



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Προσαρμοστική επιδημική διάδοση σε ασύρματα
αδόμητα δίκτυα**

Θεοφάνης Ι. Κοντός

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2018



NATIONAL AND KAPODISTRIAN UNIVERSITY OF ATHENS

**SCHOOL OF SCIENCES
DEPARTMENT OF INFORMATICS AND TELECOMMUNICATIONS**

PROGRAM OF POSTGRADUATE STUDIES

PHD THESIS

**Adaptive epidemic dissemination in wireless ad hoc
networks**

Theofanis I. Kontos

ATHENS

JULY 2018

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Προσαρμοστική επιδημική διάδοση σε ασύρματα αδόμητα δίκτυα

Θεοφάνης Ι. Κοντός

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ε. Χατζεθυμιιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ:

Ε. Χατζεθυμιιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΚΠΑ

Λ. Μεράκος, Καθηγητής ΕΚΠΑ

Θ. Σφηκόπουλος, Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

**Ε. Χατζεθυμιιάδης,
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΚΠΑ**

**Λ. Μεράκος,
Καθηγητής ΕΚΠΑ**

**Θ. Σφηκόπουλος,
Καθηγητής ΕΚΠΑ**

**Ε. Ζέρβας,
Καθηγητής Πανεπιστήμιο Δυτικής
Αττικής**

**Δ. Βέργαδος,
Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπι-
στήμιο Πειραιώς**

**Α. Αλωνιστιώτη,
Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΚΠΑ**

**Δ. Βαρουτάς,
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΚΠΑ**

Ημερομηνία Εξέτασης: 18 Ιουλίου 2018

PhD THESIS

Adaptive epidemic dissemination in wireless ad hoc networks

Theofanis I. Kontos

SUPERVISOR: E. Hadjiefthymiades, Associate Professor NKUA

THREE-MEMBER ADVISORY COMMITTEE:

E. Hadjiefthymiades, Associate Professor NKUA

L. Merakos, Professor NKUA

T. Sfikopoulos, Professor NKUA

SEVEN-MEMBER EXAMINATION COMMITTEE

E. Hadjiefthymiades,
Associate Professor NKUA

L. Merakos,
Professor NKUA

T. Sfikopoulos,
Professor NKUA

E. Zervas,
Professor University of Western
Attica

D. Vergados,
Associate Professor University of
Piraeus

A. Alonistioti,
Assistant Professor NKUA

D. Varoutas,
Associate Professor NKUA

Examination Date: July 18, 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της έρευνας αυτής είναι η επιδημική διάδοση (epidemic dissemination) πληροφορίας σε ασύρματα αδόμητα (ad hoc) δίκτυα με προσαρμοστικό τρόπο. Στόχοι είναι η συμφιλίωση των απαιτήσεων για ευρεία διάδοση της πληροφορίας και για μειωμένο ενεργειακό κόστος, η εκτίμηση μιας βέλτιστης λύσης του προβλήματος αλλά και η επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης στους εν λόγω τομείς με υψηλής ποιότητας πληροφορία.

Η προσαρμοστική επιδημική διάδοση (Π.Ε.Δ.) σε αδόμητα δίκτυα σε θορυβώδες περιβάλλον είναι πρόβλημα με πολλές παραμέτρους.

Με τη χρήση της διαστρωμάτωσης (cross-layering) με βάση την επίγνωση κατάστασης καναλιού μπορούν να κατασκευαστούν σχήματα προσαρμοστικής διάδοσης, τα οποία εξοικονομούν ενέργεια διατηρώντας ταχεία και αποτελεσματική διάχυση πληροφορίας ή μόλυνση του δικτύου, σύμφωνα με την ορολογία της επιδημικής διάδοσης [1].

Αυτού του είδους η αντιμετώπιση [1] είναι αναδραστική. Μπορεί όμως να σχεδιαστεί μια εκδοχή σχημάτων με πρόβλεψη η οποία χρησιμοποιεί συναρτήσεις οφέλους για την προσαρμογή των χαρακτηριστικών εκπομπής. Η προτεινόμενη λύση είναι μια απόδειξη της αρχής λειτουργίας (proof of concept, PoC) αυτής της ιδέας. Με την αντιμετώπιση αυτή εξοικονομείται ενέργεια ενώ και η διάχυση πληροφορίας είναι επιτυχής [2].

Το πιο πάνω σχήμα μπορεί να ενισχυθεί με τη χρήση βελτιστοποίησης. Ελέγχοντας ποια προσαρμογή είναι η πλέον σύμφωνη σε κάθε χρονική στιγμή όπως στο [2], επιτυγχάνεται μια έστω και «μυωπική» ορατότητα στο άμεσο μέλλον. Με τη χρήση της θεωρίας βέλτιστης παύσης (β.π.) μπορεί να αποκτηθεί καλύτερη ορατότητα σε βάθος χρόνου και να προσεγγιστεί η βελτιστοποίηση. Η πραγματική βελτιστοποίηση εξαρτάται από την ικανοποίηση συνθηκών β.π. Αν αυτές δεν ικανοποιούνται πλήρως, τότε και οι αποκτώμενες λύσεις δεν είναι κατ' ανάγκη βέλτιστες. Αυτό φαίνεται στην [3] με τη χρήση του κανόνα β.π. (one-stage-look-ahead, 1sla). Μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση σε σχέση με μη προσαρμοστικές λύσεις ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας. Η ευρεία μόλυνση του δικτύου εξακολουθεί να επιτυγχάνεται [3].

Εξετάζεται στη συνέχεια ως πρόβλημα Π.Ε.Δ. ο χρονοπρογραμματισμός τακτικών εκπομπών. Η βελτιστοποίηση προσεγγίζεται με τη μετάβαση από αυστηρά περιοδικές εκπομπές σε πλησιοπεριοδικό καθεστώς. Ο χρονοπρογραμματισμός πραγματοποιείται με τη βοήθεια των ιδίων εργαλείων, δηλαδή διαστρωματικές συναρτήσεις οφέλους και χρήση μηχανισμού β.π. Το πρόβλημα αυτό μοντελοποιείται ως κλασικό πρόβλημα γραμματέως, στο οποίο η χρήση β.π. προσφέρει βελτιστοποίηση. Σε σχέση με σχήματα χωρίς β.π. [2] και με μη προσαρμοστικά το σχήμα αυτό είναι αποδοτικότερο στην εξοικονόμηση ενέργειας και επιτρέπει εξ ίσου επιτυχημένη μόλυνση του δικτύου. Είναι δυνατόν να συνυπολογιστεί και το ενεργειακό κόστος απόκτησης πληροφορίας κατάστασης καναλιού (ΠΚΚ). Με τη βοήθεια αυτού του σχήματος, το δίκτυο συγκλίνει σε κατάσταση στην οποία το κόστος διάχυσης είναι σημαντικά ελαττωμένο ενώ σημαντικό ποσοστό του εναπομέ-

νοντος κόστους οφείλεται στην ανάκτηση ΠΚΚ ([4]). Οι ακριβείς συσχετισμοί εξαρτώνται από τις παραμέτρους του προβλήματος [4].

Περαιτέρω θίγεται η δυνατότητα βελτίωσης της ποιότητας πληροφορίας με την αξιοποίηση σχημάτων σαν αυτό της [4]. Αρχικά θεωρείται ως ποιότητα η νεότητα της διαχεόμενης πληροφορίας. Προτείνεται προσαρμογή των χαρακτηριστικών εκπομπής με βάση τη νεότητα της μολύνουσας πληροφορίας με στόχο τη βελτίωση της μέσης ηλικίας της μολύνουσας τους κόμβους πληροφορίας. Με τον τρόπο αυτό εισάγεται η ιδέα της προσαρμογής των χαρακτηριστικών εκπομπής με βάση το περιεχόμενο της ίδιας της φερόμενης πληροφορίας.

Ο μετριασμός των ευρυεκπομπών κατά τη φάση ανακάλυψης μονοπατιού στα πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι ένας ακόμη ελκυστικός στόχος και αντιμετωπίζεται στα πλαίσια του πρωτοκόλλου AODV. Εδώ αναδεικνύεται ο ανταγωνισμός μεταξύ εξοικονόμησης ενεργειακού κόστους και ταχείας εύρεσης πληροφορίας δρομολόγησης. Σε μια απόπειρα επέκτασης της τεχνικής στην εκπομπή της ίδιας της δρομολογούμενης πληροφορίας (των δεδομένων δηλαδή), μεταπίπτουμε σε περιβάλλον μονοεκπομπών (unicast). Εδώ, ο μετριασμός εκπομπών μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες στη μετάδοση πληροφορίας και καταδεικνύεται η ανάγκη εξέτασης του προβλήματος με τη βοήθεια μετρικών που εκφράζουν την έννοια της ποιότητας υπηρεσίας (quality of service, QoS) και κατ' επέκταση της ποιότητας της πληροφορίας.

Το εξεταζόμενο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού με την πρόσθετη νέα απαίτηση της βελτίωσης της ποιότητας πληροφορίας μπορεί να διατυπωθεί αυστηρά ως πρόβλημα βέλτιστης παύσης με πεπερασμένο γνωστό ορίζοντα.

Η ποιότητα πληροφορίας μπορεί να ορίζεται με βάση ιδιότητές της (όπως η νεότητα που αναφέρθηκε) ή παραμέτρους του πρωτοκόλλου στα πλαίσια του οποίου γίνεται η διάχυσή της, όπως το TTL (time-to-live) στην περίπτωση του AODV.

Έτσι η ποιότητα πληροφορίας αναδεικνύεται σε μια τρίτη συνιστώσα πέρα από το ενεργειακό κόστος και το ποσοστό μόλυνσης, η οποία λαμβάνει μέρος στον υπό εξέταση ανταγωνισμό. Ανάλογα με την οριζόμενη ποιότητα πληροφορίας είναι δυνατή η εύρεση συμβιβασμού μεταξύ των τριών αυτών απαιτήσεων.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Δίκτυα Υπολογιστών

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Αδόμητα δίκτυα, προσαρμοστική επιδημική διάδοση, διαστρωματική σχεδίαση, βέλτιστη παύση

ABSTRACT

The focus of this research is epidemic information dissemination in wireless ad hoc networks in an adaptive manner. The main targets are the compromise between demands for broad information dissemination and reduced energy cost, the assessment of an optimal solution to the problem and also the achievement of optimal performance in the aforementioned areas with high quality information.

Adaptive epidemic dissemination (AED) in ad hoc networks in a noisy environment is a problem with many parameters.

Using cross-layering based on channel state-awareness, one can engineer adaptive dissemination schemes, which save energy while retaining a fast and effective infection ([1]).

This type of scheme [1] is reactive, but a flavor of proactive scheme can be devised that uses utility functions in order to adapt transmission characteristics. The proposed solution is a proof of concept of this idea. With this approach energy cost is saved while infection remains successful [2].

The above scheme can be enhanced through the use of optimization. Assessing which adaptation is most beneficial at every round as in [2], a "myopic" visibility to the future is at least achieved. Using optimal stopping theory (OST) one may obtain longer visibility and approach optimal solutions. The actual optimality depends on satisfaction of optimal stopping conditions. If these are not fully satisfied, then the obtained solutions are not necessarily optimal. This is displayed in [3] through the use of the one-stage-look-ahead, (1sla) optimal stopping rule. Improvement over non-adaptive schemes in terms of energy cost save is possible. Broad network infection is still as effective [3].

Optimization is investigated in the periodic broadcast problem, which is addressed with a transition to a near-periodic framework where scheduling is performed using the same toolcase, that is cross-layer utility functions and an optimal stopping mechanism. This problem is modeled as a secretary problem where the use of OST offers optimality. Compared against non-OST [2] and non-adaptive schemes this scheme wins in the energy cost save area and allows for successful network infection. The energy cost of channel state information (CSI) retrieval may also be considered. In this case, the system converges to a state where dissemination cost is dramatically reduced while a large proportion of the residual, steady-state energy cost is due to CSI acquisition. Exact relations depend on parameters of the problem [4].

Furthermore, the possibility to improve information quality is investigated using schemes such as the one in [4]. Information freshness is originally considered as the measure of quality. Adaptation of transmission characteristics based on information freshness is suggested aiming to improve the average age of the infecting information. In this manner, the idea of adapting transmission characteristics based on the actual payload

of the infecting information is introduced.

Tuning broadcasts down to a polite gossip during the route discovery phase in routing protocols is an additional attractive area. This problem is addressed within the framework of the AODV protocol. The tradeoff between energy cost save and fast routing information discovery emerges here. In an effort to expand the technique to the actual routed data transmission (i.e. the user data), we move from broadcasting to a unicast landscape. Here, the tuning down of transmissions may have significant impact on information propagation. It is shown that the problem is best addressed using metrics reflecting a conceived quality of service and by extension quality of information.

The time scheduling problem enhanced by the additional information quality requirement can be formally expressed as an optimal stopping problem with known finite horizon.

The quality of the information may be defined based on its properties (such as freshness as mentioned earlier) or parameters of the protocol concerned with the dissemination, such as TTL in case of AODV.

In this manner, information quality emerges as a third component besides energy cost and network infection, which participates the addressed tradeoff. Depending on the defined information quality seeking a compromise between these three requirements is possible.

SUBJECT AREA: Computer Networks

KEYWORDS: Ad hoc networks, adaptive epidemic dissemination, cross-layer design, optimal stopping

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η επιδημική διάδοση (Ε.Δ.) έχει στόχο τη διάχυση πληροφορίας σε δίκτυο αποφεύγοντας τις άνευ όρων ευρυεκπομπές. Είναι γνωστό ότι αυτές προκαλούν προβλήματα, όπως υπερβολικό ενεργειακό κόστος και συμφόρηση στα κανάλια επικοινωνίας χωρίς αντίστοιχο πάντα όφελος.

Οι επιδόσεις της Ε.Δ. μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω με την εισαγωγή προσαρμοστικότητας στα χαρακτηριστικά εκπομπής των συμμετεχόντων κόμβων. Έτσι προκύπτει η προσαρμοστική επιδημική διάδοση (Π.Ε.Δ.)

Η προηγούμενη έρευνα έχει αναδείξει αρκετά σχήματα Π.Ε.Δ., εκ των οποίων τα περισσότερα βασίζονται σε αναδραστικούς μηχανισμούς οι οποίοι αξιοποιούν επίγνωση πληροφορίας πλαισίου (context awareness). Τόσο η επίγνωση πληροφορίας πλαισίου όσο και η προσαρμογή των χαρακτηριστικών εκπομπής άπτονται αρκετών διαφορετικών στρωμάτων του δικτύου ταυτόχρονα. Η Π.Ε.Δ., λοιπόν, είναι τεχνική με εγγενή διαστρωματική (cross-layer) φύση. Οι αποφάσεις για προσαρμογές τις οποίες υπαγορεύει ένα σχήμα Π.Ε.Δ. λαμβάνονται αποκεντρωμένα και όχι από κάποιον κεντρικό και ιεραρχικά ανώτερο κόμβο ο οποίος έχει πλήρη γνώση του δικτύου.

Το πρόβλημα το οποίο διαπραγματεύεται η παρούσα έρευνα είναι η φορμαλιστική διάτυπωση και αντιμετώπιση της Π.Ε.Δ. με στόχο υψηλές επιδόσεις σε εξοικονόμηση ενεργειακού κόστους και διάχυση της πληροφορίας με ελαχιστοποίηση των συμβιβασμών σε άλλους τομείς. Η χρήση γνώσης από το πεδίο της θεωρίας βέλτιστης παύσης (β.π.) έχει κεντρική σημασία στην προσπάθεια βελτιστοποίησης των λύσεων που προτείνονται. Η εφαρμογή σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού και δρομολόγησης είναι εύλογη εφαρμογή. Λόγω της πολυπλοκότητάς του και της διαστρωματικής φύσης του, πρόκειται για πρόβλημα με πολλές παραμέτρους.

Θεωρούμε ασύρματο αδόμητο (ad hoc) δίκτυο στο οποίο είναι επιθυμητή η διάχυση ενός μοναδικού μηνύματος πληροφορίας το οποίο αρχικά το κατέχει ένα μικρό μόνο ποσοστό κόμβων. Οι τελευταίοι σύμφωνα με την καθιερωμένη ορολογία της Π.Ε.Δ. θεωρούνται *μολυσμένοι*. Προφανώς, επιθυμητή είναι η μετάβαση και των υπολοίπων (δηλαδή των *ευάλωτων*) κόμβων στη μολυσμένη κατάσταση.

Για το σκοπό αυτό, ανά τακτά χρονικά διαστήματα κάθε μολυσμένος κόμβος προβαίνει σε απόπειρα εκπομπής της μολύνουσας πληροφορίας, δηλαδή εκπέμπει με πεπερασμένη πιθανότητα β (πιθανότητα προώθησης). Εάν όντως εκπέμπει, το κάνει χρησιμοποιώντας σχήμα προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (ΠΔΚ). Κάθε σχήμα ΠΔΚ παρέχει πεπερασμένο πλήθος δυνατών τρόπων. Ο τρόπος του ΠΔΚ περιγράφεται από είδος διαμόρφωσης (π.χ. QAM, QPSK, κ.λ.π.) και κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος. Σημαντικό χαρακτηριστικό της τελευταίας είναι ο ρυθμός κωδικοποίησης (coding rate).

Στα μοντέλα της Π.Ε.Δ. σημαντικές παράμετροι είναι οι ακόλουθες:

- n : Το πλήθος των κόμβων του δικτύου
- f : Το fan-out δηλαδή το πλήθος κόμβων προς τους οποίους εκπέμπει ένας μολυσμένος.
- t : Ο χρόνος για τον οποίον εκπέμπει ένας μολυσμένος. Αυτός μπορεί να ποικίλλει από 0 έως ∞ . Στην πρώτη περίπτωση μιλάμε για τακτική infect-and-die ενώ στη δεύτερη για infect-forever.
- b : Χωρητικότητα της μνήμης ενός κόμβου (buffer capacity). Εάν η μολύνουσα πληροφορία αποτελείται από περισσότερα του ενός μηνύματα, τότε η χωρητικότητα αυτή εισάγει έναν περιορισμό και απαιτείται μηχανισμός διαχείρισής του.
- *partial view*: Η γνώση του δικτύου την οποία έχει κάθε κόμβος. Ουσιαστικά είναι το πλήθος των κόμβων τους οποίους γνωρίζει αυτός.

Το σημείο εκκίνησης της παρούσας μελέτης είναι η αναδραστική αντιμετώπιση, η οποία είναι οικεία και από προηγούμενη έρευνα. Η πληροφορία πλαισίου για κάθε κόμβο αποτελείται από την εξής πληροφορία:

- Το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Αυτή η γνώση συνιστά επίγνωση πληροφορίας κατάστασης καναλιού (ΠΚΚ, channel state information, CSI)
- Το ποσοστό κατεστραμένων μηνυμάτων λόγω θορύβου τα οποία λαμβάνει. Υψηλό ποσοστό σημαίνει πως η διάχυση δεν ευνοείται λόγω θορύβου ο οποίος καθιστά τις λήψεις του μολύνοντος μηνύματος «άκαρπες» αφού δεν επιφέρουν μόλυνση.
- Το πλήθος διπλοτύπων τα οποία λαμβάνει. Το λαμβανόμενο μήνυμα θεωρείται διπλότυπο όταν λαμβάνεται από ήδη μολυσμένο κόμβο.

Βάσει της πληροφορίας αυτής, ο κάθε μολυσμένος κόμβος προσαρμόζει τον τρόπο του ΠΔΚ (ο οποίος συμβολίζεται με μ) και την πιθανότητα προώθησης β σύμφωνα με εξισώσεις της μορφής $\beta(t+1) = f(\beta(t))$, πληροφορία πλαισίου)

Επί της ουσίας η προσαρμογή του β αποτελεί και επηρεασμό του πειράματος τύχης το οποίο εκτελεί ο μολυσμένος κόμβος όταν είναι έτοιμος να εκπέμψει. Ελάττωση του β σημαίνει ότι η πιθανότητα επιτυχούς έκβασης υποβιβάζεται, άρα έχει γίνεται λιγότερο πιθανό το να εκπέμψει. Η προσαρμογή του β , λοιπόν, σημαίνει αυξομείωση του πλήθους των εκπομπών άρα και του ενεργειακού κόστους. Η προσαρμογή του μ σημαίνει αυξομείωση της πιθανότητας επιτυχούς λήψεως αλλά και του ενεργειακού κόστους λόγω των διαφορετικών ρυθμών κωδικοποίησης. Μπορούμε, λοιπόν, να ελαττώνουμε το β για να μειωθεί το κόστος. Τότε όμως μειώνεται και η πιθανότητα να ληφθεί η πληροφορία από ευάλωτους κόμβους. Ρυθμίζοντας όμως ταυτόχρονα κατάλληλα το μ , φροντίζουμε οι έστω ελαττωμένες λήψεις να καταλήγουν σε μόλυνση ευάλωτων. Έτσι οι ελαττωμένες εκπομπές είναι αποτελεσματικότερες από τις μη προσαρμοζόμενες άνευ όρων εκπομπές.

Ένας μολυσμένος κόμβος μπορεί για διάφορους τυχαίους λόγους να χάσει τη μολύνουσα πληροφορία, οπότε μεταπίπτει και πάλι στην ευάλωτη κατάσταση και είναι έτοιμος να μολυνθεί εκ νέου. Αυτή η τυχαία διαδικασία συνοψίζεται με μια *πιθανότητα θεραπείας*.

Σιωπηρά ως τώρα έχουν υποθεθεί τα ακόλουθα:

- Το fan-out ισούται με το πλήθος των άμεσων (single-hop) γειτόνων κάθε κόμβου. Ουσιαστικά καθορίζεται από την εμβέλεια του ασύρματου πομπού.
- Ακολουθείται το επιδημικό μοντέλο infect-forever, δηλαδή οι μολυσμένοι κόμβοι εκπέμπουν επ' άπειρο εκτός αν θεραπευθούν.
- Το μέγεθος του buffer είναι αρκετό για την αποθήκευση ενός μολύνοντος μηνύματος. Αυτό αρκεί για να καταστήσει τον κόμβο μολυσμένο. Δεν έχει νόημα η συγκράτηση δύο αντιτύπων του ίδιου μηνύματος, οπότε περιττεύει και η ανάγκη διαχείρισης της αποθήκευσης.
- Ο κόμβος γνωρίζει μόνο τους κόμβους από τους οποίους έχει λάβει πληροφορία.

Οι προσομοιώσεις δείχνουν πολύ βραδύτερη συσσώρευση του ενεργειακού κόστους με την υιοθέτηση του σχήματος αυτού και συγκρίσιμο με ευριστικά σχήματα Π.Ε.Δ.

Ενδιαφέρον χαρακτηριστικό είναι το ότι αποφεύγονται ενεργοβόροι διάλογοι μεταξύ κόμβων για λήψη πληροφορίας πλαισίου. Πρόκειται για πλήρως παθητικό σχήμα Π.Ε.Δ. Η αξιοποίηση της διαστρωματικής επίγνωσης πλαισίου με τη μορφή του SNR είναι επίσης αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό. Η συνολική καινοτομία έγκειται στην αποχώρηση από ευριστικά σχήματα, στη συνδυασμένη υιοθέτηση διαστρωματικής επίγνωσης πληροφορίας πλαισίου, ΠΔΚ με συνελικτική κωδικοποίηση και άμεσης προσαρμογής της πιθανότητας προώθησης.

Η ρήξη με την αναδραστική αντιμετώπιση έρχεται με την πρόταση ενός νέου σχήματος το οποίο βασίζεται στην πρόβλεψη.

Θεσπίζεται τρόπος περιγραφής της κατάστασης του κόμβου μια τυχαία χρονική στιγμή t με το ζεύγος (β, μ) . Η σημασία αυτού είναι η ακόλουθη:

Τη χρονική στιγμή t ο μολυσμένος κόμβος εκτελεί πείραμα τύχης με πιθανότητα επιτυχίας β . Εάν η έκβαση είναι επιτυχής, τότε ο κόμβος θα ευρυσκέμψει χρησιμοποιώντας τον τρόπο μ του ΠΔΚ επιχειρώντας να μολύνει ευάλωτους άμεσους γείτονές του. Η πιθανότητα προώθησης διακριτοποιείται για την απλούστευση του μοντέλου και των υπολογισμών που περιγράφονται.

Επίσης, ακολουθείται τρόπος περιγραφής του ασύρματου καναλιού ως μαρκοβιανό κανάλι πεπερασμένων καταστάσεων (finite state markov channel FSMC). Κάθε κατάσταση της θεσπιζόμενης μηχανής καταστάσεων αντιστοιχίζεται με ένα διάστημα τιμών του SNR. Έτσι οι περιοχές τιμών σήματος-προς-θόρυβο που αντιστοιχούν σε τρόπο του ΠΔΚ αντιστοιχίζονται στις καταστάσεις της μηχανής που περιγράφει την κατάσταση του ασύρματου καναλιού.

Κάθε χρονική στιγμή t ο μολυσμένος κόμβος εξετάζει ποια προσαρμογή της κατάστασής του είναι η βέλτιστη. Οι δυνατές επιλογές συνοψίζονται στις *πράξεις* οι οποίες αποδίδονται στον πίνακα 1. Οι επιλογές μεταξύ αύξησης και μείωσης των β και μ αξιοποιούν την επίγνωση πληροφορίας πλαισίου και συνοψίζονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 1: Υποψήφιες πράξεις

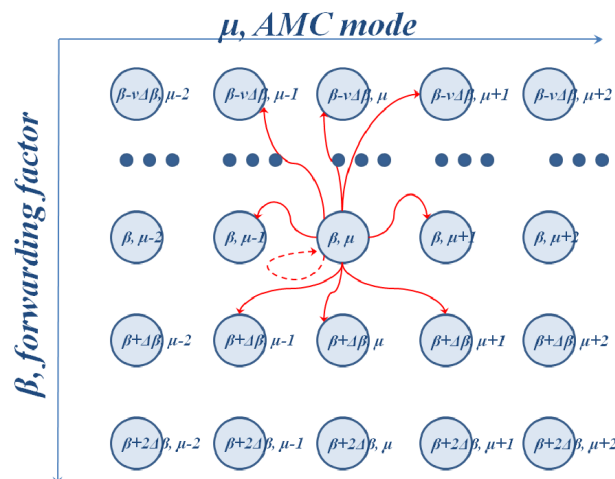
πράξη	α_1	α_2	α_3	α_4
β	προσαρμογή	διατήρηση	προσαρμογή	διατήρηση
μ	διατήρηση	προσαρμογή	προσαρμογή	διατήρηση

Πίνακας 2: Αξιοποίηση πληροφορίας πλαισίου στην απόφαση για αύξηση ή μείωση των β και μ

αύξηση SNR	μείωση SNR
μείωση β , αύξηση μ	αύξηση β , μείωση μ

Η εκτίμηση του ποια πράξη είναι η βέλτιστη γίνεται με βάση το υψηλότερο προβλεπόμενο άμεσο όφελος. Αυτό υπολογίζεται με τη βοήθεια συναρτήσεως οφέλους.

Η υιοθέτηση μιας πράξεως από αυτές του πίνακα 2 φέρνει τον κόμβο σε νέα κατάσταση ή και τον αφήνει στην ίδια. Αυτή η διαδικασία μεταβάσεων αποδίδεται επίσης με μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων. Κάθε κατάσταση της μηχανής αντιστοιχεί σε κατάσταση (β, μ) του κόμβου. Το σχήμα 1 αποδίδει αυτή την αντίληψη.



Σχήμα 1: Μαρκοβιανή μηχανή διακριτών καταστάσεων που περιγράφει τις μεταπτώσεις της κατάστασης ενός κόμβου

Οι υπολογισμοί επίσης δείχνουν ότι η εξοικονόμηση ενεργειακού κόστους και διατήρηση της μόλυνσης σε υψηλά επίπεδα είναι ταυτόχρονα εφικτές.

Ριζική καινοτομία του σχήματος αυτού είναι το ότι βασίζεται στην *πρόβλεψη* αντί στην *ανάδραση*. Η επιλογή συνάρτησης οφέλους επαφίεται στον ερευνητή ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος. Αυτή η ευελιξία περιλαμβάνεται στα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης τεχνικής.

Η πιο πάνω τεχνική μπορεί να υποστεί μια σαφή αλλά σημαντική τροποποίηση: *Η πλέον σύμφωνη από τις πράξεις του πίνακα 1 επιλέγεται μόνον αν επί πλέον ικανοποιείται μια συνθήκη βέλτιστης παύσης (β.π.).*

Έτσι το εξεταζόμενο πρόβλημα αντιμετωπίζεται πλέον ως πρόβλημα β.π. με άπειρο χρονικό ορίζοντα. Ως συνθήκη β.π. υιοθετείται η συνθήκη one-stage-look-ahead (1sla) η οποία, όμως, είναι βέλτιστη σε προβλήματα με άπειρο χρονικό ορίζοντα μόνον όταν ικανοποιείται η συνθήκη μονοτονικότητας για το πρόβλημα με δεδομένη συνάρτηση οφέλους. Με μερικές παραδοχές μπορεί να αποδειχθεί ότι στο εξεταζόμενο πρόβλημα μπορεί να ικανοποιείται η συνθήκη μονοτονικότητας της συνάρτησης οφέλους με πεπερασμένη πιθανότητα.

Αυτή η «διστακτική» αντιμετώπιση των προσαρμογών των χαρακτηριστικών εκπομπής αποδίδει εξοικονόμηση ενεργειακού κόστους χωρίς ουσιαστικό συμβιβασμό στην εξάπλωση της πληροφορίας.

Η προηγούμενη γνώση μπορεί να αξιοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού.

Πολλές διαδικασίες στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν περιοδικές ευρυεκπομπές για τη διάχυση πληροφορίας. Παραδείγματα είναι σχήματα όπως το directed diffusion και τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, όπως τα AODV, DSR, LOADng, κ.ά.

Ας θεωρήσουμε ένα τέτοιο σύστημα στο οποίο οι μολυσμένοι κόμβοι ευρυεκπέμπουν περιοδικά την πληροφορία που κατέχουν. Έστω η περίοδος των εκπομπών είναι ϵ . Αντί της περιοδικής ευρυεκπομπής κάθε ϵ χρονοθυρίδες, προτείνεται το ακόλουθο μοντέλο:

Το πεδίο του χρόνου κατανέμεται σε διαδοχικά, ξένα μεταξύ τους διαστήματα διάρκειας ϵ τα οποία ονομάζονται *εποχές*. Εντός κάθε εποχής ο μολυσμένος κόμβος επιλύει το γνωστό πρόβλημα του γραμματέως με πεπερασμένο γνωστό ορίζοντα.

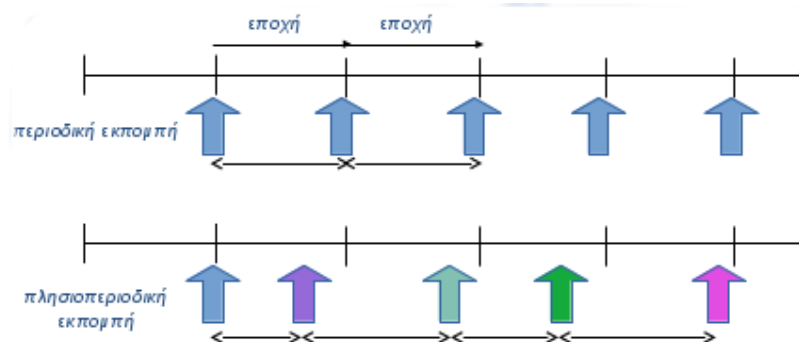
Ξεκινά ευρισκόμενος σε κατάσταση (β, μ) . Κάθε χρονική στιγμή κάνει εκτίμηση του υποσχόμενου άμεσου οφέλους της πιο σύμφωνης από τις πράξεις του πίνακα 1. Όταν ικανοποιηθεί η συνθήκη β.π., όπως είναι γνωστή για το πρόβλημα του γραμματέως, υιοθετεί την πράξη και μεταβάλλει την κατάστασή του. Σιωπά για το υπόλοιπο της τρέχουσας εποχής.

Με τον τρόπο αυτό η αντιμετώπιση του προβλήματος της διάχυσης πληροφορίας μεταπίπτει από την περιοδική στην «πλησιοπεριοδική».

Υιοθετούνται, δηλαδή, επαναλαμβανόμενες εκπομπές οι οποίες εκτελούνται εντός καθορι-

σμένων χρονικών ορίων αλλά χωρίς η χρονική απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών να είναι αυστηρά σταθερή.

Η μετάβαση αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2: Η μετάβαση από την αυστηρή περιοδικότητα στην πλησιοπεριοδικότητα

Για την υλοποίηση ενός τέτοιου σχήματος υποτίθεται γνώση του πλήθους των άμεσων γειτόνων και της πληροφορίας κατάστασης καναλιού (ΠΚΚ). Αυτό είναι αρκετά κοινή υπόθεση στην Π.Ε.Δ. Στη συνεισφορά της μελέτης περιλαμβάνεται και το ότι τα ενεργειακά έξοδα για ανάκτηση ΠΚΚ και πληροφορίας άμεσων γειτόνων συνεκτιμώνται για τον υπολογισμό των ενεργειακών επιδόσεων.

Οι επιδόσεις της προτεινόμενης τεχνικής εκτιμώνται σε περιβάλλον με κινητούς κόμβους και με συγκρούσεις στα ασύρματα κανάλια. Επίσης συνυπολογίζεται το ενεργειακό κόστος της ανάκτησης ΠΚΚ.

Στα πλεονεκτήματά της περιλαμβάνεται η δυνατότητα επιλογής συνάρτησης οφέλους, και η ελάττωση του ενεργειακού κόστους σε επίπεδα συγκρίσιμα με πλήρως παθητικών μεθόδων.

Ως πεδίο εφαρμογής του χρονοπρογραμματισμού θεωρείται η διάχυση μηνύματος ζήτησης μονοπατιών (route request, RREQ) σε πρωτόκολλα δρομολόγησης. Έτσι γίνεται απόπειρα να βελτιωθεί η απόδοση της διάχυσης τέτοιων μηνυμάτων με την εφαρμογή της πλησιοπεριοδικής αντιμετώπισης που περιγράφτηκε.

Σε σχέση με την άνευ όρων διάχυση μηνυμάτων είναι αναμενόμενη η εξοικονόμηση ενέργειας. Είναι χρήσιμο, όμως, να εκτιμηθούν κι άλλοι παράγοντες. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα παρουσιάζει ενδιαφέρον η πιθανότητα ανεύρεσης κόμβου ο οποίος να κατέχει τη ζητούμενη πληροφορία δρομολόγησης. Η τελευταία προκύπτει βέβαια από την έκταση που παίρνει τελικά η «επιδημία», δηλαδή η διάχυση της πληροφορίας. Αναδύεται, λοιπόν, η ανάγκη εξεύρεσης ισορροπίας μεταξύ εξοικονόμησης ενεργειακού κόστους και εύρεσης πληροφορίας δρομολόγησης.

Μπορεί πλέον να εκφρασθεί πιο αυστηρά το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού ως εξής:

- Σε κάθε χρονική στιγμή, $t \in \mathbb{N}$ η κατάσταση ενός μολυσμένου κόμβου περιγράφεται

από το διατεταγμένο ζεύγος $h = (\beta, \mu) \in B \times M$, όπου B και M τα σύνολα τιμών των β και μ αντίστοιχα.

- Η κατάσταση μπορεί να αλλάξει με την υιοθέτηση μιας πράξης α από ένα πεπερασμένο σύνολο δυνατών πράξεων \mathcal{A} , δηλαδή $\alpha \in \mathcal{A}$, τέτοια ώστε $(\beta, \mu) \xrightarrow{\alpha} (\beta', \mu')$. Ισχύει πάντα ότι $(\beta, \mu) \in B \times M$ και $(\beta', \mu') \in B \times M$. Δηλαδή το σύνολο $B \times M$ είναι κλειστό ως προς κάθε πράξη $\alpha \in \mathcal{A}$.
- Θεωρώντας το πεδίο του χρόνου διηρημένο σε εποχές, η πράξη α υιοθετείται (εκτελείται) τη χρονική στιγμή t_{ost} , δηλαδή το πολύ μία φορά εντός της τρέχουσας εποχής. Για την n -οστή ($n \in \mathbb{N}$) εποχή διάρκειας ϵ , αυτό μπορεί να γραφεί ως: $t_{ost} \in E_n = [n\epsilon, (n+1)\epsilon)$ ή $t_{ost} \in [n\epsilon, (n+1)\epsilon - 1]$ εφ' όσον μιλάμε με όρους διακριτοποιημένου χρόνου. Επομένως επιζητείται σε κάθε εποχή, δηλ. $\forall n \in \mathbb{N}$, η βέλτιστη στιγμή για αλλαγή κατάστασης και εκπομπή από αυτή.
- Οι δυνατές πράξεις αξιολογούνται με τη βοήθεια της τιμής μιας συνάρτησης οφέλους U . Αυτή υπολογίζεται $\forall t \in \mathbb{N}$ άρα και $\forall t \in E_n$.

Για κάθε εποχή, δηλ. $\forall n \in \mathbb{N}$, το διατεταγμένο ζεύγος $(\alpha, t_{ost}) \in \mathcal{A} \times E_n$ αποκαλείται η **βέλτιστη πολιτική** για την εποχή αυτή. Δηλαδή η βέλτιστη πολιτική είναι η απόφαση για το ποια είναι η κατάλληλη στιγμή εντός της εποχής για να εκτελεστεί η ωφελιμότερη πράξη, η οποία αλλάζει την κατάσταση του κόμβου. Από τη νέα αυτή κατάσταση εκπέμπει, όπως είδαμε, ο κόμβος. Δηλαδή:

$$\forall n \in \mathbb{N}, \text{ ζητείται η πολιτική } \alpha_0, t_{ost,0} \in \mathcal{A} \times E_n : \alpha_0, t_{ost,0} = \operatorname{argmax} U_n(\alpha, t_{ost})$$

Έτσι τη n -οστή εποχή αποκομίζεται όφελος έστω U_n , το οποίο είναι προφανώς το $U_n(\alpha_0, t_{ost,0})$. Η μεγιστοποίηση του U_n συνεπάγεται και μεγιστοποίηση του αθροιστικού οφέλους $\sum_{n \in \mathbb{N}} U_n$.

Ακολουθώντας το φορμαλισμό που μόλις εισήχθη μπορεί να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού υπό διάφορες συνθήκες και με ποικίλες απαιτήσεις. Σε κάθε περίπτωση, βέβαια, για την αποτίμηση του οφέλους χρησιμοποιείται μια κατάλληλα ορισμένη συνάρτηση οφέλους.

Η απόφαση για αλλαγή καταστάσεως μπορεί να αξιοποιήσει την επίγνωση πλήθους γειτόνων με ευρύτερο τρόπο. Έτσι αν συνεξετασθεί η μεταβολή πυκνότητας δικτύου ρ για τις αποφάσεις περί αυξήσεως ή μειώσεως των β και μ , ο πίνακας 2 μεταπίπτει στον 3. Αυτό έχει, βέβαια, νόημα σε περιβάλλον με κινητικότητα.

Στο πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού εκπομπών για μηνυμάτων ζήτησης μονοπατιών μπορεί να αξιοποιηθεί και αυτό το σχήμα.

Μια ενδιαφέρουσα διάσταση είναι η σύγκριση μεταξύ των συμπεριφορών του σχήματος σε τυχαίο δίκτυο και σε δίκτυο ελεύθερο κλίμακας (scale-free network). Παρατηρείται πως και στα ελεύθερα κλίμακας δίκτυα παρατηρούνται οι ελπιδοφόρες επιδόσεις του προτεινόμενου σχήματος. Η εξέταση τέτοιων δικτύων αποτελεί, βέβαια, αρκετά εκτεταμένο πεδίο

Πίνακας 3: Αξιοποίηση πληροφορίας πλαισίου στην απόφαση για αύξηση ή μείωση των β και μ

	αύξηση SNR	μείωση SNR
αύξηση ρ	μείωση β , αύξηση μ	μείωση β , μείωση μ
μείωση ρ	αύξηση β , αύξηση μ	αύξηση β , μείωση μ

έρευνας.

Η επίγνωση πληροφορίας πλαισίου μπορεί να διευρυνθεί περαιτέρω και να συμπεριλάβει και στοιχεία της ίδιας της φερόμενης πληροφορίας (payload). Τότε η προσαρμογή της κατάστασης των μολυσμένων κόμβων που εξηγήθηκε αποκτά πιο πληροφοριοκεντρικό χαρακτήρα. Για παράδειγμα, μια εφαρμογή στο πρωτόκολλο δρομολόγησης AODV είναι το να ενισχύεται η πιθανότητα προώθησης ενός μηνύματος όταν αυτό χαρακτηρίζεται από ακόμα υψηλή τιμή TTL (time-to-live). Έτσι η διαχεόμενη πληροφορία διατηρεί χαμηλότερη ηλικία.

Αναδύεται έτσι η ανάγκη εξισορρόπησης τριών πλέον απαιτήσεων:

- Εξοικονόμηση ενεργειακού κόστους
- Ευρεία διάδοση πληροφορίας
- Διατήρηση ή και βελτίωση ποιότητας πληροφορίας

Οι τεχνικές που περιγράφηκαν έχουν ως κοινό παράγοντα τη διαστρωματικότητα. Αυτή η ιδιότητα εμφανίζεται στην έρευνά μας με δύο εκφάνσεις:

- Στην πληροφορία πλαισίου περιλαμβάνονται μερικές από τις ακόλουθες παραμέτρους: το πλήθος άμεσων γειτόνων, η ΠΚΚ μεταξύ κάθε κόμβου και όλων των γειτόνων του, το ποσοστό κατεστραμμένων μηνυμάτων, το πλήθος διπλοτύπων και το TTL. Αυτές σχετίζονται με το φυσικό στρώμα και με τα στρώματα δικτύου και εφαρμογής.
- Στις προσαρμοζόμενες παραμέτρους περιλαμβάνονται πάλι η πιθανότητα προώθησης και ο τρόπος του ΠΔΚ, οπότε και πάλι εμπλέκονται το φυσικό στρώμα και το στρώμα δικτύου.

Η εκμετάλλευση της διαστρωματικής φύσης της Π.Ε.Δ. επιτρέπει την αναζήτηση ισορροπίας ανάμεσα σε ποικίλες ανταγωνιστικές μεταξύ τους απαιτήσεις.

Στη μνήμη του γελαστού πατέρα μου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Από τη θέση αυτή εκφράζω τις ευχαριστίες μου σε αρκετούς ανθρώπους για την πολύτιμη συνδρομή τους. Πρώτα-πρώτα ευχαριστώ τον επιβλέποντα αναπληρωτή καθηγητή κ. Στάθη Χατζηευθυμιιάδη χωρίς τον οποίον αυτή η έρευνα δε θα είχε γίνει. Τον ευχαριστώ για την ενθάρρυνση, την υπομονή του, τις συμβουλές του, τις γόνιμες συζητήσεις μας -που μερικές φορές έφταναν στα όρια του εξωτικού- και την εμπιστοσύνη του.

Ευχαριστώ την τριμελή επιτροπή και ιδιαίτερα τον καθηγητή κ. Λάζαρο Μεράκο για την εμπιστοσύνη και την υπομονή. Ένας ερευνητής που ερευνά την επιδημική διάδοση με το μυαλό του να γυρίζει στον κρουστικό θόρυβο καναλιού, στον αλγόριθμο Diffie-Hellman σε περιβάλλον ad hoc και στις discounted utility functions ταυτόχρονα, είναι ένα παιδί που εξερευνά το σύμπαν και χρειάζεται υπομονή. Τους ευχαριστώ που με άφησαν να παραμείνω παιδί!

Παραπάνω από πολύτιμη υπήρξε η βοήθεια και οι συμβουλές του Δρος Χρήστου Αναγνωστόπουλου. Αυτός μου εξήγησε και σκιαγράφησε τον αλγόριθμο επιδημικής διάδοσης σε πρωτογενή μορφή. Υπό την καθοδήγησή του (επί της ουσίας μαζί) μετέφερα το πρωτόλειο αυτό λογικό διάγραμμα σε ένα στοιχειώδες πρόγραμμα java. Έβαλε σε κίνδυνο την όρασή του κοιτάζοντας πάλι και πάλι τις αδέξιες εργασίες μου πριν βρουν το δρόμο της δημοσίευσης. Χάρη στην πολύτιμη και αλύπητα(!) γόνιμη κριτική του μπόρεσε η σκέψη μου να τιθασευθεί.

Στο θέμα της κατανόησης των καναλιών με διαλείψεις, του θερμικού θορύβου και της λογικής μοντελοποίησής τους, τα οφείλω όλα στον καθηγητή Ευάγγελο Ζέρβα. Η βοήθειά του ήταν συγκινητική, ως προς τις λεπτομερέστατες εξηγήσεις, τις προτάσεις, τη βοήθεια να συλλάβω μια πληρέστερη εικόνα. Σημαντικότερη ήταν η καίρια και στοχευμένη τεχνική βοήθειά του στο θέμα των διαλείψεων. Χωρίς τη βοήθειά του, θα είχα δυσκολευτεί πολύ περισσότερο και θα είχα απλώς ανακαλύψει εκ νέου τον τροχό.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω το φίλο και συνάδελφο Δρα Κώστα Κολομβάτσο. Πέρα από τις γειτονικές θέσεις στα πανεπιστημιακά μας γραφεία μοιραστήκαμε ατέλειωτες συζητήσεις για τις συναρτήσεις οφέλους, τη βέλτιστη παύση και τους ληστές με... ένα ή περισσότερα χέρια. Οι συμβουλές ενός πρόσφατου διδάκτορα με βοήθησαν πάρα πολύ στο να κατανείμω την ενέργεια και τις προσπάθειές μου πιο ωφέλιμα. Κι από δω τον ευχαριστώ.

Σωτήρια υπήρξε, τέλος, και η βοήθεια των φίλων και συναδέλφων Κάκκας Παναγίδη και Βασίλη Παπαταξιάρχη. Ως ατρόμητοι ερευνητές και πολυμήχανοι λύτες πολύπλοκων προβλημάτων, με βοήθησαν καθοριστικά να ξεπεράσω απορίες και δυσκολίες σε προβλήματα υπολογισμών και προσομοιώσεων και μου άνοιξαν τα μάτια σε εφαρμογές των μεθόδων και τεχνικών που ερευνούσα.

Σας ευχαριστώ όλους.

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	39
1.1	Κίνητρα και Θεματολογία της Διατριβής	39
1.2	Δομή της Διατριβής	43
2	ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΗ ΕΡΕΥΝΑ	47
2.1	Υπόβαθρο και βασικές έννοιες	47
2.2	Προηγούμενη έρευνα	48
3	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΔΟΜΗΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ	55
3.1	Γενική περιγραφή των αδόμητων ασύρματων δικτύων	55
3.2	Εφαρμογές και είδη ασύρματων αδόμητων δικτύων	56
3.3	Απαιτήσεις και προβλήματα	57
3.4	Παραδείγματα αδόμητων ασυρμάτων δικτύων	58
3.5	Η ανάγκη για διάδοση πληροφορίας σε αδόμητα ασύρματα δίκτυα και δίκτυα αισθητήρων	60
4	ΕΠΙΔΗΜΙΚΗ ΔΙΑΔΟΣΗ	61
4.1	Η Ανάγκη και Οι Αρχές	61
4.2	Σύνοψη (σύντηξη) πληροφορίας (information aggregation)	62
4.3	Επιδημική Διάδοση	65
4.3.1	SI ή SIS susceptible-infected-susceptible	67
4.3.2	SIR susceptible-infected-removed	68
4.3.3	SIRS susceptible-infected-removed-susceptible	70
4.3.4	Το επιδημικό κατώφλι ή σημείο καμπής	71
4.3.5	Επιδημική διάδοση SIR με δημογραφική κίνηση - SIR model with demography	72
4.3.6	Μερικά Γενικά Σχόλια	73
4.4	Προσαρμοστική Επιδημική Διάδοση	74
4.4.1	Οι Αρχές	74
4.4.2	Η αναλυτική λύση του προβλήματος	78
5	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	81
5.1	Διαστρωμάτωση και διαστρωματική επίγνωση πλαισίου	81
5.1.1	Από τη στρωματική στη διαστρωματική αντιμετώπιση	81
5.1.2	Η ιδέα της διαστρωμάτωσης	82
5.1.3	Ο μαθηματικός φορμαλισμός της διαστρωμάτωσης	84

5.2	Ασύρματα Κανάλια και Μοντέλα Θορύβου	87
5.2.1	Ο τυχαίος θόρυβος	87
5.2.2	Η πολυδιάδοση	88
5.2.3	Αναπαράσταση καναλιού με διαλείψεις με το μοντέλο Jakes	91
5.2.4	Το κανάλι ως μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων	92
5.3	Προσαρμοστική Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση - ΠΔΚ (Adaptive Modulation and Coding - AMC)	93
5.3.1	Γενικά	93
5.3.2	Μοντέλα για το packet error rate, PER	95
5.3.3	Παραδείγματα ΠΔΚ (AMC) στις ασύρματες επικοινωνίες	97
5.4	Δίκτυα χωρίς κλίμακα	99
5.4.1	Γενικά	99
5.4.2	Τυχαία δίκτυα	99
5.4.3	Δίκτυα χωρίς κλίμακα	101
5.4.4	Κατασκευή δικτύου χωρίς κλίμακα	103
5.4.5	Σύνοψη	104
5.4.6	Επιδημική διάδοση στα δίκτυα χωρίς κλίμακα	105
6	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	107
6.1	Η Βέλτιστη Παύση	107
6.1.1	Βασικές έννοιες	107
6.1.2	Προβλήματα με πεπερασμένο ορίζοντα	108
6.1.3	Το πρόβλημα του γραμματέως (the classical secretary problem)	108
6.1.4	Το πρόβλημα της στάθμευσης (the parking problem)	109
6.1.5	Γνωστοί κανόνες βέλτιστης παύσης: οι κανόνες <i>ksla</i> και <i>1sla</i>	109
6.1.6	Παράδειγμα εφαρμογής της βέλτιστης παύσης	110
7	ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	113
7.1	Γενικά - Παραδοχές	113
7.2	Μοντέλο θορύβου και ασυρμάτου καναλιού	114
7.3	Επιδημικό μοντέλο	116
7.4	Μοντέλο Δικτύου	117
7.4.1	Γενικά	117
7.4.2	Τυχαία δίκτυα	118
7.4.3	Δίκτυα χωρίς Κλίμακα	119
7.4.4	Κινητικότητα	120
7.5	Συστολή Πιθανότητας Προώθησης	121
8	ΒΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΤΗ ΛΥΣΗ	123
8.1	Προσαρμοστική διάδοση με Διαστρωματική Επίγνωση Πλαισίου	123
8.1.1	Μοντέλο και Παραδοχές	123
8.1.2	Αποτελέσματα	130
8.1.3	Συζήτηση	135
8.2	Επιδημική Διάδοση με Πρόβλεψη: Συνάρτηση Οφέλους με Απλή Σύγκριση (<i>beauty contest</i>)	139

8.2.1	Μοντέλο και Παραδοχές	139
8.2.2	Αποτελέσματα και συζήτηση	145
8.2.3	Σύνοψη	150
8.3	Επιδημική Διάδοση με Βελτιστοποίηση	151
8.3.1	Μοντέλο και Παραδοχές	151
8.3.2	Αποτελέσματα και Συζήτηση	155
8.3.3	Σύνοψη	159
8.4	Βέλτιστος Χρονοπρογραμματισμός με Πλησιοπεριοδικές Εκπομπές	161
8.4.1	Μοντέλο και Παραδοχές	161
8.4.2	Βελτίωση ποιότητας πληροφορίας	164
8.4.3	Επιδόσεις του σχήματος	167
8.4.3.1	Σχήμα αναφοράς 1 (benchmark 1)	167
8.4.3.2	Σχήμα αναφοράς 2 (benchmark 2)	168
8.4.3.3	Σχήμα αναφοράς 3 (benchmark 3)	168
8.4.3.4	Σχήμα αναφοράς 4 (benchmark 4)	169
8.4.3.5	Σχήμα αναφοράς 5 (benchmark 5)	169
8.4.4	Εξοικονόμηση ενέργειας	170
8.4.5	Βελτίωση ποιότητας πληροφορίας	176
8.4.6	Εφαρμογή στη δρομολόγηση με το πρωτόκολλο AODV	178
8.4.7	Σύνοψη και συμπεράσματα	182
8.5	Εφαρμογή στη δρομολόγηση	184
8.5.1	Μοντέλο και Παραδοχές	184
8.5.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων και συζήτηση	187
8.5.2.1	Παραδοχές και περιβάλλον	187
8.5.2.2	Αποτελέσματα	188
8.5.3	Εκπομπή δεδομένων με μονοεκπομπή (unicast)	193
8.5.4	Δυνατότητα εφαρμογής σε άλλα πρωτόκολλα	196
8.5.5	Διαστρωματική απεικόνιση και συζήτηση	197
8.6	Μελλοντική έρευνα: πληροφοριοκεντρική προσαρμογή	200
8.6.1	Φορμαλισμός και σύνδεση με τα προηγούμενα	200
8.6.2	Οι δυνατές πράξεις	201
8.6.3	Παράδειγμα προσαρμογής κατάστασης με τη χρήση και του TTL	201
8.6.4	Διαστρωμάτωση	205
8.6.5	Συζήτηση	206
9	ΣΥΖΗΤΗΣΗ	209
9.1	Η ανάγκη αναχώρησης από τα ευριστικά μοντέλα	209
9.2	Οι κύριοι άξονες: διαστρωμάτωση και ανάδραση	210
9.3	Δίκτυα χωρίς κλίμακα	211
9.4	Η πορεία προς τη λύση	212
9.5	Πεδίο εφαρμογών	215
9.5.1	Περιοχές έρευνας	215
9.5.2	Εφαρμογές	217
10	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	219

10.1 Συμπεράσματα	219
10.2 Μελλοντική έρευνα	219
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	221
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	225

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1:	Μαρκοβιανή μηχανή διακριτών καταστάσεων που περιγράφει τις μεταπτώσεις της κατάστασης ενός κόμβου	16
Σχήμα 2:	Η μετάβαση από την αυστηρή περιοδικότητα στην πλησιοπεριοδικότητα	18
Σχήμα 3:	Η διαστρωμάτωση της Π.Ε.Δ.	42
Σχήμα 4:	Δίκτυο ασυρμάτων αισθητήρων	59
Σχήμα 5:	Επέκταση δικτυακής πρόσβασης	60
Σχήμα 6:	Εποχούμενο αδόμητο δίκτυο	60
Σχήμα 7:	Πρώθηση πληροφορίας προς κόμβο-καταβόθρα χωρίς σύνοψη δεδομένων	62
Σχήμα 8:	Πρώθηση πληροφορίας προς κόμβο-καταβόθρα με σύνοψη δεδομένων	63
Σχήμα 9:	Αναπαράσταση του cross-layering στη σύνοψη δεδομένων	65
Σχήμα 10:	Μετάβαση μεταξύ ευάλωτης, μολυσμένης και άνοσης (απομακρυσμένης) κατάστασης [49]	67
Σχήμα 11:	Μετάβαση μεταξύ ευάλωτης και μολυσμένης κατάστασης σύμφωνα με το μοντέλο SIS	68
Σχήμα 12:	Στο μοντέλο SIS το ποσοστό των μολυσμένων κόμβων τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή $1 - \delta/\alpha$	69
Σχήμα 13:	Μετάβαση μεταξύ ευάλωτης, μολυσμένης και άνοσης (απομακρυσμένης) κατάστασης στο μοντέλο SIR.	69
Σχήμα 14:	Η χρονική εξέλιξη των πληθυσμών S, I και R στο μοντέλο SIR. Η σχέση της ποσότητας δ/α με το επιδημικό κατώφλι είναι τέτοια που η επιδημία ατονεί καθώς η πλειοψηφία των κόμβων τείνει να ανοσοποιηθεί.	70
Σχήμα 15:	Η χρονική εξέλιξη των πληθυσμών S, I και R στο μοντέλο SIRS.	71
Σχήμα 16:	Το μοντέλο SIR με δημογραφική κίνηση.	73
Σχήμα 17:	Η προσαρμοστική επιδημική διάδοση ως σύστημα με ανάδραση.	75
Σχήμα 18:	Παράδειγμα Π.Ε.Δ. ως σύστημα με ανάδραση. Η πιθανότητα πρώιμης είναι το προσαρμοζόμενο χαρακτηριστικό εκπομπής.	75
Σχήμα 19:	Όταν ο κεντρικός πομπός εκπέμπει με πλήρη ισχύ, η μολύνουσα πληροφορία λαμβάνεται από 11/16 κόμβους, ενώ με την ελάχιστη μόνο από 2/16.	77

Σχήμα 20:	Τα πρότυπα OSI και διαδικτύου για τη στρωματική μοντελοποίηση δικτύου.	81
Σχήμα 21:	Η μετάβαση από το ιεραρχικό στρωματικό μοντέλο σ' ένα μοντέλο με αφαιρετικές οντότητες.	83
Σχήμα 22:	Η διαστρωματική λειτουργία παρέχεται από οντότητα εκτός των στρωμάτων η οποία συλλέγει πληροφορίες απ' όλα.	83
Σχήμα 23:	Παραδείγματα αλληλεπιδράσεων μεταξύ μη γειτονικών στρωμάτων.	84
Σχήμα 24:	Το μοντέλο θορύβου Middleton-A	88
Σχήμα 25:	Το μοντέλο θορύβου Markov-Middleton	89
Σχήμα 26:	Απεικόνιση μοντέλου θορύβου Markov-Middleton με χρήση FSM δύο καταστάσεων	89
Σχήμα 27:	Πολυδιόδευση ασύρματου σήματος	90
Σχήμα 28:	Η pdf της κατανομής Rayleigh	90
Σχήμα 29:	Κατανομή Nakagami-m	91
Σχήμα 30:	Λαμβανόμενο σήμα σε κανάλι με διαλείψεις	91
Σχήμα 31:	Λήψη σκεδαζόμενου σήματος υπό γωνία	92
Σχήμα 32:	Τυχαίο δίκτυο	101
Σχήμα 33:	Συγκριτική απεικόνιση κατανομών Poisson και χωρίς κλίμακα	102
Σχήμα 34:	Δίκτυο χωρίς κλίμακα	104
Σχήμα 35:	Συμπεριφορά δικτύων με βαθμό κόμβων κατανεμημένο με νόμο δύναμης	105
Σχήμα 36:	Κανάλια με θόρυβο και διαλείψεις στην ασύρματη μετάδοση	113
Σχήμα 37:	Θόρυβος με παλμούς με γκαουσιανά κατανεμημένους χρόνους άφιξης	114
Σχήμα 38:	Γραμμικός κώδικας block	115
Σχήμα 39:	Εξάρτηση του PER από το SNR σύμφωνα με το μοντέλο της [92]	116
Σχήμα 40:	Το μοντέλο του συστήματος ως σύστημα ελέγχου με ανάδραση	117
Σχήμα 41:	Ο ρόλος του εύρους συστολής στην εξοικονόμηση ενέργειας	122
Σχήμα 42:	Γραμμική μεταβολή του β με τα διπλότυπα και τα κατεστραμένα μηνύματα	126
Σχήμα 43:	Σιγμοειδής μεταβολή του β με τα διπλότυπα και τα κατεστραμένα μηνύματα	126
Σχήμα 44:	Η συνδυασμένη επίδραση της πιθανότητας προώθησης και του τρόπου του ΠΔΚ στο ενεργειακό κόστος	127
Σχήμα 45:	Λογικό διάγραμμα συστήματος προσαρμογής χαρακτηριστικών εκπομπής με ανάδραση σε επιδημικό περιβάλλον	129
Σχήμα 46:	Διάγραμμα βαθμίδων συστήματος προσαρμογής χαρακτηριστικών εκπομπής με ανάδραση σε επιδημικό περιβάλλον	129
Σχήμα 47:	Βελτίωση ενεργειακού κόστους	131
Σχήμα 48:	Βελτίωση απόδοσης	131
Σχήμα 49:	Μόλυνση δικτύου ως προς το χρόνο	131
Σχήμα 50:	Κανονικοποιημένη απόδοση ως προς την αρχική πιθανότητα προώθησης	132
Σχήμα 51:	Πιθανότητα προώθησης ως προς το χρόνο με το β_0 ως παράμετρο	133

Σχήμα 52:	Μόλυνση δικτύου ως προς το χρόνο με το β_0 ως παράμετρο	133
Σχήμα 53:	Μόλυνση δικτύου ως προς το χρόνο με και χωρίς κινητικότητα	133
Σχήμα 54:	Ελάττωση ενεργειακού κόστους ως προς την αρχική πιθανότητα προώθησης	134
Σχήμα 55:	Ελάττωση ενεργειακού κόστους ως προς το SNR	134
Σχήμα 56:	Ελάττωση ενεργειακού κόστους ως προς την πυκνότητα δικτύου	135
Σχήμα 57:	Μόλυνση δικτύου ως προς το SNR	135
Σχήμα 58:	Ενεργό ενεργειακό κόστος ως προς το SNR	136
Σχήμα 59:	Ενεργό ενεργειακό κόστος ως προς την πυκνότητα δικτύου	136
Σχήμα 60:	Διαστρωματική αντίληψη του σχήματος επιδημικής διάδοσης	138
Σχήμα 61:	Μαρκοβιανή μηχανή διακριτών καταστάσεων που περιγράφει τις μεταπτώσεις της κατάστασης ενός κόμβου	140
Σχήμα 62:	Λογικό διάγραμμα	144
Σχήμα 63:	Πιο επιθυμητές τιμές του gain product είναι οι υψηλές μη αρνητικές τιμές, και μάλιστα αυτές που προκύπτουν ως γινόμενο θετικών SG και G	145
Σχήμα 64:	Χρονική εξέλιξη της πιθανότητας προώθησης. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3	146
Σχήμα 65:	Χρονική εξέλιξη της τρόπου του ΠΔΚ. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3	146
Σχήμα 66:	Η επίδραση της προσαρμογής των παραμέτρων εκπομπής στην εξάπλωση της επιδημίας. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3	147
Σχήμα 67:	Επίδραση της δυναμικής προσαρμογής παραμέτρων στο ενεργειακό κόστος και την ταχύτητα μόλυνσης. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3	147
Σχήμα 68:	Επίδραση της δυναμικής προσαρμογής παραμέτρων στις μετρικές που ορίστηκαν. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3	148
Σχήμα 69:	Η εκλυόμενη ενέργεια ως προς τη μόλυνση. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3	148
Σχήμα 70:	Η σχετική δημοφιλία των δυνατών πράξεων. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3	149
Σχήμα 71:	Διαστρωματική αντίληψη του σχήματος προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης με απλή σύγκριση	150
Σχήμα 72:	Λογικό διάγραμμα για επιδημική διάδοση με βελτιστοποίηση	152
Σχήμα 73:	Τυχαίος παλμικός θόρυβος και διαλείψεις στο πεδίο του χρόνου	157
Σχήμα 74:	Χρονική μεταβολή του τρόπου του ΠΔΚ	157
Σχήμα 75:	Χρονική μεταβολή της πιθανότητας προώθησης	158

Σχήμα 76:	Κανονικοποιημένο ενεργειακό κόστος ως προς το ποσοστό μόλυνσης για τις διάφορες εκδοχές του σχήματος (aggressive, conservative, lazy)	158
Σχήμα 77:	Ενεργό ενεργειακό κόστος ως προς το ποσοστό μόλυνσης για τις διάφορες εκδοχές του σχήματος	158
Σχήμα 78:	Ενεργό ενεργειακό κόστος ως προς το ποσοστό μόλυνσης για διάφορες τιμές της συστολής του β	159
Σχήμα 79:	Διαστρωματική αντίληψη του σχήματος προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης με βελτιστοποίηση	160
Σχήμα 80:	Από την περιοδική στην πλησιοπεριοδική ευρυεκπομπή	164
Σχήμα 81:	Μηχανισμός βέλτιστης παύσης	165
Σχήμα 82:	Διάγραμμα ροής του σχήματος αναφοράς 3	168
Σχήμα 83:	Χρονική εξέλιξη της πιθανότητας προώθησης. Το προτεινόμενο σχήμα αποδίδεται ως OST (optimal stopping theory)	172
Σχήμα 84:	Χρονική εξέλιξη της μόλυνσης. Το προτεινόμενο σχήμα αποδίδεται ως OST	172
Σχήμα 85:	Ενεργειακό κόστος ως προς το χρόνο σε σύγκριση με τα σχήματα αναφοράς. Το προτεινόμενο σχήμα αποδίδεται ως OST	173
Σχήμα 86:	Ενεργειακό κόστος ως προς το χρόνο για διάφορες εκδοχές (flavors) του σχήματος	173
Σχήμα 87:	Εξοικονόμηση ενέργειας ως προς το μέγεθος του πακέτου της καθαρής μολύνουσας πληροφορίας	174
Σχήμα 88:	Ενεργειακό κόστος ως προς το εύρος συστολής του β . Με non-OST και OST το σχήμα αναφοράς 3 και το προτεινόμενο σχήμα αντίστοιχα.174	174
Σχήμα 89:	Ανάλυση ενεργειακού κόστους για διάφορα σχήματα και διάφορες ρυθμίσεις παραμέτρων (settings 1, settings 2, settings 3)	175
Σχήμα 90:	Λόγος πλήθους συγκρούσεων προς πλήθος εκπομπών. Με OST το προτεινόμενο σχήμα.	175
Σχήμα 91:	Ηλικία πληροφορίας ως προς το χρόνο για διάφορες τιμές του παράγοντα ενίσχυσης η («ντοπάρισμα» ή «biasing»)	177
Σχήμα 92:	Ενεργειακό κόστος ως προς το χρόνο για διάφορες τιμές του παράγοντα ενίσχυσης («ντοπάρισμα»)	177
Σχήμα 93:	Διάχυση του RREQ στο AODV: Ποσοστό μόλυνσης για ευρυεκπομπή άνευ όρων (σχήμα αναφοράς 1, «flooding»), για επιδημικό σχήμα χωρίς β.π. (σχήμα αναφοράς 3, «non-OST») και για σχήματα με β.π. χωρίς («OST») και με («OST-biased») ενίσχυση του β	180
Σχήμα 94:	Διάχυση του RREQ στο AODV: Ενεργειακό κόστος για ευρυεκπομπή άνευ όρων (σχήμα αναφοράς 1), για επιδημικό σχήμα χωρίς β.π. (σχήμα αναφοράς 3) και για σχήματα με β.π. χωρίς και με ενίσχυση του β	180
Σχήμα 95:	AODV: Μέση ηλικία του μηνύματος RREQ για ευρυεκπομπή άνευ όρων (σχήμα αναφοράς 1), για επιδημικό σχήμα χωρίς β.π. (σχήμα αναφοράς 3) και για σχήματα με β.π. χωρίς και με ενίσχυση του β	181

Σχήμα 96:	Διάχυση του RREQ στο AODV: Η επίδραση του χρόνου εκπνοής στο ποσοστό μόλυνσης.	181
Σχήμα 97:	Διαστρωματική αντίληψη της εφαρμογής στη δρομολόγηση με αξιοποίηση πληροφορίας ηλικίας	182
Σχήμα 98:	Αποστολή δεδομένων με μονοεκπομπή	185
Σχήμα 99:	Λογικό διάγραμμα εφαρμογής β.π. στη διάχυση μηνύματος ζήτησης μονοπατιού	188
Σχήμα 100:	Πυκνότητα πιθανότητας πλήθους γειτόνων	189
Σχήμα 101:	Συνέπεια γειτνίασης	189
Σχήμα 102:	Ελάττωση ρυθμού κατανάλωσης ενέργειας	191
Σχήμα 103:	Ελάττωση ποσοστού μόλυνσης του δικτύου	191
Σχήμα 104:	Λόγος κόστους προς μόλυνση για διάφορες τιμές του TTL	191
Σχήμα 105:	Ανάλυση ενεργειακού κόστους	192
Σχήμα 106:	Ποσοστό αύξησης της καθυστέρησης	194
Σχήμα 107:	Ποσοστό μείωσης ρυθμού κατανάλωσης ενέργειας	195
Σχήμα 108:	Μεταβολή ενεργού ποιότητας υπηρεσίας	195
Σχήμα 109:	Επίδραση της παραμέτρου $qualprob$ στην ενεργό ποιότητα υπηρεσίας	195
Σχήμα 110:	Διαστρωματική αντίληψη της εφαρμογής στη δρομολόγηση με αξιοποίηση πληροφορίας ΠΚΚ και πυκνότητας κόμβων	198
Σχήμα 111:	Επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων γ και ρ στο β . Οι τίτλοι $\delta\gamma$, $\delta\rho$ και $\delta\beta$ σημαίνουν αλλαγή ή προσαρμογή των αντίστοιχων ποσοτήτων	199
Σχήμα 112:	Επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων γ και ρ στο μ . Οι τίτλοι $\delta\gamma$, $\delta\rho$ και $\delta\mu$ σημαίνουν αλλαγή ή προσαρμογή των αντίστοιχων ποσοτήτων	199
Σχήμα 113:	Συνδυασμένη επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων γ και ρ στα β και μ . Οι τίτλοι $\delta\gamma$, $\delta\beta$, $\delta\rho$ και $\delta\mu$ σημαίνουν αλλαγή ή προσαρμογή των αντίστοιχων ποσοτήτων	199
Σχήμα 114:	Προσαρμογή κατάστασης με χρήση γ , ρ και TTL	202
Σχήμα 115:	Προσαρμογή πιθανότητας προώθησης με χρήση γ , ρ και TTL	203
Σχήμα 116:	Προσαρμογή κατάστασης με χρήση γ , ρ και TTL	203
Σχήμα 117:	Προσαρμογή κατάστασης με χρήση γ , ρ και TTL	203
Σχήμα 118:	Σύγκριση απόδοσης σχήματος πληροφοριοκεντρικής («3d») και μη πληροφοριοκεντρικής («2d») προσαρμογής	204
Σχήμα 119:	Διαστρωματική λογική σε παράδειγμα σχήματος πληροφοριοκεντρικής προσαρμογής	205
Σχήμα 120:	Συνδυασμένη επίδραση των παραμέτρων γ και ρ στα β και μ σε σχήμα πληροφοριοκεντρικής προσαρμογής	205
Σχήμα 121:	Π.Ε.Δ. με βρόχο ανάδρασης: μετρούνται τα διπλότυπα και ποσοστά κατεστραμμένων και προσαρμόζονται και επανατροφοδοτούνται η πιθ. προώθ. και ο τρόπος του ΠΔΚ.	212

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1:	Υποψήφιος πράξεις	16
Πίνακας 2:	Αξιοποίηση πληροφορίας πλαισίου στην απόφαση για αύξηση ή μείωση των β και μ	16
Πίνακας 3:	Αξιοποίηση πληροφορίας πλαισίου στην απόφαση για αύξηση ή μείωση των β και μ	20
Πίνακας 4:	Συμβολισμός για την επιδημική διάδοση για μοντέλα SIS (susceptible - infected - susceptible) και SIR (susceptible - infected - removed) και SIRS (susceptible - infected - removed-susceptible)	67
Πίνακας 5:	Μερικές τυπικές λειτουργίες διαφόρων δικτυακών στρωμάτων	84
Πίνακας 6:	Μηχανισμός ΠΔΚ (AMC) για το 802.11g	95
Πίνακας 7:	Οι τρόποι λειτουργίας της ΠΔΚ που υιοθετείται από την [92]	97
Πίνακας 8:	Οι τρόποι του ΠΔΚ που προτάθηκαν για το σύστημα EDGE [93]. Ο ρυθμός κωδικοποίησης έχει οριστεί διαφορετικά.	98
Πίνακας 9:	Φορμαλισμός για την απόδοση του ορισμού της βέλτιστης παύσεως.	108
Πίνακας 10:	Οι τρόποι	116
Πίνακας 11:	Μετρικές για την αποτίμηση επιδόσεων και σχετικός συμβολισμός	130
Πίνακας 12:	Αποτελέσματα προσομοιώσεων για την εξοικονόμηση ενέργειας	130
Πίνακας 13:	Υποψήφιος πράξεις	142
Πίνακας 14:	Επιλογή αύξησης ή μείωσης των β, μ ανάλογα με τη μεταβολή του γ (SNR)	142
Πίνακας 15:	Υποψήφιος πράξεις-λεπτομέρειες	142
Πίνακας 16:	Οι ποσότητες που εμφανίζονται στη λίστα 8	143
Πίνακας 17:	Εκδοχές της συνάρτησης οφέλους ανάλογα με το εύρος του w	153
Πίνακας 18:	Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις	156
Πίνακας 19:	Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις	170
Πίνακας 20:	Τιμές παραμέτρων για σύγκριση επιδόσεων με σχήματα αναφοράς	171
Πίνακας 21:	Υποψήφιος πράξεις	186
Πίνακας 22:	Τιμές παραμέτρων για τις προσομοιώσεις	190
Πίνακας 23:	Υποψήφιος πράξεις	198
Πίνακας 24:	Υποψήφιος πράξεις σύμφωνα με το κεφάλαιο 8.2	201
Πίνακας 25:	Υποψήφιος πράξεις σύμφωνα με το κεφάλαιο 8.5	201

Πίνακας 26: Παράδειγμα ιδιοτήτων ενδιαφέροντος διαφημιζόμενου με τεχνική Directed Diffusion	215
Πίνακας 27: Περιοχές έρευνας ως πιθανά πεδία εφαρμογής	216
Πίνακας 28: Πρακτικές εφαρμογές	218

Κατάλογος Αποσπασμάτων Κώδικα

1	Σύνοψη πληροφορίας	64
2	Σύνοψη πληροφορίας	64
3	Διαδικασία προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης	74
4	Διαδικασία προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης	74
5	Κατασκευή τυχαίου δικτύου	119
6	Κατασκευή δικτύου χωρίς κλίμακα	119
7	Αναδραστική επιδημική εκπομπή	129
8	Διαδικασία προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης με πρόβλεψη	143
9	Διαδικασία προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης	155
10	Μηχανισμός βέλτιστης παύσης	164
11	Διαδικασία επιδείνωσης της επιδημίας	166
12	Διάχυση μηνύματος RREQ με μηχανισμό βέλτιστης παύσης	187

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κίνητρα και Θεματολογία της Διατριβής

Τα αδόμητα (ad hoc) ασύρματα δίκτυα έχουν γίνει αρκετά δημοφιλές αντικείμενο έρευνας τον τελευταίο καιρό και βρίσκουν εφαρμογή σε αρκετές περιοχές.

Με τον όρο αυτό εννοούνται δίκτυα κινητών σταθμών ασύρματα δικτυωμένων χωρίς τη χρήση σταθερής μόνιμης υποδομής δηλαδή σταθμών βάσης. Παρόμοια με τα γνωστά (με υποδομή) ασύρματα δίκτυα, δικτυώνουν σταθμούς οι οποίοι εμφανίζονται σε τυχαία σημεία ή κινούνται με τυχαίο τρόπο. Στα αδόμητα δίκτυα, όμως, η τοπολογία μπορεί να είναι ταχέως μεταβαλλόμενη, οι συνδέσεις είναι άμεσες μεταξύ των σταθμών και εν γένει εφήμερες, δυναμικές και κατ' απαίτηση.

Σημαντικό, αν και όχι μοναδικό, πεδίο εφαρμογών τους είναι η επικοινωνία μεταξύ μηχανών (machine-to-machine, M2M), όπως για παράδειγμα τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (wireless sensor networks, WSN). Αυτού του είδους η επικοινωνία θέτει απαιτήσεις σχεδίασης δυνάμει διαφορετικές από αυτές των «παραδοσιακών» δικτύων υπολογιστών ή τηλεπικοινωνιών.

Σε πολλές περιπτώσεις οι δικτυωμένοι κόμβοι έχουν περιορισμένες δυνατότητες σε υπολογιστική ισχύ, μνήμη και αποθηκευτικό χώρο, επικοινωνιακή ικανότητα (εύρος ζώνης) και ιδίως ενεργειακό απόθεμα (μπαταρίες).

Απουσία σταθερής υποδομής, όλοι οι σταθμοί (κόμβοι) δρουν ως δρομολογητές. Οι συνεδρίες μεταξύ δύο τυχαίων κόμβων (κινητών σταθμών) απαρτίζονται από μια αλληλουχία συνδέσεων μεταξύ γειτονικών μεταξύ τους κόμβων. Η κινητικότητα και η αναξιοπιστία των κόμβων, η οποία πηγάζει από τις περιορισμένες δυνατότητές τους και τη λειτουργία τους απουσία ανθρώπινου παράγοντα, επιτρέπουν ή και προκαλούν τις συχνές διακοπές των συνδέσεων αυτών. Αυτό σημαίνει πως είναι απαραίτητη η ταχεία αναπροσαρμογή του δικτύου ώστε να είναι εφικτή η απρόσκοπτη ή έστω ταχέως επαναποκαθιστάμενη επικοινωνία.

Οι χαμηλές δυνατότητες σε εύρος ζώνης υπαγορεύουν το περιορισμό της επικοινωνίας στα απαραίτητα, όχι μόνο ως προς τα δεδομένα αλλά και ως προς τα μηνύματα ελέγχου. Πράγματι, σε πολλές περιπτώσεις τα αδόμητα δίκτυα χρησιμοποιούνται σε περιστάσεις που απαιτούν τη μεταφορά μικρού όγκου δεδομένων. Τέτοιες περιπτώσεις είναι π.χ. οι μετρήσεις αισθητήρων οι οποίοι μετρούν φυσικά μεγέθη και μεταδίδουν τις μετρήσεις τους οι οποίες έχουν τη μορφή βαθμωτών ποσοτήτων.

Δεδομένου, επίσης, ότι η επικοινωνία μεταξύ μηχανών συχνά λαμβάνει χώρο απουσία ανθρώπων, είναι αντιληπτό ότι απαιτείται τέτοια σχεδίαση των δικτύων αυτών ώστε να εξασφαλιστεί η προσαρμοστικότητα, η δυνατότητα αυτοθεραπείας, η αντοχή και η μακροζωία τους. Βασικός παράγοντας, προφανώς, για τη μακροζωία είναι η ενεργειακή ολιγάρκεια.

Αυτή αποτελεί και έναν από τους καθοριστικότερους παράγοντες και τις βασικότερες δεσμεύσεις στη σχεδίαση των δικτύων αυτών.

Τα αδόμητα δίκτυα συχνά λειτουργούν σε δυσμενείς συνθήκες, στις οποίες τα ασύρματα κανάλια είναι θορυβώδη και ταχέως μεταβαλλόμενα. Η ανάγκη για ταχεία προσαρμογή στις συνθήκες είναι λοιπόν ένα βασικό χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών.

Απαιτείται πλέον η προσαρμογή της συμπεριφοράς του συστήματος να γίνεται με γνώμονα τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Πιο σωστά θα πρέπει να ειπωθεί ότι απαιτείται προσαρμογή με *επίγνωση πληροφορίας πλαισίου*.

Με τον όρο *επίγνωση πληροφορίας πλαισίου* (context awareness) εννοούμε την ικανότητα ενός συστήματος να συλλέγει πληροφορία σχετική με το περιβάλλον του και να αναπροσαρμόζει αυτόματα τη συμπεριφορά του βάσει αυτής ή βάσει συμπερασμάτων τα οποία προκύπτουν από την ανάλυσή της.

Η ανταπόκριση (προσαρμογή συμπεριφοράς) μπορεί να γίνεται βάσει προκαθορισμένων κανόνων ή και ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Η πληροφορία πλαισίου συχνά έχει διαστρωματικό χαρακτήρα όπως και η ανταπόκριση του δικτύου σ' αυτήν.

Σε πολλά σύγχρονα ασύρματα συστήματα, στα οποία επιβάλλεται προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος, ενσωματώνεται η τεχνική της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ή ΠΔΚ (adaptive modulation and coding, AMC). Αυτή υπαγορεύει ότι ανάλογα με τα επίπεδα του θορύβου σ' ένα ασύρματο κανάλι, υιοθετείται ο πιο κατάλληλος τρόπος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ελέγχου σφάλματος από ένα σύνολο προβλεπόμενων. Είναι, λοιπόν, μια έκφραση προσαρμοστικότητας στο φυσικό στρώμα. Αυτού του είδους η διαχείριση μπορεί να αξιοποιηθεί και σε περιβάλλον αδόμητων δικτύων. Μπορεί όμως να είναι απαραίτητη η αξιοποίηση ευρύτερη πληροφορίας, δηλαδή πληροφορίας πλαισίου, για τη βελτιστοποίηση της προσαρμογής της συμπεριφοράς των κόμβων του δικτύου.

Η προσαρμοστικότητα, λοιπόν, ή πιο σωστά οι μηχανισμοί προσαρμογής, μπορούν να διευρυνθούν και να αποκτήσουν *διαστρωματικά* χαρακτηριστικά τόσο ως προς την πληροφορία που αξιοποιούν όσο και ως προς τη συμπεριφορά που τροποποιούν.

Με τον όρο διαστρωμάτωση (cross-layering) εννοείται υπόδειγμα λειτουργίας δικτύων σύμφωνα με το οποίο κάθε στρώμα δε λειτουργεί αυτόνομα και επικοινωνώντας μόνο με τα αμέσως γειτονικά του (υπερκείμενο και υποκείμενο αυτού). Αντίθετα προσαρμόζει τη λειτουργία του επικοινωνώντας και με μη γειτονικά του.

Η διαστρωματική αντιμετώπιση κρίνεται ως η πλέον αρμόζουσα στα προβλήματα αδόμητης δικτύωσης διότι προσφέρει ταχύτερη προσαρμογή με ταυτόχρονη δυνατότητα επιλογής από ευρύτερο χώρο συνδυασμών τιμών των προσαρμοζόμενων παραμέτρων.

Στα αδόμητα δίκτυα συχνά παρουσιάζεται η ανάγκη για διάδοση πληροφορίας, είτε αυτή είναι δεδομένα είτε μηνύματα ελέγχου, όπως π.χ. στη δρομολόγηση. Αναλυτικότερα, αν θεωρήσουμε δίκτυο στο οποίο λίγοι κόμβοι κατέχουν μια ποσότητα πληροφορίας («μολύνουσα πληροφορία») και είναι επιθυμητή η διάδοσή της σε όσο το δυνατόν περισσότερους. Οι κατέχοντες την πληροφορία ονομάζονται *μολυσμένοι* και οι μη κατέχοντες *ευάλωτοι*. Αντί οι μολυσμένοι κόμβοι να ευρυσκέπτονται άνευ όρων τη μολύνουσα πληροφορία, εκπέμπουν με πιθανότητα πεπερασμένη και μικρότερη της μονάδας. Αυτό το πιθανοκρατικό καθεστώς εκπομπών αναφέρεται ως *επιδημική διάδοση* πληροφορίας (Ε.Δ). Η πιθανοκρατική εκπομπή προσφέρει περιορισμό του ενεργειακού κόστους και των αλληλοπαρεμβολών στα ασύρματα κανάλια. Εάν η πιθανότητα εκπομπής είναι προσαρμόσιμη, μιλάμε για *προσαρμοστική επιδημική διάδοση* (Π.Ε.Δ.). Τα κριτήρια και η μέθοδος προσαρμογής αποτελούν αντικείμενο έρευνας.

Όταν οι μολυσμένοι κόμβοι μπορούν, για τυχαίους λόγους, να μεταβούν και πάλι στην ευάλωτη κατάσταση τότε το μοντέλο περιλαμβάνει και το ενδεχόμενο της *θεραπείας*, η οποία συμβαίνει σε μολυσμένους κόμβους με πεπερασμένη πιθανότητα. Τέτοιου είδους μοντέλα αναφέρονται ως μοντέλα ευάλωτου-μολυσμένου-ευάλωτου (susceptible-infected-susceptible, SIS).

Στα δίκτυα που μελετάμε, ανάγκη ευρείας διάχυσης πληροφορίας παρουσιάζεται σε αρκετές περιπτώσεις και εφαρμογές: στη μετάδοση μηνυμάτων ελέγχου σύμφωνα με κάποιο πρωτόκολλο, στη δημοσίευση ενδιαφέροντος για πληροφορία σε δίκτυα αισθητήρων (directed diffusion), στη μετάδοση δεδομένων (π.χ. μετρήσεων αισθητήρων), κ.λ.π.

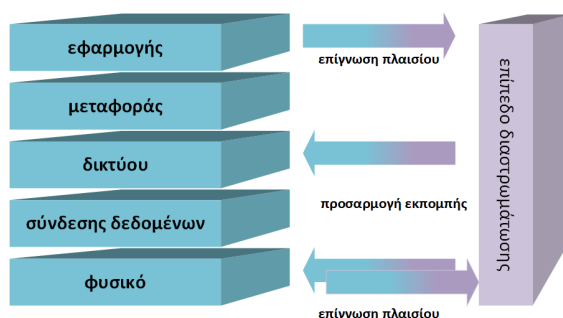
Η παρούσα μελέτη επιχειρεί να:

- ελαττώσει το ενεργειακό κόστος της προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης τύπου SIS σε θορυβώδες περιβάλλον χωρίς συμβιβασμό στην ευρεία διάδοση της πληροφορίας.
- προτείνει βελτιστοποιημένη προσαρμογή χαρακτηριστικών εκπομπής με βάση επίγνωση πληροφορίας πλαισίου με διαστρωματικό χαρακτήρα για την επίτευξη του πιο πάνω στόχου.
- αντιμετωπίσει το χρονοπρογραμματισμού τακτικών εκπομπών ως πρόβλημα Π.Ε.Δ. και να προσεγγίσει τη βέλτιστη λύση του.
- αξιοποιήσει τα ίδια εργαλεία για την εξοικονόμηση ενεργειακού κόστους κατά τη διάχυση μηνυμάτων ελέγχου σε πρωτόκολλα δρομολόγησης.
- διευρύνει τη λογική αυτή με τη συμπερίληψη στην πληροφορία πλαισίου δεδομένων από το περιεχόμενο της ίδιας της φερόμενης πληροφορίας, μεταβαίνοντας έτσι σε μια «πληροφοριοκεντρική» αντιμετώπιση του προβλήματος.

Τα επιτεύγματα είναι:

- η διατήρηση του ενεργειακού κόστους της επιδημικής διάδοσης σε θορυβώδες περιβάλλον χωρίς συμβιβασμό στην ευρεία διάδοση της πληροφορίας με χρήση είτε αναδραστικών είτε προβλεπτικών μηχανισμών.
- η ανάδειξη της ανάγκης εξισορρόπησης μεταξύ τριών αναγκών: χαμηλό ενεργειακό κόστος, ευρεία διάδοση της πληροφορίας και διατήρηση ή και βελτίωση της ποιότητας πληροφορίας· η χρήση μηχανισμού πρόβλεψης βασισμένου σε συναρτήσεις οφέλους για την αντιμετώπισή της.
- η εφαρμογή του μετριάσμου εκπομπών στη φάση ανακάλυψης μονοπατιού κατά τη λειτουργία πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Συνοπτικά η περιγραφόμενη λογική προτείνει τη βελτιστοποίηση της επιδημικής διάδοσης πληροφορίας σε θορυβώδες περιβάλλον με προσαρμογή των χαρακτηριστικών εκπομπής χρησιμοποιώντας επίγνωση πληροφορίας πλαισίου από πολλά στρώματα και από το περιεχόμενο της ίδιας της φερόμενης (διαδιδόμενης) πληροφορίας (σχήμα 3). Το κέρδος της μελέτης αυτής επεκτείνεται στη μελέτη του προβλήματος του χρονοπρογραμματισμού.



Σχήμα 3: Η διαστρωμάτωση της Π.Ε.Δ.

Η έρευνα ακολουθεί την ακόλουθη πορεία:

- Προτείνει την εξοικονόμηση ενέργειας σε επιδημική διάδοση σε θορυβώδες περιβάλλον χρησιμοποιώντας ανάδραση βασισμένη σε διαστρωματική πληροφορία πλαισίου.
- Προτείνει την εξοικονόμηση ενέργειας στο ίδιο περιβάλλον χρησιμοποιώντας «μυωπική» πρόβλεψη με τη βοήθεια συναρτήσεων οφέλους διαστρωματικού χαρακτήρα.
- Ενισχύει την πιο πάνω τακτική εισάγοντας συνθήκη βέλτιστης παύσης έτσι ώστε να αποφεύγονται οι βιαστικές προσαρμογές στα χαρακτηριστικά εκπομπής.
- Εφαρμόζει τα ως αυτή τη στιγμή συμπεράσματα σε πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού εκπομπών. Προτείνει τη μετάβαση από τις περιοδικές ευρυεκπομπές στις πλησιοπεριοδικές επιδημικές εκπομπές εκμεταλλευόμενη τις βέλτιστες συνθήκες περιβάλλοντος όπως αυτές προκύπτουν από την πληροφορία πλαισίου.

- Αντιμετωπίζει ως πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού τη διάχυση μηνυμάτων ζήτησης μονοπατιών (RREQ) στη φάση ανακάλυψης μονοπατιού κατά τη λειτουργία πρωτοκόλλων δρομολόγησης.
- Στο πάνω πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού επεκτείνει την επίγνωση πληροφορίας πλαισίου συμπεριλαμβάνοντας και πληροφορία από τη φερόμενη πληροφορία, όπως π.χ. πεδία πληροφορίας του διαχεόμενου μηνύματος. Με τον τρόπο αυτό δείχνεται η δυνατότητα χρήσης των προτεινόμενων τεχνικών σε περιβάλλον πληροφοριοκεντρικής αντίληψης.

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η εξισορρόπηση ανταγωνιστικών απαιτήσεων για εξοικονόμηση ενέργειας, διάδοση πληροφορίας και ρύθμιση της ποιότητας πληροφορίας σε τοπικό επιδημική διάδοση πληροφορίας σε θορυβώδες περιβάλλον, χρησιμοποιώντας επίγνωση πληροφορίας πλαισίου από πολλά στρώματα και από το περιεχόμενο της ίδιας της διαδιδόμενης πληροφορίας.

1.2 Δομή της Διατριβής

Η παρούσα μελέτη πραγματεύεται το πρόβλημα της προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης (Π.Ε.Δ.) πληροφορίας σε αδόμητα ασύρματα δίκτυα. Το εξεταζόμενο περιβάλλον είναι η εξάπλωση πληροφορίας σε όσο το δυνατόν περισσότερους κόμβους ενός αδόμητου δικτύου με επιδημικές δηλαδή πιθανοκρατικές εκπομπές. Οι κόμβοι που κατέχουν την προς εξάπλωση πληροφορία (*μολυσμένοι*) ευρειακτέμπουν πιθανοκρατικά με στόχο να «μολύνουν» τους μη έχοντες (*ευάλωτους*) γείτονές τους.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται το υπόβαθρο της έρευνας στην Π.Ε.Δ. καθώς και η πορεία της έρευνας στον τομέα. Εκτίθεται η εξελιξη της ιδέας από τα ενσύρματα δίκτυα μέχρι τα αδόμητα ασύρματα. Σκιαγραφούνται οι αντιλήψεις στην αντιμετώπιση του προβλήματος και θίγεται η έρευνα σε πεδία που μπορούν να είναι του άμεσου ενδιαφέροντός μας, όπως οι διαστρωματικές αρχιτεκτονικές.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 3, δίνεται μια συνοπτική εισαγωγή στα ασύρματα αδόμητα δίκτυα τα οποία αποτελούν το πεδίο έρευνάς μας και εφαρμογής της επιδημικής διάδοσης.

Η επιδημική διάδοση εισάγεται στο κεφάλαιο 4 και εκεί παρουσιάζονται τα βασικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της. Εξηγούνται μοντέλα όπως τα SIS, SIR, κ.ά. και εκτίθεται η δυναμική της επιδημικής διάδοσης και οι κρίσιμες παράμετροι. Επίσης αιτιολογείται η ανάγκη εισαγωγής της προσαρμοστικότητας και τονίζονται μερικά σημαντικά συμπεράσματα.

Λόγω της πολυπλοκότητας του υιοθετούμενου μοντέλου μας και της διαστρωματικής φύσης του, κρίθηκε απαραίτητη μια σύνοψη μερικών χρήσιμων εννοιών. Έτσι στο κεφάλαιο 5 δίνονται ορισμένες βασικές γνώσεις οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατανόηση της παρούσας έρευνας. Εδώ συνυπάρχουν καινοτόμες ιδέες, όπως η διαστρωμάτωση και τα ελεύθερα κλίμακας δίκτυα, αλλά και πιο οικείες όπως τα μοντέλα περιγραφής ασύρματων καναλιών.

Το κεφάλαιο 6 είναι αφιερωμένο σε μια σύνοψη εννοιών από τη θεωρία βέλτιστης παύσης. Λόγω του κεντρικού ρόλου τον οποίον έχουν στην παρούσα μελέτη, δίνεται βάρος σε μερικά ειδικά θέματα, όπως το πρόβλημα του γραμματέως και ο κανόνας one-stage-look-ahead. Επίσης με ένα παράδειγμα εφαρμογής της βέλτιστης παύσης γίνεται στην ουσία νύξη στο μοντέλο που υιοθετείται στο ερευνητικό κομμάτι της ΔΔ.

Στο κεφάλαιο 7 εκτίθεται λεπτομερώς το μοντέλο συστήματος για τη ΔΔ. Εδώ βρίσκει τη χρησιμότητά της η γνώση που δόθηκε στο κεφάλαιο 5. Το περιγραφόμενο μοντέλο αφορά μια κλίμακα θεμάτων από τη συμπεριφορά των ασύρματων καναλιών ως την Π.Ε.Δ. Έτσι, όλες οι έννοιες που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 5 και 6 καθίστανται εδώ απαραίτητα εργαλεία για τη θεμελίωση του μοντέλου εργασίας μας.

Το κεφάλαιο 8 είναι αφιερωμένο στην περιγραφή της έρευνας και των αποτελεσμάτων που δόθηκαν. Παρουσιάζεται μια σειρά από σχήματα Π.Ε.Δ. τα οποία αποσκοπούν στο να εξισορροπήσουν τις ανταγωνιστικές απαιτήσεις για εξοικονόμηση ενεργειακού κόστους, ευρεία διάδοση της πληροφορίας και διατήρηση της ποιότητάς της. Ακολουθείται μια πορεία από τη γνωστή αναδραστική αντιμετώπιση του προβλήματος προς τη βελτιστοποιημένη πληροφοριοκεντρική προσαρμογή με πρόβλεψη.

Όλα τα σχήματα λειτουργούν σε περιβάλλον επιδημικής διάδοσης όπου ο μηχανισμός της μόλυνσης ακολουθεί το μοντέλο susceptible-infected-susceptible, SIS. Σε όλα τα σχήματα προϋποτίθεται η χρήση προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (ΠΔΚ) κατά την εκπομπή και λήψη. Επίσης, όπως πάντα στην επιδημική διάδοση, κύριο ρόλο έχει η *πιθανότητα προώθησης*: με τον όρο αυτό εννοούμε την πιθανότητα με την οποία πραγματοποιεί εκπομπή ένας μολυσμένος κόμβος κατά την προδιαγεγραμμένη χρονική στιγμή. Πιθανότητα προώθησης ίση με τη μονάδα σημαίνει πως τις στιγμές αυτές ο κόμβος σίγουρα εκπέμπει. Πιθανότητα προώθησης χαμηλότερη του ενός (π.χ. $\beta < 1$) σημαίνει πως ο εν λόγω κόμβος έχει πιθανότητα $1 - \beta$ να μην εκπέμπει.

Η κατάσταση των καναλιών ως προς την παρουσία μορφή θορύβου και διαλείψεων έχει κεντρικό ρόλο στο μοντέλο που υιοθετείται. Με βάση αυτή κάθε κόμβος έχει πεπερασμένη μη μοναδιαία πιθανότητα να λάβει επιτυχώς εκπομπές της μολύνουσας πληροφορίας.

Το σημείο έναρξης της παρούσας μελέτης είναι η γνωστή αναδραστική αντιμετώπιση του προβλήματος (υποκεφάλαιο 8.1). Χρησιμοποιείται διαστρωματική επίγνωση πλαισίου για την προσαρμογή της πιθανότητας προώθησης και του *τρόπου* του ΠΔΚ.

Ένα περαιτέρω βήμα είναι η μετάβαση σε σχήμα προσαρμογής των ιδίων ποσοτήτων με μηχανισμό πρόβλεψης αντί ανάδρασης. Σύμφωνα με το δεύτερο αυτό σχήμα που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 8.2, η προσαρμογή των εν λόγω ποσοτήτων γίνεται με γνώμονα το άμεσο όφελος με βάση την εκτίμηση συναρτήσεως οφέλους διαστρωματικής φύσης. Το προβλεπόμενο κόστος και η πιθανότητα μόλυνσης γειτόνων μπορούν να συνθέτουν μια τέτοια συνάρτηση.

Η συνάρτηση οφέλους είναι στενά συνδεδεμένη με την κατάσταση των καναλιών (διαλείψεις) και το συνεπαγόμενο λόγο σήματος-προς-θόρυβο (SNR), δηλαδή με το φυσικό στρώμα.

Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να ενισχυθεί με την επί πλέον εισαγωγή κριτηρίου βέλτιστης

παύσης (β.π.): σύμφωνα με την εκδοχή αυτή, η προσαρμογή (αλλαγή της κατάστασης του κόμβου) προκρίνεται μόνο όταν ικανοποιείται ένα τέτοιο κριτήριο. Δηλαδή μόνο όταν ικανοποιείται το προκαθορισμένο κριτήριο β.π. πραγματοποιείται η προσαρμογή των χαρακτηριστικών εκπομπής η οποία επιφέρει το μέγιστο άμεσο όφελος. Αυτό το τροποποιημένο σχήμα παρουσιάζεται στο υποκεφάλαιο 8.3

Στη συνέχεια (υποκεφάλαιο 8.4), ο ίδιος τρόπος αντιμετώπισης χρησιμοποιείται στην αντιμετώπιση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού. Θεωρείται ένα περιβάλλον στο οποίο οι μολυσμένοι κόμβοι ευρυεκπέμπουν περιοδικά μια πληροφορία με σκοπό αυτή να εξαπλωθεί σε όλο το δίκτυο. Προτείνεται η μετάβαση από την αυστηρή περιοδικότητα στην *πλησιοπεριοδικότητα*: το πεδίο του χρόνου διαιρείται σε διαδοχικά ξένα μεταξύ τους διαστήματα διάρκειας ίσης με την ως τότε θεωρούμενη περίοδο. Εντός καθενός από αυτά τα διαστήματα ο μολυσμένος κόμβος παίζει το κλασσικό παιχνίδι του γραμματέως με γνωστό πεπερασμένο ορίζοντα. Βάσει αυτού εκπέμπει επιδημικά την πιο σύμφωρη στιγμή, όπως αυτή καθορίζεται από διαστρωματικής φύσης συνάρτηση οφέλους.

Στο ίδιο τοπίο του χρονοπρογραμματισμού μελετάται και η συμπερίληψη στην πληροφορία πλαισίου και ποσοτήτων όπως η πυκνότητα των κόμβων στο δίκτυο. Αυτή η διεύρυνση του μοντέλου παρουσιάζεται στο υποκεφάλαιο 8.5 σε συνδυασμό με μια ενδιαφέρουσα επέκταση: είναι η εφαρμογή τέτοιου σχήματος Π.Ε.Δ. στη λειτουργία πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε αδόμητα ασύρματα δίκτυα. Στα πρωτόκολλα αυτά η διαδικασία ανακάλυψης μονοπατιών συχνά εκκινείται με την ευρυεκπομπή και διάχυση μηνυμάτων ελέγχου, των μηνυμάτων ζήτησης μονοπατιού (*route request, RREQ*). Το εγχείρημα χρήσης σχήματος όπως τα προηγούμενα στο πεδίο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάδυση της ανάγκης αντιστάθμισης μεταξύ επαρκούς εξοικονόμησης ενέργειας και διάχυσης του μηνύματος, άρα και πιθανότητας να ανακλυφθεί το ζητούμενο μονοπάτι.

Με τον τρόπο αυτό και με το επί πλέον εγχείρημα χρήσης του σχήματος στη μετάδοση των δρομολογούμενων δεδομένων με μονοεκπομπή (*unicast*) καταλήγουμε στην ανάγκη καθορισμού μετρικών *ποιότητας υπηρεσίας* (*QoS, quality of service*), οι οποίες μας καθοδηγούν σε συμπεράσματα ως προς το όφελος της χρήσης σχημάτων Π.Ε.Δ. της μορφής των περιγραφέντων.

Στο υποκεφάλαιο 8.6 παρουσιάζεται η ιδέα εμπλουτισμού της αξιοποιούμενης από το μηχανισμό Π.Ε.Δ. πληροφορίας πλαισίου με στοιχεία του ίδιου του περιεχομένου της διαχεόμενης πληροφορίας: π.χ. την ηλικία της πληροφορίας ή την τιμή ενός πεδίου περιεχόμενου σ' αυτήν, όπως το *TTL, time-to-live*. Με το τον τρόπο αυτό εισάγεται η πληροφοριοκεντρική άποψη της Π.Ε.Δ.

Οι καρποί της παρούσας έρευνας παρουσιάζονται και συζητώνται στο κεφάλαιο 9. Εκτίθεται το γεγονός πως η Π.Ε.Δ. έχει να συμβιβάσει αντικρουόμενες απαιτήσεις και πως η διαστρωματική αρχιτεκτονική συμβάλλει στην αντιμετώπιση του προβλήματος. Παρουσιάζονται επίσης απόψεις για τα πεδία εφαρμογής βελτιστοποιημένων σχημάτων Π.Ε.Δ. με σχετική επιχειρηματολογία.

Στο κεφάλαιο 10, τέλος, συνοψίζονται τα συμπεράσματα και προτείνονται πεδία μελλοντικής έρευνας.

2. ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΗ ΕΡΕΥΝΑ

2.1 Υπόβαθρο και βασικές έννοιες

Η επιδημική διάδοση (Ε.Δ.) και ειδικότερα η προσαρμοστική επιδημική διάδοση (Π.Ε.Δ.) έχει ερευνηθεί αρκετά στο παρελθόν. Έχει εξεταστεί ως μηχανισμός διάδοσης πληροφορίας σε δίκτυο, τόσο θεωρητικά με συγκεκριμένες ή και πιο ευρείες παραδοχές, όσο και σε επίπεδο εφαρμογών.

Η αρχική σύλληψη της επιδημικής διάδοσης (Ε.Δ.) είναι η εξής: Έστω ένα δίκτυο στο οποίο είναι επιθυμητή η διάδοση μιας πληροφορίας η οποία μπορεί να είναι είτε δεδομένα είτε μήνυμα ελέγχου ή σηματοδότησης. Στην αρχή μόνο ένα μικρό υποσύνολο κόμβων του δικτύου κατέχουν αυτήν την πληροφορία, οι λεγόμενοι *μολυσμένοι*. Οι μη κατέχοντες ονομάζονται *ευάλωτοι*. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα κάθε μολυσμένος επιλέγει ένα υποσύνολο των κόμβων του δικτύου και επικοινωνεί μαζί τους επιχειρώντας να τους μεταδώσει την πληροφορία αυτή.

Παρατηρεί κανείς ότι στην αρχική αυτή σύλληψη οι επαφές μεταξύ κόμβων είναι ενός-προς-έναν (peer-to-peer). Πράγματι, αρχικά η Ε.Δ. προτάθηκε σε ενσύρματα δίκτυα [8], [6], στα οποία οι ευρυεκπομπές μπορούν να έχουν χαρακτήρα ενός-προς-έναν (peer-to-peer). Η επιλογή των παραληπτών της μολύνουσας πληροφορίας μπορεί να είναι είτε τυχαία [6], είτε βάσει κάποιων χαρακτηριστικών της [8]. Η εκπομπή μπορεί να πάψει, λοιπόν, να είναι ντετερμινιστική και καθίσταται πλέον πιθανοκρατική.

Η εικόνα αυτή πηγάζει από τα μαθηματικά μοντέλα περιγραφής της διάδοσης των επιδημιών [9], [10], [49] δηλαδή από τον επιστημονικό κλάδο της Επιδημιολογίας. Στον τομέα των δικτύων, βέβαια, η διάδοση της «επιδημίας» είναι, αντίθετα με την Επιδημιολογία, η ευκαταία έκβαση της διαδικασίας. Στη μοντελοποίηση της διάδοσης μολυσματικών ασθενειών προβλέπεται και η πιθανότητα *θεραπείας*, δηλαδή της θεραπείας ενός μολυσμένου ατόμου και μετάβασής του πίσω στην ευάλωτη κατάσταση. Στα δίκτυα, αυτό αντιστοιχεί στην απώλεια της μολυσματικής πληροφορίας, λόγω π.χ. φθοράς της στη μνήμη του κόμβου ή άλλου τυχαίου λόγου.

Στην πρωτοποριακή για την εποχή της έρευνα τής [6] ο μολυσμένος κόμβος είναι υπολογιστής ο οποίος μεταδίδει επιδημικά ενημερώσεις σε άλλους υπολογιστές στους οποίους κατοικούν αντίγραφα μιας βάσης δεδομένων. Η επιλογή παραληπτών από τον μολυσμένο κόμβο (υπολογιστή) που εκπέμπει υποτίθεται τυχαία. Υποτίθεται επίσης και πλήρης γνώση του δικτύου. Το πρόβλημα διατυπώνεται αυστηρά, όπως θα δούμε αργότερα, με σύστημα διαφορικών εξισώσεων, το οποίο περιγράφει τη χρονική εξέλιξη του ποσοστού των μολυσμένων και των ευάλωτων κόμβων. Αυτού του είδους ο φορμαλισμός συνάδει με την προαναφερθείσα γνώση από την Επιδημιολογία [9], [10], [49]. Το αποτέλεσμα είναι η πλήρης διάχυση της ενημερωμένης πληροφορίας με σαφώς μειωμένη κίνηση σε σχέση με ντετερμινιστικούς αλγορίθμους που βασίζονται σε αποκατάσταση διαλόγου μεταξύ μολυσμένων και ευάλωτων κόμβων.

Η πρώτη μάλιστα εισήγηση μιας τέτοιου είδους τακτικής [8] βασίζει τη διαδικασία επιλογής

παραληπτών στην ηλικία των δεδομένων· εισάγει δηλαδή ήδη τη επίδραση του περιεχομένου της πληροφορίας στη δυναμική της διάδοσής της.

Σε τέτοια δίκτυα δείχτηκαν τα πιθανά πλεονεκτήματα τα οποία σχετίζονται ιδίως με την πλήρη κάλυψη του δικτύου ([6], [7]), δηλαδή με τη διάδοση της «μολύνουσας» πληροφορίας σε όσο περισσότερους κόμβους είναι δυνατόν. Υποτίθεται ότι οι κόμβοι εκπέμπουν επ' άπειρο, ότι δεν υπάρχει πιθανότητα θεραπείας και ότι οι κόμβοι έχουν πλήρη γνώση (της τοπολογίας) του δικτύου.

Με τη μετάβαση στην περιοχή των ασυρμάτων επικοινωνιών ο χαρακτήρας επικοινωνίας ενός-προς-έναν υποχωρεί προς όφελος της ευρυεκπομπής. Δηλαδή, στα κατώτερα τουλάχιστον στρώματα, η επικοινωνία είναι ενός-προς-πολλούς (ευρυεκπομπή) εφ' όσον το ασυρματικό σήμα λαμβάνεται ακούσια από όλους τους κόμβους εντός εμβέλειας του πομπού, ακόμα κι αν δεν αποτελούν τους επιλεγμένους αποδέκτες.

Στα ασύρματα δίκτυα συχνά υπεισέρχεται μια επί πλέον απαίτηση η οποία μάλιστα αποδεικνύεται και η πιο κρίσιμη: οι συμμετέχοντες κόμβοι συχνά είναι περιορισμένων δυνατοτήτων ως προς τα ενεργειακά αποθέματα (μπαταρία), τη μνήμη και αποθηκευτικό χώρο και τις επικοινωνιακές δυνατότητες (εύρος ζώνης). Αυτό ισχύει, για παράδειγμα, σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (wireless sensor networks, WSN) στα οποία οι κόμβοι λειτουργούν συχνά απομονωμένα, απομακρυσμένα και χωρίς δυνατότητα διορθωτικής ανθρώπινης επέμβασης. Επομένως, και διαισθητικά αντιλαμβάνεται κανείς πως η κάλυψη του δικτύου με τη μολύνουσα πληροφορία και η εξοικονόμηση ενέργειας είναι αντικρουόμενοι στόχοι.

2.2 Προηγούμενη έρευνα

Βασικές παράμετροι στην Ε.Δ. είναι το πλήθος των κόμβων, το πλήθος των παραληπτών σε κάθε επανεκπομπή της μολύνουσας πληροφορίας, το μέγεθος της μνήμης κάθε κόμβου στην οποία αυτή αποθηκεύεται, και η επίγνωση του δικτύου που έχει κάθε κόμβος [57]. Βασικές μετρικές απόδοσης είναι η πιθανότητα να μολυνθεί πλήρως το δίκτυο (atomic probability ή global reach probability), το πλήθος εκπομπών για την πλήρη μόλυνση, το αναμενόμενο ποσοστό κάλυψης του δικτύου, το ενεργειακό κόστος, κ.ά. [57].

Η εφαρμογή της Ε.Δ. στα αδόμητα ασύρματα δίκτυα μελετήθηκε αρκετά και τα συμπεράσματα μελετήθηκαν και συνοψίσθηκαν εκτεταμένα όπως π.χ. στις [57], [66]. Έτσι γίνονται γνωστές οι θεωρητικά αναμενόμενες επιδόσεις της Ε.Δ. σε σχέση με τις βασικές παραμέτρους που αναφέρθηκαν και αυτές συνάδουν μάλιστα με τη γνώση από την Επιδημιολογία που ήδη αναφέρθηκε [9], [49].

Στα ασύρματα δίκτυα, όμως, γίνονται αισθητοί οι περιορισμοί που επιβάλλονται από τις περιορισμένες δυνατότητες των κόμβων. Οι άνευ όρων εκπομπές έχουν κι άλλα μειονεκτήματα. Έτσι εντοπίστηκε η ανάδυση του προβλήματος το οποίο περιγράφεται ως *πρόβλημα καταιγιστικών ευρυεκπομπών* (broadcast storm problem) [61], [41]. Με τον όρο αυτό συνοψίζεται η κατάσταση κατά την οποία υψηλός φόρτος στο δίκτυο επιφέρει συνθήκες συνδυσασμένης ενεργειακής εξάντλησης και επικοινωνιακής συμφόρησης. Το αποτέλεσμα είναι η εξάντληση των πόρων των κόμβων χωρίς ουσιαστικό πλεονέκτημα

στην εξάπλωση της πληροφορίας. Η Π.Ε.Δ. προτάθηκε με σκοπό την αντιμετώπιση του. Στην Π.Ε.Δ. οι εκπομπές προσαρμόζονται σε ρυθμό, εμβέλεια ή χαρακτηριστικά εκπομπής (διαμόρφωση) ανάλογα με *πληροφορία πλαισίου* την οποία ο μολυσμένος κόμβος πρέπει να αποκτήσει. Οι εκπομπές έτσι εν γένει περιορίζονται με ταυτόχρονη προσπάθεια διατήρησης της ευρείας εξάπλωσης της πληροφορίας.

Όμως, στην Π.Ε.Δ. οι υπολογισμοί δεν είναι τετριμμένοι και η μαθηματική αντιμετώπιση που αναφέρθηκε [6] δεν είναι απλή. Συχνά, λοιπόν, υιοθετούνται ευριστικές μέθοδοι για την ανάκτηση πληροφορίας πλαισίου βάσει της οποίας προσαρμόζονται οι παράμετροι λειτουργίας του μηχανισμού επιδημικής διάδοσης. Η προσαρμογή αυτή επίσης συχνά γίνεται με ευριστικό τρόπο.

Η απόκτηση της πληροφορίας πλαισίου γίνεται είτε με παθητικές είτε με ενεργητικές μεθόδους. Στις ενεργητικές συνήθως ο κόμβος επικοινωνεί με τους γείτονές του για να αποκτήσει πληροφορία πλαισίου είτε άμεσα είτε έμμεσα μέσω άλλων μετρήσεων. Στις παθητικές, η πληροφορία πλαισίου ανακτάται από μηνύματα τα οποία ανταλλάσσονται στα πλαίσια της διάχυσης πληροφορίας. Ένα παράδειγμα είναι η αξιοποίηση του πλήθους ληφθέντων μηνυμάτων φθαρμένων από το θόρυβο καναλιού για να εκτιμηθεί ο θόρυβος αυτός. Άλλο παράδειγμα είναι η αξιοποίηση του πλήθους ληφθέντων μηνυμάτων για να εκτιμηθεί η πυκνότητα των κόμβων στο δίκτυο, έστω και τοπικά.

Στην [41] προτείνεται ο μετριασμός των ευρυεκπομπών με χρήση πληροφορίας πλαισίου, η οποία μάλιστα έχει διαστρωματικό χαρακτήρα. Προτείνονται τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί για τον περιορισμό των εκπομπών. Διενεργείται παρατήρηση παραμέτρων, όπως πλήθος ληφθέντων μηνυμάτων απόσταση και θέση, και οι εκπομπές επιβραδύνονται ανάλογα με τις μετρήσεις. Η παράμετρος που προσαρμόζεται άμεσα είναι ο ρυθμός ή το πλήθος των εκπομπών, γεγονός που έχει άμεσες συνέπειες στο ενεργειακό κόστος. Επί της ουσίας τροποποιείται η πιθανότητα επικοινωνίας μεταξύ μολυσμένων και ευάλωτων άρα και η πιθανότητα μόλυνσης των ευάλωτων. Οι ερευνητές συνάγουν ότι και το πρόβλημα της συμφόρησης (στα πλαίσια του broadcast storm problem) απαλύνεται χάρη στην ελάττωση των εκπομπών.

Στο σχήμα της [61] οι μολυσμένοι κόμβοι επικοινωνούν με τους γείτονές τους για να μάθουν την κατάσταση μόλυνσής τους και να προσαρμόσουν την πιθανότητα προώθησής τους αναλόγως. Δηλαδή, ανταλλάσσουν μηνύματα με μετα-πληροφορία η οποία χρησιμεύει για την προσαρμογή των επερχόμενων εκπομπών. Στην ουσία ανταλλάσσονται μηνύματα μικρού όγκου για να αποφευχθούν τα μεγαλύτερου όγκου τα οποία φέρουν τη μολύνουσα πληροφορία. Προφανώς, το σχήμα αυτό είναι ενεργό. Επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας με διατήρηση της εξάπλωσης της πληροφορίας σε ευρεία κλίμακα.

Υπάρχουν σχήματα τα οποία βασίζονται στην επιλογή των παραληπτών βάσει τοπικής πληροφορίας. Στο σχήμα τύπου «publish-subscribe» της [22] μερικοί κόμβοι αφήνονται σκόπιμα εκτός του συνόλου των παραληπτών. Θεσπίζεται μηχανισμός επιλογής των μελών της ομάδας των παραληπτών (membership). Αυτό καθορίζει το πλήθος τους, άρα και την πιθανότητα να μολυνθεί τυχαίος ευάλωτος. Η γνώση του δικτύου λαμβάνεται δεδομένη και υποτίθεται ενεργειακά ανέξοδη.

Η ενδιαφέρουσα προσέγγιση του [11] προτείνει τη χρήση διαλόγων με σκοπό τη ρύθμιση των εκπομπών μέσω της ελάττωσης των περιπτώσεων. Και εδώ επισημαίνεται η ανάγκη εξεύρεσης μέτρου στην αποστολή μηνυμάτων στα πλαίσια τέτοιων διαλόγων, διότι μπορούν να συμβάλουν στο σχηματισμό συμφόρησης αντί στην αποτροπή της.

Συχνά, λοιπόν, τα ενεργά σχήματα προϋποθέτουν την άμεση συνεργασία των γειτονικών κόμβων του πομπού. Επομένως, είναι απαραίτητη η αντιστάθμιση του επί πλέον αυτού ενεργειακού εξόδου με την εξοικονόμηση που υπόσχεται ένα τέτοιο σχήμα.

Τα παθητικά σχήματα δεν έχουν το μειονέκτημα του επί πλέον ενεργειακού κόστους για διαλόγους μεταξύ κόμβων.

Το μοντέλο που προτείνεται στην [15] βασίζεται στην προσαρμογή της πιθανότητας προώθησης κόμβου ανάλογα με την πυκνότητα του δικτύου, βασιζόμενο στην αντίληψη ότι οι πολύ συχνές εκπομπές είναι περιττές σε πυκνά δίκτυα.

Στη [43] επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της προσαρμογής της εμβέλειας εκπομπής. Κατ' αυτόν τον τρόπο, τροποποιείται η πιθανότητα να μολύνει ένας μολυσμένος έναν ευάλωτο.

Σε πολλές περιπτώσεις ένα δίκτυο μπορεί να οργανωθεί σε «συστάδες» κόμβων. Έτσι οι κόμβοι αρκούνται στο να διαχέουν την πληροφορία μόνο εντός της συστάδας συμπεριλαμβάνοντας και έναν κόμβο-επικεφαλής της συστάδας. Αυτός είναι επιφορτισμένος με τη διάχυση εκτός συστάδας. Αυτή η αντιμετώπιση προϋποθέτει κάποια γνώση τοπολογίας του δικτύου. Αυτή αποτελεί την πληροφορία πλαισίου βάσει της οποίας εκλέγονται οι κόμβοι-επικεφαλής.

Στις [14], [12] και [13] υιοθετείται τέτοια προσέγγιση για να ικανοποιηθεί η ανάγκη για απομάκρυνση από τις άνευ όρων ευρυεκπομπές. Σύμφωνα με αυτή, οι κόμβοι οι οποίοι δεν είναι επικεφαλής των επί μέρους συστάδων επιφορτίζονται με μειωμένες εκπομπές.

Η ανάγκη αντιστάθμισης (tradeoff) μεταξύ εξάπλωσης της μόλυνσης και περιορισμού των εκπομπών έχει γίνει αντιληπτή αμέσως στην Π.Ε.Δ. Το ζητούμενο είναι, βέβαια, η πλήρης κάλυψη του δικτύου. Η εύρεση της βέλτιστης πιθανότητας προώθησης για την ελαχιστοποίηση των περιπτώσεων μηνυμάτων αποδεικνύεται πως είναι NP-πλήρες πρόβλημα (NP-complete) [18]. Οι Erdős και Rényi, [17] δίνουν άνω και κάτω όρια για την πιθανότητα πλήρους κάλυψης (global outreach probability). Στην [19] οι ερευνητές επεξεργάζονται το πρόβλημα περαιτέρω. Εργαζόμενοι σε τυχαίους γράφους και υποθέτοντας ότι όλες οι επαφές οδηγούν σε επιτυχή μόλυνση και όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια και σταθερή πιθανότητα προώθησης καταλήγουν σε εκφράσεις για το πλήθος των απαραίτητων εκπομπών για πλήρη μόλυνση και την αναγκαία πιθανότητα προώθησης για να επιτευχθεί αυτή. Γενικά για τη διεξαγωγή αναλυτικών υπολογισμών και την εξαγωγή συμπερασμάτων σε κλειστή μορφή είναι απαραίτητη η υιοθέτηση παραδοχών.

Στις παραπάνω έρευνες αμελείται η πιθανότητα θεραπείας μολυσμένου κόμβου και μετάπτωσης του πίσω στην ευάλωτη κατάσταση. Όταν υπάρχει μη μηδενική πιθανότητα θεραπείας η πλήρης κάλυψη του δικτύου δεν επέρχεται. Αντίθετα παρατηρείται η λεγόμενη bimodal συμπεριφορά: η επιδημία είτε σβήνει είτε επικρατεί σε ένα σημαντικό ποσοστό του δικτύου αν και όχι κατ' ανάγκη σε ολόκληρο [57].

Στην [20] εξετάζεται μια προσαρμοστική μέθοδος για τη διάχυση μηνυμάτων πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε αδόμητα ασύρματα δίκτυα. Η πιθανότητα προώθησης προσαρμόζεται ενισχυόμενη ή καταπνιγόμενη ανάλογα με την απόσταση από τους κόμβους-στόχους. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται αποκατάσταση διαλόγων μεταξύ κόμβων για ανάκτηση σχετικής πληροφορίας πλαισίου. Επομένως πρόκειται για ενεργητικό σχήμα Π.Ε.Δ. το οποίο όμως επιτυγχάνει αποτελεσματικότερη διάχυση.

Η ιδέα αντικατάστασης της άνευ όρων ευρυεκπομπής με πιθανοκρατική (επιδημική) εκπομπή στη διάχυση μηνυμάτων πρωτοκόλλων δρομολόγησης εκφράζεται και στην [21]. Εδώ προτείνεται η αποφυγή ευρυεκπομπών στη διάχυση του μηνύματος αναζήτησης μονοπατιών (/textlatinroute request, RREQ) κατά τη φάση ανακάλυψης μονοπατιών στο πρωτόκολλο δρομολόγησης AODV. Αυτή η καινοτομία αποδίδει εξ ίσου ομαλή λειτουργία του πρωτοκόλλου παρά την ελάττωση των εκπομπών.

Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος, οι περισσότερες αντιμετωπίσεις της Π.Ε.Δ. βασίζονται σε προσομοιώσεις. Μια ενδιαφέρουσα οπτική για την αναλυτική επίλυση του προβλήματος της Π.Ε.Δ. δίνεται στην [55]. Εδώ επιλύονται οι διαφορικές εξισώσεις της Π.Ε.Δ. και εξάγονται σε κλειστή μορφή εκφράσεις για το ποσοστό μολυσμένων ως συνάρτηση του χρόνου.

Σημαντικού ενδιαφέροντος είναι και μερικά ειδικότερα θέματα στην Π.Ε.Δ.

Με τον όρο *πληροφοριοκεντρική (datacentric) διάδοση πληροφορίας* εννοούμε μηχανισμούς ή αλγορίθμους που καθορίζουν τη διάδοση με λαμβάνοντας υπ' όψη το ίδιο το περιεχόμενο της διαδιδόμενης πληροφορίας. Στην [16] εξετάζεται ένα πρόβλημα πληροφοριοκεντρικής Π.Ε.Δ. Στην έρευνα αυτή εξετάζεται η διάχυση πληροφορίας μετρήσεων κάποιου φυσικού μεγέθους σε δίκτυο ασύρματων αισθητήρων. Η πιθανότητα προώθησης προσαρμόζεται συναρτήσει της μεταβολής της πληροφορίας. Σε περιστάσεις αργών ή μικρών μεταβολών της μετρούμενης ποσότητας, η άμεση διάχυση δεν είναι τόσο σημαντική ώστε να είναι αποδεκτή η επιβάρυνση του δικτύου με το ενεργειακό κόστος των συχνών εκπομπών. Εισάγεται, λοιπόν, μια ισχυρά διαστρωματική τακτική κατά την οποία το περιεχόμενο της πληροφορίας επηρεάζει τη διάδοσή της.

Η προσαρμοστική πολυεπιδημική διάδοση [5] είναι μια ακόμα ενδιαφέρουσα άποψη. Θεωρούμε την Ε.Δ. έστω δύο μολυνόντων μηνυμάτων. Οι μολυσμένοι από το ένα μόνο κόμβοι θεωρούνται μερικώς μολυσμένοι, αλλά η κατάστασή τους «επιδεινώνεται» και μολύνονται πλήρως όταν βρεθούν τελικά μολυσμένοι και από τα δύο. Αυτή η κατάσταση μπορεί να θεωρηθεί ως η ταυτόχρονη Π.Ε.Δ. δύο επιδημιών: μιας που περιλαμβάνει τους μερικώς μολυσμένους και μιας τους πλήρως. Για τη δεύτερη επιδημία, οι συμμετέχοντες κόμβοι στην πρώτη είναι ευάλωτοι. Αν συμπεριληφθεί στο μοντέλο και πιθανότητα θεραπείας, ισχύει και το αντίστροφο. Η εξέταση του προβλήματος δίνει αναλυτικό μοντέλο για την περιγραφή αυτής της διαδικασίας.

Στην περίπτωση που υπάρχει πιθανότητα θεραπείας ενός μολυσμένου κόμβου, μπορούν να σχηματισθούν διάφορα μοντέλα ανάλογα με το σε ποια κατάσταση μεταπίπτει ο θεραπευμένος. Εάν μεταπίπτει και πάλι αμέσως στην ευάλωτη κατάσταση μιλάμε για το μοντέλο susceptible-infected-susceptible, SIS. Είναι και διαισθητικά αντιληπτό ότι η θεραπεία δυσκολεύει την εξάπλωση της μόλυνσης, δηλαδή της πληροφορίας. Απαιτείται

μια αρκετά ισχυρή πιθανότητα μόλυνσης για να διαδοθεί επαρκώς η επιδημία. Το *σημείο καμπής*, *tipping point* ή *επιδημικό κατώφλι* η *βασικός αριθμός αναπαραγωγής* αποτελεί τη συνθήκη η εκπλήρωση της οποίας επιτρέπει την εξάπλωση της μόλυνσης και την εξέλιξή της σε επιδημία [53]. Αυτή η γνώση βασίζεται στην Επιδημιολογία [49], αλλά έχει μελετηθεί και στα αδόμητα δίκτυα [107], [53]. Η έννοια του επιδημικού κατωφλίου έχει άμεσα νόημα στο μοντέλο SIS.

Με την άνοδο της μελέτης των δικτύων ελευθέρων κλίμακας, εξετάστηκε και η συμπεριφορά τους σε καθεστώς Ε.Δ. Ενώ, λοιπόν, η Ε.Δ. σε τυχαίο δίκτυο επιτρέπει την επικράτηση της επιδημίας μόνον όταν ξεπερασθεί το επιδημικό κατώφλι, η κατάσταση είναι διαφορετική σε δίκτυα ελεύθερα κλίμακας. Η έρευνα εδώ [72] δείχνει την απουσία τέτοιου κατωφλίου ακόμα και υπό συνθήκες αργής μόλυνσης, όπως όταν υπάρχει σημαντική σημαντική πιθανότητα θεραπείας ή ασθενική πιθανότητα μόλυνσης. Ακόμα και τότε η επιδημία μπορεί να επιζήσει καλύπτοντας έστω και πολύ μικρό ποσοστό κόμβων.

Η ιδέα του μετριασμού των άνευ όρων εκπομπών βρίσκει εφαρμογή στο περιβάλλον λειτουργίας των πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Η απόκτηση και η διατήρηση ενημερωμένης πληροφορίας δρομολόγησης συχνά βασίζεται σε τέτοιου είδους ευρυεκπομές. Όπως είδαμε, στην [21] προτείνεται η αποφυγή των άνευ όρων εκπομπών με ριζική ελάττωσή τους. Το αποτέλεσμα είναι ενθαρρυντικό όσον αφορά την κάλυψη του δικτύου και τον απαιτούμενο χρόνο για την ανεύρεση της ζητούμενης πληροφορίας δρομολόγησης (latency).

Στην έρευνα των [123] και [124] προτείνεται ο μετριασμός των εκπομπών μέσω άμεσης προσαρμογής της πιθανότητας προώθησης. Πρόκειται για αντιμετώπιση του προβλήματος χρησιμοποιώντας τις τεχνικές της Π.Ε.Δ. Για την κατάλληλη προσαρμογή της πιθανότητας προώθησης απαιτείται επίγνωση πληροφορίας πλαισίου, δηλαδή πληροφορίας την οποία μπορεί να ανακτήσει και να αξιοποιήσει ο μολυσμένος κόμβος για να προσαρμόσει αυτόνομα τα χαρακτηριστικά εκπομπής του. Η πυκνότητα των κόμβων στη γειτονιά του κάθε κόμβου μπορεί να αποτελέσει αυτή την πληροφορία πλαισίου. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική ελάττωση ενεργειακού κόστους καθώς αποφεύγεται η διάχυση μηνυμάτων σε περιοχές του δικτύου όπου χαρακτηρίζεται περιττή.

Στην [23] οι ερευνητές επίσης προτείνουν ελάττωση της ισχύος εκπομπής, άρα και της εμβέλειας, στην περίπτωση της διάχυσης μηνυμάτων ανακάλυψης μονοπατιού στο πρωτόκολλο AODV. Η πληροφορία πλαισίου στην περίπτωση αυτή είναι η πυκνότητα του δικτύου και αποκτάται από τα λαμβανόμενα Hello messages τα οποία προβλέπονται από τη λειτουργία του AODV. Ο μολυσμένος κόμβος, λοιπόν, εδώ αποκτά επίγνωση πληροφορίας πλαισίου χωρίς ενεργειακά έξοδα ειδικά για το σκοπό αυτό.

Έχει καταστεί σαφές ότι η Π.Ε.Δ. χρειάζεται πληροφορία (δηλαδή επίγνωση πλαισίου) από διάφορα στρώματα και επίσης υπαγορεύει την προσαρμογή παραμέτρων σε πολλά στρώματα. Στην [112] διατυπώνεται και αντιμετωπίζεται το πρόβλημα του ελέγχου και της διαχείρισης δικτύου με βάση τα δυο προηγούμενα στοιχεία. Η αυστηρή διατύπωση και αξιοποίηση συνθηκών βέλτιστης παύσης (β.π.) χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών αυτών. Αντιμετωπίζεται το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού. Ζητείται η βέλτιστη στιγμή για εκπομπή βάσει οφέλους το οποίο αξιοποιεί επίγνωση πληροφορίας πλαισίου. Έτσι η ισχυρή διαστρωματικότητα του προβλήματος αξιοποιείται και για την α-

νάκτηση πληροφορίας πλαισίου και για την προσαρμογή παραμέτρων εκπομπής με στόχο τη βελτίωση του οφέλους, σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις.

Τα κύρια διδάγματα από τη μέχρι τώρα έρευνα συνοψίζονται ως εξής:

Η Π.Ε.Δ. είναι αντίληψη με ενδογενώς διαστρωματικό χαρακτήρα η οποία απαιτεί επίγνωση πληροφορίας πλαισίου για να λειτουργήσει.

Η ποικιλία των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος καθιστά δύσκολη την ακριβή επίλυση. Για το λόγο αυτό συχνά υιοθετούνται παραδοχές σχετικές με την εκάστοτε συνθήκες.

Η εφαρμογή σε συγκεκριμένα προβλήματα, όπως τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορεί να προσφέρει σημαντική βελτίωση των επιδόσεων του εξεταζόμενου δικτύου.

Η μελέτη των διαστρωματικών αρχιτεκτονικών προσφέρει χρήσιμη γνώση για τη μελέτη της Π.Ε.Δ. σε ποικίλα περιβάλλοντα και με διάφορες παραμέτρους.

Η έρευνά μας προσβλέπει στην αξιοποίηση του συνδυασμού των παραπάνω γνώσεων για την αντιμετώπιση του προβλήματος της Π.Ε.Δ. σε ασύρματα αδόμητα δίκτυα παρουσία θορύβου.

3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΔΟΜΗΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

3.1 Γενική περιγραφή των αδόμητων ασύρματων δικτύων

Αδόμητα (ad hoc) ασύρματα δίκτυα λέμε μια κατηγορία ασύρματων δικτύων στα οποία δε χρησιμοποιείται σταθερή και μόνιμη υποδομή, όπως σταθμοί βάσης, και η επικοινωνία είναι αποκλειστικά μεταξύ των ασύρματων κόμβων.

Βασικό χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών είναι το γεγονός ότι είναι κατανεμημένα και δυναμικά. Λόγω της απουσίας σταθερής υποδομής, της ανάπτυξής τους σε δυσμενή περιβάλλοντα και των περιορισμένων δυνατοτήτων των κόμβων χαρακτηρίζονται από συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας [29], [35].

Κανένας κόμβος δεν έχει συνολική εικόνα της τοπολογίας και των συνθηκών λειτουργίας του δικτύου αλλά και η πλήρης γνώση δεν είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του δικτύου.

Για τους λόγους αυτούς ο έλεγχος είναι κατανεμημένος και οι αποφάσεις λαμβάνονται από τους επί μέρους κόμβους αντί από κάποια κεντρική ελεγκτική οντότητα με βάση τη μερική και τοπικού χαρακτήρα πληροφορία που μπορούν να έχουν [117], [76], [69], [43], κ.ά.

Οι συνδέσεις μεταξύ κόμβων είναι εν γένει εφήμερες, δυναμικές και κατ' απαίτηση [29], [30], [35], [26].

Η ιεραρχία δεν είναι πολύπλοκη -μπορεί να είναι και «επίπεδη»- και οι κόμβοι είναι ισότιμοι και δρουν όλοι ως δρομολογητές [29], [35]. Οι διαδικασίες προώθησης και δρομολόγησης βασίζονται σε αποφάσεις λαμβανόμενες δυναμικά ανάλογα με τις συνθήκες και με τη χρήση εφήμερων συνδέσεων [34], [35].

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται και δίκτυα στα οποία οι κόμβοι είναι κινητοί, εμφανίζονται σε τυχαίες θέσεις ή και τίθενται περιοδικά εκτός λειτουργίας τροποποιώντας έτσι την τοπολογία. Η κινητικότητά τους μεταφράζεται σε μεταβαλλόμενη θέση αλλά και ταχύτητα και επιτάχυνση.

Τέτοια δίκτυα μπορούν να λειτουργούν πλήρως αυτόνομα, αλλά σε μερικές περιπτώσεις μπορούν και να είναι συνδεδεμένα με σταθερή υποδομή. Παραδείγματα τέτοιας λειτουργίας είναι τα ακόλουθα:

- Ένας σταθερός και μεγαλύτερων δυνατοτήτων κόμβος (π.χ. σταθερός υπολογιστής) δέχεται πληροφορίας από το ασύρματο δίκτυο, τις επεξεργάζεται και τις καθιστά δικτυακά διαθέσιμες [44].
- Σταθεροί σταθμοί βάσης παρέχουν υπηρεσίες αποθήκευσης και προώθησης (store-and-forward) σε κινητούς κόμβους οι άμεσες συνδέσεις μεταξύ των οποίων είναι πολύ σύντομες ή καθόλου εφικτές [39], [40].

Πρόκειται για δίκτυα αυτοδημιουργούμενα, αυτοοργανούμενα και αυτοθεραπευόμενα. Η ανάπτυξη της ασυρματικής τεχνολογίας 802.11 έπαιξε σημαντικό ρόλο στην εξέλιξή τους.

3.2 Εφαρμογές και είδη ασύρματων αδόμητων δικτύων

Ανάλογα με τις προδιαγραφές και τους σκοπούς τους, τα ασύρματα αδόμητα δίκτυα μπορούν να καταταγούν σε κατηγορίες. Παρουσιάζονται στα ακόλουθα μερικές από τις γνωστότερες.

- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) [24], [25], κ.ά: Στα δίκτυα αυτά, μερικοί ή όλοι οι κόμβοι είναι εφοδιασμένοι με αισθητήρες, οι οποίοι μετρούν φυσικά μεγέθη όπως θερμοκρασία, υγρασία, κ.λ.π. Οι μετρήσεις αυτές έχουν την μορφή βαθμωτών μεγεθών και είναι χρήσιμες αυτούσιες ή χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση γεγονότων, όπως διέλευση ανθρώπων, οχημάτων και ζώων ή παραβιάσεις φυσικών χώρων. Οι κόμβοι είναι συνήθως διεσπαρμένοι και όχι εύκολα επισκέψιμοι. Έτσι έχουν απαιτήσεις σε χαμηλή κατανάλωση ισχύος, δηλαδή ενεργειακή ολιγάρκεια.

Συχνά, οι κόμβοι που φέρουν αισθητήρες παρουσιάζονται μικρή ή και καθόλου κινητικότητα. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες θερμοκρασίας σε ένα δάσος είναι ακίνητοι, όπως και οι αισθητήρες κίνησης σε μια περιφραγή.

Σε τέτοιο δίκτυο μερικοί κόμβοι μπορούν να μην έχουν αισθητήρες, αλλά να είναι απλώς επιφορτισμένοι με την προώθηση πληροφορίας προς κάποια εφαρμογή-καταναλωτή η οποία εδρεύει σε κόμβο που είναι τοπολογικά καταβόθρα. Σε άλλες εφαρμογές, υπάρχει η ανάγκη για διάδοση πληροφορίας σε πολλούς κόμβους. Στην περίπτωση που περιλαμβάνονται και επικαιροποιητές (actuators) μιλάμε για sensor actuator networks.

- Κινητά αδόμητα δίκτυα (MANET) [26]: Αυτά είναι δίκτυα στα οποία οι κόμβοι κινούνται ή εμφανίζονται σε τυχαίες θέσεις. Λόγω της κινητικότητας η τοπολογία της άμεσης γειτονιάς του κάθε κόμβου υφίσταται συνεχείς μεταβολές και οι συνδέσεις είναι συνήθως παροδικές και διακοπτόμενες. Και εδώ, φυσικά, κάθε κόμβος δρα ως δρομολογητής και πρέπει να χρησιμοποιεί ενέργεια και εύρος ζώνης για να διατηρεί την απαραίτητη σχετική πληροφορία.
- Εποχούμενα αδόμητα δίκτυα (VANET) [39], [40]: Μπορούν να θεωρηθούν ως υποκατηγορία των MANET. Σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι πως, λόγω του ότι οι κόμβοι βρίσκονται σε οχήματα, δεν υφίστανται περιορισμούς σε κατανάλωση ενέργειας και εύρος ζώνης. Απο την άλλη μεριά, η επικοινωνία μεταξύ τους επιβάλλεται να έχει μεγάλη ανοχή στις χρονικές καθυστερήσεις, διότι οι μεταξύ τους συνδέσεις είναι ευκαιριακές και παροδικές λόγω της ταχύτητας των οχημάτων. Συχνά επικοινωνούν με ακίνητους κόμβους εγκατεστημένους παράλληλα στο δρόμο οι οποίοι μπορούν να διευκολύνουν τη μεταξύ τους επικοινωνία, να συλέγουν πληροφορία με στόχο να καταναλωθεί από κόμβο-καταβόθρα διαδικτυακά συνδεδεμένο ή και να διαχέει μηνύματα προς τους κινητούς κόμβους.
- Δίκτυα έξυπνων τηλεφώνων (SPAN) [27], [28]: Σ' αυτά τα δίκτυα ένα ή περισσότερα τηλέφωνα συνδεδεμένα σε συμβατικό δίκτυο δεδομένων με υποδομή (GPRS,

UMTS, LTE, WiFi) συνδέονται με τρίτες συσκευές με σκοπό να τους παράσχουν διαδικτυακή πρόσβαση μέσω εαυτών. Οι κόμβοι είναι εν γένει συμβατικές συσκευές με αξιόλογες υπολογιστικές, επικοινωνιακές δυνατότητες και απόθεμα ισχύος. Σχεδόν πάντα βρίσκονται υπό τον άμεσο έλεγχο ανθρώπινου χειριστή.

Οι εφαρμογές των αδόμητων δικτύων μπορούν να είναι πολλές σε διάφορα πεδία της ανθρώπινης δραστηριότητας. Υπάρχουν πολλές δυνατότητες σε τομείς όπως η υγεία, οι συγκοινωνίες, η αστική οργάνωση, η βιομηχανική παραγωγή, κ.ά. Στις περισσότερες περιπτώσεις εμπίπτουν σε μια από τις παραπάνω κατηγορίες.

3.3 Απαιτήσεις και προβλήματα

Λόγω των εφαρμογών και των συνθηκών χρήσης τους, τα ασύρματα αδόμητα δίκτυα υφίστανται σημαντικούς περιορισμούς στη σχεδίασή τους. Απαρτίζονται από κόμβους οι οποίοι πρέπει να είναι μικρού μεγέθους και να μπορούν να λειτουργούν χωρίς ανθρώπινη παρουσία. Η εξασφάλιση της ορθής λειτουργίας τους και της μακροζωίας τους, υπαγορεύει αρκετές δεσμεύσεις.

- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας: Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Ο περιορισμός των εκπομπών είναι ο πιο αποδοτικός. Για να έχει αποτέλεσμα μπορεί να συνοδεύεται από σύνοψη δεδομένων (data aggregation), περιοδική απενεργοποίηση, προσαρμοστικό χρονοπρογραμματισμό, επιδημική διάχυση πληροφορίας, έξυπνους μηχανισμούς δρομολόγησης, κ.λ.π.
- Χαμηλή υπολογιστική ισχύς: Οι μικρές διαστάσεις, η ανάγκη φορητότητας και οι μικρές πηγές ενέργειας είναι περιοριστικές ως προς την υπολογιστική ισχύ. Υπάρχουν εξαιρέσεις, όπως στα VANET και ίσως στους κόμβους-καταβόθρες στα WSN οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με το διαδίκτυο. Η ενεργειακή ολιγάρκεια συντελεί στη μακροζωία του δικτύου. Λόγω της επίπεδης ιεραρχίας του δικτύου, η απενεργοποίηση κόμβων λόγω εξάντλησης ενέργειας, μπορεί να έχει συνέπειες στη λειτουργία του δικτύου, λόγω της αλλαγής στην τοπολογία που αυτή συνεπάγεται.
- Χαμηλή κίνηση στα ασύρματα κανάλια: Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με συμπύκνωση δεδομένων (data aggregation) ή προτεραιοποίηση εκπομπών. Η υψηλή κίνηση σημαίνει πολλές ενεργειακά κοστοβόρες εκπομπές και επί πλέον συμφόρηση στις συνδέσεις.
- Ανοχή στη χρονική υστέρηση: Όταν ο επιθυμητός παραλήπτης-καταναλωτής της πληροφορίας δεν είναι στην εμβέλεια του πομπού-ιδιοκτήτη της πληροφορίας, τότε πρέπει να είναι εφικτή η αποθήκευση και ανάκτηση πληροφορίας για αργότερη προώθησή της.
- Αποκεντρωμένη διαχείριση: Οι αποφάσεις δρομολόγησης, εξοικονόμησης ισχύος, απενεργοποίησης, επεξεργασίας πληροφορίας είναι εν γένει αποκεντρωμένες, δηλ.

λαμβάνονται από τους επί μέρους κόμβους. Για τις αποφάσεις αυτές λαμβάνονται υπ' όψη η κατάσταση του εν λόγω κόμβου και ίσως των άμεσων γειτόνων του. Με την τακτική αυτή ελαττώνονται οι ασύρματες εκπομπές και έτσι εξοικονομείται ενέργεια και χωρητικότητα καναλιού. Υπάρχουν όμως και δίκτυα στα οποία δεν είναι όλοι οι κόμβοι ιεραρχικά ίσοι. Μπορεί μερικοί να ελέγχουν (να «διατάσσουν») άλλους [36]. Σε μεγάλο βαθμό αυτή η απαίτηση είναι απόρροια των προηγούμενων.

Από τα πορηγούμενα προκύπτει πως στα περισσότερα δίκτυα του είδους βασικό πρόβλημα είναι οι περιορισμένες δυνατότητες των ασυρμάτων κόμβων ως προς το απόθεμα ενέργειάς τους, την υπολογιστική αλλά και την επικοινωνιακή τους ισχύ (εύρος ζώνης). Αυτά πηγάζουν κυρίως από την απαίτηση για μικρό μέγεθος και την κινητικότητα απουσία σταθερής υποδομής. Προφανώς, οι περιορισμοί στην ισχύ (ηλεκτρική ενέργεια) επιδεινώνουν τα άλλα δύο προβλήματα. Το μικρό μέγεθος υπαγορεύει μικρές ηλεκτρονικές διατάξεις και μπαταρίες. Επομένως, ασθενείς επεξεργαστές και μικρές μνήμες. Μια ακόμα αρκετά κοινή απαίτηση είναι για ανοχή στη χρονική υστέρηση (delay tolerance). Αυτό υπαγορεύει την ανάγκη για αποθήκευση. Επίσης, το χαμηλό ενεργειακό απόθεμα δεν επιτρέπει ισχυρούς επεξεργαστές, οι οποίοι με τη σειρά τους θα μπορούσαν να επεξεργαστούν μεγάλα κομμάτια πληροφορίας.

Είναι αποδεκτό ότι το μεγαλύτερο κομμάτι του ενεργειακού κόστους της λειτουργίας οφείλεται στην επικοινωνία [48]. Ο περιορισμός των περιττών εκπομπών είναι, λοιπόν, ο προφανής τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας. Υπάρχουν και εξαιρέσεις· δίκτυα όπως τα εμποχούμενα δεν υφίστανται δεσμεύσεις ως προς την ενέργεια, ενώ στα δίκτυα αισθητήρων η δέσμευση αυτή είναι καθοριστική.

Συνεπώς τα μειονεκτήματά τους πηγάζουν ιδίως από τις χαμηλές δυνατότητες των κόμβων σε συνδυασμό με την υψηλή δυναμικότητά τους: η κινητικότητα και η ανάγκη για γρήγορη προσαρμογή και αποκέντρωση επιτείνουν τις δυσκολίες αυτές.

Προφανή πλεονεκτήματά τους είναι το χαμηλό κόστος και η ανεξαρτησία από ολιγοπωλιακά δίκτυα ασύρματων επικοινωνιών με σταθερή υποδομή -λόγω της εν γένει μη ύπαρξης και χρήσης σταθερής επίγειας υποδομής. Επίσης, η αποκεντρωμένη φύση τους έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία διάχυση πληροφορίας έστω τοπικά. Έτσι γίνεται προφανές το δυνατό όφελος σε περιβάλλοντα με δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας, χωρίς δυνατότητα ανθρώπινης παρουσίας, με κατεστραμμένη ή απύσχα σταθερή υποδομή, κ.λ.π.

3.4 Παραδείγματα αδόμητων ασυρμάτων δικτύων

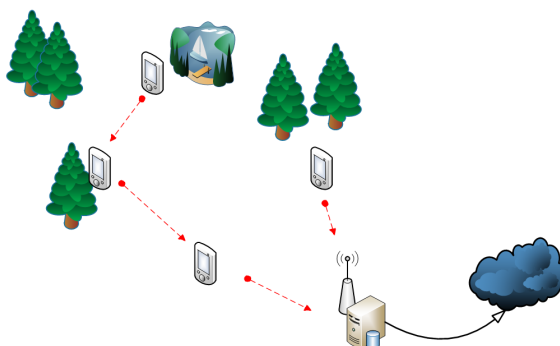
Έχουν προταθεί πολλαπλές εφαρμογές [25] των αδόμητων δικτύων για περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή ή επιθυμητή η χρήση δικτύων με υποδομή:

- Ερευνητικές: Για ερευνητικούς σκοπούς, έχουν αναπτυχθεί δίκτυα ad hoc είτε για βασική έρευνα είτε για να μελετηθούν οι εφαρμογές τους. Ενδεικτικά αναφέρονται ως τέτοια παραδείγματα τα προγράμματα IPAC [31] και IDIRA [32], στα πλαίσια του κοινοτικού πλαισίου 7 (FP7) της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

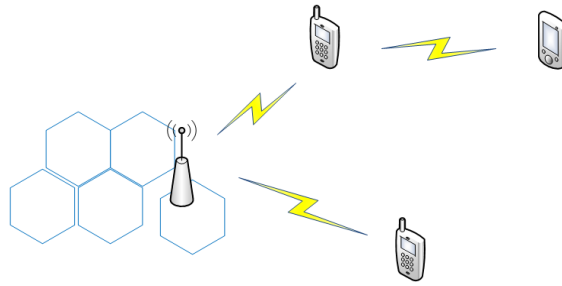
- Στις προσωπικές επικοινωνίες, π.χ. με bluetooth. Αυτό έχει νόημα περισσότερο σε δίκτυα SPAN. Τέτοια δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί και ως υποδομή για μελέτες σε άλλους τομείς, όπως κοινωνικά δίκτυα [38]
- Για επέκταση ασυρμάτων δικτύων: Αυτή μπορεί να γίνει είτε με bluetooth, οπότε ουσιαστικά εμπίπτει στην προηγούμενη κατηγορία, είτε με WiFi. Τοπολογικά οι δυο εκδοχές είναι παρόμοιες με απλή πρακτική εφαρμογή.
- Για προστασία αγρίων ζώων [37]
- Στον τομέα της υγείας
- Σε αποστολές διάσωσης σε φυσικές καταστροφές (disaster relief)
- Στη βιομηχανική παραγωγή
- Σε στρατιωτικές εφαρμογές, και μάλιστα σε τακτικές πεδίου μάχης
- Επιτήρησης και φυσικής ασφάλειας: εφαρμογές περιφρούρησης περιφέρειας (perimeter intrusion detection)
- Η επέκταση σταθερών ασυρμάτων δικτύων
- Ψυχαγωγία σε οχήματα

Υπάρχουν, βέβαια, και αδόμητα δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν και επίγεια υποδομή (ορισμένα MANET). Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις, υπάρχει ιεραρχία μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Αυτή μπορεί να έχει επίπτωση στη δρομολόγηση διότι όλη η πληροφορία (μετρήσεις αισθητήρων) χρειάζεται να διοχετευθεί προς έναν κόμβο-δεξαμενή [44]. Επίσης, είναι δυνατόν κάποιες αποφάσεις να λαμβάνονται κεντρικά και όχι καταναμημένα.

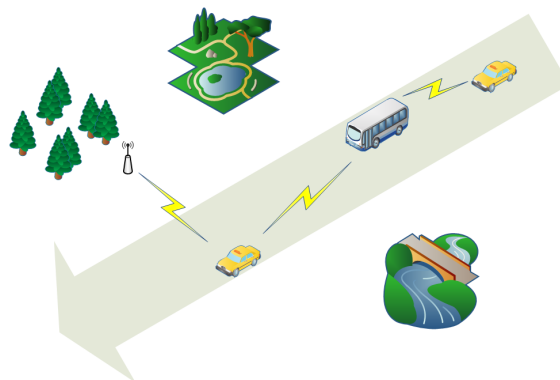
Σημειώνουμε ότι η έννοια των αδόμητων δικτύων δεν περιορίζεται στα ασύρματα. Αντίθετα, αδόμητα φύσεως είναι και κάποια ιδεατά υπερτεθειμένα (overlay) δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν σταθερή φυσική (επίγεια) υποδομή. Τέτοιο παράδειγμα είναι τα δίκτυα peer-to-peer. Στο εξής, ο όρος «δίκτυο» θα αναφέρεται σε ασύρματο αδόμητο δίκτυο ad hoc.



Σχήμα 4: Δίκτυο ασυρμάτων αισθητήρων



Σχήμα 5: Επέκταση δικτυακής πρόσβασης



Σχήμα 6: Εποχούμενο αδόμητο δίκτυο

3.5 Η ανάγκη για διάδοση πληροφορίας σε αδόμητα ασύρματα δίκτυα και δίκτυα αισθητήρων

Στα δίκτυα που μελετάμε συχνά ανακύπτει η ανάγκη για διαμοιρασμό πληροφορίας μεταξύ των κόμβων.

Αυτή μπορεί να είναι πληροφορία ελέγχου, για παράδειγμα στα πλαίσια κάποιου πρωτοκόλλου δρομολόγησης, η οποία εξυπηρετεί την ανεύρεση μονοπατιών στο δίκτυο ή μια εντολή ελέγχου από κάποιον ιεραρχικά ανώτερο κόμβο προς άλλους για σκοπούς χρονοπρογραμματισμού (scheduling). Στα πλαίσια μιας εφαρμογής εμπίπτει ένα σήμα έκτακτης ανάγκης σε μια αποστολή διάσωσης μετά από φυσική καταστροφή. Διαχεόμενη πληροφορία μπορεί να είναι οι μετρήσεις αισθητήρων οι οποίες παράγονται περιοδικά και πρέπει να διαδοθούν σε ολόκληρο το δίκτυο ώστε να ληφθούν οι κατάλληλες αποφάσεις (αξιοποίηση επίγνωσης πληροφορίας πλαισίου).

Πάντως, λόγω της απουσίας σταθερής υποδομής και της άγνοιας της συνολικής τοπολογίας του δικτύου, συχνά πληροφορία χρήστη ή σηματοδосία (μηνύματα ελέγχου) είναι αναγκαίο να διαχυθούν ευρέως στο δίκτυο για να εξυπηρετηθεί ο σκοπός τους. Η παρούσα ΔΔ επικεντρώνεται σε τέτοιου είδους διάδοση πληροφορίας σε ασύρματα αδόμητα δίκτυα.

4. ΕΠΙΔΗΜΙΚΗ ΔΙΑΔΟΣΗ

4.1 Η Ανάγκη και Οι Αρχές

Ας θεωρήσουμε δίκτυο περιγραφόμενο από γράφο $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$. Ένα υποσύνολο κόμβων $V_i \in \mathcal{V}$ κατέχει ένα κομμάτι πληροφορίας και οι κόμβοι αυτοί ονομάζονται *μολυσμένοι*. Συμβολίζουμε το ποσοστό τους με $i = |V_i|/|\mathcal{V}|$. Η πληροφορία αυτή πρέπει να δοθεί σε οσους περισσότερους κόμβους είναι δυνατόν. Οι κόμβοι που δεν κατέχουν την πληροφορία αυτοί ονομάζονται *ευάλωτοι*.

Στα ασύρματα δίκτυα η εκπομπή είναι ολοκατευθυντική, εφ' όσον το επιτρέπουν τα φυσικά εμπόδια. Έτσι όλοι οι κόμβοι εντός της εμβέλειας ενός κόμβου είναι δέκτες. Βέβαια, είναι γενικά αδύνατον να είναι όλοι οι κόμβοι του δικτύου εντός της εμβέλειάς του. Για το λόγο αυτό, η πληροφορία μεταδίδεται σε μακρινούς κόμβους μέσω πολλών αλμάτων (multihop). Οι περισσότεροι κόμβοι έχουν και το ρόλο του ενδιάμεσου-μεσολαβητή (relay).

Η φυσική ολοκατευθυντικότητα ισοδυναμεί με λογική ευρυεκπομπή (broadcast). Η ευρυεκπομπή είναι χρήσιμη για διαδικασίες paging, δρομολόγησης, κ.λ.π. Ιδίως όταν πρόκειται για τοπολογίες που μεταβάλλονται συνεχώς.

Ενώ όμως είναι γενικά αποτελεσματική, είναι διαισθητικά αντιληπτό ότι μπορεί να προκαλεί συμφόρηση των ασυρμάτων καναλιών, ακόμα κι όταν πρόκειται για εκπομπές στις οποίες ο πομπός δεν αιτεί επιβεβαίωση ορθήςλήψης unacknowledged.

Επειδή ο συγχρονισμός μεταξύ κόμβων είναι δύσκολος ή ασύμφορος, ο χρονοπρογραμματισμός είναι επίσης δύσκολος. Έτσι η απλούστερη αποκεντρωμένη μέθοδος για να διαδοθεί η πληροφορία είναι η άνευ όρων ευρυεκπομπή από κάθε μολυσμένο κόμβο προς τους γείτονές του. Η μέθοδος αυτή λέγεται flooding και παρά τα πλεονεκτήματά της έχει και σημαντικά μειονεκτήματα [41]:

- Περιττές εκπομπές με αποτέλεσμα τη μεγάλη σπατάλη ενέργειας. Οι unacknowledged εκπομπές και η ύπαρξη φυσικών εμποδίων επιτείνουν αυτό το πρόβλημα.
- Αναμενόμενη είναι και η συμφόρηση των ασυρμάτων καναλιών. Ένας κόμβος που έχει μόλις λάβει την πληροφορία, την επανεκπέμπει. Αλλά ανάμεσα στους δυνάμει δέκτες του είναι και ο προηγούμενος εκπομπός.
- Στην περίπτωση που το επίπεδο σύνδεσης (data link layer) ανιχνεύει τις συγκρούσεις, έχουμε έναν ακόμα παράγοντα που δυσκολεύει την επικοινωνία.

Η κατάσταση αυτή περιγράφεται συνολικά με τον όρο the broadcast storm problem [41]. Η σοβαρότητα των πιο πάνω προβλημάτων έχει δείχθει [61], [41]. Πιο σοβαρό είναι το γεγονός ότι η αύξηση των broadcasts πολύ σύντομα παύει να έχει όφελος. Έτσι, μετά από λίγες λήψεις από έναν κόμβο, δεν αυξάνεται ουσιαστικά η περιοχή που καλύπτει η διαχεόμενη πληροφορία [41]. Για την αντιμετώπισή τους, προτείνονται δύο διαφορετικές μεταξύ τους προσεγγίσεις:

- Σύνοψη πληροφορίας (data aggregation)
- Πιθανοκρατική διάδοση φήμης (probabilistic gossiping, PG), η οποία κατά κύριο λόγο μας απασχολεί σ' αυτή την έρευνα.

Αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά στα ακόλουθα.

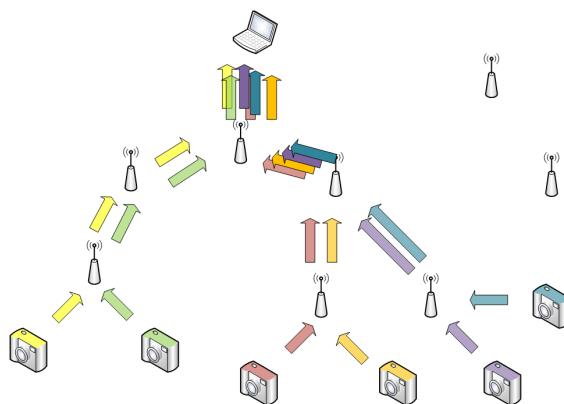
4.2 Σύνοψη (σύντηξη) πληροφορίας (information aggregation)

Η σύνοψη πληροφορίας έγκειται στη χρήση υπολογιστικής ισχύος των ενδιάμεσων κόμβων για την επεξεργασία των προς μετάδοση δεδομένων με στόχο τη μείωση του όγκου τους και συνεπώς την εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό μπορεί να γίνεται:

- Κατά τη downlink μετάδοση προς τα φύλλα ερωτημάτων ή ενδιαφερόντων (queries, interest posting) από έναν κόμβο-ρίζα ή κόμβο-καταβόθρα
- Κατά την uplink μετάδοση δεδομένων από αισθητήρες προς τον κόμβο-καταβόθρα.

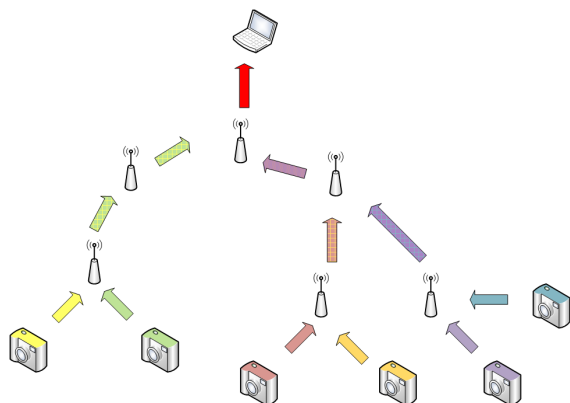
Για τη μετάδοση της συνοψισμένης πληροφορίας αποκαθίσταται και χρησιμοποιείται μια δενδρικού τύπου ιεραρχία. Αυτή αποτελείται από υποσύνολο των κόμβων του δικτύου. Το δίκτυο που σχηματίζεται απ' αυτούς είναι επίσης υποσύνολο του γράφου του δικτύου. Αυτοί οι συνοψίζοντες κόμβοι (aggregators) εκλέγονται σύμφωνα με κάποιον αλγόριθμο και πιθανώς να εναλλάσσονται ώστε να αποφευχθεί η εξάντληση του ενεργειακού τους αποθέματος.

Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται η προώθηση δεδομένων προς κόμβο-καταβόθρα χωρίς σύνοψη. Μερικοί ενδιάμεσοι κόμβοι επιβαρύνονται ενεργειακά με πολλαπλές εκπομπές. Τα βέλη διαφορετικών χρωμάτων αποδίδουν δεδομένα προερχόμενα από τις αντίστοιχες πηγές. Στο σχήμα 7 απεικονίζεται η μετάδοση της ίδιας πληροφορίας με σύνοψη που διεξάγεται στους ενδιάμεσους κόμβους.



Σχήμα 7: Προώθηση πληροφορίας προς κόμβο-καταβόθρα χωρίς σύνοψη δεδομένων

Διακρίνουμε τη σύνοψη δεδομένων ως εξής:



Σχήμα 8: Προώθηση πληροφορίας προς κόμβο-καταβόθρα με σύνοψη δεδομένων

- Με ελάττωση μεγέθους. Στην περίπτωση αυτή τα ληφθέντα μηνύματα γίνονται αντικείμενο επεξεργασίας και η πληροφορία που περιέχεται σ' αυτά χρησιμοποιείται για τη σύνθεση συνοπτικότερης πληροφορίας, π.χ. μέσου όρου, ελάχιστης τιμής κ.λ.π. Η συνοψισμένη πληροφορία πολλών προηγούμενων μηνυμάτων εκπέμπεται με ένα μοναδικό μήνυμα, επιτρέποντας έτσι την εξοικονόμηση ενέργειας.
- Χωρίς ελάττωση μεγέθους. Η περίπτωση αυτή περιλαμβάνει και πάλι την εκπομπή ενός μηνύματος αντί πολλών, αλλά αυτό περιέχει όλη την πληροφορία των προηγούμενων. Με τον τρόπο αυτό, η εξοικονόμηση ενέργειας οφείλεται στις λιγότερες κεφαλίδες (headers) μηνυμάτων (lower overhead).

Στη σύνοψη πληροφορίας έχουν σημαντικό ρόλο οι εξής παράγοντες:

- Δικτυακά πρωτόκολλα, συμπεριλαμβανομένων των πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Η σύνοψη δεδομένων είναι συνήθως περιοδική ή περίπου περιοδική. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να είναι [44]:
 - Απλή περιοδική. Ο συνοψίζων κόμβος χρησιμοποιεί όλα τα δεδομένα που έλαβε κατά τη διάρκεια μιας περιόδου για να συνθέσει την πληροφορία που θα εκπέμψει ακολούθως στο δέντρο σύνοψης.
 - Περιοδική ανά άλμα: Ο συνοψίζων κόμβος περιμένει να λάβει πληροφορία από όλα τα παιδιά του (ιεραρχικά άμεσα κατωτέρους του κόμβους) πριν εκπέμψει. Μόνο αφού παρέλθει ένα οριακό χρονικό περιθώριο παύει να περιμένει. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί πιθανή απώλεια δεδομένων στο ασύρματο κανάλι.
 - Προσαρμοστική περιοδική ανά άλμα: Όπως και η προηγούμενη με τη διαφορά ότι ο χρόνος εκπνοής της αναμονής εξαρτάται από τη θέση του κόμβου στο δέντρο σύνοψης.
- Συναρτήσεις σύνοψης πληροφορίας. Ο σκοπός των συναρτήσεων αυτών είναι προφανής. Μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια:

- Σε χωρίς- και με απώλεια πληροφορίας ανάλογα με το αν είναι εφικτή η πλήρης ανασύνθεση των αρχικών δεδομένων. Για παράδειγμα ο υπολογισμός μέσης τιμής συνεπάγεται απώλεια πληροφορίας, ενώ η συμπίεση όχι.
 - Με αγνόηση διπλότυπων δεδομένων ή όχι. Για παράδειγμα η εξαγωγή ελάχιστης τιμής αγνοεί το αν έχει ληφθεί μια τιμή πολλές φορές, ενώ η μέση τιμή όχι.
- Αναπαράσταση πληροφορίας. Εδώ λαμβάνονται υπ' όψη οι περιορισμένες δυνατότητες των κόμβων για επεξεργασία και αποθήκευση. Η συμπίεση δεδομένων βοηθά στο θέμα αυτό και μάλιστα ένα σημαντικό βήμα προόδου ήταν οι τεχνικές κατανομής κωδικοποίησης πηγής (distributed source coding) [47]

Τα προβλήματα της εύρεσης καταλλήλων μεθόδων αναπαράστασης δεδομένων και βέλτιστων συναρτήσεων σύνοψης είναι αλληλοεξαρτώμενα και η επίλυση κάθε άλλο παρά τετριμμένη. Η χρήση χρονικής, χωρικής και σημασιολογικής συσχέτισης για το σκοπό αυτό είναι πεδίο ενεργού έρευνας [44], [46]. Η σύνοψη πληροφορίας μπορεί να περιγραφεί κατά βάση από τον ψευδοκώδικα της λίστας 1.

Λίστα 1: Σύνοψη πληροφορίας

```

information received during  $[t - \delta t, t) = I(t) = (i(t - \delta t), i(t - \delta t + 1), \dots, i(t - 1), i(t))$ 

aggregation function =  $A(t) = A(I(t)) = \alpha(t)$  e.g.  $\alpha(t) = \frac{1}{\delta t} \sum_{\tau=t-\delta t}^{t-1} i(\tau)$ 

for each  $t : \text{mod}(t, n) = 0$ 
    calculate  $A(t)$ 
    transmit  $A(t)$ 
    
```

Προφανώς, το ενεργειακό κόστος της εκπομπής συνοψισμένης πληροφορίας είναι πολύ χαμηλότερο από την εκπομπή ατόφιας της ήδη ληφθείσας πληροφορίας. Στην τελευταία περίπτωση, η λίστα 1 εκφυλίζεται στη λίστα 2.

Λίστα 2: Σύνοψη πληροφορίας

```

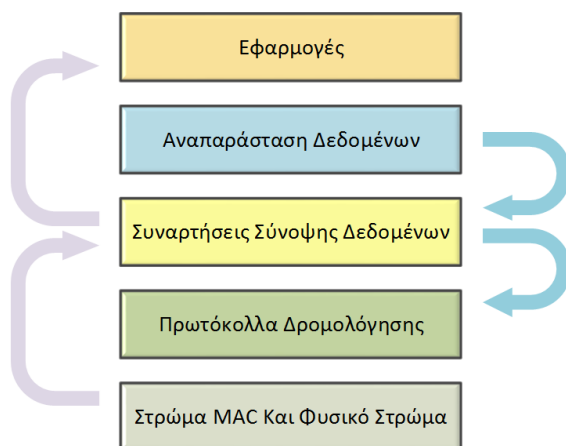
information received during  $[t - \delta t, t) = I(t) = (i(t - \delta t), i(t - \delta t + 1), \dots, i(t - 1), i(t))$ 

for each  $t$ 
    transmit  $I(t)$ 
    
```

Η περιοδικότητα των εκπομπών επηρεάζει άμεσα το ενεργειακό κόστος. Το ισοζύγιο μεταξύ ενεργειακής οικονομίας και απώλειας ακρίβειας έχει εξεταστεί αρκετά λεπτομερώς. Με τη βοήθεια της σύνοψης πληροφορίας, τα προβλήματα του flooding αντιμετωπίζονται. Πλεονεκτήματα της σύνοψης πληροφορίας είναι η σημαντική μείωση του ενεργειακού κόστους λόγω εκπομπών [44] (ιδίως στην περίπτωση σύνοψης με ελάττωση μεγέθους. Επίσης, ακόμα και όταν δεν υπάρχει το πρόβλημα των χαμηλών ενεργειακών αποθεμάτων, αντιμετωπίζεται η συμφόρηση λόγω ανταγωνισμού στο ασύρματο κανάλι (π.χ. [48]). Από την άλλη μεριά, η τεχνική παρουσιάζει και μειονεκτήματα:

- Απώλεια ακρίβειας στην περίπτωση που έχουμε σύνοψη με απώλεια πληροφορίας. Εδώ εντοπίζεται η ανάγκη εξισορρόπησης μεταξύ ενεργειακής οικονομίας και διατήρησης της ακρίβειας σε ανεκτά επίπεδα [44].
- Η ανάγκη συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων
- Η ανάγκη ύπαρξης λογικής για επιλογή και εναλλαγή συνοπιζόντων κόμβων ώστε να μην επιμερίζεται το ενεργειακό κόστος
- Οι πιθανές επιπτώσεις και απαιτήσεις για μνήμη των κόμβων δεν έχουν μελετηθεί αρκετά.

Τέλος εντοπίζουμε το γεγονός ότι η τεχνική περιέχει στοιχεία διαστρωμάτωσης (cross-layering), όπως δείχνεται στο σχήμα 9, το οποίο αναπαράγεται από το [44]



Σχήμα 9: Αναπαράσταση του cross-layering στη σύνοψη δεδομένων

4.3 Επιδημική Διάδοση

Η προφανής μέθοδος για την αποφυγή των προβλημάτων που πηγάζουν από την άνευ όρων ευρυεκπομπή (flooding) είναι η *επιδημική διάδοση* (Ε.Δ.) ή πιθανοκρατική διάδοση φήμης (probabilistic gossiping). Η τεχνική αυτή έγκειται στη διάχυση πληροφορίας με την ευρυεκπομπή της από κάθε κατέχοντα κόμβο με πιθανότητα p γενικά μικρότερη της μονάδας. Προφανώς η περίπτωση $p = 1$ εκφυλίζεται σε άνευ όρων ευρυεκπομπή (flooding). Η πιθανότητα p ονομάζεται πιθανότητα προώθησης (forwarding probability).

Για το φορμαλισμό της επιδημικής διάδοσης δανειζόμαστε από την επιδημιολογία τη μαθηματική αντιμετώπιση της εξάπλωσης μιας επιδημίας. Σ' έναν πληθυσμό ατόμων στον οποίο εξαπλώνεται μια ασθένεια επιδημικά, κάθε άτομο μπορεί να είναι μολυσμένο ή ευάλωτο (υγιές, επιρρεπές). Κατ' αντιστοιχία με το βιολογικό ανάλογο, στο ασύρματο αδόμητο δίκτυο, αντί για ασθένεια, εξαπλώνεται ένα συγκεκριμένο κομμάτι πληροφορίας. Για το λόγο αυτό ονομάστηκαν οι κόμβοι μολυσμένοι και ευάλωτοι ανάλογα με το αν έχουν ήδη την

πληροφορία. Προφανώς, αντίθετα με το ανάλογο από τη βιολογία, η εξάπλωση της πληροφορίας (δηλ. της επιδημίας) είναι επιθυμητή. Εναλλακτικά μπορούμε να θεωρήσουμε τη διάδοση μιας φήμης. Σ' έναν πληθυσμό ατόμων στον οποίο εξαπλώνεται η φήμη επιδημικά, κάθε άτομο μπορεί να είναι πληροφορημένο ή σε άγνοια (informed, ignorant).

Για κάθε μολυσμένο κόμβο, τη χρονική στιγμή t διεξάγεται πείραμα τύχης, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα αληθές με πιθανότητα $p : 0 < p < 1$ και ψευδές με πιθανότητα $1 - p$. Εάν το αποτέλεσμα είναι αληθές, ο κόμβος ευρυσκεπτεμπει τη μολύνουσα πληροφορία. Στη βιολογία, ένα μολυσμένο άτομο μπορεί τη χρονική στιγμή t να θεραπευτεί από την πάθηση με πιθανότητα δ . Αν δεν θεραπευτεί, έρχεται σε επαφή με τυχαίο υποσύνολο ευάλωτων και μεταδίδει την επιδημία σε καθέναν απ' αυτούς με πεπερασμένη πιθανότητα. Αντίστοιχα, στο μοντέλο μας, ένας μολυσμένος κόμβος μπορεί τη χρονική στιγμή t να θεραπευτεί, δηλαδή να χάσει την πληροφορία με πιθανότητα δ . Η ιδέα της θεραπείας από επιδημία συνοψίζει όλους τους πιθανούς μηχανισμούς απώλειας της πληροφορίας: εκπνοή της εγκυρότητάς της, φθορά της στο αποθηκευτικό μέσο, κ.ά. Αν ο μολυσμένος κόμβος δεν θεραπευτεί, έρχεται σε επαφή με τυχαίο υποσύνολο ευάλωτων και τους μεταδίδει την επιδημία με πεπερασμένη πιθανότητα. Δηλαδή, ένας ευάλωτος κόμβος μπορεί να λάβει την πληροφορία και να μολυνθεί, με πιθανότητα έστω $\alpha < 1$.

Έστω ότι το δίκτυο που περιγράφεται από το γράφο $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ αποτελείται από N το πλήθος κόμβους. Το υποσύνολο κόμβων $V_i \in \mathcal{V}$ που κατέχει ένα κομμάτι πληροφορίας είναι οι μολυσμένοι. Η πληροφορία αυτή πρέπει να δοθεί σε όσους περισσότερους κόμβους είναι δυνατόν. Ισχύει $|\mathcal{V}| = N = I + S$ όπου I και S τα πλήθη των μολυσμένων και των ευάλωτων κόμβων αντίστοιχα.

Είναι δυνατόν επί πλέον να θεωρήσουμε ότι οι θεραπευόμενοι δεν ξαναγίνονται ευάλωτοι και δε μπορούν να μολυνθούν εκ νέου, τουλάχιστον όχι άμεσα. Τότε ονομάζονται ανοσοποιημένοι (άνοσοι) ή απομακρυσμένοι (immune, removed), δηλ. έχουν αφαιρεθεί από τη διαδικασία της εξάπλωσης πληροφορίας. Αν συμβολίσουμε το πλήθος τους με R , ισχύει προφανώς $N = I + S + R$. Για λόγους πληρότητας εισάγουμε και την πιθανότητα γ με την οποία ένας ανοσοποιημένος κόμβος μεταπίπτει και πάλι στην ευάλωτη κατάσταση.

Αναφέρουμε τρία βασικά μοντέλα:

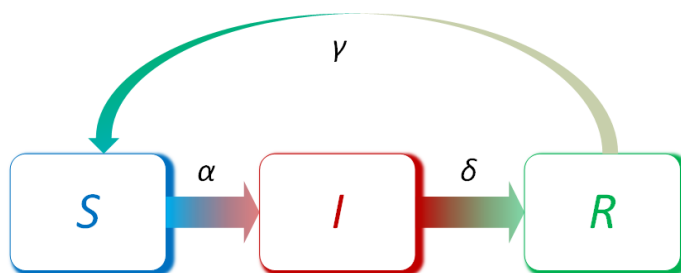
- Το μοντέλο SIS (susceptible-infected-susceptible), στο οποίο οι μολυσμένοι που θεραπεύονται ξαναγίνονται αμέσως ευάλωτοι.
- Το μοντέλο SIR (susceptible-infected-removed), στο οποίο οι θεραπευόμενοι ανοσοποιούνται και δεν ξαναμολύνονται ποτέ.
- Το μοντέλο SIRS (susceptible-infected-removed-susceptible), στο οποίο οι θεραπευόμενοι διατηρούν την ανοσία τους στην επιδημία για πεπερασμένο χρονικό διάστημα, μετά το οποίο μεταπίπτουν εκ νέου στην κατάσταση του ευάλωτου και μπορούν να ξαναμολυνθούν.

Εισάγουμε το συμβολισμό του πίνακα 4 στον οποίον αναφέρονται τα μοντέλα που μόλις περιγράφηκαν.

Πίνακας 4: Συμβολισμός για την επιδημική διάδοση για μοντέλα SIS (susceptible - infected - susceptible) και SIR (susceptible - infected - removed) και SIRS (susceptible - infected - removed-susceptible)

Περιγραφή	Μοντέλο SIS	Μοντέλα SIS και SIRS
Πλήθος κόμβων	$N = V $	$N = V $
Πλήθος μολυσμένων κόμβων	$I = V_i $	$I = V_i $
Ποσοστό μολυσμένων κόμβων	$i = V_i / V $	$i = V_i / V $
Πλήθος μη μολυσμένων (ευάλωτων) κόμβων	$S = N - I$	$S = N - I - R$
Ποσοστό μη μολυσμένων (ευάλωτων) κόμβων	$s = 1 - i$	$s = 1 - i - r$
Ποσοστό άνοσων κόμβων	-	$r = 1 - i - s$
Πλήθος άνοσων κόμβων	-	$R = N - I - S$
Πιθανότητα μόλυνσης	α	α
Πιθανότητα θεραπείας	δ	δ
Πιθανότητα μετάπτωσης από την ανοσοποιημένη στην ευάλωτη κατάσταση	-	γ

Η διαδικασία της μετάπτωσης μεταξύ των καταστάσεων απεικονίζεται σχηματικά στο διάγραμμα καταστάσεων του σχήματος 10.

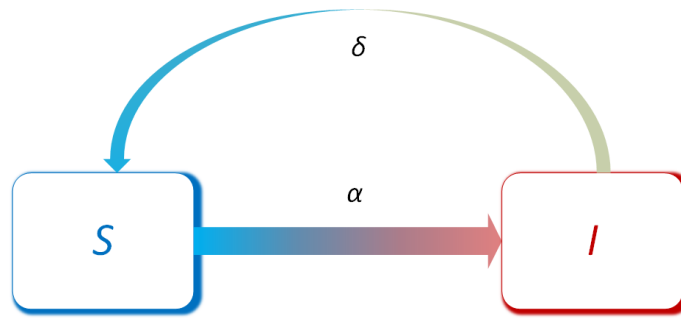


Σχήμα 10: Μετάβαση μεταξύ ευάλωτης, μολυσμένης και άνοσης (απομακρυσμένης) κατάστασης [49]

Υπάρχουν αρκετά γενικά αποδεκτά μοντέλα ανάλογα με τη συμπεριφορά των θεραπευόμενων κόμβων. Ήδη αναφέρθηκαν τα πιο συνηθισμένα, τα οποία εξετάζονται λεπτομερέστερα στα ακόλουθα:

4.3.1 SI ή SIS susceptible-infected-susceptible

Θεωρούμε ότι μετά τη θεραπεία του ο μολυσμένος κόμβος μεταπίπτει εκ νέου στην κατάσταση του ευάλωτου και μπορεί να ξαναμολυνθεί άμεσα. Αναφερόμαστε δηλαδή σε μόλυνση χωρίς ανοσοποίηση. Εδώ ισχύουν οι συμβολισμοί S, I για τους επί μέρους πληθυσμούς των κόμβων. Το μοντέλο αυτό δεν περιγράφεται με ακρίβεια από το σχήμα 10, αλλά από το σχήμα 11. Προφανώς, η κατάσταση R δεν υφίσταται και η πιθανότητα γ είναι μηδενική.



Σχήμα 11: Μετάβαση μεταξύ ευάλωτης και μολυσμένης κατάστασης σύμφωνα με το μοντέλο SIS

Στο μοντέλο SIS, σε κάθε χρονική στιγμή t οι ρυθμοί μεταβολής των μολυσμένων και ευπαθών κόμβων δίνονται από τις εξισώσεις (4.1) και (4.2) [49], [6], [9], [57].

$$\frac{dI}{dt} = \alpha SI - \delta I \quad (4.1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \delta I - \alpha SI \quad (4.2)$$

Αν θεωρήσουμε τις παραμέτρους α και δ σταθερές, το σύστημα των (4.1) και (4.1) έχει τη λύση που παρουσιάζεται στην εξίσωση (4.3) [49], [57].

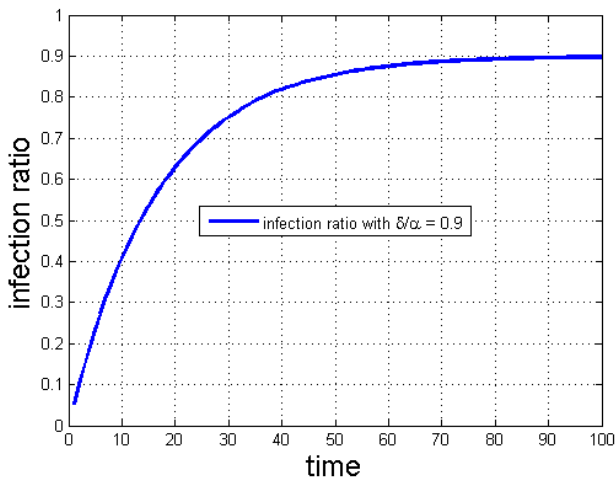
$$I(t) = \frac{K}{1 + (\frac{K}{I_0} - 1) \exp(-I_0 \alpha K t)} \quad (4.3)$$

Η παράμετρος K ορίζεται ως $K = 1 - \delta/\alpha$, όπου α και δ οι πιθανότητες μόλυνσης και θεραπείας αντίστοιχα. Το I_0 είναι το πλήθος μολυσμένων τη χρονική στιγμή μηδέν $I(0)$

Η λύση που δίνεται στην 4.3 απεικονίζεται γραφικά στο σχήμα 12. Από την 4.3 προκύπτει ότι η τιμή στην οποία τείνει ασυμπτωτικά το ποσοστό των μολυσμένων κόμβων είναι $1 - \delta/\alpha$. Πρέπει όμως να αναφερθεί ότι η λύση που παρουσιάζεται είναι για τιμές των παραμέτρων δ και α τέτοιες που να οδηγούν στην επιβίωση της επιδημίας. Αυτό είναι έκφραση της ανάγκης να ξεπερασθεί το επιδημικό κατώφλι, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.

4.3.2 SIR susceptible-infected-removed

Εδώ υποθέτουμε ότι ο θεραπευμένος κόμβος δεν είναι δυνατόν να μολυνθεί ποτέ πάλι, αντίστοιχα με έναν άνθρωπο ο οποίος μετά τη θεραπεία του από μια μολυσματική ασθένεια έχει αναπτύξει αντισώματα. Εισάγουμε και το συμβολισμό R για το πλήθος των θεραπευμένων κόμβων. Προφανώς ισχύει $S + I + R = N$ σε κάθε χρονική στιγμή. Οι θεραπευόμενοι κόμβοι δεν λαμβάνουν εκ νέου μέρος στη δυναμική ισορροπία μεταξύ μολυσμένης και ευάλωτης κατάστασης, δηλαδή παραμένουν ανοσοποιημένοι στην στην επιδημία και



Σχήμα 12: Στο μοντέλο SIS το ποσοστό των μολυσμένων κόμβων τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή $1 - \delta/\alpha$.

«απομακρύνονται, βγαίνουν από το παιχνίδι». Αφού, λοιπόν, δεν επανέρχονται ποτέ στην ευάλωτη κατάσταση, η πιθανότητα γ του σχήματος 10 είναι μηδενική και οι προαναφερθείσες εξισώσεις (4.1) και (4.2) αντικαθίστανται από τις (4.4)-(4.6). Το σχήμα 10 μεταπίπτει στο σχήμα 13.

$$\frac{dI}{dt} = \alpha SI - \delta I \tag{4.4}$$

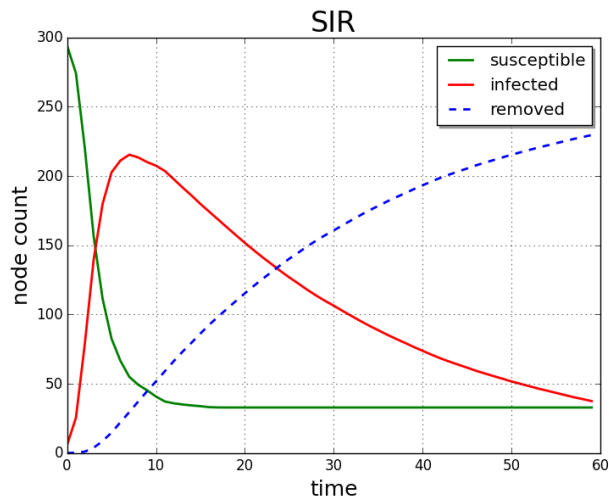
$$\frac{dS}{dt} = -\alpha SI \tag{4.5}$$

$$\frac{dR}{dt} = -\delta I \tag{4.6}$$



Σχήμα 13: Μετάβαση μεταξύ ευάλωτης, μολυσμένης και άνοσης (απομακρυσμένης) κατάστασης στο μοντέλο SIR.

Η λύση των 4.4 - 4.6 δεν δίνεται αναλυτικά. Μπορεί υπολογιστικά να βρεθεί ότι παίρνει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 14, με την κατάλληλη σχέση μεταξύ των μεγεθών δ και α .



Σχήμα 14: Η χρονική εξέλιξη των πληθυσμών S, I και R στο μοντέλο SIR. Η σχέση της ποσότητας δ/α με το επιδημικό κατώφλι είναι τέτοια που η επιδημία ατονεί καθώς η πλειοψηφία των κόμβων τείνει να ανοσοποιηθεί.

4.3.3 SIRS susceptible-infected-removed-susceptible

Εάν πάλι υποθέσουμε ότι η κατάσταση ανοσίας (κατάσταση R του σχήματος 10) έχει χρονικά πεπερασμένη διάρκεια, τότε μεταπίπτουμε στο μοντέλο SIRS στο οποίο ισχύουν οι εξισώσεις 4.7-4.9

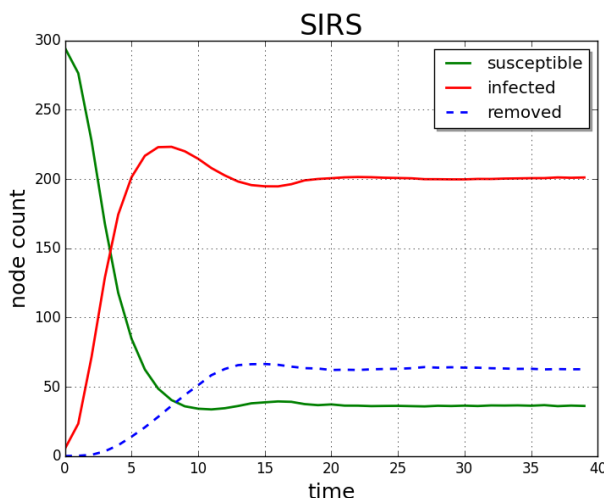
$$\frac{dI}{dt} = \alpha SI - \delta I \tag{4.7}$$

$$\frac{dS}{dt} = -\alpha SI + \gamma R \tag{4.8}$$

$$\frac{dR}{dt} = -\alpha I - \delta I \tag{4.9}$$

Παρατηρούμε εδώ ότι η κατάσταση R επανατροφοδοτεί την κατάσταση I . Αν και δεν είναι δυνατή η αναλυτική επίλυση του συστήματος, μπορούμε με υπολογιστικές μεθόδους να αναπαραστήσουμε γραφικά τη χρονική εξέλιξη της μόλυνσης γι' αυτό το μοντέλο όπως φαίνεται στο σχήμα 15.

Στο σχήμα 15 η επιδημία επιβιώνει και όλοι οι πληθυσμοί (S, I, R) τείνουν ασυμπτωτικά σε σταθερές τιμές. Έτσι, πέρα από τους φορείς (μολυσμένους) και τους ευάλωτους έχουμε και ένα συνεχώς παραμένον ποσοστό ανοσοποιημένων κόμβων.



Σχήμα 15: Η χρονική εξέλιξη των πληθυσμών S, I και R στο μοντέλο SIRS.

4.3.4 Το επιδημικό κατώφλι ή σημείο καμπής

Στα προηγούμενα, υποθέσαμε σιωπηρά ότι η επιδημία εξελίσσεται και επιβάλλεται. Στην πραγματικότητα η εξέλιξη της εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ των μεγεθών δ και α . Η ανάγκη να πληρούν οι παράμετροι του προβλήματος μια συνθήκη για να επικρατήσει η επιδημία αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2. Πράγματι, αποδεικνύεται ότι υπάρχει ένα κατώφλι τ , του οποίου ο ρόλος φαίνεται στην εξίσωση 4.10 [53], [54].

$$\text{η επιδημία} \begin{cases} \text{εξαπλώνεται, αν} & > \tau, \\ \text{ατονεί, αν} & \leq \tau \end{cases} \quad (4.10)$$

Το σημείο τ λέγεται και επιδημικό κατώφλι (epidemic threshold), βασικός αριθμός αναπαραγωγής (basic reproduction number) ή σημείο καμπής (tipping point). Αν θεωρήσουμε ότι το δίκτυο είναι ομογενές και περιγράφεται από έναν πλήρως συνδεδεμένο γράφο, τότε το κατώφλι έχει την τιμή 1 και η εξίσωση (4.10) μεταπίπτει στην 4.11

$$\text{η επιδημία} \begin{cases} \text{εξαπλώνεται, αν} & > 1, \\ \text{ατονεί, αν} & \leq 1 \end{cases} \quad (4.11)$$

Η ύπαρξη κατωφλίου και το κριτήριο των εξισώσεων 4.10 ή 4.11 ισχύει για τα μοντέλα SIS, SIR και SIRS. Στην περίπτωση του SIS, με την προϋπόθεση ότι αγνοούμε τη συνδεσιμότητα μεταξύ κόμβων, είδαμε [49], [57] ότι το ποσοστό μολυσμένων κόμβων (infection ratio) τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή $1 - \delta/\alpha$, εφ' όσον ισχύει βέβαια ότι $\delta/\alpha > 1$. Στην περίπτωση του SIR, το ότι η επιδημία επιβάλλεται σημαίνει ότι το πλήθος των ευάλωτων συγκλίνει σε πολύ χαμηλή τιμή, αλλά και ότι οι μολυσμένοι ασυμπτωτικά μεταπίπτουν σε ανοσοποιημένους. Η πλήρης συνδεσιμότητα, όμως, δεν είναι ρεαλιστική υπόθεση. Τα περισσότερα ασύρματα αδόμετα δίκτυα λειτουργούν σε δύσκολες και συχνά δυναμικές

συνθήκες. Έστω, λοιπόν, ότι η γεινίαση μεταξύ των κόμβων ανά δύο περιγράφεται από πίνακα γεινίασης (adjacency matrix). Αυτός μπορεί να είναι σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της διάχυσης της πληροφορίας είτε μεταβλητός. Στην τελευταία περίπτωση, η γεινίαση μπορεί να αποδοθεί από μια χρονική ακολουθία πινάκων $A_{1, 2, 3, \dots, t, \dots}$. Η μεταβολή του μπορεί να είναι είτε στοχαστική είτε ντετερμινιστική. Η εξέλιξη της επιδημίας στην περίπτωση μεταβαλλόμενης γεινίασης έχει μελετηθεί και για ορισμένες ειδικές περιπτώσεις [51], [52] αλλά και πιο γενικά [53], [50]. Αποδεικνύεται [53] ότι γενικά το επιδημικό κατώφλι δίνεται από την έκφραση της εξίσωσης (4.12).

$$\tau = \frac{1}{\lambda_{1,A}} \quad (4.12)$$

όπου με $\lambda_{1,A}$ συμβολίζεται η μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα γεινίασης. Ας θεωρήσουμε τώρα την ενδιαφέρουσα περίπτωση κατά την οποία οι τιμές της ακολουθίας A_t είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους (Poisson). Τότε το κατώφλι δίνεται από την εξίσωση (4.13) [53] και προσεγγιστικά [53] από την (4.14).

$$\tau = \frac{1}{\lambda_A} \quad (4.13)$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda_{\bar{A}}} \quad (4.14)$$

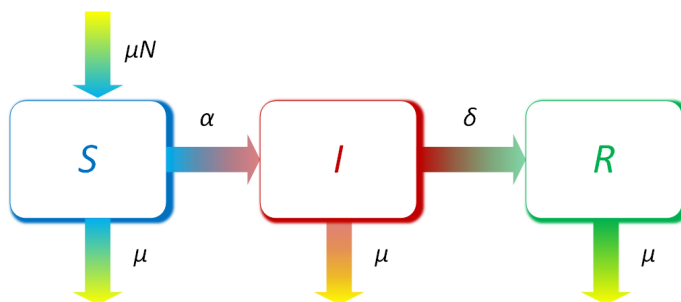
Στις (4.13) και (4.14), \bar{A} είναι η μέση τιμή του και $\lambda_{\bar{A}}$ η ιδιοτιμή του πίνακα \bar{A} και λ_A η μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα.

4.3.5 Επιδημική διάδοση SIR με δημογραφική κίνηση - SIR model with demography

Τα μοντέλα που περιγράψαμε περιέχουν τη σιωπηρή υπόθεση ότι το δίκτυο απαρτίζεται πάντα από τους ίδιους κόμβους. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή στο δίκτυο εισέρχονται ή αποχωρούν κάποιοι έχουμε *επιδημική διάδοση με δημογραφική κίνηση* (epidemic dissemination with demography) [58]. Ας δούμε συνοπτικά την εκδοχή του μοντέλου SIR όταν υπάρχει δημογραφική κίνηση. Στο SIR ο πληθυσμός κόμβων νοείται καταναμημένος σε τρεις ομάδες S, I και R , ανάλογα με το σε ποια κατάσταση βρίσκονται οι κόμβοι. Θεωρούμε ένα ρυθμό εκροής από κάθε ομάδα, τον οποίον συμβολίζουμε με μ . Επί πλέον, θεωρούμε κι έναν ρυθμό εισροής στην κατάσταση S μόνο, δηλαδή ότι τα εισερχόμενα άτομα είναι αποκλειστικά υγιή (ευάλωτοι κόμβοι). Αυτός ο ρυθμός ισούται με μN , όπου N το ολικό πλήθος κόμβων. Το μοντέλο αυτό παριστάνεται στο σχήμα 16.

Στην περίπτωση αυτή, πρέπει και οι εξισώσεις 4.4-4.6 να διορθωθούν και να πάρουν τη μορφή 4.15-4.17.

$$\frac{dI}{dt} = \alpha SI - \delta I - \mu I \quad (4.15)$$



Σχήμα 16: Το μοντέλο SIR με δημογραφική κίνηση.

$$\frac{dS}{dt} = -\alpha SI + \mu(N - S) \quad (4.16)$$

$$\frac{dR}{dt} = -\alpha I - \mu R \quad (4.17)$$

Προφανώς οι πιο πάνω ρυθμοί εισόδου και εξόδου κόμβων στο σύστημα εγγυώνται τη διατήρηση του συνολικού πληθυσμού αφού $\mu N = \mu S + \mu I + \mu R$. Και σ' αυτό το μοντέλο παρατηρούνται σημεία ισορροπίας, συγκεκριμένα:

- Το σημείο χωρίς ασθένεια: $S = N, I = 0, R = 0$
- Το σημείο ενδημικής ασθένειας $S = \delta/\alpha, I = \frac{N-\delta}{1+\frac{\delta}{\alpha}}, R = \frac{N-\delta}{1+\frac{\alpha}{\delta}}$

Κι εδώ πρέπει να ισχύει $\alpha/\delta > 1$ ώστε να επιβιώσει η επιδημία.

4.3.6 Μερικά Γενικά Σχόλια

Η επιδημική διάδοση εξακολουθεί να είναι πολύ αποτελεσματική από πλευράς ταχύτητας αλλά επί πλέον συνοδεύεται από πολύ μικρότερο ενεργειακό κόστος.

Το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η πιθανότητα p είναι αυθαίρετα και άπαξ οριζόμενη και δε λαμβάνει υπ' όψη τις πιθανώς μεταβαλλόμενες συνθήκες του προβλήματος. Έτσι μπορεί ακόμα να συμβεί να έχουμε πολλές εκπομπές ενώ αυτές δεν εισακούονται ή ενώ οι γύρω κόμβοι είναι ήδη μολυσμένοι.

Πάνω σ' αυτό το σημείο όμως μπορούν να επέλθουν βελτιώσεις εάν η πιθανότητα προώθησης καταστεί προσαρμοζόμενη. Αυτή είναι η κεντρική ιδέα της προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης.

4.4 Προσαρμοστική Επιδημική Διάδοση

4.4.1 Οι Αρχές

Μιλάμε για προσαρμοστική επιδημική διάδοση (Π.Ε.Δ.) πληροφορίας όταν η Ε.Δ. γίνεται με χαρακτηριστικά εκπομπής προσαρμοζόμενα με στόχο αποτελεσματική και αποδοτική διάχυση με αποφυγή συνήθως των περιπτώσεων εκπομπών.

Αυτό αντικατοπτρίζει την ανάγκη για εξισορρόπηση αντικρουόμενων αναγκών για περιορισμό ενεργειακού κόστους από τη μία και διάδοση της πληροφορίας από την άλλη.

Η προσαρμοστική επιδημική διάδοση έγκειται στο να αντιλαμβάνεται το δίκτυο με εν γένει αποκεντρωμένο τρόπο την ανάγκη για προσαρμογή των χαρακτηριστικών εκπομπής της διαχεόμενης πληροφορίας. Έτσι μπορούν π.χ. να περιορίζονται οι εκπομπές όταν ένας κόμβος αντιλαμβάνεται ότι οι γειτονικοί είναι ήδη μολυσμένοι.

Η προσαρμοστική επιδημική διάδοση μπορεί να θεωρηθεί ως σύστημα ελέγχου με ανάδραση το οποίο χρησιμοποιεί την επίγνωση πληροφορίας πλαισίου (context awareness, δηλ. ενημερότητα επί της καταστάσεως). Από την άλλη μεριά η στοχαστικότητα της πληροφορίας πλαισίου (π.χ. θόρυβος καναλιού) δε μας αφήνει να έχουμε προβλέψιμη επίδραση της προσαρμογής παραμέτρων στην συμπεριφορά του συστήματος. Επίσης μια ουσιαστική παρατήρηση είναι ότι στην Π.Ε.Δ. δεν έχουμε γνωστό μοντέλο αναφοράς, δηλ. ρητά εκπεφρασμένη επιθυμητή κατάσταση. Η παραδοχή πως επιθυμητή κατάσταση είναι η πλήρης εξάπλωση της πληροφορίας και η εξοικονόμηση ενέργειας δεν είναι ούτε πλήρης διότι δεν ξέρουμε το βέλτιστο κόστος και ούτε και άμεσα μετρήσιμη. Έτσι, προτιμούμε να εκφράσουμε το πρόβλημα ως στοχαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Η παραπάνω θεώρηση εκφράζεται με γενικευμένο τρόπο στον ψευδοκώδικα στη λίστα 3. Στη λίστα 4 μεταπίπτουμε αν θεωρήσουμε ως πληροφορία πλαισίου το θόρυβο του καναλιού και την εξάπλωση της πληροφορίας και ως χαρακτηριστικά εκπομπής την πιθανότητα εκπομπής (προώθησης) β .

Με τις προσαρμογές των χαρακτηριστικών εκπομπής προσαρμόζεται η πιθανότητα μόλυνσης. Η προσαρμογή της πιθανότητας προώθησης της λίστας 4 έχει αυτό ακριβώς το αποτέλεσμα. Οι προσαρμογές των χαρακτηριστικών εκπομπής έχουν άμεση επίδραση στο ενεργειακό κόστος διότι επηρεάζουν το πλήθος (τη συχνότητα) των εκπομπών, την απαιτούμενη ισχύ, κλπ. Τα περιεχόμενα των σχημάτων αποδίδονται και στα σχήματα 17 και 18.

Λίστα 3: Διαδικασία προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης

```

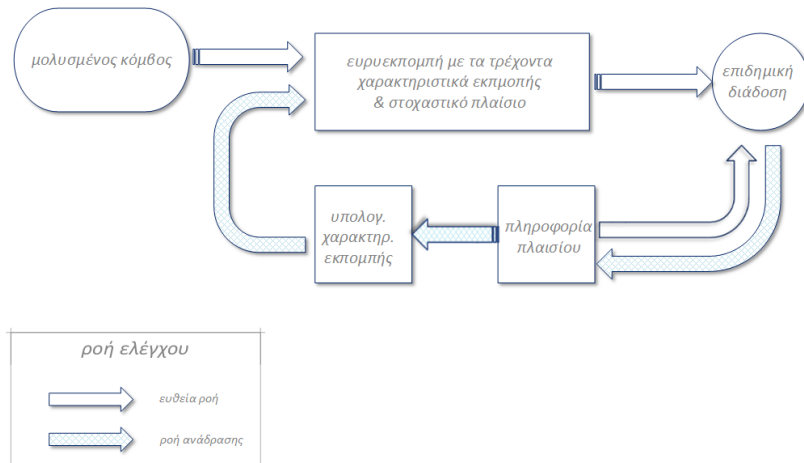
set  $\beta(t)$ 
for each  $t \in [0, T]$  do
  broadcast with forwarding probability  $\beta(t)$ 
  observe context  $C = (c_1, c_2, \dots)$ 
  calculate  $\beta(t+1) = f(C)$ 
end

```

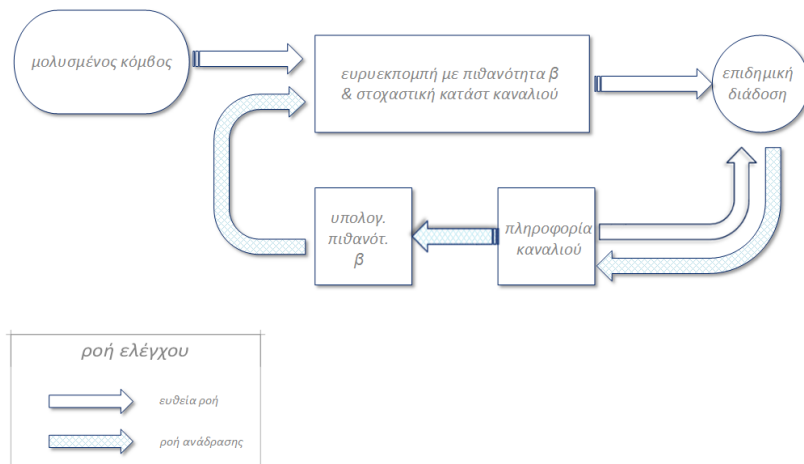
Λίστα 4: Διαδικασία προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης

```

set  $\beta(t)$ 
for each  $t \in [0, T]$  do
  broadcast with forwarding probability  $\beta(t)$ 
  observe channel state  $\gamma(t)$ 
  calculate  $\beta(t+1) = f(\gamma)$ 
end
    
```



Σχήμα 17: Η προσαρμοστική επιδημική διάδοση ως σύστημα με ανάδραση.



Σχήμα 18: Παράδειγμα Π.Ε.Δ. ως σύστημα με ανάδραση. Η πιθανότητα προώθησης είναι το προσαρμοζόμενο χαρακτηριστικό εκπομπής.

Όλα τα βήματα αφορούν κάθε κόμβο ξεχωριστά. Πρόκειται για αποκεντρωμένη αντιμετώπιση του προβλήματος. Η κυρίαρχη λογική έγκειται στα βήματα 4 και 5 της λίστας 3 και κατ' επέκταση και της 4). Με τον όρο πλαίσιο (context) εννοούμε τις επικρατούσες συνθήκες στο δίκτυο, οι οποίες περιγράφονται από διάφορες στοχαστικές παραμέτρους (c_1, c_2, c_3, \dots). Αυτές συνήθως αφορούν τη γειτονιά του ενδιαφερόμενου κόμβου. Μια συνηθής παράμετρος προς παρατήρηση είναι το πλήθος των ήδη μολυσμένων κόμβων. Άλλες δυνατές παράμετροι είναι π.χ. ο θόρυβος του καναλιού, το πλήθος ή το ποσοστό των ληφθέντων διπλοτύπων μηνυμάτων, κ.λ.π.

Κεντρικός στόχος είναι στο βήμα 3 να προσαρμόζονται κατάλληλα τα χαρακτηριστικά εκπομπής, για παράδειγμα να περιορίζεται η πιθανότητα εκπομπής σε περιβάλλοντα όπου η μόλυνση (πληροφορία) έχει ήδη εξαπλωθεί. Θα δούμε ότι η Π.Ε.Δ. είναι ενδογενώς διαστρωματική διαδικασία.

Οι πρώτες εκδοχές της προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης προτάθηκαν όταν έγινε σαφές το πρόβλημα της συμφόρησης λόγω ευρυεκπομπής άνευ όρων (broadcast storm problem) [41]. Παρουσιάζουμε ενδεικτικά μερικούς τρόπους αποφυγής αυτού του προβλήματος.

Με διαζευκτική απόφαση για εκπομπή ή μη εκπομπή - counter based scheme (CBS) [41]. Εδώ η πιθανότητα εκπομπής προσαρμόζεται χάρη στη διαζευκτική απόφαση περί εκπομπής ή όχι. Έτσι, αν β η πιθανότητα εκπομπής, λ ο ρυθμός αφίξεως διπλοτύπων κατά Poisson και d το πλήθος τους, εύκολα κάνουμε το συλλογισμό της (4.18) θεσπίζοντας μια τιμή κατωφλίου d_0 για το πλήθος των ληφθέντων διπλοτύπων.

$$\beta = p(d < d_0) = 1 - \exp(-\lambda d_0) \quad (4.18)$$

Έστω ότι ο κόμβος έχει n γείτονες, επικρατεί μέσο τοπικό ποσοστό μόλυνσης i και (τοπικά) μέση πιθανότητα εκπομπής β . Τότε για το λ υποθέτουμε ότι ισχύει η 4.19.

$$\lambda = ni\bar{\beta} \quad (4.19)$$

Προφανώς το n είναι ευθέως ανάλογο της εμβέλειας εκπομπής και τα i και $\bar{\beta}$ εκφράζουν πληροφορία πλαισίου. Από τα παραπάνω είναι τετριμμένο να εξαχθεί σχέση της μορφής της 4.20

$$\beta = 1 - e^{-\bar{\beta}} e^{-i} e^{-nd_0} \quad (4.20)$$

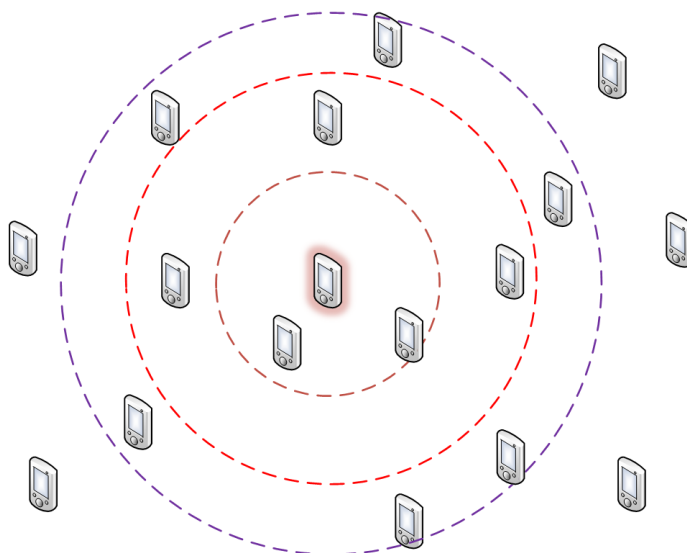
Η πιθανότητα μόλυνσης ευάλωτου κόμβου είναι ευθέως ανάλογη της πιθανότητας προώθησης. Έστω α η πιθανότητα να μολυνθεί ένας τυχαίος ευάλωτος με n γείτονες όταν το μέσο ποσοστό μόλυνσης είναι τοπικά i . Τότε ισχύει η 4.21.

$$\alpha = \sum_{j=1}^n p\beta_j \quad (4.21)$$

όπου β η πιθανότητα προώθησης από τον j -στό μολυσμένο γείτονα και p η πιθανότητα μόλυνσης επί τη λήψει της μολύνουσας πληροφορίας. Έτσι, για παράδειγμα, σε θορυβώδες περιβάλλον η λήψη μηνύματος φθαρμένου από το θόρυβο του καναλιού μπορεί να μην καταλήξει σε μόλυνση και τότε $p < 1$.

Με τροποποίηση της εμβέλειας της εκπομπής [43]. Εάν ένας κόμβος αντιληφθεί ότι η μολύνουσα πληροφορία έχει ήδη εξαπλωθεί αρκετά, περιορίζει την ισχύ, άρα και την εμβέλεια εκπομπής του. Με τον τρόπο αυτό, ουσιαστικά σμικρύνεται η γειτονιά του και μειώνεται το ποσοστό κόμβων οι οποίοι μπορούν να λάβουν την πληροφορία (σχήμα 19). Συνεπώς, και πάλι προσαρμόζεται (τροποποιείται) η πιθανότητα μόλυνσης. Στο [43] η

προσαρμογή είναι τυχαία βάσει κατανομής νόμου δύναμης, με ταυτόχρονη αποφυγή απόκτησης πληροφορίας πλαισίου. Η μοναδική πληροφορία πλαισίου είναι η πυκνότητα των κόμβων.



Σχήμα 19: Όταν ο κεντρικός πομπός εκπέμπει με πλήρη ισχύ, η μολύνουσα πληροφορία λαμβάνεται από 11/16 κόμβους, ενώ με την ελάχιστη μόνο από 2/16.

Με απ' ευθείας μεταβολή της πιθανότητας προώθησης [1]. Έτσι, σε κάθε θεωρούμενη διακριτή χρονική στιγμή, διεξάγεται ένα πείραμα τύχης με πιθανότητα επιτυχίας την τροποποιούμενη αυτή πιθανότητα [1]. Εδώ προσαρμόζεται άμεσα η πιθανότητα εκπομπής της μολύνουσας πληροφορίας από τους μολυσμένους κόμβους ανάλογα με την πληροφορία πλαισίου. Έτσι επηρεάζονται οι συνθήκες του πειράματος τύχης βάσει του αποτελέσματος του οποίου αποφασίζει ο μολυσμένος κόμβος αν θα ευρευεκπέμψει.

Καταλαβαίνουμε από τα παραδείγματα ότι μπορεί να τροποποιείται η πιθανότητα μόλυνσης με βάση την πληροφορία πλαισίου.

Το εύλογο ερώτημα είναι πώς επιτυγχάνεται η επίγνωση πλαισίου [57]. Αυτή η απόκτηση πληροφορίας για τις επικρατούσες συνθήκες στο δίκτυο είναι κυρίαρχος μηχανισμός κατανάλωσης ενέργειας και μπορεί να γίνει με μεθόδους που, κατά κύριο λόγο, ταξινομούνται σε ενεργητικές και παθητικές. Δηλαδή είναι εφικτό είτε να αποκτάται με περιοδικούς κύκλους ερωταποκρίσεων (polling) είτε να συνάγεται από άλλη πληροφορία (context inference) αντιστοίχως.

Οι ενεργητικές μέθοδοι περιλαμβάνουν εκπομπές εκ μέρους των μολυσμένων, οι απαντήσεις στις οποίες αξιοποιούνται για απόκτηση πληροφορίας πλαισίου. Αυτές είναι και οι πιο ενεργοβόρες [59]-[64]. Μπορούν να απαιτούν μηχανισμούς ερωταποκρίσεων (polling) [61], [63] ή μηνύματα χαιρετισμού (hello messages) [60], [62].

Οι παθητικές μέθοδοι συνάγουν την πληροφορία πλαισίου από λήψεις πληροφορίας είτε στοχευμένες είτε παραπλεύρως ακουόμενες (overheard) [66]-[69].

Για παράδειγμα, στην [41] ο μολυσμένος κόμβος μετρά τις λήψεις μολύνουσας πληροφορίας. Εφ' όσον είναι ήδη μολυσμένος, αυτές αποτελούν διπλότυπα, περιττά μηνύματα, τα οποία, όμως, αποτελούν ένδειξη για το πλήθος των μολυσμένων γειτόνων.

Ομοίως, στο [1] ο μολυσμένος κόμβος παρατηρεί το θόρυβο στα κανάλια με τους γειτονικούς κόμβους. Αυτό, όπως θα δούμε, μπορεί να ανατεθεί σε χαμηλότερο στρώμα ή να θεωρηθεί ενεργητική μέθοδος απόκτησης πληροφορίας πλαισίου.

Η Π.Ε.Δ. αποφέρει ενεργειακό όφελος χάρη στην κατά περίπτωση ελάττωση των θεωρούμενων περιπτώσεων εκπομπών. Το όφελος αυτό εξαρτάται πολύ από τις παραμέτρους του εκάστοτε προβλήματος και εν γένει υπολογίζεται πειραματικά, δηλαδή με χρήση προσομοιώσεων.

4.4.2 Η αναλυτική λύση του προβλήματος

Στο πρόβλημα της επιδημικής διάδοσης, οι συντελεστές α και δ του συστήματος εξισώσεων (4.1) και (4.2) είναι μεταβλητοί και η εξίσωση (4.3) δεν είναι πλέον η ορθή λύση.

Μια ενδιαφέρουσα αντιμετώπιση [55] χρησιμοποιεί δυο νέες παραμέτρους, την *ευπάθεια* (susceptibility) και τη *μολυσματικότητα* (infectivity) ως ανεξάρτητες μεταξύ τους μεταβλητές και τις συμβολίζουμε με ω_1 και ω_2 αντίστοιχα.

Ορίζουμε ως *ευπάθεια* (ω_1 , susceptibility) την πιθανότητα επιτυχούς μόλυνσης δεδομένου ευάλωτου κόμβου έστω s . Αυτή ορίζεται ως το γινόμενο του ρυθμού επαφών (ασυρματικών λήψεων) με μολυσμένους κόμβους επί την πιθανότητα επιτυχίας μιας επαφής. Σε μοναδιαίο χρόνο, ο ρυθμός επαφών είναι το άθροισμα των πιθανοτήτων προώθησης από όλους τους μολυσμένους γείτονες. Τότε:

$$\omega_{1,s} = \sum_i \beta_i p_{i,s} = \sum_i \beta_i (1 - q_{i,s}) \quad (4.22)$$

όπου β_i η πιθανότητα προώθησης από μολυσμένο γείτονα i , $p_{i,s}$ η πιθανότητα επιτυχίας της λήψεως πληροφορίας από τον s η οποία εκπέμφθηκε από μολυσμένο γείτονα i , και $q_{i,s}$ η πιθανότητα αποτυχίας της όπως π.χ. αν η ληφθείσα μολύνουσα πληροφορία είναι φθαρμένη λόγω θορύβου καναλιού.

Ως *μολυσματικότητα* (ω_2 , infectivity) εννοούμε την πιθανότητα επιτυχούς μόλυνσης από δεδομένο μολυσμένο κόμβο έστω a [56]. Αυτή ορίζεται ως το γινόμενο του ρυθμού επαφών (ασυρματικών λήψεων) με ευάλωτους κόμβους επί την πιθανότητα επιτυχίας μιας επαφής. Σε μοναδιαίο χρόνο, ο ρυθμός επαφών είναι η πιθανότητα προώθησης του μολυσμένου κόμβου προς τους γείτονές του επί το πλήθος αυτών. Υποθέτοντας πως οι πιθανότητες επιτυχίας επαφών με διαφορετικούς ευάλωτους κόμβους i είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, ισχύει:

$$\omega_{2,a} = \beta \sum_i p_{a,i} = \beta \sum_i (1 - q_{a,i}) \quad (4.23)$$

όπου $q_{a,i}$ η πιθανότητα αποτυχίας μιας λήψεως από ευάλωτο i της μολύνουσας πληροφορίας που εκπέμφθηκε από τον a . Ο a εκπέμπει με πιθανότητα προώθησης β_a .

Υποθέτουμε ότι η ευπάθεια και η μολυσματικότητα είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και συμβολίζουμε με $\alpha_1(\omega_1)$ και $\alpha_2(\omega_2)$ τις αντίστοιχες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (pdf), και με α το γινόμενό τους $\alpha(\omega_1, \omega_2) = \alpha_1(\omega_1)\alpha_2(\omega_2)$.

Θεωρούμε πως τα πλήθη των ευάλωτων και των μολυσμένων κόμβων (S και I αντίστοιχα) εξαρτώνται από τις μεταβλητές ω_1 και ω_2 οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Τότε αν συμβολίσουμε με $s(t, \omega_1)$ και $i(t, \omega_2)$ τις αντίστοιχες πυκνότητες, έχουμε:

$$S(t) = \int_{\Omega_1} s(t, \omega_1) d\omega_1 \quad (4.24)$$

$$I(t) = \int_{\Omega_2} i(t, \omega_2) d\omega_2 \quad (4.25)$$

όπου Ω_1 και Ω_2 είναι τα πεδία τιμών των ω_1 και ω_2 αντίστοιχα.

Συμβολίζουμε με $\alpha_1(\omega_1)$ την πιθανότητα επιτυχούς λήψης από ευάλωτο κόμβο και $\alpha_2(\omega_2)$ την πιθανότητα εκπομπής από μολυσμένο κόμβο. Αυτές τις δυο πιθανότητες τις θεωρούμε ανεξάρτητες μεταξύ τους. Τότε για το πλήθος μολυσμένων κόμβων, αποδεικνύεται [55] ότι ισχύει η 4.26 για το ποσοστό μολυσμένων κόμβων ως συνάρτηση του χρόνου σε περιβάλλον Π.Ε.Δ.

$$I(t) = \frac{\exp[\int_1^t (\delta - \alpha(\phi)N) d\phi]}{C - \int_1^t \alpha(\epsilon) \exp[\int_1^\tau (\delta - \alpha(\phi)N) d\phi] d\epsilon} \quad (4.26)$$

Αποδεικνύεται ότι κι εδώ υπάρχει υπό συνθήκες ασυμπτωτική συμπεριφορά αντίστοιχη με την $\lim I(t) = \frac{\alpha N - \delta}{\alpha}$ για $\alpha - \delta > 1$ που ισχύει στην περίπτωση σταθερών δ και α . Είναι ευνόητο ότι η εξάρτηση $\alpha(t)$ δεν είναι εύκολα αναλυτικά γνωστή σε κλειστή μορφή.

Προφανώς η 4.26 εκφυλλίζεται στην (4.3) με προσεγγίσεις και την παραδοχή σταθερών δ και α , δηλαδή στην περίπτωση μη προσαρμοστικής Ε.Δ.

Επειδή, εν γένει, το περιβάλλον της Π.Ε.Δ. έχει στοχαστικά χαρακτηριστικά, η γνώση της $\alpha(t)$ δεν είναι τετριμένη. Μπορεί π.χ. να εξαρτάται από το θόρυβο καναλιού, πιθανότητα βλάβης κόμβου, τοπολογία, κινητικότητα, κ.λ.π.

5. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

5.1 Διαστρωμάτωση και διαστρωματική επίγνωση πλαισίου

5.1.1 Από τη στρωματική στη διαστρωματική αντιμετώπιση

Παραδοσιακά τα δίκτυα αντιμετωπίζονται με στρωματική αντίληψη. Σε ένα δίκτυο εκτελούνται παράλληλα πλήθος διεργασιών εκ των οποίων κάποιες συνεργάζονται άμεσα για να διεκπεραιώσουν σχετικά σαφώς ορισμένους σκοπούς. Τα αποτελέσματα της λειτουργίας τους χρησιμοποιούνται από άλλες διεργασίες, οι οποίες δεν επηρεάζονται από τον τρόπο που οι εν λόγω σκοποί εκπληρώθηκαν. Τέτοιες ομάδες διεργασιών ονομάζονται στρώματα του δικτύου. Τα στρώματα ιεραρχούνται από το κατώτερο προς το ανώτερο. Κάθε στρώμα για να λειτουργήσει προϋποθέτει τα αποτελέσματα της λειτουργίας τού αμέσως από κάτω του χωρίς να γνωρίζει τις λεπτομέρειές του. Αυτή η αντιμετώπιση και αρχιτεκτονική έχει το πλεονέκτημα ότι μπορούν οι λεπτομέρειες της λειτουργίας ενός στρώματος να τροποποιηθούν χωρίς να επηρεαστούν τα άλλα. Βασικό χαρακτηριστικό είναι, λοιπόν, η σχετική απομόνωση μεταξύ των στρωμάτων. Στο σχήμα 20 παρουσιάζονται συγκριτικά τα δυο δημοφιλέστερα πρότυπα στρωματικής μοντελοποίησης δικτύων, δηλ. το πρότυπο OSI (Open Systems Interconnection) και το πρότυπο διαδικτύου.



Σχήμα 20: Τα πρότυπα OSI και διαδικτύου για τη στρωματική μοντελοποίηση δικτύου.

Με την εξέλιξη των δικτύων, όμως, η παραπάνω αντιμετώπιση αποδεικνύεται κάποτε ανεπαρκής. Προκύπτει πλέον η ανάγκη για δίκτυα που ικανοποιούν ανάγκες διαφορετικές μεταξύ τους και ταχέως μεταβαλλόμενες ή σε ταχέως μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Πολλαπλές και ταυτόχρονες απαιτήσεις πηγάζουν από την ανάγκη για ποιότητα επικοινωνίας (QoS) υπό γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες, όπως η κατάσταση των ασυρμάτων καναλιών, η κίνηση, κ.ά.

Για παράδειγμα σ' ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων (WSN), μπορεί να υπάρχει σοβαρή

ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και ταυτόχρονα απαιτήσεις διατήρησης της ακρίβειας, η οποία εδώ αποτελεί μέτρο της ποιότητας υπηρεσίας (QoS), μέσα σε αποδεκτά όρια [45].

Η δυναμική προσαρμογή των δικτύων δεν είναι νέα απαίτηση, αλλά παραδοσιακά αφορά κάθε στρώμα ξεχωριστά. Η συστολή του παραθύρου του πρωτοκόλλου TCP είναι τέτοιο παράδειγμα. Αυτή η προσαρμογή γίνεται χωρίς εξέταση της επίδρασής της σε άλλα στρώματα και χωρίς λήψη πληροφορίας από αυτά.

Για να αντιμετωπιστούν οι νέες απαιτήσεις για ικανοποίηση ποικίλων και δυναμικών αναγκών και συνθηκών λειτουργίας, εισάγεται η ιδέα της διαστρωμάτωσης (cross-layering) [73], [75], [74]:

Τα διάφορα στρώματα πρέπει να συνεργαστούν για την επιλογή της πιο κατάλληλης συλλογικής στρατηγικής για τη βέλτιστη λειτουργία του δικτύου. Όταν αναφερόμαστε σε επιλογή συλλογικής στρατηγικής, εννοούμε ταυτόχρονη και συνεργατική προσαρμογή παραμέτρων λειτουργίας πολλών στρωμάτων του δικτύου.

Μερικά παραδείγματα διαστρωματικής αντιμετώπισης είναι τα ακόλουθα:

- Μια εφαρμογή πληροφορείται την κατάσταση (ασυρμάτου) καναλιού και ρυθμίζει την ανάκτηση πολυμέσων [77], [78].
- Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, μια εφαρμογή πληροφορείται το επίπεδο θορύβου στο κανάλι και χρονοπρογραμματίζει τις εκπομπές με ρυθμίσεις στο υποστρώμα πρόσβασης μέσου (MAC) του στρώματος σύνδεσης δεδομένων [92]

Οι διαστρωματικές αρχιτεκτονικές συχνά εμπλέκουν τα στρώματα εφαρμογής, σύνδεσης δεδομένων και το φυσικό. Με τον τρόπο αυτό επιχειρείται η συμφιλίωση μεταξύ των ταχέως μεταβαλλόμενων συνθηκών θορύβου, της κίνησης στο κανάλι και των απαιτήσεων των εφαρμογών ως προς τις εκπομπές.

Η διαστρωματική θεώρηση και σχεδίαση δικτύων μας βοηθάει στη βελτιστοποίηση δικτύων με ταυτόχρονες, συνεργατικές προσαρμογές παραμέτρων σε παραπάνω από ένα στρώματα. Αυτές οι συνεργατικές προσαρμογές παραμέτρων συνιστούν υιοθέτηση (συγκεκριμένων από τις πολλές διαθέσιμες) συλλογικών στρατηγικών.

5.1.2 Η ιδέα της διαστρωμάτωσης

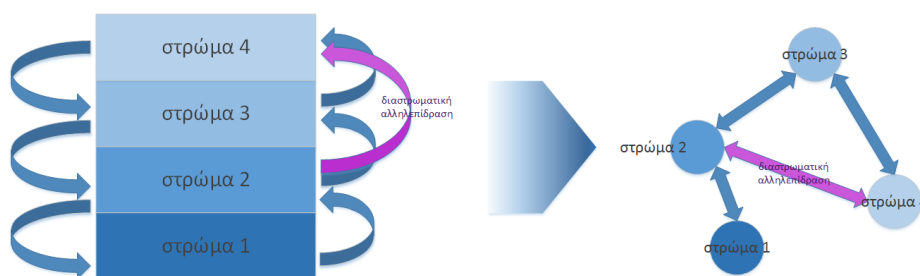
Παραδοσιακά κάθε στρώμα απ' αυτά που παρουσιάζονται στο σχήμα 20 χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες του αμέσως από κάτω του και παρέχει τις δικές του στο αμέσως από πάνω του και μόνο. Είναι λοιπόν ορατό και προσβάσιμο μόνο από τους άμεσους γείτονές του. Οι λεπτομέρειες της λειτουργίας του καθενός δεν αφορούν κανένα άλλο.

Αυτό το πρότυπο δε μπορεί να ισχύει καθολικά πλέον. Η βελτίωση της απόδοσης του δικτύου υπαγορεύει τη συνεργασία μεταξύ πολλών στρωμάτων. Και μάλιστα μιλάμε για δυναμική προσαρμογή των παραμέτρων λειτουργίας του δικτύου βάσει δυναμικά μεταβαλλόμενων συνθηκών λειτουργίας. Για το σκοπό αυτό απαιτούνται:

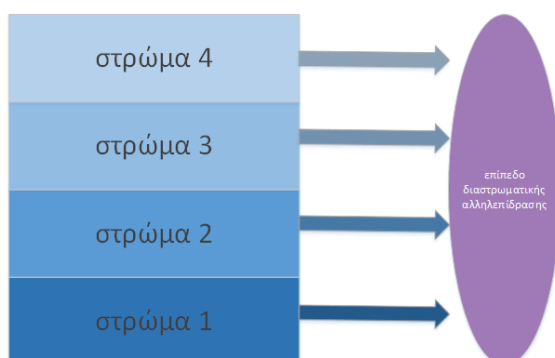
- **Διαστρωματική συνεργασία**, δηλαδή τα διάφορα στρώματα να συνεργάζονται με άλλα πέραν των εκατέρωθεν αμέσων γειτόνων τους.
- **Διαστρωματική σχεδίαση**, σύμφωνα με την οποία η προαναφερθείσα συνεργασία εξασφαλίζεται με την πρόβλεψή της στη σχεδίαση πρωτοκόλλων. Αυτή η εργασία δεν είναι τετριμμένη σύμφωνα με τα ως τώρα γνωστά πρότυπα.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να διεκπεραιωθούν τα πιο πάνω [75]:

- Εφ' όσον στρώματα μη γειτονικά συνεργάζονται, επί της ουσίας εισάγουμε νέες διεπαφές (interfaces) για διαστρωματική αλληλεπίδραση (σχήμα 21.α).
- Μπορούμε να εγκαταλείψουμε πλήρως την ιεραρχική αντίληψη περί στρωματικής δομής των δικτύων. Αντικαθιστούμε τα στρώματα με αφαιρετικές οντότητες (abstractions) οι οποίες επικοινωνούν και συνεργάζονται μεταξύ τους χωρίς ιεραρχία. Η μετάβαση από τη στρωματική στην πλήρως μη-στρωματική αντίληψη απεικονίζεται στο σχήμα 21.β.
- Η διαστρωματική λειτουργία παρέχεται από οντότητα εκτός των στρωμάτων η οποία συλλέγει πληροφορίες απ' όλα (σχήμα 22) [113].



Σχήμα 21: Η μετάβαση από το ιεραρχικό στρωματικό μοντέλο σ' ένα μοντέλο με αφαιρετικές οντότητες.



Σχήμα 22: Η διαστρωματική λειτουργία παρέχεται από οντότητα εκτός των στρωμάτων η οποία συλλέγει πληροφορίες απ' όλα.

Η διαστρωματική μοντελοποίηση έχει δυο εκφάνσεις:

- Παρατήρηση και μετρήσεις. Ένα στρώμα λαμβάνει πληροφορίες από ένα μη γειτονικό του. Για παράδειγμα το στρώμα εφαρμογής λαμβάνει πληροφορίες για την ποιότητα του ασυρμάτου καναλιού.
- Υιοθέτηση στρατηγικής (προσαρμογή παραμέτρων). Ένα στρώμα υπαγορεύει σε μη γειτονικό του να κάνει προσαρμογές στις παραμέτρους λειτουργίας του. Έτσι, σ' αυτό το παράδειγμα, αποφασίζονται προσαρμογές των παραμέτρων του χρονοπρογραμματισμού στο στρώμα σύνδεσης δεδομένων βάσει του θορύβου στο κανάλι και των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας (QoS) των τρεχουσών εφαρμογών.

Από τις πιο πάνω, η δεύτερη έκφραση συνιστά την επιλογή συνδυασμένης διαστρωματικής στρατηγικής.

Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα λειτουργιών διαφόρων στρωμάτων. Στην περιγραφή αυτή τα στρώματα 5-7 του προτύπου OSI συνενώνονται σε ένα διευρυμένο στρώμα εφαρμογής.

Στο σχήμα 23 παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα αλληλεπιδράσεων μεταξύ μη γειτονικών στρωμάτων μαζί με τις λειτουργίες που αφορούν [75], [74].

Πίνακας 5: Μερικές τυπικές λειτουργίες διαφόρων δικτυακών στρωμάτων

στρώμα εφαρμογής	συμπίεση
στρώμα μεταφοράς	επανεκπομπή (ARQ)
στρώμα δικτύου	δρομολόγηση
στρώμα σύνδεσης δεδομένων	αυτόματη επανεκπομπή (ARQ)
φυσικό στρώμα	διαμόρφωση, κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος



Σχήμα 23: Παραδείγματα αλληλεπιδράσεων μεταξύ μη γειτονικών στρωμάτων.

5.1.3 Ο μαθηματικός φορμαλισμός της διαστρωμάτωσης

Ας θεωρήσουμε τη διαστρωματική συνεργασία μεταξύ τριών στρωμάτων: του στρώματος σύνδεσης δεδομένων (DL), του δικτύου και του εφαρμογής [73].

Έστω διαθέτουμε N_d , N_n και N_a το πλήθος δυνατές στρατηγικές για κάθε στρώμα αντίστοιχα. Για παράδειγμα οι στρατηγικές για φυσικό το στρώμα μπορούν να αντιπροσωπεύουν διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ελέγχου σφάλματος. Όσον αφορά το στρώμα δικτύου μπορούμε να αναφερόμαστε σε διαφορετικές επιλογές δρομολόγησης και οι στρατηγικές στο στρώμα εφαρμογής μπορούν να έχουν σχέση με προτεραιοποίηση ή συμπίεση δεδομένων. Τότε οι επί μέρους στρατηγικές συμβολίζονται αντίστοιχα όπως στην (5.1).

$$dl_i \in N_D : i \in \{1, 2, \dots, N_d\}, net_i \in N_N : i \in \{1, 2, \dots, N_n\}, app_i \in N_A : i \in \{1, 2, \dots, N_a\} \quad (5.1)$$

... όπου dl_i, net_i, app_i δυνατές στρατηγικές. Προφανώς ισχύει και ότι $N_d = |N_D|, N_n = |N_N|, N_a = |N_A|$.

Η συνολική, διαστρωματική στρατηγική αποδίδεται με την έκφραση της 5.2

$$s_i \in M, M = N_D \times N_N \times N_A, i \in \{1, 2, \dots, |M|\} \quad (5.2)$$

Έτσι το πρόβλημα της διαστρωματικής βελτιστοποίησης είναι η επιλογή διαστρωματικής στρατηγικής s_{opt} έτσι ώστε να ικανοποιείται η (5.3) ενώ ισχύουν δεσμεύσεις της μορφής της (5.4)

$$s_{opt}(h) = \arg_s \max U(s(h)) \quad (5.3)$$

$$D_1(s(h)) \in \mathbb{D}_1 \text{ και } D_2(s(h)) \in \mathbb{D}_2 \quad (5.4)$$

Στην (5.3) με U συμβολίζεται ένα μέτρο της επιθυμητής ποιότητας ή οφέλους από αυτήν, π.χ. χρονοκαθυστέρηση, ποσοστό σφαλμάτων, ενεργειακό κόστος, ηλικία πληροφορίας, κ.ά. Με το h αποδίδεται η κατάσταση του δικτύου από την οποία εξαρτάται η επιλεγόμενη στρατηγική s_{opt} . Σε μια πιο ρεαλιστική και πολύπλοκη θεώρηση το U μπορεί να περιγράψει τις παραπάνω πολλαπλές ανάγκες ποιότητας ταυτόχρονα. Αυτές μπορούν επίσης να μην είναι ασυσχέτιστες, γεγονός που καθιστά το πρόβλημα δυσεπίλυτο.

Η (5.4) εκφράζει μια σειρά περιορισμών που πρέπει να ικανοποιούνται. Οι D_1 και D_2 εκφράζουν με γενικό τρόπο ποσότητες που εξαρτώνται από την s και που υφίστανται περιορισμούς ως προς τις τιμές τους. Παραδείγματα τέτοιων ποσοτήτων είναι η χωρητικότητα καναλιού, SNR, bit error rate, κ.ά.

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα διαστρωματικής αρχιτεκτονικής και σχεδίασης. Κάποια από αυτά είναι τα ακόλουθα [75], [74]:

- Προσέγγιση από πάνω προς τα κάτω. Τα υψηλότερα στρώματα βελτιστοποιούν τις παραμέτρους τους και τις στρατηγικές των αμέσως κατώτερων στρωμάτων.

- Προσέγγιση από κάτω προς τα πάνω. Τα χαμηλότερα στρώματα απομονώνουν τα ανώτερα τους από τις δυσχέρειες που αυτά αντιμετωπίζουν, όπως θόρυβο, παρεμβολές κ.λ.π.
- Προσέγγιση εστιασμένη στην εφαρμογή. Το στρώμα εφαρμογής διεκπεραιώνει τη βελτιστοποίηση όλων των κατωτέρων του *διαδοχικά*.
- Προσέγγιση εστιασμένη στην πρόσβαση στο μέσο (MAC-centric). Το υπο-στρώμα MAC παίρνει δεδομένα από το στρώμα εφαρμογής και διεκπεραιώνει το χρονοπρογραμματισμό και την ικανοποίηση απαιτήσεων ως προς την ποιότητα (QoS) αναλόγως.
- Ολοκληρωμένη προσέγγιση. Αυτή συνίσταται σε εξαντλητική δοκιμή όλων των δυνατών επιλογών της 5.2 και είναι προφανώς ασύμφορη. Επομένως απαιτούνται ευφυέστερες μέθοδοι επιλογής στρατηγικής. Η υπέρβαση αυτής της προσέγγισης αυτής είναι στενά συνδεδεμένη με την παρούσα έρευνα.

Η παρούσα ΔΔ εστιάζει στην ταυτόχρονη προσαρμογή των εμπλεκόμενων στρωμάτων αξιολογώντας τις δυνατές στρατηγικές με τη βοήθεια μιας αφαιρετικής οντότητας (abstraction) έξω από τα στρώματα αυτά.

5.2 Ασύρματα Κανάλια και Μοντέλα Θορύβου

Στα ασύρματα δίκτυα, το μεταδιδόμενο σήμα υφίσταται υποβιβασμό λόγω διαφόρων μηχανισμών, όπως ο θόρυβος, η εξασθένηση, η παραμόρφωση (λόγω διασποράς των παλμών στο μέσο διάδοσης), η πολυδιόδευση και οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές [79]. Από τους πιο σημαντικούς είναι ο τυχαίος θόρυβος και η πολυδιόδευση, η οποία έχει ως συνέπεια τις διαλείψεις (fading).

5.2.1 Ο τυχαίος θόρυβος

Ο τυχαίος θόρυβος προκαλείται από τις τυχαίες φυσικές διαδικασίες στο μέσο διάδοσης (σκέδαση, τυχαία κίνηση φορέων φορτίου, κοσμική ακτινοβολία, κλπ). Αυτές παράγουν επί της ουσίας τυχαίο ηλεκτρομαγνητικό σήμα. Λόγω της στοχαστικής φύσης του, αυτό μοντελοποιείται στατιστικά με τη βοήθεια της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητάς του (pdf).

Ένα χρήσιμο και κοινά αποδεκτό μοντέλο του είναι αυτό του Προσθετικού Λευκού Γκαουσιανού Θορύβου (Additive White Gaussian Noise, AWGN) σύμφωνα με το οποίο ο θόρυβος απλώς προστίθεται στο σήμα, έχει το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο καθ' όλο το εύρος του φάσματος του σήματος και το μέγεθός του ακολουθεί την κανονική (γκαουσιανή) κατανομή. Ισχύουν, λοιπόν, οι 5.5 και 5.6, όπου $X(t)$ το αρχικό σήμα, $Z(t)$ ο θόρυβος, $Y(t)$ το συνολικά λαμβανόμενο σήμα στο δέκτη, \mathcal{N} η κανονική κατανομή και N η διακύμανση (variance) του θορύβου.

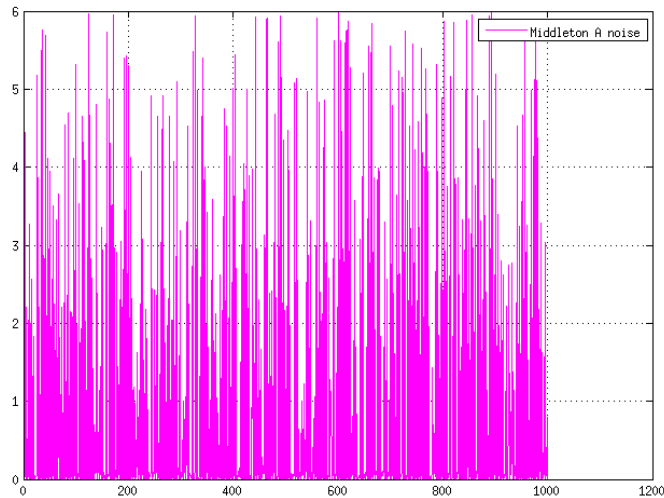
$$Y(t) = X(t) + Z(t) \quad (5.5)$$

$$Z(t) = \mathcal{N}(0, N) \quad (5.6)$$

Ένα άλλο δόκιμο μοντέλο για τον τυχαίο θόρυβο είναι αυτό του κρουστικού θορύβου (impulse noise) [80]. Σε μερικές περιπτώσεις, παρατηρείται θόρυβος ο οποίος στο πεδίο του χρόνου έχει τη μορφή κρουστικών παλμών. Υπάρχουν διάφορες εκδοχές και περιγραφές του. Μια απ' αυτές είναι αυτή του μοντέλου Middleton-A [81]. Σύμφωνα μ' αυτό, ένας παλμός θορύβου έχει πεπερασμένη πιθανότητα να παρουσιαστεί οποιαδήποτε χρονική στιγμή και ανεξάρτητη από την προηγούμενη κατάσταση του καναλιού. Πρόκειται δηλαδή για ένα μοντέλο χωρίς μνήμη, του οποίου η pdf περιγράφεται από την 5.7. Η μορφή αυτού του είδους θορύβου απεικονίζεται στο σχήμα 24.

$$\begin{aligned} p(\text{noise}(t) = N_0 \neq 0) &= q \forall t \\ \text{noise}(t) &= qN_0 + (1 - q)n_0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

Σε μερικά περιβάλλοντα (π.χ. βιομηχανικά) έχει υποστηριχθεί ότι ο θόρυβος ακολουθεί μια κατανομή με μνήμη. Ένα ενδιαφέρον και απλό μοντέλο που περιγράφει αυτή τη συμπεριφορά είναι το μοντέλο Markov-Middleton [82]. Σύμφωνα μ' αυτό, ο παλμός θορύβου



Σχήμα 24: Το μοντέλο θορύβου Middleton-A

εμφανίζεται με πεπερασμένη πιθανότητα, αλλά αυτή είναι πολύ υψηλότερη όταν έχει μόλις προηγηθεί παλμός την προηγούμενη χρονική στιγμή. Συνεπώς, οι παλμοί θορύβου έχουν την τάση να παρουσιάζονται κατά συστάδες ή ριπές. Αυτό το μοντέλο περιγράφεται από την 5.8 και το σχήμα 25.

$$\begin{aligned}
 p(\text{noise}(t) \neq 0) &= q \text{ αν } \text{noise}(t-1) \neq 0 \\
 p(\text{noise}(t) \neq 0) &= p \text{ αν } \text{noise}(t-1) = 0
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

όπου $p \ll q$

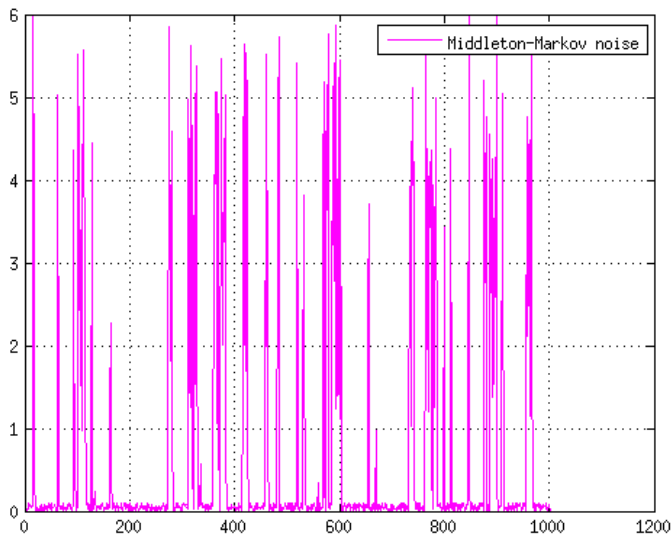
Το μοντέλο Markov-Middleton εισάγει την έννοια της (έστω βραχείας) μνήμης στο κανάλι. Έτσι, η συμπεριφορά του καναλιού αποδίδεται με μια μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων (FSM) (σχήμα 26), η οποία, στην απλούστερη μορφή της, περιλαμβάνει δυο μόνο καταστάσεις: την καλή (αθόρυβη, G) και την κακή (ενθόρυβη, B). Η εικόνα αυτή μας είναι οικεία και από το μοντέλο του Gilbert ([83]) για τα ασύρματα κανάλια.

Είναι δυνατή και η θέσπιση περισσότερων της μιας ενθόρυβων καταστάσεων, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα θορύβου.

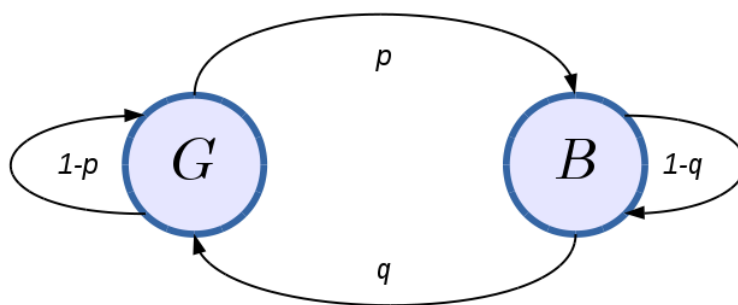
5.2.2 Η πολυδιόδευση

Όταν ένα ασυρματικό σήμα διαδίδεται, δε φτάνει στον προορισμό του από μια μοναδική διαδρομή, αλλά από πολλές, λόγω των ανακλάσεων από τυχαία εμπόδια στον επίγειο χώρο διάδοσης.

Το αποτέλεσμα είναι ότι ο παραλήπτης το λαμβάνει ερχόμενο από πολλά διαφορετικά μονοπάτια (σχήμα 27). Όπως είναι λογικό και οι χρόνοι λήψεως από όλα αυτά τα μονοπάτια



Σχήμα 25: Το μοντέλο θορύβου Markov-Middleton

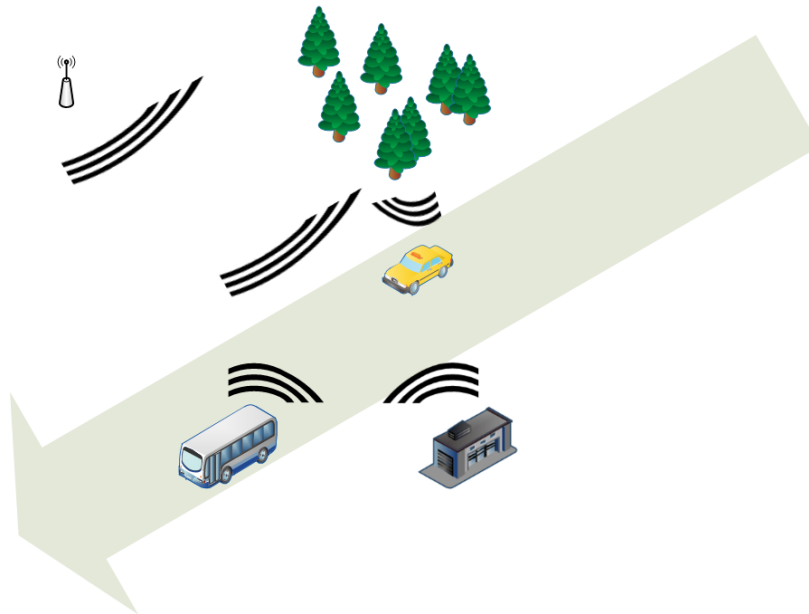


Σχήμα 26: Απεικόνιση μοντέλου θορύβου Markov-Middleton με χρήση FSM δύο καταστάσεων

δεν είναι ταυτόχρονοι. Αλλά και η ισχύς και τα ηλεκτρομαγνητικά φασματικά χαρακτηριστικά των διαφόρων εκδοχών του σήματος διαφέρουν μεταξύ τους. Το τελικά λαμβανόμενο από τον δέκτη σήμα είναι το αποτέλεσμα της συμβολής τους, καταστροφικής και εποικοδομητικής.

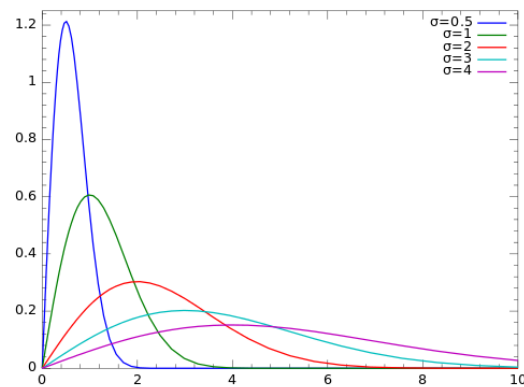
Και αυτός ο μηχανισμός, ο οποίος ονομάζεται *πολυδιόδευση*, έχει ισχυρά στοχαστικό χαρακτήρα λόγω τυχαίων εμποδίων, τυχαίας κινήσεως πομπών και δεκτών κ.λ.π. Έτσι το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος έχει στοχαστικό χαρακτήρα και αποδεικνύεται [84] ότι η pdf του ακολουθεί την κατανομή Rayleigh η οποία αποδίδεται στην 5.9 και στο σχήμα 28.

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \tag{5.9}$$



Σχήμα 27: Πολυδιόδευση ασύρματου σήματος

... όπου με Γ συμβολίζεται η συνάρτηση γάμμα, η γενίκευση της παραγοντικής με πεδίο ορισμού τους θετικούς πραγματικούς αριθμούς.

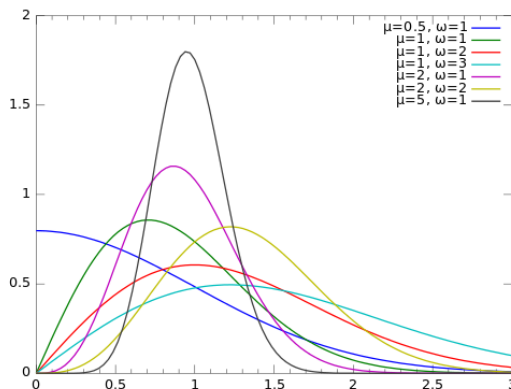


Σχήμα 28: Η pdf της κατανομής Rayleigh

Η γενικευμένη εκδοχή της είναι η κατανομή Nakagami- m , η οποία περιγράφεται από την (5.10) και το σχήμα 29

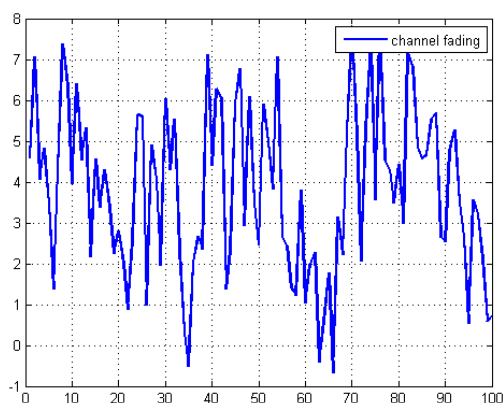
$$p(x) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} x^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} x^2\right) \quad (5.10)$$

Προφανώς για $m = 1$ η κατανομή Nakagami- m μεταπίπτει στην Rayleigh. Η κατανομή Nakagami- m μπορεί να απεικονίσει τη συμπεριφορά σήματος που είναι υπέρθεση πολλών σημάτων που ακολουθούν κατανομή Rayleigh.



Σχήμα 29: Κατανομή Nakagami-m

Το φυσικό νόημα είναι πως λόγω της πολυδιόδευσης, ο δέκτης λαμβάνει πολλά αντίτυπα του σήματος, τα οποία συμβάλλουν εποικοδομητικά ή καταστροφικά και έχουν ως αποτέλεσμα μια παραμορφωμένη εκδοχή του αρχικού σήματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *διαλείψεις* (fading) και τα κανάλια τα οποία επηρεάζονται απ' αυτό *κανάλια με διαλείψεις* (fading channels). Τυπικά υποθέτουμε ότι από τα πολλαπλά λαμβανόμενα αντίτυπα του σήματος απουσιάζει το απ' ευθείας λαμβανόμενο (line-of-sight) χωρίς ανακλάσεις σε εμπόδια. Μια τυπική απόδοση ενός τέτοιου «διαλείποντος» σήματος στο πεδίο του χρόνου δίνεται στο σχήμα 30.

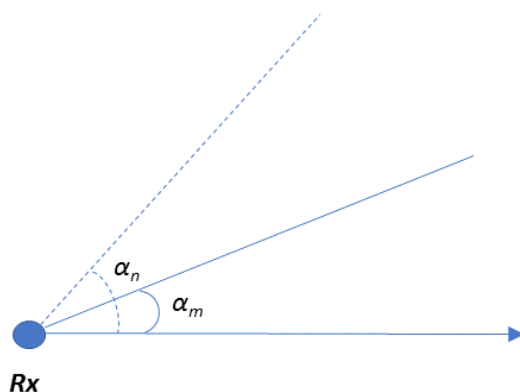


Σχήμα 30: Λαμβανόμενο σήμα σε κανάλι με διαλείψεις

5.2.3 Αναπαράσταση καναλιού με διαλείψεις με το μοντέλο Jakes

Παρ' ότι το λαμβανόμενο σήμα είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα που γεννάται από τη συμβολή πολλών σημάτων (κυμάτων), μπορεί να μοντελοποιηθεί ικανοποιητικά με το μοντέλο του αθροίσματος ημιτόνων (sum of sines, SoS) [84]. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, μπορεί να αποδοθεί ως γραμμικός συνδυασμός ενός πεπερασμένου (και μάλιστα μικρού, 7-8) πλήθους ημιτόνων, εξ ου και ο όρος «άθροισμα ημιτόνων».

Η διαπραγμάτευση του θέματος από τον Jakes στην [84] ξεκινά υποθέτοντας ακίνητο πομπό (σταθμός βάσης) περιβαλλόμενο από εμπόδια από τα οποία σκεδάζεται το εκπεμπόμενο σήμα. Ο δέκτης, ο οποίος μπορεί να κινείται, λαμβάνει διάφορες εκδοχές του σκεδαζόμενου σήματος από διάφορες γωνίες (σχήμα 31). Υποτίθεται ακόμα ότι, λόγω



Σχήμα 31: Λήψη σκεδαζόμενου σήματος υπό γωνία

της κίνησης του δέκτη, η συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος υφίσταται μετατόπιση κατά Doppler και ότι η ισχύς είναι κατανεμημένη ομοιόμορφα σ' όλες τις γωνίες $[0, 2\pi]$. Με τις υποθέσεις αυτές -και μερικές ακόμα στοχευμένες παραδοχές- αποδεικνύεται ότι το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος είναι στοχαστικό μέγεθος και η pdf του δίνεται από την κατανομή Rayleigh. Επίσης προκύπτει το προαναφερθέν συμπέρασμα ότι μπορεί να προσεγγισθεί πολύ ικανοποιητικά ως γραμμικός συνδυασμός ενός πεπερασμένου πλήθους N ημιτόνων όπως δείχνεται στην εξίσωση 5.11.

$$R(t) = \sum_{n=1}^N c_n \cos(2\pi f_n t + \theta_n) \quad (5.11)$$

Προφανώς, το μοντέλο αυτό απλοποιεί πολύ τους υπολογισμούς. Η προσέγγιση της [84] ουσιαστικά προσομοιώνει μια στοχαστική διαδικασία με μια ντετερμινιστική. Παρατηρούμε ότι από τη στιγμή που καθορίζονται οι παράμετροι (c_n, f_n, θ_n) στην εξίσωση (5.11), η τυχαιότητα εξαλείφεται.

Στις ντετερμινιστικές διαδικασίες, έχουν νόημα οι χρονικές μέσες τιμές και όχι οι στατιστικές. Αυτές ταυτίζονται αν η διαδικασία είναι εργοδική, αλλά αυτό δεν είναι πάντα εξασφαλισμένο ότι συμβαίνει [87]. Στην εν λόγω προσέγγιση, έχουν εντοπιστεί αδυναμίες [85], [87] αλλά παραμένει ικανοποιητική προσέγγιση. Έχει προταθεί [85] η βελτίωση της ακρίβειάς της απλώς με την άθροιση ενός κάπως μεγαλύτερου πλήθους ημιτονειδών (λίγο πάνω από 10), αλλά και πάλι σχετικά μικρού.

5.2.4 Το κανάλι ως μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων

Μια σημαντική συμβολή στη μελέτη της πολυδιάδεσης είναι η περιγραφή των καναλιών με διαλείψεις με στατιστική Rayleigh με μαρκοβιανές αλυσίδες (μηχανές πεπερασμένων

καταστάσεων, FSM) ([83], [88], [89], [86]). Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, το πεδίο του (λαμβανομένου) SNR κατανέμεται σε μια σειρά διαδοχικών, ξένων μεταξύ τους διαστημάτων. Σε κάθε ένα από τα διαστήματα αυτά αντιστοιχίζεται μια κατάσταση του καναλιού. Το πλήθος των διαστημάτων (άρα και των δυνατών καταστάσεων του καναλιού) εξαρτώνται από την ταχύτητα εξασθένησης (τις διαλείψεις) του καναλιού. Έτσι, ένα κανάλι, το οποίο χαρακτηρίζεται από χρονικά μεταβαλλόμενο SNR $\gamma(t)$, λέμε ότι τη στιγμή t βρίσκεται στην κατάσταση i αν και μόνο αν ισχύει η 5.12

$$\gamma_i \leq \gamma(t) < \gamma_{i+1} \quad (5.12)$$

Στην (5.12) τα γ_i είναι κατώφλια τα οποία οριοθετούν τις δυνατές καταστάσεις του καναλιού μεταξύ τους. Το πλήθος τους είναι πεπερασμένο. Καθώς το γ μεταβάλλεται με το χρόνο μπορεί να διασχίζει τα εν λόγω κατώφλια και το κανάλι θεωρείται ότι μεταπίπτει σε νέα κατάσταση. Η μοντελοποίηση αυτού του είδους μπορεί να μας δώσει και τις πιθανότητες μετάβασης μεταξύ καταστάσεων. Σύμφωνα με την [86] αυτές δίνονται από τις (5.13).

$$P_{k,k+1} = \frac{N(\Gamma_{k+1})T_p}{\Pi_k} \quad (5.13)$$

$$P_{k,k-1} = \frac{N(\Gamma_k)T_p}{\Pi_k}$$

όπου $N(x)$ είναι ο χρονικός ρυθμός διάσχισης μιας τιμής-κατωφλίου x (level crossing rate) και υπολογίζεται και από το μοντέλο του Jakes [84]. Το T_p είναι η χρονική περίοδος του πακέτου (packet time period).

Στις [86] και [92] υπολογίζονται και τιμές του SNR οι οποίες οριοθετούν τις καταστάσεις του καναλιού μεταξύ τους. Αυτό, βέβαια, γίνεται με διαφορετικές υποθέσεις και παραδοχές.

Συνοψίζοντας, η χρονικά μεταβαλλόμενη κατάσταση ενός καναλιού με διαλείψεις μπορεί να αναπαρασταθεί με την κατάσταση μιας FSM.

Ας θυμίσουμε, τέλος, ότι οι προαναφερθέντες μηχανισμοί υποβιβασμού του σήματος μπορούν να συνυπάρχουν, π.χ. θόρυβος τύπου AWGN και διαλείψεις στο κανάλι. Φυσικά, ποσότητες όπως το ποσοστό εσφαλμένων bits (BER) και πακέτων (PER) εξαρτώνται ισχυρά από το προκύπτον SNR.

5.3 Προσαρμοστική Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση - ΠΔΚ (Adaptive Modulation and Coding - AMC)

5.3.1 Γενικά

Η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση, ΠΔΚ (adaptive modulation and coding, AMC) ή προσαρμογή σύνδεσης (link adaptation) είναι η τεχνική κατά την οποία η διαμόρφωση σήματος και η προληπτική κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος (forward error control) αναπροσαρμόζονται δυναμικά σύμφωνα με την κατάσταση του καναλιού. Βρίσκει ιδίως εφαρμογή στις ασύρματες επικοινωνίες, στις οποίες η κατάσταση του καναλιού τείνει να

υπόκειται σε απρόβλεπτες διαλείψεις ή και απότομες αλλαγές συνθηκών θορύβου [79]. Ο προφανής σκοπός είναι η ταχεία αντιμετώπιση αυτών των δυναμικά μεταβαλλόμενων συνθηκών. Βασικά στοιχεία, στην ΠΔΚ είναι η τεχνική της διαμόρφωσης του σήματος (πχ QPSK, 16-QAM, κλπ) και η κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος (πχ συνελικτική, με κώδικα μπλοκ, κλπ). Το BER (bit error rate, ρυθμός σφάλματος bit) για διαμορφωμένη και κωδικοποιημένη εκπομπή εξαρτάται ισχυρά φυσικά από το θόρυβο αλλά και τα πιο πάνω στοιχεία. Η εξάρτησή του από τον τρόπο διαμόρφωσης είναι ισχυρή [79], [90] Αυτό το γεγονός καθιστά διαφορετικά είδη διαμορφώσεων κατάλληλα για διαφορετικές απαιτήσεις και συνθήκες λειτουργίας [90].

Επί πλέον, για την αντιμετώπιση των συνεπειών του θορύβου εφαρμόζεται η κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος. Η κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος προσθέτει bits στο κωδικοποιούμενο πακέτο ή πλαίσιο (frame). Έτσι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους της κωδικοποίησης είναι ο ρυθμός κωδικοποίησης, (coding rate ή code rate) , ο οποίος ορίζεται ως το ποσοστό των ωφέλιμων bits (payload) επί του ολικού μήκους του κωδικοποιημένου πακέτου. Η κωδικοποίηση με χαμηλούς ρυθμούς κωδικοποίησης θωρακίζει ισχυρότερα απέναντι στο θόρυβο [90], [91] σε σχέση με την «ελαφριά» κωδικοποίηση με υψηλό ρυθμό. Βέβαια, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει και το είδος της κωδικοποίησης [79] [90], [91]. Πάντως, για δεδομένο είδος κωδικοποίησης, ο χαμηλότερος ρυθμός κωδικοποίησης προστατεύει το πακέτο περισσότερο από το θόρυβο [91].

Ένας μηχανισμός ΠΔΚ (AMC) καθορίζεται από ένα πλήθος επιτρεπτών τρόπων λειτουργίας. Πιο αυστηρά: Έστω M το σύνολο των δυνατών τρόπων διαμόρφωσης και R το σύνολο των δυνατών ρυθμών κωδικοποίησης:

$$\mathcal{M} = \{m_1, \dots, m_N\}, |\mathcal{M}| = M \text{ και } \mathcal{R} = \{r_1, \dots, r_N\}, |\mathcal{R}| = R \quad (5.14)$$

Τότε το σύνολο των δυνατών τρόπων λειτουργίας είναι ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών της μορφής $\alpha = (m, r) = (\text{διαμόρφωση}, \text{ρυθμός κωδικοποίησης})$ έτσι ώστε:

$$\{\alpha\} \subseteq M \times R \quad (5.15)$$

Τα πιο πάνω ζεύγη (m_i, r_i) αποτελούν τους τρόπους του μηχανισμού ΠΔΚ. Το σύνολό τους αποτελεί ένα σύστημα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, ΣΔΚ (modulation and coding scheme, MCS). Συμβατικά κατασκευάζεται ένας πίνακας με τους δυνατούς τρόπους στον οποίο οι «υψηλοί» τρόποι είναι αυτοί με τους υψηλότερους ρυθμούς κωδικοποίησης.

Ο πίνακας 6 μάλιστα είναι ένας τέτοιος πίνακας για το σύστημα WiFi IEEE 802.11g, [93], [99].

Επειδή στις ασύρματες επικοινωνίες η κατάσταση του καναλιού παρουσιάζει απρόβλεπτη συμπεριφορά, επιβάλλεται να υπάρχει η δυνατότητα της μετάπτωσης μεταξύ των διαφόρων τρόπων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ανάλογα με τις στιγμιαίες συνθήκες, δηλαδή η χρήση ΠΔΚ. Για να τη διεκπεραίωση της διαδικασίας προφανώς απαιτείται γνώση πληροφορίας καταστάσεως του καναλιού (ΠΚΚ, channel state information, CSI). Είναι γνωστό [79] ότι η γνώση της κατάστασης καναλιού καθιστά πιο αποτελεσματική την προσαρμογή από το θόρυβο.

Πίνακας 6: Μηχανισμός ΠΔΚ (AMC) για το 802.11g

αριθμός τρόπου	ταχύτητα	διαμόρφωση	ρυθμός κωδικοποίησης
1	6	BPSK	1/2
2	9	BPSK	3/4
3	12	QPSK	1/2
4	18	QPSK	3/4
5	24	16-QAM	1/2
6	36	16-QAM	3/4
7	48	64-QAM	2/3
8	54	64-QAM	3/4

Η λειτουργία, λοιπόν, ενός σχήματος ΠΔΚ έγκειται στη δυναμική επιλογή κατάλληλου τρόπου από τους επιτρεπτούς, λαμβάνοντας υπ' όψη την κατάσταση του καναλιού. Η επίγνωση της ΠΚΚ επέρχεται με τη χρήση μηχανισμού αφοσιωμένου σ' αυτή. Στη συνέχεια μεθοδεύεται και η μετάβαση σε αυτόν.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο επιτυχημένος συνδυασμός διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ελέγχου σφάλματος (και μάλιστα δυναμικά) μπορεί να έχει καλά αποτελέσματα ως προς την προστασία από το θόρυβο [42], [94], [95], [96]. Ένα σχήμα ΠΔΚ καλείται, λοιπόν, για τις δεδομένες συνθήκες κάθε χρονική στιγμή, να επιλέγει την κωδικοποίηση και διαμόρφωση οι οποίες δίνουν το χαμηλότερο BER (ουσιαστικά πιθανότητα σφάλματος). Οι διαφορετικές διαμορφώσεις έχουν ποικίλες αντοχές στο θόρυβο [79], [90]. Οι διαφορετικές κωδικοποιήσεις επίσης έχουν ποικίλες αντοχές στο θόρυβο αλλά και συνδέονται με διαφορετικά coding rates άρα και με διαφορετικά μήκη κωδικοποιημένων πακέτων για δεδομένο αρχικό πακέτο καθαυτό πληροφορίας (payload).

5.3.2 Μοντέλα για το packet error rate, PER

Έχει διεξαχθεί αρκετή ερευνητική δραστηριότητα στο θέμα του BER. Εύλογα, όμως, προκύπτει η ανάγκη να γνωρίσουμε και το PER (packet error rate) πέρα από το BER. Αυτό φυσικά εξαρτάται σοβαρά από το είδος κωδικοποίησης και διαμόρφωσης. Στην απλούστερη περίπτωση, στην οποία δεν έχουμε κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος, η πιθανότητα σφάλματος πακέτου είναι η πιθανότητα το ληφθέν πακέτο να περιέχει έστω και ένα εσφαλμένο (κατεστραμένο, φθαρμένο) bit. Η εξίσωση (5.16) δίνει αυτήν την πιθανότητα για πακέτο μήκους N bits [79], [90], [92].

$$PER = 1 - (1 - BER)^N \quad (5.16)$$

Όμως, η 5.16 δε μπορεί να ισχύει σε περίπτωση κωδικοποιημένου πακέτου, διότι αμελεί τη διορθωτική ικανότητα του κώδικα. Η μετάβαση από το BER στο PER σε εκπομπή κωδικοποιημένων πακέτων δεν είναι τετριμμένη και φυσικά εξαρτάται από την κωδικοποίηση που εφαρμόζεται. Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση είναι αυτή της αναφοράς [92]. Εκεί παρουσιάζεται διαστρωματική σχεδίαση η οποία συνδυάζει ΠΔΚ (τεχνική στρώματος 1) και

truncated ARQ (τεχνική στρώματος σύνδεσης δεδομένων (DL) για να επιτύχει εκπομπή με υψηλή φασματική απόδοση. Ταυτόχρονα, όμως, προσφέρεται και γνώση όσον αφορά το PER συνελκτικικά κωδικοποιημένης πληροφορίας.

Χρησιμοποιούνται σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης βασιζόμενα σε διαμορφώσεις m-QAM, BPSK, QPSK και συνελκτικική κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος. Περιλαμβάνει συνελκτικικά κωδικοποιημένους ορθογώνιους M_n ή τετραγωνικούς QAM τρόπους, προσαρμοσμένους από τα πρότυπα HIPERLAN/2 ή IEEE 802.11a [12] [42]. Σχεδιάζεται ένας ΠΔΚ βασισμένος σε πληροφορία ΠΚΚ και πληροφορία από το μηχανισμό αυτόματου αιτήματος επανεκπομπής (automatic repeat request, ARQ). Επίσης υπολογίζονται τα κατώφλια του ΠΔΚ αυτού.

Οι βασικές υποθέσεις και παραδοχές είναι οι ακόλουθες:

- Έχουμε κανάλι με διαλείψεις επίπεδο ως προς τη συχνότητα ((frequency-)flat fading channel)
- Οι διαλείψεις είναι αργές (slow fading channel): έχουμε μεταβολές μεταξύ πακέτων, αλλά όχι κατά τη διάρκεια κάθε πακέτου.
- Υπάρχει πλήρως αξιόπιστος μηχανισμός επίγνωσης καταστάσεως καναλιού.
- Η ανίχνευση σφάλματος είναι τέλεια
- Η ενέργεια εκπομπής είναι σταθερή
- Το PER δίνεται από εξίσωση της μορφής της 5.17

$$PER = a_n \exp(g_n \gamma) \quad (5.17)$$

- Ο αριθμός επανεκπομπών είναι άνω φραγμένος
- Η επιτρεπτή πιθανότητα απώλειας είναι άνω φραγμένη. Δηλαδή, εφ' όσον μιλάμε για ARQ, το ληφθέν πακέτο απορρίπτεται αν ληφθεί φθαρμένο από το θόρυβο πλήθος φορών που υπερβαίνει το μέγιστο αριθμό επανεκπομπών.

Με τις υποθέσεις αυτές επιτυγχάνονται τα ακόλουθα:

- Προτείνεται διαστρωματικό σχήμα με ARQ και ΠΔΚ δηλ στα στρώματα 1 και 2. Η προσαρμογή γίνεται με βάση τις διαλείψεις στα ασύρματα κανάλια.
- Επιτυγχάνεται ο δεδηλωμένος στόχος: η φασματική απόδοση (spectral efficiency) είναι βελτιωμένη χάρη στη χαμηλότερη πιθανότητα σφάλματος και τις συνεπαγόμενες λιγότερες επανεκπομπές.
- Κατασκευάζεται ο ΠΔΚ του πίνακα 7 και υπολογίζονται τα κατώφλια μετάβασης μεταξύ των τρόπων. Χρησιμοποιείται και μη κωδικοποιημένη εκπομπή για λόγους σύγκρισης, αλλά αυτή είναι εκτός του ενδιαφέροντός μας.

Πίνακας 7: Οι τρόποι λειτουργίας της ΠΔΚ που υιοθετείται από την [92]

	τρόπος 1	τρόπος 2	τρόπος 3	τρόπος 4	τρόπος 5	τρόπος 6
διαμόρφωση	BPSK	QPSK	QPSK	16-QAM	16-QAM	64-QAM
ρυθμός κωδικοποίησης	1/2	1/2	3/4	9/16	3/4	3/4
α_n	274.7229	90.2519	67.6181	50.122	53	35.3508
g_n	7.9932	3.4998	1.6883	0.6644	0.3756	0.0900
$\gamma_p n(dB)$	-1.5331	1.0942	3.9722	7.7021	10.2488	15.9784

- Υπολογίζονται οι παράμετροι α_n και g_n της (5.17) για κάθε τρόπο εκπομπής με τη βοήθεια των οποίων δίνεται το PER για κάθε τρόπο. Αναφερόμαστε στο PER συνελικτικά κωδικοποιημένων πακέτων. Οι υπολογιζόμενες τιμές είναι λίγο διαφορετικές από αυτές που θα έδινε η εξίσωση 5.16.
- Υπολογίζονται οι τιμές του SNR που οριοθετούν τους τρόπους του ΠΔΚ μεταξύ τους.

5.3.3 Παραδείγματα ΠΔΚ (AMC) στις ασύρματες επικοινωνίες

Παραδείγματα χρήσης ΠΔΚ στις ασύρματες επικοινωνίες είναι αρκετά. Στο GPRS [102], το οποίο παρείχε χαμηλές ταχύτητες, ο ΠΔΚ ήταν περιορισμένων δυνατοτήτων και περιελάμβανε μόνο τέσσερις τρόπους [93]. Με την αύξηση των απαιτήσεων σε QoS και τον ερχομό του EDGE ο ΠΔΚ που υιοθετήθηκε ήταν αυτός του πίνακα 8, ο οποίος αναπαράγεται επίσης από την [93]. Θεσπίστηκαν δηλαδή 9 δυνατοί τρόποι και μάλιστα στηρίζονται σε δυο μόνο είδη διαμόρφωσης (MSK, 8PSK). Χρησιμοποιείται συνελικτική κωδικοποίηση με διάφορους ρυθμούς κωδικοποίησης. Οι «υψηλότεροι» τρόποι είναι κατάλληλοι για λιγότερο θορυβώδεις συνθήκες.

Στο LTE πλέον η προσαρμογή σύνδεσης γίνεται με την ίδια φιλοσοφία, οι τρόποι, όμως, έγιναν πολύ περισσότεροι, 16 το πλήθος [98]. Και εδώ για να είναι εύστοχες οι μεταπτώσεις μεταξύ τρόπων απαιτείται γνώση ΠΚΚ (CSI ή CQI, channel quality info). Στο LTE καθορίζεται προσαρμογή σύνδεσης με χρήση ΠΔΚ και για τη σηματοδότηση ελέγχου [97], [98].

Και στις δυο περιπτώσεις, ακόμα και στο εξελιγμένο σύστημα 4ης γενιάς LTE, η απόφαση για μετάπτωση μεταξύ τρόπων ακολουθεί έναν απλό μηχανισμό: Με κάποιον μηχανισμό επίγνωσης κατάστασης (ποιότητας) καναλιού γίνεται γνωστός στον κινητό σταθμό ανά διαστήματα ο λόγος σήματος προς παρεμβολές και θόρυβο (signal-to-interference-plus-noise ratio, SNIR) και αυτός προσαρμόζει τον τρόπο εκπομπής του.

Στο WiFi (802.11) υπάρχουν αρκετές εκδοχές, όμως επίσης προβλέπεται μηχανισμός επίγνωσης κατάστασης καναλιού (MCS feedback) τουλάχιστον για το 802.11g [93]. Για το 802.11g πάλι, προτείνεται η δυνατή μετάπτωση μεταξύ 8 τρόπων οι οποίοι ήδη εκτέθηκαν στον πίνακα 6, ο οποίος επίσης αναπαράγεται από το [93], [99]. Για το 802.11ac προβλέπονται 10 τρόποι, οι οποίοι εναλλάσσονται [100], ενώ για το 802.11n περισσότεροι από 32 τρόποι [101]. Και εδώ, η επίγνωση κατάστασης καναλιού επιτυγχάνεται είτε άμεσα με

Πίνακας 8: Οι τρόποι του ΠΔΚ που προτάθηκαν για το σύστημα EDGE [93]. Ο ρυθμός κωδικοποίησης έχει οριστεί διαφορετικά.

αριθμός τρόπου	διαμόρφωση	ταχύτητα ανά χρονοθυρίδα (kbit/s)	ρυθμός κωδικοποίησης	ρυθμ. κωδικ. με μια επανεκπομπή
MCS-1	GMSK	8.8	0.53	0.26
MCS-2	GMSK	11.2	0.66	0.33
MCS-3	GMSK	14.8	0.85	0.42
MCS-4	GMSK	17.6	1.00	0.50
MCS-5	8PSK	22.4	0.37	0.19
MCS-6	8PSK	29.6	0.49	0.24
MCS-7	8PSK	44.8	0.76	0.38
MCS-8	8PSK	54.4	0.92	0.46
MCS-9	8PSK	59.2	1.00	0.50

επί τούτου MCS feedback είτε έμμεσα με ανάλυση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος [93].

5.4 Δίκτυα χωρίς κλίμακα

5.4.1 Γενικά

Τα δίκτυα συχνά περιγράφονται με γράφους. Σε ένα δίκτυο υπολογιστών ή τηλεπικοινωνιών, οι κόμβοι αντιστοιχούν σε δρομολογητές, μεταγωγείς (switches) ή τηλεπικοινωνιακές μηχανές και οι ακμές σε συνδέσεις μεταξύ τους. Για παράδειγμα σε αδόμητο ασύρματο δίκτυο, υπάρχει ακμή μεταξύ δυο κόμβων όταν αυτοί μπορούν να εκπέμπουν και να λάβουν πληροφορία μεταξύ τους, όταν δηλαδή στην πράξη βρίσκονται ο ένας στην εμβέλεια του άλλου.

Επειδή η σύνδεση μεταξύ δυο κόμβων μπορεί εν γένει να μην είναι αμφίδρομη, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν κατευθυντικοί γράφοι για την απεικόνιση δικτύων.

Στην περίπτωση που υπάρχει σύνδεση μεταξύ δυο κόμβων, αυτοί θεωρούνται γείτονες. Η γειτνίαση κόμβων ενός δικτύου αποδίδεται με πίνακα γειτνίασης, έστω A , ο οποίος ορίζεται έτσι ώστε για δυο κόμβους i και j να ισχύει ότι:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν } i \text{ και } j \text{ είναι γείτονες} \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (5.18)$$

Αν ο γράφος δεν είναι κατευθυντικός ισχύει και $A_{ij} = A_{ji}$.

Πέρα από τηλεπικοινωνιακά δίκτυα ή δίκτυα υπολογιστών, οι γράφοι χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση κι άλλων δικτύων, π.χ. κοινωνικών, ακαδημαϊκών συνεργασιών, κ.λ.π.

Ίσως η πιο ενδιαφέρουσα γνώση για ένα δίκτυο είναι το πλήθος των γειτόνων ενός κόμβου. Η παράμετρος αυτή ονομάζεται *βαθμός* του κόμβου. των κόμβων ενός δικτύου.

5.4.2 Τυχαία δίκτυα

Έστω ένα δίκτυο στο οποίο η πιθανότητα να είναι συνδεδεμένοι δυο τυχαίοι κόμβοι i και j μεταξύ τους είναι συγκεκριμένη και σταθερή. Αν για απλότητα υποθέσουμε ότι αυτό περιγράφεται από μη κατευθυντικό γράφο τότε για τον πίνακα γειτνίασης A ισχύει:

$$A_{ij} = A_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{με πιθανότητα } p \\ 0, & \text{με πιθανότητα } q = 1 - p \end{cases} \quad (5.19)$$

Ουσιαστικά η πιθανότητα p είναι η πιθανότητα ύπαρξης σύνδεσης μεταξύ τυχαίων κόμβων. Τα δίκτυα αυτού του είδους ονομάζονται *τυχαία*.

Η διαδικασία κατασκευής τέτοιου δικτύου από N το πλήθος κόμβους είναι η ακόλουθη:

- Έστω τυχαίος κόμβος i
- Συνδέουμε τον i με τυχαίον j από τους υπόλοιπους $N - 1$ με πιθανότητα p .

- Επαναλαμβάνουμε μέχρι να εξαντληθούν όλα τα πιθανά ζεύγη $N(N - 1)/2$ (για μη κατευθυντικό γράφο).

Η κατασκευή τυχαίων δικτύων (γράφων) μοντελοποιείται πιο αυστηρά με βάση το μοντέλο Erdős-Rényi [17], το οποίο μπορεί να εκφραστεί σε δυο εκδοχές ή formalismούς:

- Το μοντέλο $G(n, M)$ **Erdős-Rényi**: όλοι οι δυνατοί γράφοι με δεδομένο πλήθος κόμβων (n) και ακμών (συνδέσεων) (M) είναι ισοπίθανοι.
- Το μοντέλο $G(n, p)$ **Gilbert**: Κάθε δυνατή σύνδεση υπάρχει με πιθανότητα p ανεξάρτητα από όλες τις άλλες συνδέσεις.

Μερικές ενδιαφέρουσες ιδιότητες των τυχαίων δικτύων παρατίθενται στα επόμενα.

Ο βαθμός των κόμβων ακολουθεί κατανομή Poisson, δηλ. η πυκνότητα πιθανότητας (pdf) είναι συνάρτηση της μορφής της εξίσωσης (5.20):

$$p(k) = e^{-\langle k \rangle} \frac{\langle k \rangle^k}{k!} \quad (5.20)$$

Στην πράξη, ο βαθμός είναι κατανεμημένος γύρω από τη μέση τιμή του η οποία δίνεται από την (5.21).

$$\langle k \rangle = p(N - 1) \quad (5.21)$$

Αυτό επιβεβαιώνεται από τις τιμές των ροπών υψηλότερης τάξης. Για τη ροπή δεύτερης τάξης, δηλαδή τη μέση τετραγωνική τιμή, αποδεικνύεται ότι ισχύει η (5.22).

$$\langle k^2 \rangle = p(N - 1)N + p^2 N^2 \quad (5.22)$$

Η τυπική απόκλιση είναι $\sigma_k = (\langle k^2 \rangle - \langle k \rangle^2)^{1/2}$ και από την (5.22) προκύπτει ότι:

$$\sigma_k = [p(1 - p)N]^{1/2} \quad (5.23)$$

Η πλειοψηφία των κόμβων έχουν λοιπόν βαθμό μέσα στο διάστημα $\langle k \rangle \pm \sigma_k$ με το σ_k πεπερασμένο. Αποδεικνύεται επίσης [103] ότι ο μέγιστος και ο ελάχιστος βαθμός συνδέονται με σχέση της μορφής που δίνεται στην (5.24), όπου $\lambda > 0$.

$$k_{max} \approx k_{min} + \frac{\ln N}{\lambda} \quad (5.24)$$

Ενδιαφέρουσα ιδιότητα είναι επίσης η μέση απόσταση μεταξύ τυχαίων κόμβων. Αυτή δίνεται από την (5.25).

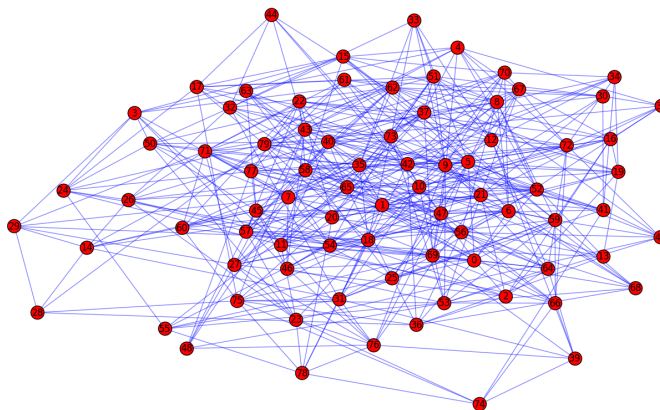
$$\langle d \rangle = \frac{\log N}{\log \langle k \rangle} \quad (5.25)$$

Η πιθανότητα να έχουμε L συνδέσεις στο δίκτυο ακολουθεί τη διωνυμική κατανομή της (5.26) και το αναμενόμενο πλήθος των συνδέσεων (links) δίνεται από την (5.27).

$$P(L) = \binom{N(N-1)}{L} p^L (1 - p)^{\frac{N(N-1)}{2} - L} \quad (5.26)$$

$$\langle L \rangle = p \frac{N(N-1)}{2} \quad (5.27)$$

Στο σχήμα 32 παρουσιάζεται ένα τέτοιο δίκτυο. Παρατηρεί κανείς ότι οι περισσότεροι κόμβοι έχουν περίπου το ίδιο πλήθος γειτόνων.



Σχήμα 32: Τυχαίο δίκτυο

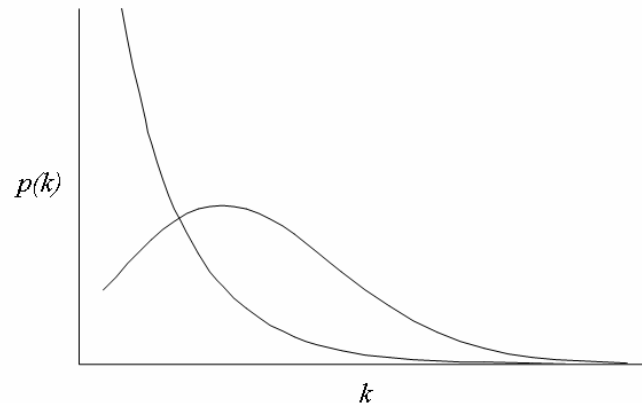
Παράδειγμα τέτοιων δικτύων είναι τα κρυσταλλικά πλέγματα των στερεών. Εκεί κάθε δομικός λίθος (ión) έχει συγκεκριμένο πλήθος γειτόνων ίσο με το πλήθος ομοειδών προς αυτό ιόντων που απαιτούνται για τη διατήρηση της ισορροπίας στη μέση θέση του. Μόνο στις περιοχές σημειακών ή γραμμικών ατελειών παρατηρείται απόκλιση από αυτό το σχήμα [105].

5.4.3 Δίκτυα χωρίς κλίμακα

Έχει παρατηρηθεί ότι τα περισσότερα πραγματικά δίκτυα δεν ακολουθούν το μοντέλο του τυχαίου δικτύου. Αυτό μάλιστα ισχύει και για τεχνικά αλλά και μη δίκτυα. Στα περισσότερα δίκτυα έχει, λοιπόν, παρατηρηθεί [103] ότι η μεγάλη πλειοψηφία κόμβων έχουν λίγους έως πολύ λίγους γείτονες και μόνο μια μικρή μειοψηφία κόμβων έχουν πολλούς. Αυτοί οι κόμβοι με τις πολλές συνδέσεις μπορούν να θεωρηθούν ως οι «δημοφιλείς» κόμβοι. Η ιδέα αυτή συγγενεύει στενά με την αρχή του Pareto, η οποία αναφέρει ότι το 80% των αποτελεσμάτων μπορεί να αποδοθεί στο 20% των αιτίων μιας διαδικασίας [106]. Προκύπτει ότι η κατανομή του πλήθους των γειτόνων έχει πυκνότητα πιθανότητας η οποία ακολουθεί νόμο δύναμης (power law distribution), δηλαδή έχει την απλή μορφή της εξίσωσης (5.28).

$$p(k) \approx k^{-\gamma} \quad (5.28)$$

Αυτή η κατανομή δίνει υψηλές τιμές για χαμηλά k αλλά και η «ουρά» της εκτείνεται ως το άπειρο. Ένα ενδιαφέρον στοιχείο είναι ότι στα περισσότερα τέτοια δίκτυα ισχύει ότι $2 < \gamma < 3$, αν και αυτό δεν είναι απόλυτο [103]. Στο σχήμα 33 παρουσιάζεται η κατανομή αυτή σε σύγκριση με την κατανομή Poisson.



Σχήμα 33: Συγκριτική απεικόνιση κατανομών Poisson και χωρίς κλίμακα

Και εδώ μας ενδιαφέρει φυσικά ο μέσος βαθμός κόμβου, ο οποίος βρίσκεται ότι δίνεται από την (5.29)

$$\langle k \rangle = C \frac{k_{min}^{-\gamma} - k_{max}^{-\gamma}}{\gamma} \quad (5.29)$$

Αυτό προκύπτει από τις ροπές οποιασδήποτε τάξης, οι τιμές των οποίων δίνονται από τη (5.30):

$$\langle k^n \rangle = C \frac{k_{max}^{n-\gamma+1} - k_{min}^{n-\gamma+1}}{n - \gamma + 1} \quad (5.30)$$

Από την (5.30) εύκολα προκύπτει πως για δεδομένο γ , οι ροπές βαθμού n τέτοιου ώστε $n > \gamma - 1$ αποκλίνουν.

Μας ενδιαφέρει περισσότερο η μέση τετραγωνική τιμή (ροπή δεύτερης τάξης) του βαθμού. Έτσι μπορούμε να κάνουμε μια διάκριση περιπτώσεων ανάλογα με την τιμή του γ :

$$\begin{aligned} \gamma < 2 &\Rightarrow \langle k \rangle \rightarrow \infty, \langle k^2 \rangle \rightarrow \infty \\ 2 \leq \gamma < 3 &\Rightarrow \langle k \rangle < \infty, \langle k^2 \rangle \rightarrow \infty \\ 3 \leq \gamma &\Rightarrow \langle k \rangle < \infty, \langle k^2 \rangle < \infty \end{aligned} \quad (5.31)$$

Η (5.31) οδηγεί σε δυο σημαντικές παρατηρήσεις:

- Για τιμές του γ τέτοιες ώστε $2 < \gamma < 3$, η μέση σταθερή απόκλιση $\sigma_k = (\langle k^2 \rangle - \langle k \rangle^2)^{1/2}$ του βαθμού τείνει στο άπειρο, δηλαδή οποιοσδήποτε βαθμός είναι δυνατός.
- Για μεγάλες τιμές του $\gamma (> 3)$ η μέση σταθερή απόκλιση του βαθμού είναι πεπερα-σμένη, άρα τα δίκτυα συμπεριφέρονται σαν τυχαία.

Ισχύει ακόμα η (5.32) για τη σχέση ελάχιστου και μέγιστου βαθμού στο δίκτυο

$$\frac{k_{max}}{k_{min}} = N^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (5.32)$$

Σε αντίθεση με την (5.24), η (5.32) δίνει μέγιστο βαθμό έντονα αύξοντα με το πλήθος των κόμβων. Η σημασία αυτού είναι ότι επιτρέπει πολύ μεγάλους βαθμούς κι έτσι αναδύονται γρήγορα πολύ δημοφιλείς κόμβοι. Οικεία παράδειγμα είναι τα κοινωνικά δίκτυα στα οποία λίγοι σχετικά χρήστες έχουν πολλές γνωριμίες. Οι κόμβοι αυτοί λέγονται *διανομείς* (hubs) και για το μέγιστο βαθμό μπορούμε να διακρίνουμε περιπτώσεις:

- $\gamma > 2 \Rightarrow$ η k_{max} αργά αύξουσα συνάρτηση του N
- $\gamma = 2 \Rightarrow$ η $k_{max} \approx k_{min}N$
- $\gamma < 2 \Rightarrow$ η k_{max} γρήγορα αύξουσα συνάρτηση του N

Δηλαδή για $\gamma < 2$, ο μεγαλύτερος κόμβος (το μέγιστο hub) τείνει να καλύψει ολόκληρο το δίκτυο.

Όσον αφορά τη μέση απόσταση μεταξύ τυχαίων κόμβων, και πάλι η συμπεριφορά εξαρτάται από την τιμή του γ (5.33):

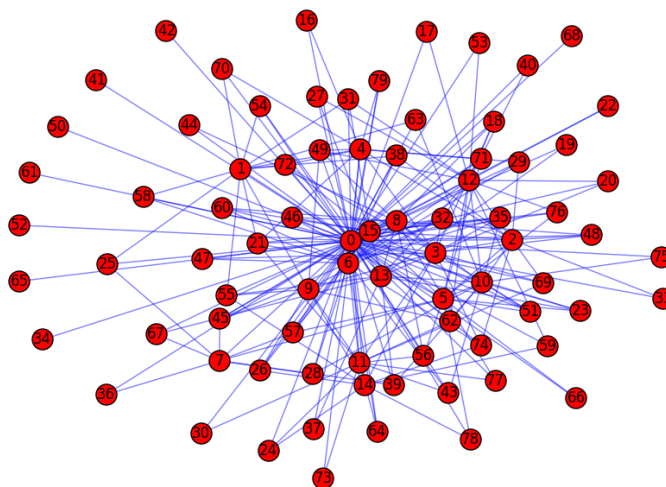
$$\begin{aligned}
 \gamma = 2 &\Rightarrow \langle d \rangle \approx \text{σταθερή} \\
 2 < \gamma < 3 &\Rightarrow \langle d \rangle \approx \ln \ln N \\
 \gamma = 3 &\Rightarrow \langle d \rangle \approx \frac{\ln N}{\ln \ln N} \\
 \gamma > 3 &\Rightarrow \langle d \rangle \approx \ln N
 \end{aligned}
 \tag{5.33}$$

Επιστούμε την προσοχή στην περιοχή $2 < \gamma < 3$ όπου η μέση απόσταση είναι μεν αύξουσα με το πλήθος των κόμβων, αλλά πιο αργά σε σχέση με τα τυχαία δίκτυα (5.25). Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται *υπέρμικροι κόσμοι* (ultra-small worlds) διότι οι αποστάσεις μεταξύ κόμβων είναι μικρές λόγω της ύπαρξης των hubs [104].

Κλείνουμε το εδάφιο με μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση: Επί της αρχής μπορούμε να έχουμε δίκτυα χωρίς κλίμακα και στην περιοχή $\gamma > 3$. Για να είναι παρατηρήσιμη η συμπεριφορά αυτή, απαιτείται διαφορά μεταξύ k_{max} και k_{min} τουλάχιστον δυο τάξεων μεγέθους. Επομένως για να είναι παρατηρήσιμη αυτή η συμπεριφορά σε δίκτυο με π.χ. $\gamma = 5$, σύμφωνα με τη (5.32) θα χρειαζόταν αυτό να είχε μέγεθος τουλάχιστον της τάξεως του $= 10^8$. Τέλος, στο σχήμα 34 παρουσιάζεται ένα δίκτυο χωρίς κλίμακα. Θα παρουσιαστεί στη συνέχεια η διαδικασία κατασκευής αυτών των δικτύων.

5.4.4 Κατασκευή δικτύου χωρίς κλίμακα

Η κατασκευή ενός τέτοιου δικτύου γίνεται βαθμιαία και με βάση δυο κύριες αρχές: τη *διαδικασία αύξησης* (growth process) και την *κατά προτίμηση προσκόλληση* (preferential attachment). Έστω N το πλήθος κόμβοι, τους οποίους θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε για να συνθέσουμε ένα δίκτυο. Ξεκινάμε με m_0 κόμβους οι οποίοι είναι τυχαία συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Θεωρούμε καθέναν από τους υπόλοιπους $N - m_0$ και τον συνδέουμε με το ήδη υπάρχον δίκτυο ως εξής: Έστω i ο κόμβος υπό εξέταση. Τον συνδέουμε με m (όπου



Σχήμα 34: Δίκτυο χωρίς κλίμακα

$m < m_0$) το πλήθος άλλους. Έτσι είναι υποψήφιοι γείτονές του m το πλήθος κόμβοι. Ο i συνδέεται με τον καθέναν από αυτούς, έστω j με πιθανότητα που δίνεται από την (5.34).

$$p_{i,j} = \frac{k_j}{\sum_{n=N-m+1}^N k_n} \quad (5.34)$$

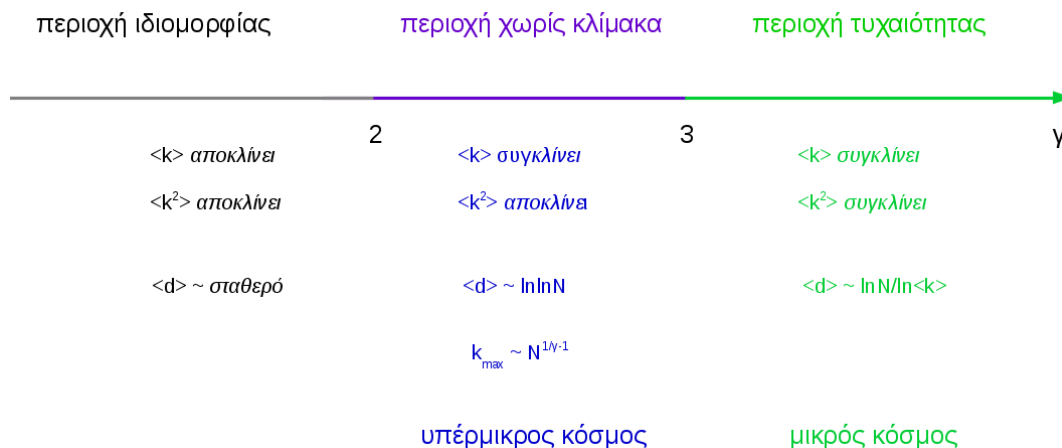
Δηλαδή έχει προτίμηση στο να συνδεθεί με τους ήδη πιο δημοφιλείς κόμβους. Σημειώνουμε ότι στην εκδοχή αυτή δεν καθορίζεται ο τρόπος επιλογής των m και m_0 . Αυτό το μοντέλο κατασκευής λέγεται μοντέλο Barabasi [103]. Σ' αυτό το μοντέλο, οι «παλιότεροι» κόμβοι πλεονεκτούν διότι αποκτούν γείτονες νωρίτερα και καθίστανται άμεσα οι πιο δημοφιλείς. Για να υπερκεραστεί αυτό το πλεονέκτημα της παλαιότητας, εισάγεται η *fitness* του κόμβου. Η *fitness* είναι μια ιδιότητα που κατέχει κάθε κόμβος, η οποία την καθιστά δημοφιλή. Έστω για κόμβο j η *fitness* είναι η η_j . Τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η πιθανότητα προσκόλλησης σε αυτόν ενός νέου κόμβου i δίνεται από τη (5.35).

$$p_{i,j} = \frac{\eta_j k_j}{\sum_{n=N-m+1}^N \eta_n k_n} \quad (5.35)$$

Αυτό το μοντέλο ονομάζεται Bianconi-Barabasi.

5.4.5 Σύνοψη

Συνοψίζουμε αυτά που ειπώθηκαν ως τώρα: Τα δίκτυα στα οποία ο βαθμός των κόμβων ακολουθεί κατανομή νόμου δύναμης δηλαδή της μορφής $\approx k^{-\gamma}$ όταν $2 < \gamma < 3$ παρουσιάζουν συμπεριφορά *χωρίς κλίμακα*. Χτίζονται με *διαδικασία αύξησης και κατά προτίμηση προσκόλλησης* των νέων κόμβων. Ο μέσος βαθμός των κόμβων έχει άπειρη μέση σταθερή απόκλιση, δηλ $k = \langle k \rangle \pm \infty$. Η μέση απόσταση μεταξύ κόμβων αυξάνεται σχετικά αργά και γι' αυτό αποτελούν *υπέρμικρους κόσμους*. Το σχήμα 35 [103] συνοψίζει αυτές τη συμπεριφορές.



Σχήμα 35: Συμπεριφορά δικτύων με βαθμό κόμβων κατανεμημένο με νόμο δύναμης

5.4.6 Επιδημική διάδοση στα δίκτυα χωρίς κλίμακα

Είδαμε στο κεφάλαιο της επιδημικής διάδοσης (κεφάλαιο 4) την έννοια του *βασικού αριθμού αναπαραγωγής*. Αυτός έχει την έννοια κατωφλίου, η υπέρβαση του οποίου είναι απαραίτητη ώστε να μπορέσει μια επιδημία να επιζήσει σ' ένα δίκτυο. Όταν μια επιδημία επιζεί, εννοούμε ότι ασυμπτωτικά το ποσοστό μόλυνσης είναι μη μηδενικό.

Ο *αριθμός αναπαραγωγής* έχει το φυσικό νόημα του πλήθους μολύνσεων που μπορεί να προκαλέσει ένας κόμβος καθ' όσον παραμένει μολυσμένος. Ισούται με α/δ , όπου α η πιθανότητα μόλυνσης και δ η πιθανότητα θεραπείας.

Ο *βασικός αριθμός αναπαραγωγής* είναι το κατώφλιο που πρέπει να υπερβεί ο *αριθμός αναπαραγωγής* για να επιζήσει η επιδημία. Η τιμή του κατωφλίου είναι η μονάδα. Εάν πάλι το κατώφλιο δεν υπερπηδηθεί, η επιδημία εκφυλλίζεται, σβήνει, με το ποσοστό μόλυνσης να τείνει ασυμπτωτικά στο μηδέν.

Κατά τη διαπραγμάτευση του θέματος αυτού, είχαμε σιωπηρά υποθέσει ότι αναφερόμαστε σε τυχαία δίκτυα. Στην περίπτωση που το δίκτυο είναι χωρίς κλίμακα, η συμπεριφορά αλλάζει: δεν υπάρχει κατώφλιο το οποίο να είναι το ελάχιστο για να επιζήσει η επιδημία. Ακόμα κι αν π.χ. η πιθανότητα μόλυνσης είναι χαμηλή, η επιδημία επιζεί, έστω και με πολύ χαμηλό ποσοστό μόλυνσης [72], [109]. Έχει επίσης επισημανθεί ότι η παραπάνω απουσία κατωφλίου ισχύει σε περίπτωση που οι επαφές μεταξύ κόμβων είναι τυχαίες. Εάν όμως υποθεθεί ότι το δίκτυο έχει ισχυρή τάση σχηματισμού *συστάδων* (highly clustered), τότε υπάρχει κατώφλιο για την πιθανότητα μόλυνσης (κατ' επέταση και για την πιθανότητα προώθησης), μόνο πάνω από το οποίο επιζεί η επιδημία [108].

6. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

6.1 Η Βέλτιστη Παύση

6.1.1 Βασικές έννοιες

Ας θεωρήσουμε το ακόλουθο πείραμα: Παρατηρούμε μια ποσότητα και κάθε χρονική στιγμή n έχουμε μια μέτρησή της x_n . Έτσι τις διακριτές χρονικές στιγμές $1, 2, \dots, n$ οι μετρήσεις μας δίνουν τις τιμές x_1, x_2, \dots, x_n . Αυτές τις θεωρούμε τιμές ισάριθμων τυχαίων μεταβλητών (τ.μ.) X_1, X_2, \dots, X_n . Οι παρατηρήσεις μας, μας δίνουν τις τιμές $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$. Έστω επίσης ότι σε κάθε χρονική στιγμή έχουμε την επιλογή να σταματήσουμε την παρατήρηση της εν λόγω ποσότητας αποκομίζοντας κάποιο κέρδος. Εάν το κάνουμε τη στιγμή n αποκομίζουμε κέρδος y_n το οποίο το εκφράζουμε ως $y_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Δηλαδή το κέρδος εξαρτάται εν γένει από την ιστορία των μέχρι τούδε μετρήσεων. Το κέρδος αν σταματήσουμε αμέσως χωρίς να κάνουμε καμιά μέτρηση είναι y_0 και αν δε σταματήσουμε ποτέ είναι y_∞ . Η πιθανότητα να επιλέξουμε να σταματήσουμε τη στιγμή n αποδίδεται με την τ.μ. $\phi_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Με τον όρο *κανόνας παύσης* εννοούμε την ακολουθία συναρτήσεων της εξίσωσης (6.1)

$$\phi = \phi_0, \phi_1(x_1), \phi_2(x_1, x_2), \dots, \phi_n(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots \quad (6.1)$$

Στην 6.1 υποθέτουμε πάντα ότι $0 \leq \phi_n(x_1, x_2, \dots, x_i) \leq 1 \forall i$.

Ο κανόνας παύσης δηλαδή καθορίζεται από τις πιθανότητες να σταματήσουμε τις διάφορες δεδομένες χρονικές στιγμές δεδομένης της ιστορίας μετρήσεων. Ο κανόνας και οι μετρήσεις καθορίζουν -πιθανοκρατικά βέβαια- τη στιγμή παύσης N . Αν η συνάρτηση μάζας πιθανότητας του N συμβολιστεί με ψ_n παρατηρούμε ότι ισχύει η (6.2).

$$\begin{aligned} \psi_0 &= \phi_0 \\ \psi_1(x_1) &= (1 - \phi_0)\phi_1(x_1) \\ &\dots \\ \psi_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \left[\prod_{j=1}^{n-1} (1 - \phi_j(x_1, x_2, \dots, x_j)) \right] \phi_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &\dots \\ \psi_\infty(x_1, x_2, \dots, x_\infty) &= 1 - \sum_0^\infty \psi_j(x_1, x_2, \dots, x_j) \end{aligned} \quad (6.2)$$

Οι ορισμοί συνοψίζονται στον πίνακα 9. Αναφερόμαστε πάντα στη διακριτή χρονική στιγμή n .

Ο κανόνας παύσης μας καθοδηγεί να σταματήσουμε κάποια στιγμή, π.χ. την n και το αναμενόμενο όφελος που αντιστοιχεί δίνεται από την (6.3)

$$V(\phi) = E[y_n(x_1, x_2, \dots, x_n)] \quad (6.3)$$

Πίνακας 9: Φορμαλισμός για την απόδοση του ορισμού της βέλτιστης παύσεως.

περιγραφή	συμβολισμός
Παρατηρούμενη ποσότητα	x_n
Όφελος από την παύση	y_n
Συνάρτηση μάζας πιθανότητας παύσης	$\psi_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$
Πιθανότητα παύσης	$\phi_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Σκοπός είναι να βρεθεί ο κανόνα παύσης ϕ που αποδίδει το μέγιστο κέρδος $V(\phi)$. Αυτή είναι ουσιαστικά και η διατύπωση του προβλήματος της βέλτιστης παύσεως.

6.1.2 Προβλήματα με πεπερασμένο ορίζοντα

Φυσικά μπορούν να διατυπωθούν πολλοί κανόνες παύσης. Δεν είναι όμως όλοι βέλτιστοι για όλα τα προβλήματα υπό όλες τις προϋποθέσεις. Όταν στο πρόβλημα παύσης, ο χρόνος παύσεως είναι άνω φραγμένος, τότε λέμε για *πρόβλημα με πεπερασμένο ορίζοντα*. Στην περιγραφή του προβλήματος συνεισφέρει η εξίσωση (6.4).

$$V_j^{(T)}(x_1, \dots, x_n) = \max\{y_j(x_1, \dots, x_j), E(V_{j+1}^{(T)}(x_1, \dots, x_j, X_{j+1}) | X_1 = x_1, \dots, X_j = x_j)\} \quad (6.4)$$

Στην (6.4) έχει χρησιμοποιηθεί ο συμβολισμός $V_T^{(T)}(x_1, \dots, x_T) = y_T(x_1, \dots, x_T)$. Η σημασία της είναι ότι τη στιγμή j συγκρίνεται το κέρδος από παύση τότε, δηλαδή το $y_i(x_1, \dots, x_j)$ με το αναμενόμενο κέρδος αν συνεχιστεί το παιχνίδι τουλάχιστον και στην $j + 1$ *δεδομένων των ως τότε μετρήσεων* (υπεσχημένων ωφελειών) x_1, \dots, x_j .

6.1.3 Το πρόβλημα του γραμματέως (the classical secretary problem)

Το πιο γνωστό ίσως πρόβλημα με πεπερασμένο ορίζοντα είναι το κλασικό πρόβλημα του γραμματέως, το οποίο έχει σημαντική θέση στην έρευνά μας. Θεωρούμε το πρόβλημα βέλτιστης παύσης με πεπερασμένο και γνωστό ορίζοντα με την ακόλουθη μορφή:

Έστω μια εταιρεία θέλει να προσλάβει έναν υπάλληλο, τον «γραμματέα», όπως αναφέρεται παραδοσιακά στη βιβλιογραφία. Για το σκοπό αυτό διεξάγονται διαδοχικές συνεντεύξεις με τους υποψηφίους. Το πλήθος των υποψηφίων είναι πεπερασμένο και εκ των προτέρων γνωστό. Κάθε υποψήφιος αξιολογείται ως προς το όφελος το οποίο μπορεί να φέρει με την πρόσληψή του. Έτσι, π.χ. ο n -οστός υποψήφιος θα φέρει όφελος y_n με την πρόσληψή του. Στο τέλος κάθε συνέντευξης η εταιρεία πρέπει να αποφασίσει αν θα προσλάβει τον υποψήφιο. Θετική απόφαση σημαίνει παύση της διαδικασίας με όφελος y_n , ενώ αρνητική σημαίνει συνέχισή της με την αξιολόγηση των υπολοίπων.

Ισχύουν επίσης οι εξής περιορισμοί:

- Δυο υποψήφιοι δεν είναι ποτέ ισοδύναμοι, δηλαδή $y_i \neq y_j \forall i, j$. Δηλαδή, σύμφωνα με την προηγούμενη ορολογία, οι μετρήσεις δεν είναι ποτέ ίσες («ισόπαλες»).

- Δε μπορεί να προσληφθεί υποψήφιος ο οποίος έχει ήδη αξιολογηθεί ακόμα κι αν ήταν καλύτερος από τον παρόντα. Δε μπορεί να προσληφθεί π.χ. ο i ενώ τώρα αξιολογείται ο j εάν $i < j$ ακόμα κι αν $y_i > y_j$. Δηλαδή, δε μπορούμε να επιστρέψουμε σε μια παρελθούσα μέτρηση αν νομίζουμε πως ήταν πιο σύμφωρη από όσες ακολούθησαν.

Τότε αποδεικνύεται [110], [111] ότι ο κανόνας βέλτιστης παύσης υπαγορεύει παύση τη στιγμή r_1 που δίνει το καλύτερο όφελος ως τότε, εφ' όσον ικανοποιείται η συνθήκη της εξίσωσης (6.5).

$$r_1 \leq n/e \quad (6.5)$$

... όπου e η βάση των φυσικών λογαρίθμων. Δηλαδή, μετά το πρώτο 36% περίπου των υποψηφίων προσλαμβάνεται ο επόμενος που παρουσιάζεται και είναι καλύτερος απ' όλους τους προηγούμενους και εγκαταλείπεται η ελπίδα πως θα βρεθεί κάποιος ακόμα καλύτερος στο μέλλον.

6.1.4 Το πρόβλημα της στάθμευσης (the parking problem)

Αυτό είναι ένα ακόμα ενδιαφέρον πρόβλημα με πεπερασμένο ορίζοντα, και το οποίο διατυπώνεται στα ακόλουθα:

Έστω θέλουμε να πάμε στο θέατρο με αυτοκίνητο και να σταθμεύσουμε όσο πιο κοντά σ' αυτό γίνεται για να αποφύγουμε το περπάτημα. Η απόσταση του θεάτρου από το σημείο εκκίνησης είναι γνωστή και συμβολίζεται με $T > 0$. Οι θέσεις στάθμευσης στο δρόμο προς το θέατρο είναι ελεύθερες με (κοινή και σταθερή) πιθανότητα p . Έτσι η κατάσταση της θέσης j περιγράφεται με την τ.μ. X_j , έτσι ώστε $X_j = 0$ όταν η θέση είναι κενή και $X_j = 1$ όταν είναι κατειλημμένη. Εάν σταματήσουμε και σταθμεύσουμε στην (κενή) θέση j , το κόστος μας είναι $|T - j|$, δηλαδή η απόσταση που θα περπατήσουμε. Εάν προσπεράσουμε το θέατρο χωρίς να σταθμεύσουμε διότι η θέση στο T είναι κατειλημμένη, το κόστος μας είναι $(1 - p) + 2p(1 - p) + 3p^2(1 - p) + \dots = 1/(1 - p)$.

Το πρόβλημα αυτό έχει λύση η οποία είναι η ακόλουθη: Προχωρούμε με το αυτοκίνητο (προσπερνώντας τις τυχόν κενές θέσεις) μέχρι r θέσεις από τον προορισμό και σταθμεύουμε στην πρώτη διαθέσιμη από κει και μετά. Το r δίνεται από την εξίσωση (6.6).

$$\min\{r \geq 0 : p^{r+1} \leq \frac{1}{2}\} \quad (6.6)$$

Παρατηρεί κανείς ότι αυτή η διατύπωση του προβλήματος της στάθμευσης είναι με πεπερασμένο και γνωστό ορίζοντα. Επί πλέον, η πιθανότητα p να είναι μια θέση ελεύθερη είναι εκ των προτέρων γνωστή.

6.1.5 Γνωστοί κανόνες βέλτιστης παύσης: οι κανόνες $ksla$ και $1sla$

Αρκετά προβλήματα βέλτιστης παύσης μπορούν να λυθούν με αρκετή ακρίβεια. Εκθέτουμε αμέσως τον κανόνα k -stage look-ahead ($ksla$). Αυτός μας λέει ότι η βέλτιστη τιμή για

να σταματήσουμε είναι η N_k αυτή που περιγράφεται από την (6.7)

$$N_k = \min\{n \leq 0 : Y_n \leq E(V_{n+1}^{(n+k)} | \mathcal{F}_n)\} \quad (6.7)$$

όπου \mathcal{F}_n το σύνολο των μέχρι τώρα παρατηρήσεων $\mathcal{F}_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

Επί της ουσίας η (6.7) μας υπαγορεύει να σταματήσουμε την πρωιμότερη χρονική στιγμή κατά την οποία το υπεσχημένο κέρδος την εν λόγω στιγμή ισούται ή υπερβαίνει το αναμενόμενο κέρδος ξεκινώντας από την $n + 1$ και φτάνοντας ως την $n + k$ δεδομένης της ιστορίας των μέχρι τότε μετρήσεων.

Για την ειδική περίπτωση $k = 1$ ο κανόνας *ksla* (*k-stage look-ahead*) μεταπίπτει στον *1sla* (*one-stage look-ahead*), ο οποίος αποδίδεται στην (6.8).

$$N_1 = \min\{n \leq 0 : Y_n \leq E(Y_{n+1} | \mathcal{F}_n)\} \quad (6.8)$$

Δηλαδή είναι η καλύτερη στιγμή να σταματήσουμε όταν λάβουμε μέτρηση (παρατήρηση) η οποία μας υπόσχεται καλύτερο κέρδος από την αναμενόμενη τιμή του κέρδους.

Βέβαια, ο κανόνας παύσης *1sla* δεν είναι πάντα βέλτιστος, αλλά μόνο υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Ο ορίζοντας του προβλήματος είναι πεπερασμένος.
- Το πρόβλημα είναι μονότονο, δηλαδή το όφελος δίνεται από μονότονη συνάρτηση. Κλασική τέτοια περίπτωση είναι όταν το όφελος έχει αθροιστικό χαρακτήρα ή όταν μπορούμε να ανακαλέσουμε μια παλιότερη μέτρηση. Περίπτωση σαν την τελευταία είναι μια εκδοχή του προβλήματος του γραμματέως σύμφωνα με την οποία μπορούμε να «επιστρέψουμε» και να προσλάβουμε έναν περασμένο υποψήφιο τον οποίον θεωρούμε καλύτερο από τον παρόντα (δηλ. αποδίδει υψηλότερο κέρδος).

Το πρόβλημα είναι μονότονο όταν ισχύει η εξίσωση (6.9).

$$A_0 \subset A_1 \subset A_2 \subset \dots \quad (6.9)$$

... όπου A_n το γεγονός (δηλαδή το σύνολο) $\{Y_n \geq E(Y_{n+1} | \mathcal{F}_n)\}$, δηλαδή το σύνολο των αποτελεσμάτων που δίνουν όφελος μεγαλύτερο από την αναμενόμενη τιμή του δεδομένων των έως τώρα μετρήσεων.

Αποδεικνύεται, όμως, ότι ο *1sla* είναι βέλτιστος και σε προβλήματα με άπειρο ορίζοντα (μπορούμε να μη σταματήσουμε και ποτέ) εάν επί πλέον ικανοποιούνται κάποιες επί πλέον συνθήκες [111].

6.1.6 Παράδειγμα εφαρμογής της βέλτιστης παύσης

Συνεχίζουμε με ένα παράδειγμα από τις ασύρματες επικοινωνίες, όπου η μετρούμενη ποσότητα είναι ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο (SNR) σ' ένα ασύρματο κανάλι. Έστω, λοιπόν, ότι αυτός μετράται κάθε (διακριτή) χρονική στιγμή n και περιγράφεται από την τ.μ. X_n

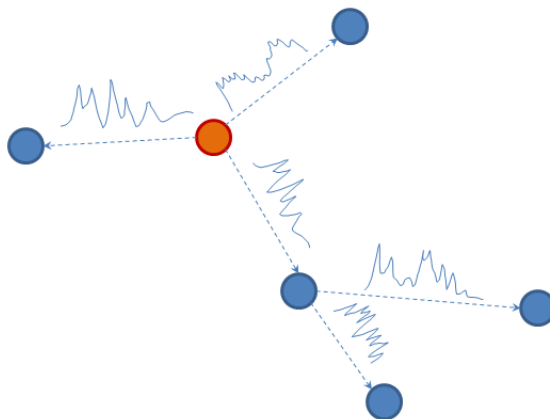
και ότι έτσι αποκομίζουμε τις μετρήσεις $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$. Εάν ο πομπός εκπέμψει τη χρονική στιγμή n θα επιτευχθεί ρυθμαπόδοση (throughput) y_n την οποία θεωρούμε ως το όφελος που αποκομίζουμε. Ζητείται ο κανόνας παύσης ο οποίος θα υπαγορεύσει εκπομπή τη βέλτιστη στιγμή ώστε να επιτευχθεί η υψηλότερη ρυθμαπόδοση. Εναλλακτικά μπορούμε με το y_n να συμβολίσουμε τη ζημία (π.χ. χρονοκαθυστέρηση) που έχουμε επιλέγοντας να εκπέμψουμε τη στιγμή εκείνη, οπότε σκοπός της βέλτιστης παύσης είναι να ελαχιστοποιήσει το y_n .

Στην [112] οι ερευνητές αναζητούν τη βέλτιστη στιγμή εκπομπής. Η μετρούμενη τυχαία μεταβλητή είναι η κατάσταση του καναλιού (π.χ. θόρυβος ή διαλείψεις) και ως όφελος εκλαμβάνεται το πλήθος των εκπεμπόμενων bits σε μοναδιαίο χρόνο.

7. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

7.1 Γενικά - Παραδοχές

Υποθέτουμε αδόμητο ασύρματο δίκτυο. Η δικτύωση είναι κατανεμημένη (mesh). Πεπερασμένος αριθμός κόμβων κατέχει ένα ποσό πληροφορίας το οποίο επιθυμούμε να διαδοθεί στο δίκτυο με κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση ενεργειακού κόστους. Τα ασύρματα κανάλια μεταξύ κόμβων είναι ενθόρυβα και με διαλείψεις (σχήμα 36).



Σχήμα 36: Κανάλια με θόρυβο και διαλείψεις στην ασύρματη μετάδοση

Κάνουμε τις εξής παραδοχές:

- Η συμπεριφορά του καναλιού $A \rightarrow B$, όπου A και B κόμβοι, είναι ίδια με την του $B \rightarrow A$, δηλ. είναι αμφίδρομη.
- Δεν υπάρχει ανταγωνισμός (contention) για την κατάληψη των καναλιών από τους πομπούς.
- Οι κόμβοι χρησιμοποιούν ΠΔΚ (προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση, AMC, adaptive modulation and coding) και μπορούν:
 - Να αλλάξουν τρόπο του ΠΔΚ στιγμιαία και χωρίς κόστος.
 - Να εκπέμπουν και να λάβουν με οποιονδήποτε από ένα σύνολο δυνατών τρόπων.
- Το κόστος εκπομπής ή λήψης ενός πακέτου είναι πολύ μεγαλύτερο (κατά μερικές τάξεις μεγέθους) από το κόστος επεξεργασίας του [48].
- Για την περίπτωση ακίνητων κόμβων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο Mica-2 [48] για το ενεργειακό κόστος.

- Η μολύνουσα πληροφορία είναι ένα και μοναδικό πακέτο και χωράει να αποθηκευτεί στον κόμβο. Επομένως δεν διαγράφονται πακέτα πληροφορίας λόγω έλλειψης χώρου αποθήκευσης.
- Οι κόμβοι μπορούν να παρουσιάζουν κινητικότητα, δηλ να κινούνται με τυχαίο τρόπο.
- Ο χρόνος μοντελοποιείται ως διακριτή ποσότητα.

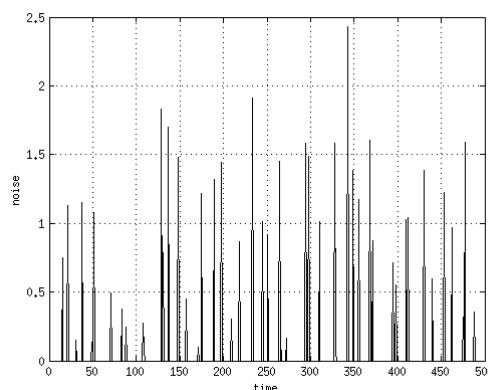
7.2 Μοντέλο θορύβου και ασυρμάτου καναλιού

Σε κάθε ασύρματο κανάλι μεταξύ δυο κόμβων A και B υπάρχουν διαλείψεις και θόρυβος. Αυτό είναι αποτέλεσμα της πολυδιάσχυσης του σήματος, των H/M παρεμβολών κλπ. Οι διαλείψεις ακολουθούν κατανομή Nakagami-m και πιο ειδικά κατανομή Rayleigh της οποίας η πυκνότητα πιθανότητας δίνεται από την 7.1

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7.1)$$

Υπάρχει επίσης και τυχαίος θόρυβος. Αυτός πηγάζει από τις τυχαίες διεργασίες στο ασύρματο κανάλι όπως περιγράψαμε και στο κεφάλαιο 5.2 Αποδεικνύεται ότι είναι σχεδόν τυχαίος και λευκός (προσθετικός λευκός γκαουσιανός θόρυβος, additive white gaussian noise, AWGN) [114].

Μπορούμε να απεικονίσουμε τον τυχαίο θόρυβο ως συρμό παλμών αφικνούμενων σε χρονικές στιγμές τυχαία κατανομημένες. Μάλιστα, η στιγμή άφιξης του παλμού είναι γκαουσιανά κατανομημένη γύρω από την τιμή N_0 με απόκλιση σ_N . Αυτός ο θόρυβος αποδίδεται στο σχήμα 37.



Σχήμα 37: Θόρυβος με παλμούς με γκαουσιανά κατανομημένους χρόνους άφιξης

Είναι θεμιτό ο τυχαίος θόρυβος να συνυπάρχει με διαλείψεις στο κανάλι.

Λόγω του υποβιβασμού σήματος υιοθετούμε κωδικοποίηση προληπτικού ελέγχου σφάλματος (forward error correction encoding) και μάλιστα συνελκτική. Αυτή η υπόθεση περιπλέκει τους υπολογισμούς PER , όπως αναπτύσσουμε αμέσως. Έστω επικοινωνία με

(κωδικοποιημένα) πακέτα μήκους L bits και bit error rate που συμβολίζουμε με BER . Για να έχουμε σωστή λήψη του πακέτου, πρέπει να ληφθούν επιτυχώς όλα τα $bits$, άρα το PER δίνεται από την 7.2

$$PER = 1 - (1 - BER)^L \quad (7.2)$$

Αυτή η υπόθεση όμως αμελεί τη διορθωτική ισχύ του κώδικα ελέγχου σφάλματος. Π.χ. σε έναν block κώδικα (σχήμα 38) έχει σημασία αν ο θόρυβος βλάψει την καθαυτό πληροφορία ή τα bits του κώδικα.



Σχήμα 38: Γραμμικός κώδικας block

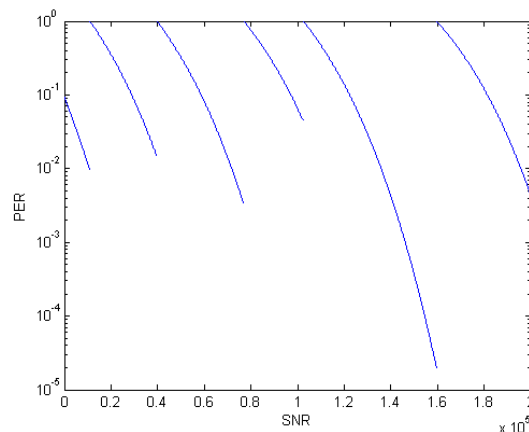
Σ' έναν συνελικτικό κώδικα η διάκριση μεταξύ ωφέλιμου φορτίου (payload) και κώδικα δεν είναι ευδιάκριτη και η κατάσταση περιπλέκεται. Η συνελικτική κωδικοποίηση, όπως και η block κωδικοποίηση χαρακτηρίζεται απ' το ρυθμό κωδικοποίησης, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του μήκους του πακέτου πριν και μετά την κωδικοποίηση. Στην ουσία εκφράζει το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου προς το του κωδικοποιημένου πακέτου, δηλαδή το ποσοστό ωφέλιμων bits στο πακέτο.

Υπενθυμίζουμε ότι υποθέσαμε τη χρήση προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, ΠΔΚ (adaptive modulation and coding, AMC) ώστε να έχουμε αξιόπιστη λήψη σ' αυτές τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του καναλιού. Υιοθετούμε, μάλιστα τον ΠΔΚ του πίνακα 7 του υποκεφαλαίου 5.3. Έτσι οι κόμβοι του δικτύου μπορούν ανάλογα με τις συνθήκες να «μεταπηδούν» μεταξύ των τρόπων (modes) του ΠΔΚ αυτού. Παρατηρούμε ότι για δεδομένο μήκος ωφέλιμου φορτίου (payload) οι χαμηλοί τρόποι δίνουν πακέτο μεγάλου μήκους, άρα χρειάζονται μεγαλύτερες ενέργειες για να εκπνευθούν και να ληφθούν. Όπως ξέρουμε το PER και το BER εξαρτώνται από τη διαμόρφωση [90] και την κωδικοποίηση [91]. Στην περίπτωση συνελικτικής κωδικοποίησης οι υπολογισμοί αυτοί δεν είναι τετριμμένοι. Αποδεικνύεται [92] ότι η χρήση του προαναφερθέντος ΠΔΚ μας δίνει PER το οποίο δίνεται από την (7.3).

$$PER = \begin{cases} a_n \exp(-\gamma g_{pn}), & \text{αν } \gamma_n \leq \gamma \\ 1, & \text{αν } 0 \leq \gamma < \gamma_n \end{cases} \quad (7.3)$$

Στην (7.3), τα g_{pn} , γ_n , g_n και a_n είναι παράμετροι που εξαρτώνται από τον τρόπο n της ΠΔΚ και υιοθετούνται από την [92]. Η (7.3) μας δίνει μια οικογένεια καμπύλων, οι οποίες μας υποδεικνύουν τον πιο κατάλληλο τρόπο ανάλογα με το γ (σχήμα 39).

Η (7.3) επί της ουσίας επιμερίζει το πεδίο SNR σε γειτονικά, διαδοχικά, ξένα μεταξύ τους διαστήματα με ποσοτικά διαφορετικές συμπεριφορές.



Σχήμα 39: Εξάρτηση του PER από το SNR σύμφωνα με το μοντέλο της [92]

Έστω σε ένα κανάλι, μια χρονική στιγμή t ο θόρυβος είναι τέτοιος ώστε $\gamma_n \leq \gamma(t) < \gamma_{n+1}$. Τότε λέμε ότι τη στιγμή t το κανάλι βρίσκεται στην κατάσταση n .

Επειδή ο θόρυβος και οι διαλείψεις μεταβάλλονται συνεχώς, ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο περιγράφεται από μια τυχαία μεταβλητή (τ.μ.). Συνεπώς και το κανάλι μπορεί να μεταπίπτει μεταξύ καταστάσεων ανάλογα με το θόρυβο ή τις διαλείψεις. Οι μεταβάσεις αυτές μπορούν να αποδοθούν με μια μαρκοβιανή μηχανή καταστάσεων [89], [86]. Φυσικά μπορεί να οριστεί και η μήτρα μετάβασης (transition matrix) για ένα κανάλι. Προφανώς η μήτρα αυτή εξαρτάται από το θόρυβο. Για να έχουμε όμως μια καθορισμένη μήτρα, υποθέτουμε ότι το μοντέλο του θορύβου είναι σταθερό.

7.3 Επιδημικό μοντέλο

Έστω τη χρονική στιγμή t έχουμε $I(t)$ μολυσμένους και $S(t)$ ευάλωτους κόμβους. Κάθε μολυσμένος κόμβος ευρεκπέμπει με πιθανότητα $\beta(t)$ χρησιμοποιώντας τον τρόπο $\mu(t)$. Υιοθετούμε το συμβολισμό $\beta \in B$ και $\mu \in M = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$ όπου οι τρόποι δίνονται από τον πίνακα 10 και είναι το πεδίο τιμών του β . Το ζεύγος $(\beta, \mu) \in B \times M$ αποτελεί την κατάσταση του κόμβου τη στιγμή t .

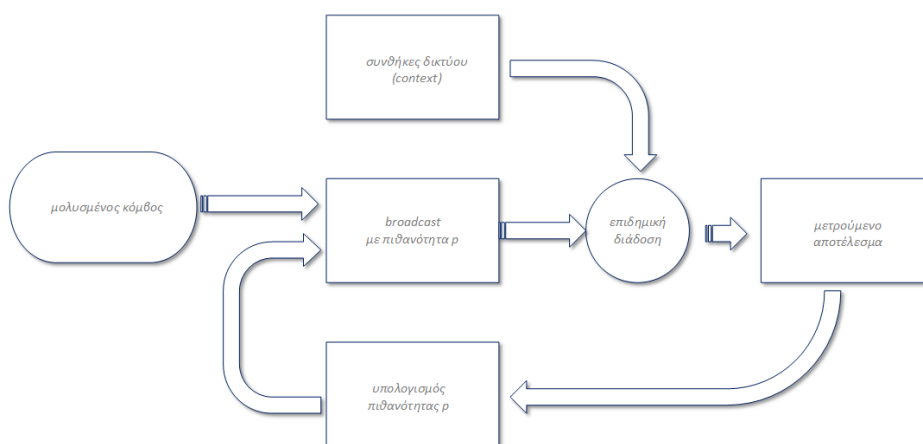
Πίνακας 10: Οι τρόποι

τρόπος	1	2	3	4	5	6
ρυθμός κωδικοποίησης	1/2	1/2	3/4	9/16	3/4	3/4
διαμόρφωση	BPSK	QPSK	QPSK	16-QAM	16-QAM	64-QAM

Αυτό ερμηνεύεται ως ακολούθως: Κάθε χρονική στιγμή ο μολυσμένος κόμβος έχει πιθανότητα δ να «θεραπευθεί», δηλ. να καταστεί η μολύνουσα πληροφορία μη χρησιμοποιήσιμη για οποιονδήποτε τυχαίο λόγο, π.χ. φθορά του αποθηκευτικού μέσου, φθορά της πληροφορίας λόγω προσβολής από Η/Μ παρεμβολή, κ.λ.π. Αν μεν θεραπευθεί μεταπίπτει

στην ευάλωτη κατάσταση έως ότου μολυνθεί εκ νέου. Εάν δε παραμείνει μολυσμένος, εκτελεί ένα πείραμα τύχης το οποίο είναι επιτυχές με πιθανότητα β . Στην περίπτωση αυτή εκπέμπει χρησιμοποιώντας τον τρόπο μ του σχήματος ΠΔΚ. Δηλαδή ο κόμβος έχει πιθανότητα β να εκπέμψει και μάλιστα αν το κάνει θα το κάνει χρησιμοποιώντας τον τρόπο μ του σχήματος ΠΔΚ.

Ο μολυσμένος κόμβος παρατηρεί παραμέτρους του περιβάλλοντός του, δηλαδή αποκομίζει επίγνωση πλαισίου και προσαρμόζει την κατάστασή του (δηλαδή τη συμπεριφορά του) σύμφωνα με κάποιον μηχανισμό, ο οποίος καθιστά την επιδημική διάδοση προσαρμοστική. Το σχήμα 40 αποδίδει αυτή τη διαδικασία.



Σχήμα 40: Το μοντέλο του συστήματος ως σύστημα ελέγχου με ανάδραση

Σε επόμενα κεφάλαια θα προσθέσουμε ορισμένες παραδοχές και μερικές φορές θα αποκλίνουμε κάπως από αυτό το γενικό μοντέλο. Πάντως, σε κάθε περίπτωση, θα μείνουμε προσηλωμένοι σε επιδημικά μοντέλα της μορφής SIS (Susceptible-Infected-Susceptible).

7.4 Μοντέλο Δικτύου

7.4.1 Γενικά

Θεωρούμε πως όταν ένας κόμβος εκπέμπει, όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται εντός της εμβέλειάς του λαμβάνουν, έστω κι αν το λαμβανόμενο πακέτο είναι κατεστραμμένο από το θόρυβο ή αν ο δέκτης το απορρίπτει. Η εμβέλεια όλων των κόμβων είναι ίδια. Δυο κόμβοι που βρίσκονται ο ένας στην εμβέλεια του άλλου θεωρούνται γείτονες. Η απλούστερη θεώρηση είναι πως δυο κόμβοι είναι γείτονες με πεπερασμένη πιθανότητα η οποία είναι σταθερή και ανεξάρτητη από οτιδήποτε.

Για να διευκολύνουμε την περαιτέρω μελέτη, υπενθυμίζουμε την έννοια του πίνακα γειτνίασης που εισήχθη στο κεφάλαιο 4.3.4 και δίνεται από την έκφραση 5.18, η οποία αναπαράγεται εδώ. Έτσι, για ένα δίκτυο με N κόμβους, ορίζουμε ως πίνακα γειτνίασης έναν

πίνακα A διαστάσεων $N \times N$ τέτοιον ώστε:

$$A_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{αν } i, j \text{ γείτονες} \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.4)$$

Προφανώς ισχύει $A_{i,j} = A_{j,i}$. Αν θέλουμε να αναφερθούμε και στη χρονική στιγμή κατά την οποία εξετάζουμε τη γειτνίαση, τον εκφράζουμε ως $A(t)$ με στοιχεία $A_{i,j}(t)$.

7.4.2 Τυχαία δίκτυα

Ας θεωρήσουμε ότι το ασύρματο αδόμητο δίκτυο που εξετάζουμε περιλαμβάνει N το πλήθος κόμβους και είναι απλωμένο σε γήπεδο συνολικού εμβαδού S . Μπορεί τότε να οριστεί η μέση πυκνότητα (κόμβων) του δικτύου όπως στην 7.5:

$$\bar{\rho} = N/S \quad (7.5)$$

Θεωρούμε, επίσης, ότι η εμβέλεια εκπομπής είναι σταθερή και ίση για όλους τους κόμβους και τη συμβολίζουμε με R_0 . Έτσι το πλήθος γειτόνων τυχαίου κόμβου i είναι σύμφωνα με την 7.6.

$$n_i = \bar{\rho} \pi R_0^2 \quad (7.6)$$

Η πιθανότητα δυο κόμβοι να είναι γείτονες υποτίθεται σταθερή και ίδια για όλα τα δυνατά ζεύγη κόμβων, έστω p . Η πιθανότητα ένας κόμβος j να είναι γείτονας του i είναι ίση με την πιθανότητα να βρίσκεται εντός της περιοχής που καλύπτεται από την εμβέλεια του i δηλαδή $p = p(A_{i,j} = 1) = \pi R_0^2 / S$ και επομένως $p = \pi R_0^2 \bar{\rho} / S$. Τα αμέσως προηγούμενα σε συνδυασμό με την 7.5 δίνουν την 7.7.

$$p = \pi R_0^2 \bar{\rho} \quad (7.7)$$

Δικαιολογείται έτσι το διαισθητικό συμπέρασμα ότι $p \propto \bar{\rho}$.

Το τυχαίο δίκτυο που περιγράφηκε κατασκευάζεται με τον ακόλουθο αλγόριθμο: Έστω \mathcal{V} το σύνολο των κόμβων όλου του δικτύου και N το πλήθος τους. Η πιθανότητα να είναι δυο τυχαίοι κόμβοι i και j γείτονες είναι σταθερή και ίση με p . Το σύνολο των γειτόνων του i συμβολίζεται με V_i και το πλήθος τους με n_i όπως είδαμε. Κατά την κατασκευή του δικτύου εξετάζονται όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι ως υποψήφιοι γείτονές του. Το σύνολο των υποψηφίων γειτόνων του i συμβολίζεται με \tilde{V}_i .

Αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται στη λίστα 5.

Λίστα 5: Κατασκευή τυχαίου δικτύου

```

for each  $i \in V$ 
   $\tilde{V}_i = V - \{i\}$ 
   $n_i = \emptyset$ 
  for each  $j \in \tilde{V}_i$ 
    if  $i \in \tilde{V}_j$ 
       $ADJ_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{με πιθανότητα } p \\ 0, & \text{με πιθανότητα } 1 - p \end{cases}$ 
      if  $ADJ_{i,j} = 1$ 
         $ADJ_{j,i} = 1$ 
      endif
       $\tilde{V}_i = \tilde{V}_i - \{j\}$ 
       $\tilde{V}_j = \tilde{V}_j - \{i\}$ 
    endif
  endfor
endfor

```

7.4.3 Δίκτυα χωρίς Κλίμακα

Μια εναλλακτική θεώρηση είναι να υποθέσουμε ότι το δίκτυο έχει μορφή χωρίς κλίμακα (scale-free, sf) (5.4.3). Είδαμε ότι σε αυτά τα δίκτυα ο βαθμός του κόμβου ακολουθεί κατανομή νόμου δύναμης (5.28) και ότι η πιθανότητα γειτνίασης μεταξύ δυο τυχαίων κόμβων δεν είναι σταθερή.

Τα δίκτυα αυτά αλγοριθμικά προκύπτουν με διαδικασία κατασκευής κατά την οποία ακολουθείται διαδικασία αύξησης και κατά προτίμηση προσκόλλησης (5.4.4). Η πιθανότητα ένας κόμβος j να γίνει γείτονας του i είναι ανάλογη με την κεντρικότητα (centrality) του i , δηλαδή τη «δημοφιλία» του (5.34).

Διατηρώντας το συμβολισμό \mathcal{V} για το σύνολο των κόμβων όλου του δικτύου και N για το πλήθος τους, η κατασκευή δικτύου ελεύθερου κλίμακας αποδίδεται αλγοριθμικά ως εξής:

Επιλέγονται τυχαία m_0 το πλήθος κόμβοι, οι οποίοι συνιστούν το σύνολο M_0 και καθένας τους δικτυώνεται με m το πλήθος άλλους κόμβους εκτός του M_0 . Στη συνέχεια δικτυώνονται και οι υπόλοιποι κόμβοι, δηλαδή τα στοιχεία του $\mathcal{V} - M_0$ προσκολλώμενοι κατά προτίμηση στους ήδη δημοφιλείς κόμβους. Η διαδικασία συνοψίζεται στον ψευδοκώδικα της λίστας 6 στην οποία η πιθανότητα $P(A_{i,j} = 1)$ προκύπτει από την κατά προτίμηση προσκόλληση που υπαγορεύει η (5.34).

Λίστα 6: Κατασκευή δικτύου χωρίς κλίμακα

```

for each  $i \in M_0$ 
  attach  $m$  random neighbors
end

for each  $j \in \mathcal{V} - M_0$ 
  attach  $j$  to  $i$  with probability  $P(A_{i,j} = 1)$ 
end

```

7.4.4 Κινητικότητα

Τα προηγούμενα περιγράφουν δίκτυα στατικά με μόνιμες γεινιάσεις μεταξύ κόμβων. Σε περίπτωση κινητικότητας, η τοπολογία αλλάζει και η πιο πάνω διαδικασία κατασκευής του δικτύου επαναλαμβάνεται σε κάθε (διακριτή) χρονική στιγμή. Όταν, μάλιστα, διαπραγματευόμαστε δίκτυο χωρίς κλίμακα, επαναλαμβάνεται ολόκληρη η διαδικασία κατασκευής με αύξηση και κατά προτίμηση προσκόλληση.

Στη μελέτη της κινητικότητας, ο πίνακας γεινιάσης μεταβάλλεται με το χρόνο, όπως δείξαμε και στο υποκεφάλαιο 4.3.4. Έτσι, αν θέλουμε να αναφερθούμε και στη χρονική στιγμή κατά την οποία εξετάζουμε τη γεινιάση, ο πίνακας εκφράζεται ως $A(t)$ με στοιχεία $A_{i,j}(t)$. Για τους κινούμενους κόμβους υποθέτουμε ότι κάθε χρονική στιγμή η θέση τους και η γεινιάσή τους με κάθε άλλον κόμβο είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες. Αυτό συνοψίζεται στην 7.8

$$P(A_{i,j}(t) = 1 | A_{i,j}(t-1), A_{i,j}(t-2), \dots, A_{i,j}(0)) = P(A_{i,j}(t) = 1) \quad (7.8)$$

ή πιο γενικευμένα στην 7.9

$$P(A_{i,j}(t) = 1 | A(t-1), A(t-2), \dots, A(0)) = P(A_{i,j}(t) = 1) \quad (7.9)$$

Για την περίπτωση του τυχαίου δικτύου η (7.9) γίνεται:

$$P(A_{i,j}(t) = 1 | A(t-1), A(t-2), \dots, A(0)) = P(A_{i,j}(t) = 1) = q \quad (7.10)$$

Έχει ενδιαφέρον να εισάγουμε την ιδιότητα της ιστορικής μνήμης στην κινητικότητα σε δίκτυο χωρίς κλίμακα. Υποθέτουμε ότι οι (5.34), (7.8) και (7.9) δεν ισχύουν. Η (5.34) αντικαθίσταται απ' την (7.11)

$$\begin{aligned} \hat{p}_{i,j} &= (1 - A_{i,j})p_{i,j} + \frac{1}{2}A_{i,j}(A_{i,j} + p_{i,j}) \\ \hat{p}_{i,j} &= (1 - A_{i,j}(t-1))p_{i,j}(t) + \frac{1}{2}A_{i,j}(t-1)(A_{i,j}(t-1) + p_{i,j}(t)) \end{aligned} \quad (7.11)$$

όπου $p_{i,j}$ η πιθανότητα που δίνεται από την (5.34) και εκφράζει την κατά προτίμηση προσκόλληση όπως την έχουμε δει ως τώρα. Με τον τρόπο αυτό η πιθανότητα προσκόλλησης ενός κόμβου j σ' έναν άλλον i είναι μεγαλύτερη εάν αυτοί ήταν ήδη γείτονες και την αμέσως προηγούμενη στιγμή. Εισάγουμε τον όρο της *συνέπειας γεινιάσης*, ο οποίος μας δείχνει την αντοχή της γεινιάσης στο χρόνο:

$$C(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i(t) \quad (7.12)$$

όπου

$$C_i(t) = \frac{\sum_j A_{i,j}(t)A_{i,j}(t-1)}{\sum_j A_{i,j}(t-1)} \quad (7.13)$$

όπου $A_{i,j}(t)$ η γεινιάση μεταξύ i και j τη στιγμή t και N το συνολικό πλήθος κόμβων.

7.5 Συστολή Πιθανότητας Προώθησης

Στην έρευνά μας χρησιμοποιούμε διακριτό πεδίο τιμών για το β , όπως είδαμε στα προηγούμενα. Η αλλαγή κατάστασης σημαίνει αλλαγή του ζεύγους (β, μ) . Για το β αυτό σημαίνει υιοθέτηση νέας τιμής από τις επιτρεπτές, είτε υψηλότερη είτε χαμηλότερη. Κατά την προσαρμογή του β , μας ενδιαφέρει να μετριάσουμε την αύξηση των εκπομπών λόγω του συνεπαγόμενου ενεργειακού κόστους. Για το λόγο αυτό, υιοθετούμε σχήμα, σύμφωνα με οποίο όλες οι μεταβολές της είναι γραμμικές αλλά οι αυξήσεις είναι πολύ βραδύτερες από τις ελαττώσεις. Το γεγονός αυτό εκφράζεται μαθηματικά στην εξίσωση (7.14)

$$\beta(t+1) = \begin{cases} \beta(t) + \Delta\beta, & \text{σε περίπτωση αύξησης} \\ \beta(t) - \nu\Delta\beta, \nu \in \mathbb{N}^*, & \text{σε περίπτωση μείωσης} \end{cases} \quad (7.14)$$

Η ποσότητα $\Delta\beta$ είναι η ελάχιστη ποσότητα μεταβολής του β και ο ν είναι θετικός μη μηδενικός φυσικός. Ονομάζονται *βήμα της συστολής* και *εύρος συστολής* αντίστοιχα. Έτσι η αναμενόμενη τιμή της β δίνεται από την (7.15)

$$\langle \beta \rangle = q(\beta + \Delta\beta) - (1 - q)(\beta - \nu\Delta\beta) \quad (7.15)$$

Όπου με q συμβολίζεται η πιθανότητα να αυξηθεί το β .

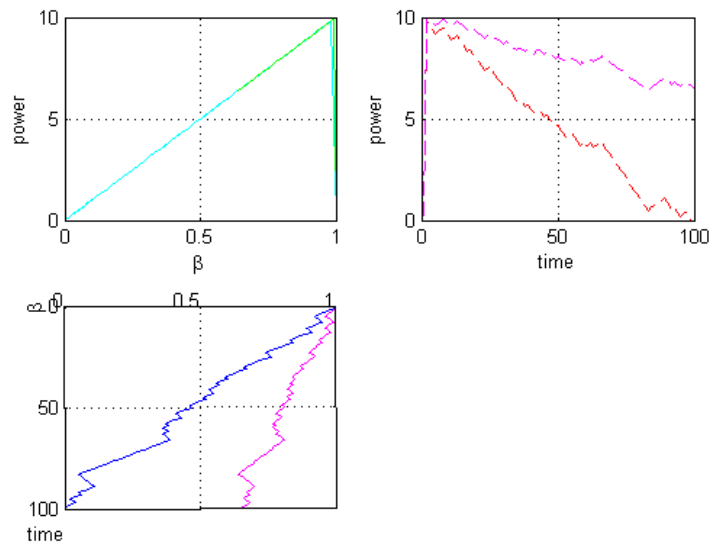
Εάν απλουστευτικά υποθέσουμε σταθερό μήκος πακέτου L , τότε το για το αναμενόμενο ενεργειακό κόστος $\langle E \rangle$ προκύπτει ότι είναι σύμφωνο με την (7.16).

$$\frac{\langle E \rangle}{L} = q\Delta\beta = \beta - \nu(1 - q)\Delta\beta \quad (7.16)$$

Προφανώς μεγάλες τιμές του ν δίνουν λιγότερο ενεργειακό κόστος.

Το αναμενόμενο κόστος μιας εκπομπής είναι $\epsilon(t) \propto \beta(t)$ και το αθροιστικό κόστος είναι $E(t) \propto \sum_{\tau=0}^t \beta(\tau)$ για διακριτό πεδίο χρόνου. Προφανώς ο ρυθμός έκλυσης ενέργειας είναι πάλι $p(t) \propto \epsilon(t)$ άρα και $p(t) \propto \beta(t)$.

Ο ρόλος του εύρους συστολής φαίνεται στο σχήμα 41. Η διαφορά επιδόσεων μεταξύ των εκδοχών $\Delta\beta = 1$ και $\Delta\beta > 1$ είναι εμφανής. Ο ρυθμός έκλυσης ενέργειας υποτίθεται ανάλογος του β , όπως απεικονίζεται στο κεντρικό γράφημα. Το β μεταβάλλεται σύμφωνα με την 7.15 όπου η αύξηση ή μείωση κρίνεται τυχαία αναξάρτητα από τα πορηγούμενα αποτελέσματα του πειράματος τύχης. Η πρόοδος του χρόνου φέρνει μείωση του β (κάτω αριστερό γράφημα) η οποία εξαρτάται ισχυρά από το εύρος συστολής. Αυτή η εξάρτηση από το εύρος συστολής μεταφέρεται και στη συμπεριφορά της έκλυσης ενέργειας (πάνω δεξιό γράφημα).



Σχήμα 41: Ο ρόλος του εύρους συστολής στην εξοικονόμηση ενέργειας

8. ΒΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΤΗ ΛΥΣΗ

8.1 Προσαρμοστική διάδοση με Διαστρωματική Επίγνωση Πλαισίου

ISCC 2011: "An Adaptive Epidemic Information Dissemination Scheme with Cross-layer Enhancements"

8.1.1 Μοντέλο και Παραδοχές

Ας θεωρήσουμε αδόμητο ασύρματο δίκτυο σύμφωνα με το προηγούμενο μοντέλο του κεφαλαίου 7, το οποίο περιγράφεται με γράφο $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$. Οι υποθέσεις εργασίας μας συγκεκριμενοποιούνται ως εξής:

- Οι τιμές του β είναι συνεχείς. Το πεδίο τιμών του β είναι συνεχές, άνω και κάτω φραγμένο και είναι το διάστημα $B = [\beta_{min}, \beta_{max}]$, έτσι ώστε $\beta_{min} \geq 0$ και $\beta_{max} \leq 1$. Οι μεταβολές του β δεν υπαγορεύονται από το μηχανισμό που είδαμε στο υποκεφάλαιο 7.5, δηλαδή $\beta(t+1) = \beta(t) + \Delta\beta$ και $\beta(t+1) = \beta(t) - \nu\Delta\beta$, αλλά με τρόπο που θα δούμε στα επόμενα.
- Η ηλικία της λαμβανόμενης από έναν κόμβο πληροφορίας δεν παίζει ρόλο στη διάδοση της επιδημίας.
- Ο θόρυβος στα ασύρματα κανάλια μεταξύ κόμβων είναι λευκός προσθετικός γκαουσιανός θόρυβος (AWGN)
- Οι κόμβοι μπορούν να κινούνται σύμφωνα με μοντέλο random waypoint.
- Οι κόμβοι έχουν επίγνωση του SNR στα ασύρματα κανάλια με καθέναν από τους γείτονές τους.
- Οι κόμβοι έχουν επίγνωση του πλήθους των γειτόνων τους.
- Για την εκπομπή και λήψη υιοθετείται ο ΠΔΚ της αναφοράς [92] ο οποίος περιγράφεται και στο υποκεφάλαιο 7.2

Έτσι, κάθε χρονική στιγμή t , ένας τυχαίος μολυσμένος κόμβος μπορεί να κάνει ένα από τα ακόλουθα ως προς την εκπομπή πληροφορίας:

- να θεραπευθεί με πιθανότητα $\delta(t) < \beta(t)$. Δεχόμαστε ότι $\delta(t) \ll \beta(t)$ έτσι ώστε η επιδημία να μην ατονεί και εξαφανίζεται (4.3). Για τις προσομοιώσεις δεχόμαστε ενδεικτικά ότι $\delta(t) = 0.1 \times \beta(t) \forall t$, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μελέτη μιας επιβιώουσας επιδημίας. Η πιθανότητα θεραπείας δ συνοψίζει όλα τα τυχαία αίτια αχρηστεύσεως της μολύνουσας πληροφορίας που είναι αποθηκευμένη σε έναν κόμβο π.χ. τυχαία φθορά αποθηκευτικού μέσου κ.λ.π.

- να εκπέμψει με πιθανότητα $\beta(t)$ επιχειρώντας να μολύνει γείτονές του.
- να μην εκπέμψει τίποτα. Αυτό συμβαίνει με πιθανότητα $1 - \beta(t)$.

Επίσης, μπορεί να κάνει ένα τα ακόλουθα ως προς τη λήψη πληροφορίας:

- να λάβει πακέτο με μολύνουσα πληροφορία. Αυτή η πληροφορία είναι διπλότυπη, δηλ. περιπτή για έναν ήδη μολυσμένο κόμβο. Πιο αυστηρά: Έστω μολυσμένος κόμβος i και έστω οι γειτονές του συναποτελούν το V_i («γειτονιά» του i). Έστω επίσης με $m_{ij}(t)$ συμβολίζεται ένα μήνυμα που ελήφθη την t από τον i απεσταλμένο από τον $j \in V_i$. Τότε το $m_{ij}(t)$ είναι διπλότυπο αν ισχύει η

$$\exists \tau \in [t - \Delta\tau, t), k \in V_i : m_{ij}(t) = m_{ik}(\tau), \Delta\tau > 0 \text{ προκαθορισμένο} \quad (8.1)$$

- να λάβει πακέτο με μολύνουσα πληροφορία κατεστραμμένο από το θόρυβο του ασύρματου καναλιού. Τέτοιες λήψεις δεν επηρεάζουν την κατάστασή του ως μολυσμένου.
- να μη λάβει τίποτα.

Οι εκπομπές και οι λήψεις του θεωρούνται ανεξάρτητες και είναι δυνατόν να είναι ταυτόχρονες. Μπορεί να λάβει και να εκπέμψει με οποιονδήποτε τρόπο του ΠΔΚ.

Επίσης, ένας τυχαίος ευάλωτος κόμβος μπορεί μόνο να λάβει και πιο συγκεκριμένα:

- να λάβει πακέτο με μολύνουσα πληροφορία αλώβητη από το θόρυβο του καναλιού. Αυτό τον καθιστά μολυσμένο.
- να λάβει πακέτο με μολύνουσα πληροφορία κατεστραμμένο από το θόρυβο του ασύρματου καναλιού. Με τη λήψη αυτή δεν μεταπίπτει στη μολυσμένη κατάσταση αλλά παραμένει στην ευάλωτη.
- να μη λάβει τίποτα. Τότε επίσης παραμένει στην ευάλωτη κατάσταση.

Κάθε κόμβος i κάθε χρονική στιγμή t μετράει τις παρακάτω οριζόμενες ποσότητες:

- *Ποσοστό διπλοτύπων*: Ως *ποσοστό διπλοτύπων* για τον τυχαίο i ορίζουμε το λόγο

$$d_i(t) = R_{d,i}(t)/R_i(t) \quad (8.2)$$

όπου $R_i(t)$ το πλήθος μηνυμάτων που λαμβάνει ο κόμβος i στο χρονικό διάστημα $[t - \Delta\tau, t)$ και $R_d(t)$ το πλήθος διπλοτύπων μηνυμάτων, δηλ. αυτά που λαμβάνει αφού είναι ήδη μολυσμένος στο ίδιο διάστημα. Δηλαδή

$$R_i(t) = |\{m_{ij}(\tau) \forall j \in V_i \forall \tau \in [t - \Delta\tau, t)\}| \quad (8.3)$$

Το πλήθος διπλοτύπων ορίζεται αυστηρότερα ως εξής:

$$R_{d,i}(t) = |\{m_{ij}(t) = m_{ik}(\tau) \mid \forall \tau \in [t - \Delta\tau, t), j, k \in V_i\}| \quad (8.4)$$

Και για τους δυο όρους του κλάσματος προσμετρώνται μόνο τα μηνύματα τα *μη κατεστραμμένα* από το θόρυβο του καναλιού.

- *Ποσοστό σφαλμάτων*: Ως *ποσοστό σφαλμάτων* ορίζουμε το λόγο

$$e_i(t) = R_{e,i}(t)/R_{i,tot}(t) \quad (8.5)$$

... όπου $R_{i,tot}(t)$ το πλήθος μηνυμάτων που λαμβάνει ένας κόμβος στο ίδιο χρονικό διάστημα $[t - \Delta\tau, t)$ και $R_{e,i}(t)$ το πλήθος των λαμβανομένων στο ίδιο διάστημα μηνυμάτων που είναι κατεστραμμένα από το θόρυβο. Για τον δυο όρο $R_{i,tot}(t)$ προσμετρώνται τώρα όλα τα μηνύματα, είτε κατεστραμμένα από το θόρυβο του καναλιού είτε μη.

Βάσει των μετρήσεων αυτών κάθε κόμβος προσαρμόζει την τιμή της πιθανότητας προώθησης. Θεωρούμε δυο επιλογές για την προσαρμογή αυτή, τη γραμμική σύμφωνα με την εξίσωση (8.6) και τη σιγμοειδή σύμφωνα με την (8.7):

$$\beta(t+1) = \beta_0(1 - \kappa_1 d_i(t) + \kappa_2 e_i(t)) \quad (8.6)$$

$$\beta(t+1) = \frac{\beta_0}{1 + \kappa_3 e^{1 - \kappa_1 d_i(t) + \kappa_2 e_i(t)}} \quad (8.7)$$

Οι παράμετροι $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ είναι σταθερές. Χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν (να «απαλύνουν») την επίδραση του θορύβου και για να διατηρήσουν το β θετικό.

Στα σχήματα 42 και 43 παρουσιάζεται το β ως γραμμική και σιγμοειδής συνάρτηση των d_i και e_i αντίστοιχα.

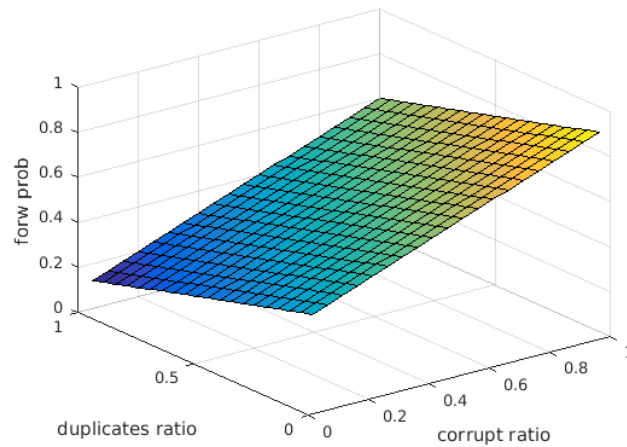
Επίσης ο τρόπος του ΠΔΚ προσαρμόζεται ανάλογα με την τιμή γ του SNR έτσι ώστε:

$$\mu(t+1) = \mu_m : \gamma_{pm} \leq \gamma_i < \gamma_{pm+1} \quad (8.8)$$

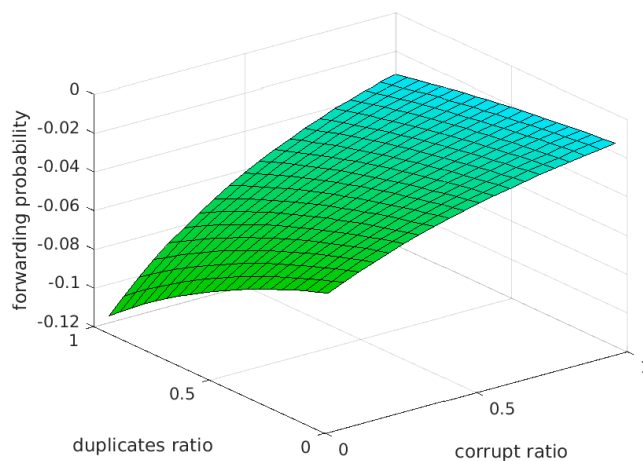
όπου η τιμή του SNR γ_i χαρακτηρίζει τον κόμβο i και τα κατώφλια γ_{pm} σηματοδοτούν τη μετάβαση μεταξύ των τρόπων του ΠΔΚ σύμφωνα με το μοντέλο της αναφοράς [92]. Έτσι ο κόμβος μπορεί να εκπέμψει με τα χαρακτηριστικά αυτά, δηλαδή με πιθανότητα β και τρόπο του ΠΔΚ μ (AMC mode).

Ας δούμε πώς αποδίδεται μια μοναδική τιμή SNR για τον κόμβο i τη στιγμή t στην (8.8): Έστω ο κόμβος i έχει n το πλήθος γείτονες τη στιγμή t . Τότε τα SNR στα ασύρματα κανάλια μεταξύ του i και των γειτόνων του είναι τα $\gamma_{i,1}, \gamma_{i,2}, \gamma_{i,3}, \dots, \gamma_{i,j}, \dots, \gamma_{i,n}$. Λαμβάνεται ως τιμή του SNR η μέση τιμή των SNR στα κανάλια με όλους τους γείτονές του, δηλ,

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{j \in V_i} \gamma_{i,j} \quad (8.9)$$



Σχήμα 42: Γραμμική μεταβολή του β με τα διπλότυπα και τα κατεστραμένα μηνύματα



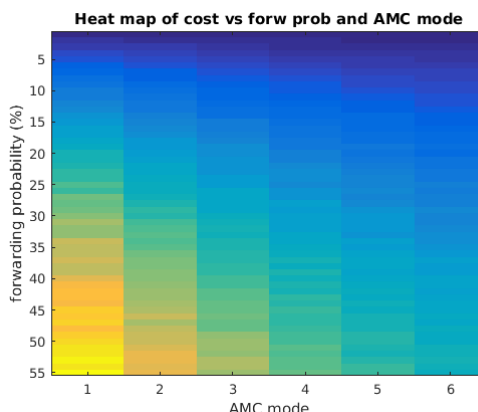
Σχήμα 43: Σιγμοειδής μεταβολή του β με τα διπλότυπα και τα κατεστραμένα μηνύματα

Φυσικά μπορούν να επιλεγούν και οι (8.10) ή (8.11), ανάλογα αν είναι επιθυμητή πιο επιθετική ή πιο συντηρητική πολιτική.

$$\gamma_i = \max_{j \in V_i} \gamma_{i,j} \quad (8.10)$$

$$\gamma_i = \min_{j \in V_i} \gamma_{i,j} \quad (8.11)$$

Συνεπώς, εκπομπή με χαμηλό τρόπο του ΠΔΚ σημαίνει μεγαλύτερα πακέτα, άρα και υψηλότερο ενεργειακό κόστος (υποκεφάλαιο 7.3). Επίσης, όταν ένας κόμβος είναι ρυθμισμένος σε υψηλό β , αυτό σημαίνει ότι είναι πιο πιθανό να εκπέμψει, άρα περισσότερες αναμενόμενες εκπομπές στη μονάδα του χρόνου, άρα υψηλότερο ενεργειακό κόστος. Η συνδυασμένη επίδραση της πιθανότητας προώθησης και του τρόπου του ΠΔΚ στο ενεργειακό κόστος αποδίδεται στο heatmap του σχήματος 44



Σχήμα 44: Η συνδυασμένη επίδραση της πιθανότητας προώθησης και του τρόπου του ΠΔΚ στο ενεργειακό κόστος

Συνοψίζοντας, οι ανεξάρτητες παράμετροι του προβλήματός μας είναι οι εξής:

- SNR μεταξύ του τυχαίου κόμβου i και των γειτόνων του: $\gamma_{i,1}, \gamma_{i,2}, \gamma_{i,3}, \dots, \gamma_{i,j}, \dots, \gamma_{i,n} \forall i$
- Αρχική τιμή πιθανότητας προώθησης β_0 . Αυτή συμβατικά λαμβάνεται κοινή για όλους τους κόμβους.
- Πυκνότητα δικτύου. Χαρακτηρίζεται από την πιθανότητα ένας κόμβος
- Κινητικότητα. Μπορούμε να υποθέσουμε είτε ακίνητους κόμβους είτε κινούμενους σύμφωνα με το μοντέλο random waypoint.

Άλλες χρήσιμες και εν γένει δυναμικές παράμετροι (για τυχαίο κόμβο i στον οποίο αποδίδεται και ο δείκτης) είναι το ποσοστό διπλοτύπων $d_i(t)$ και το ποσοστό σφαλμάτων $e_i(t)$, τα οποία ορίστηκαν στα προηγούμενα. Αυτές είναι διαφορετικές για κάθε κόμβο και κάθε χρονική στιγμή.

Η γνώση αυτών των *μη ανεξάρτητων* παραμέτρων από τον κόμβο συνιστά *επίγνωση πληροφορίας πλαισίου* για το παρόν πρόβλημα.

Ενδιαφέρουσες μετρικές με τη βοήθεια των οποίων μπορούμε να αποτιμήσουμε την επίδοση του παρόντος σχήματος είναι οι:

- Μέση πιθανότητα προώθησης $\tilde{\beta}(t)$. Αυτή ορίζεται ως η μέση τιμή των τιμών της πιθανότητας προώθησης όλων των κόμβων του δικτύου: $\tilde{\beta}(t) = \langle \beta_i(t) \rangle_{i \in \mathcal{V}}$. Στην εκτίμηση των επιδόσεων του παρόντος σχήματος αναφερόμαστε σχεδόν πάντα σε αυτή την ποσότητα όταν λέμε «πιθανότητα προώθησης». Η γνώση της πιθανότητας προώθησης μεμονωμένων κόμβων δεν έχει τόση αξία.
- Ποσοστό μόλυνσης δικτύου (κάλυψη) $i(t)$. Σύμφωνα με τη θεωρία της επιδημικής διάδοσης (4.3) είναι το ποσοστό των μολυσμένων κόμβων επί συνόλου όλων των κόμβων του δικτύου και είναι συνάρτηση του χρόνου, $i(t) = \frac{I(t)}{N}$. Ένας λίγο πιο

αυστηρός ορισμός: Έστω δυαδικός πίνακας διαστάσεων $1 \times N$ χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κατάσταση μόλυνσης των N το πλήθος κόμβων του δικτύου, έτσι ώστε

$$A_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{εάν ο κόμβος } i \text{ είναι μολυσμένος τη στιγμή } t \\ 0 & \text{εάν όχι} \end{cases} \quad (8.12)$$

Τότε το πλήθος μολυσμένων κόμβων είναι

$$I(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \quad (8.13)$$

- Ενεργειακό κόστος $E(t)$. Η ενέργεια που έχουν αθροιστικά ξοδέψει ως τη στιγμή t όλοι οι κόμβοι του δικτύου για λήψη, εκπομπή και επεξεργασία της μολύνουσας πληροφορίας.
- Ενεργό ενεργειακό κόστος $\tilde{E}(t)$ (effective cost): Ο λόγος (των αθροιστικά μετρούμενων) εκπομπών μηνυμάτων προς το ποσοστό μολυσμένων κόμβων (ποσοστό μόλυνσης):

$$\tilde{E}(t) = \frac{N_{T_x}(t)}{i(t)} \quad (8.14)$$

Αυτή η μετρική αγνοεί τις διαφορές ενεργειακού κόστους που συνδέονται με διαφορετικά μηνύματα. Έτσι, προσμετρά ισοδύναμα την εκπομπή ενός μηνύματος με τρόπο ΠΔΚ $\mu = 6$ και την εκπομπή με τρόπο ΠΔΚ $\mu = 1$.

- Μείωση ενεργειακού κόστους (εξοικονόμηση ενέργειας)

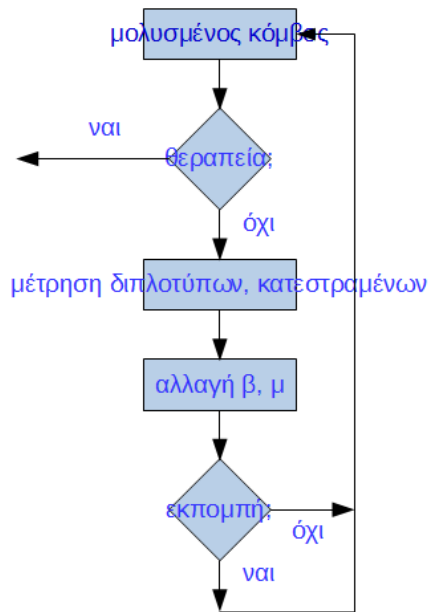
$$h(t) = \frac{E_0(t) - E(t)}{E_0(t)} \quad (8.15)$$

όπου $E(t)$ το κόστος με την υιοθέτηση του προτεινόμενου σχήματος και $E_0(t)$ το κόστος με την παραμονή σε σχήμα που διατηρεί το β σταθερό και ίσο με την αρχική του τιμή.

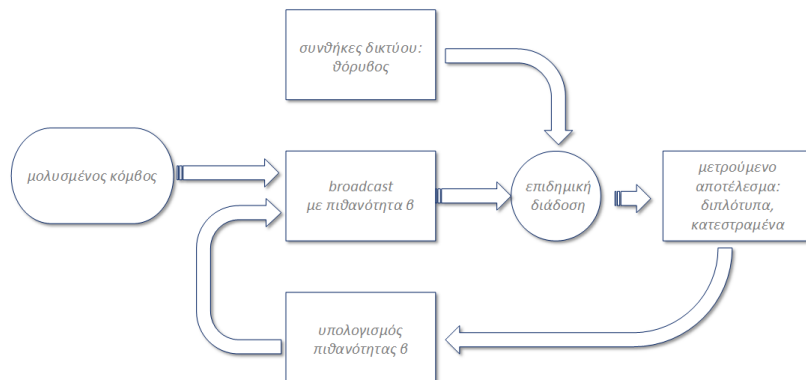
- Απόδοση ϵ . Ο λόγος του ποσοστού μόλυνσης του δικτύου προς το αθροιστικό πλήθος εκπομπών. Αυτή παρέχει το όφελος που προκύπτει ανά εκπομπή, δηλαδή ανά μονάδα ενεργειακού εξόδου. Ουσιαστικά παρέχει μέτρο του κόστους της μόλυνσης.

$$\epsilon(t) = \frac{i(t)}{N_{T_x}(t)} \quad (8.16)$$

Το σχήμα που περιγράφηκε είναι επί της ουσίας σύστημα με ανάδραση το οποίο αντιδρά στις μεταβολές του περιβάλλοντος, χωρίς να μπορεί να τις προβλέψει. Αυτά συνοψίζονται στο λογικό διάγραμμα του σχήματος 45, στο διάγραμμα βαθμίδων του σχήματος 46 και στη λίστα 7.



Σχήμα 45: Λογικό διάγραμμα συστήματος προσαρμογής χαρακτηριστικών εκπομπής με ανάδραση σε επιδημικό περιβάλλον



Σχήμα 46: Διάγραμμα βαθμίδων συστήματος προσαρμογής χαρακτηριστικών εκπομπής με ανάδραση σε επιδημικό περιβάλλον

Λίστα 7: Αναδραστική επιδημική εκπομπή

```

for each  $i : A(i) = 1$ 
  if  $i$  not cured
    measure  $d_i(t), R_{d,i}(t), \gamma(t)$ 
    calculate  $\beta(t), \mu(t)$ 
    transmit with  $\beta(t), \mu(t)$ 
  end
end
    
```

Για λόγους πληρότητας συνοψίζουμε τον εισαχθέντα συμβολισμό μαζί με τις ορισμένες ποσότητες στον πίνακα 11

Πίνακας 11: Μετρικές για την αποτίμηση επιδόσεων και σχετικός συμβολισμός

ποσότητα	συμβολισμός
πιθανότητα προώθησης κόμβου i τη στιγμή t	$\beta_i(t)$
αρχική πιθανότητα προώθησης	β_0
μέση πιθανότητα προώθησης τη στιγμή t	$\tilde{\beta}(t)$
τρόπος του ΠΔΚ κόμβου i τη στιγμή t	$\mu_i(t)$
πιθανότητα θεραπείας μολυσμένου κόμβου i τη στιγμή t	$\delta_i(t) = 0.1 \beta_i(t)$
συνολικό πλήθος κόμβων	
πλήθος μολυσμένων κόμβων	$I(t)$
ποσοστό μόλυνσης δικτύου (κάλυψη)	$i(t) = I(t)/N$
ενεργειακό κόστος ως τη στιγμή t	(t)
ενεργό ενεργειακό κόστος ως τη στιγμή t	$\tilde{E}(t)$
μείωση ενεργειακού κόστους	$h(t)$
απόδοση	ϵ

8.1.2 Αποτελέσματα

Οι προσομοιώσεις μας δίνουν ενθαρρυντικά αποτελέσματα (πίνακας 12, σχήματα 47, 48, 49). Παρατηρούμε ότι εξοικονομείται ενέργεια χωρίς συμβιβασμούς στην εξάπλωση της μόλυνσης. Το ενεργειακό κόστος ελαττώνεται σημαντικά, ιδίως με την επιλογή σιγμοειδούς προσαρμογής του β (εξίσωση 8.7). Η απόδοση του δικτύου επίσης βελτιώνεται (πίνακας 12). Η απόδοση ελαττώνεται με την αύξηση του β_0 , δείχνοντας ότι και με σχετικά χαμηλές τιμές πιθανότητας προώθησης επιτυγχάνεται μόλυνση (σχήμα 50).

Πίνακας 12: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για την εξοικονόμηση ενέργειας

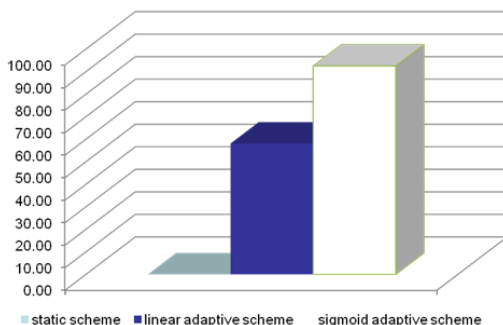
προσαρμογή του β	εξοικονόμηση ενέργειας %	βελτίωση απόδοσης %
γραμμική (εξίσωση 8.6)	58.1	31.6
σιγμοειδής (εξίσωση 8.7)	92.5	292.5

Για τις παραμέτρους $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ θεωρήθηκε ότι παίρνουν τιμές $0,5 < \kappa_1 < 1,5$ $i = 1, 2$ και $1, 0 < \kappa_3 < 10, 0$.

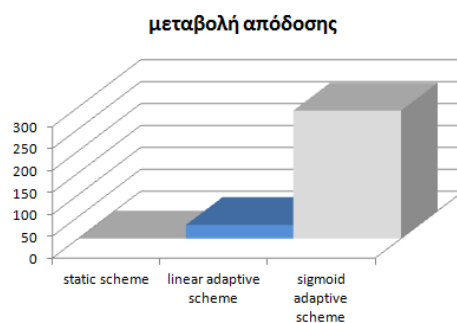
Έχει ενδιαφέρον να δούμε τη συμπεριφορά του μηχανισμού για διάφορες (και για οριακές) τιμές παραμέτρων. Στο σχήμα 51 παρατηρούμε πως η μείωση του β συμβαίνει όταν το β_0 είναι αρκετά υψηλό. Χαμηλές τιμές του β_0 δεν οδηγούν σε περαιτέρω μείωση του β . Τα σχήματα 52 και 53 απλώς επιβεβαιώνουν ότι η ασυμπτωτική τιμή του ποσοστού μόλυνσης εξαρτάται από το λόγο πιθανότητας θεραπείας και πιθανότητας μόλυνσης (υποκεφάλαιο 4.3).

Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί με το εξής απλό σκεπτικό: Έστω P_{inf} η πιθανότητα να μολυνθεί δεδομένος κόμβος, προφανώς από μολυσμένο γείτονά του. Τότε ισχύει ότι:

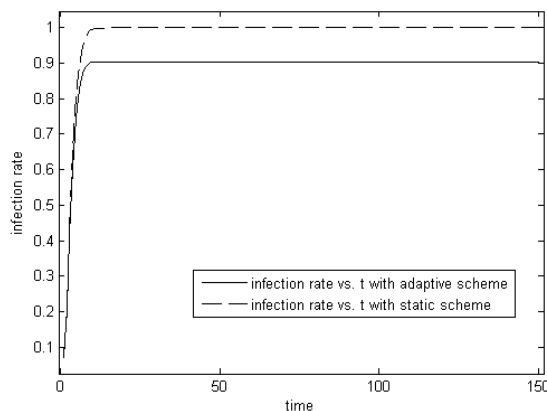
$$P_{inf} = p(\text{υπάρχει τουλάχιστον ένας μολυσμένος γείτονας}) \times$$



Σχήμα 47: Βελτίωση ενεργειακού κόστους



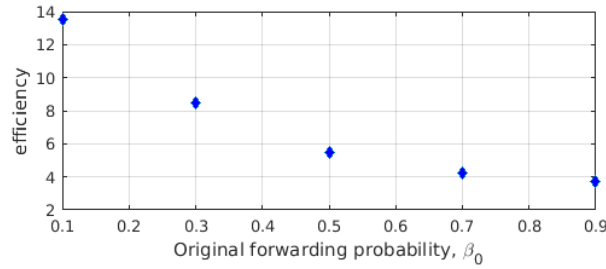
Σχήμα 48: Βελτίωση απόδοσης



Σχήμα 49: Μόλυνση δικτύου ως προς το χρόνο

$$p(\text{ο μολυσμένος γείτονας δε θεραπεύεται}) \times p(\text{ο μολυσμένος γείτονας εκπέμπει}) \times p(\text{η μολύνουσα πληροφορία λαμβάνεται αλώβητη από το θόρυβο})$$

Η πιθανότητα να υπάρχει τουλάχιστον ένας μολυσμένος από τους έστω n γείτονες ισούται με $1 - CDF(1)$ όπου $CDF(.)$ η αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας της διωνυμικής. Η χρήση της διωνυμικής έχει το νόημα ότι διεξάγονται νοερά n «τυχαία πειράματα» για να εξαχθεί αν οι n γείτονες είναι μολυσμένοι ή όχι. Το κάθε πείραμα έχει πιθανότητα επιτυχίας προσεγγιστικά ίση με το ποσοστό μόλυνσης στο δίκτυο $i(t)$.



Σχήμα 50: Κανονικοποιημένη απόδοση ως προς την αρχική πιθανότητα προώθησης

Οπότε: $p(\text{υπάρχει τουλάχιστον ένας μολυσμένος γείτονας}) = 1 - \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} i^k (1-i)^{n-k} \equiv p^*$,

όπου n το πλήθος γειτόνων, i το ποσοστό μόλυνσης στο δίκτυο και *όχι μεταβλητός δείκτης του αθροίσματος*. Προφανώς υποτίθεται ότι η πιθανότητα να είναι τυχαίος κόμβος μολυσμένος ισούται με αυτό το ποσοστό. Τα αμέσως προηγούμενα μπορούν να συνοψισθούν στην (8.17).

$$P_{inf} = p^*(1 - \delta)\beta(1 - PER) \quad (8.17)$$

Επίσης, μια απλή εκτίμηση του αναμενόμενου ενεργειακού κόστους εκπομπής $\langle E_{Tx} \rangle$ μπορεί να δοθεί από την (8.18).

$$\langle E_{Tx} \rangle = L\beta(1 - \delta) = \frac{L_0}{R_c}\beta(1 - \delta) \quad (8.18)$$

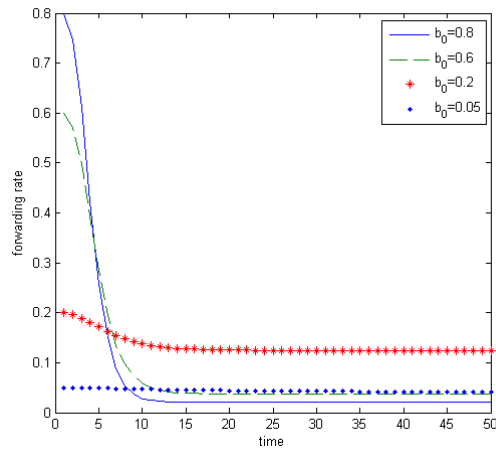
... όπου L και L_0 το μήκος του κωδικοποιημένου και του μη κωδικοποιημένου πακέτου αντίστοιχα και R_c ο ρυθμός κωδικοποίησης.

Από τις (8.17) και (8.18) επιβεβαιώνεται δηλαδή η διαίσθηση ότι η αύξηση του β συμβάλλει στην εξάπλωση της επιδημίας επιδεινώνοντας όμως και το ενεργειακό κόστος. Επίσης, όμως, αντιλαμβανόμαστε και ότι η προσαρμογή του τρόπου του ΠΔΚ επηρεάζει το PER και έτσι αντισταθμίζεται η επίδραση της μείωσης του β στην εξάπλωση της επιδημίας. Ταυτόχρονα, τροποποιεί και το μήκος του κωδικοποιημένου πακέτου, άρα και το αναμενόμενο ενεργειακό κόστος.

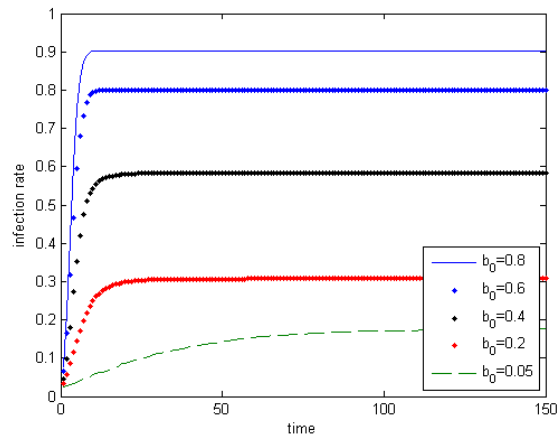
Στο σχήμα 53 φαίνεται μάλιστα και η επίδραση της κινητικότητας στην εξάπλωση της επιδημίας. Η σύγκλιση του ποσοστού μόλυνσης επιτυγχάνεται είτε οι κόμβοι είναι ακίνητοι είτε κινούνται με μοντέλο random waypoint.

Στα σχήματα 54, 55, 56 βλέπουμε την εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με διάφορες παραμέτρους και διαπιστώνουμε πως είναι σχετικά σταθερή για ευρέα φάσματα τιμών τους εκτός από οριακές περιπτώσεις πολύ χαμηλής πιθανότητας προώθησης, υψηλού θορύβου ή πολύ πυκνού δικτύου.

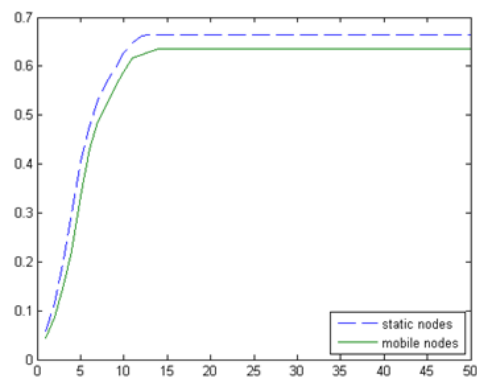
Αυτό ισχύει π.χ. για το β_0 (δηλ. την αρχική τιμή του β) (σχήμα 54) εκτός από την περίπτωση που αυτό ξεκινάει από ήδη πολύ χαμηλές τιμές. Εξ ίσου σταθερή είναι και ως προς την πυκνότητα του δικτύου εκτός από τα πολύ πυκνά δίκτυα, στα οποία η διάχυση επί της ουσίας προσεγγίζει την άνευ όρων εκπομπή (flooding).



Σχήμα 51: Πιθανότητα προώθησης ως προς το χρόνο με το β_0 ως παράμετρο



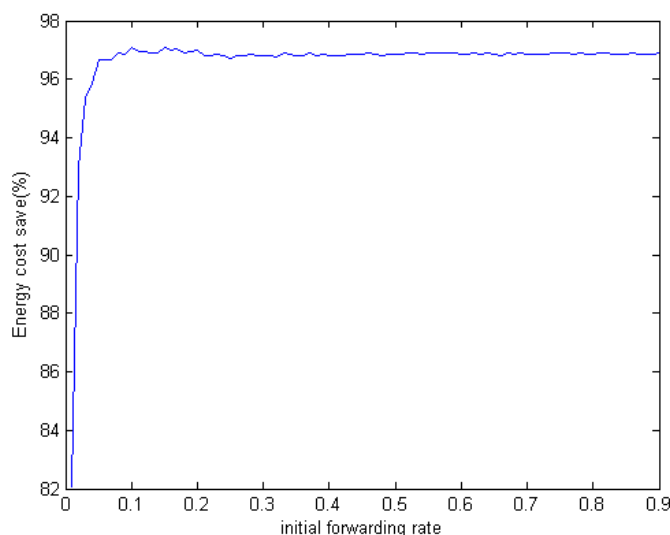
Σχήμα 52: Μόλυνση δικτύου ως προς το χρόνο με το β_0 ως παράμετρο



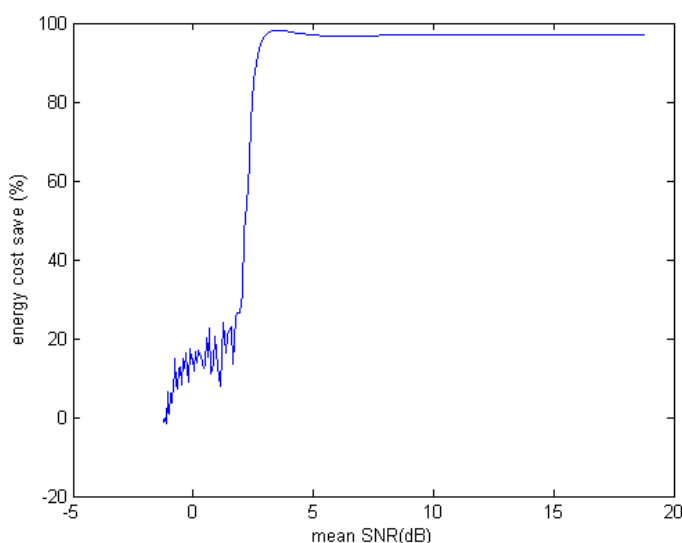
Σχήμα 53: Μόλυνση δικτύου ως προς το χρόνο με και χωρίς κινητικότητα

Η ελάττωση ενεργειακού κόστους είναι επίσης σταθερή για ευρύ φάσμα τιμών του λόγου σήματος-προς-θόρυβο (SNR). Παρατηρούμε μόνο κατάρρευση της καθώς μειούμενη

προσεγγίζει την κατώτατη τιμή-όριο του κατώτατου τρόπου του ΠΔΚ (σχήμα 55). Για τιμές SNR χαμηλότερες από το κατώτατο όριο του χαμηλότερου τρόπου του ΠΔΚ, το PER είναι σχεδόν ίσο με το 1 και η αύξηση εκπομπών δε βελτιώνει τη εξάπλωση της μόλυνσης.

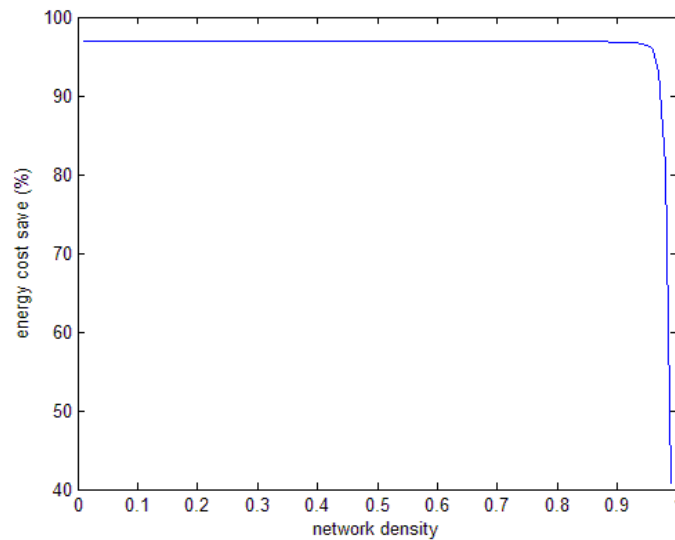


Σχήμα 54: Ελάττωση ενεργειακού κόστους ως προς την αρχική πιθανότητα προώθησης

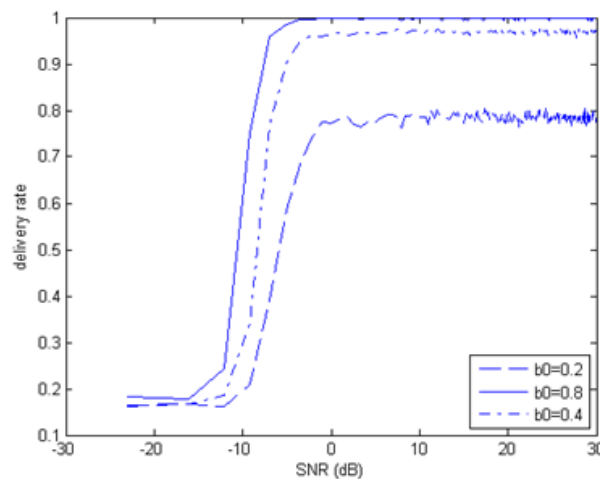


Σχήμα 55: Ελάττωση ενεργειακού κόστους ως προς το SNR

Επίσης, χρήσιμο είναι να παρατηρήσει κανείς την επίδραση του θορύβου στην ασυμπτωτική τιμή του ποσοστού μόλυνσης. Στο σχήμα 57, όπως και στο 55 παρατηρούμε πως από ένα κατώφλιο τιμών SNR και κάτω, ο ΠΔΚ δε μπορεί να βοηθήσει άλλο, διότι δε έχει χαμηλότερο mode και το PER προσεγγίζει σχεδόν τη μονάδα με αποτέλεσμα το ποσοστό μόλυνσης να είναι πολύ χαμηλό. Αντίστοιχα, σε πολύ υψηλές τιμές SNR, ο ΠΔΚ δεν έχει ανώτερο τρόπο (mode) για να επωφεληθεί, οπότε και δε μπορεί να ενθαρρύνει περισσότερο τη μόλυνση.



Σχήμα 56: Ελάττωση ενεργειακού κόστους ως προς την πυκνότητα δικτύου

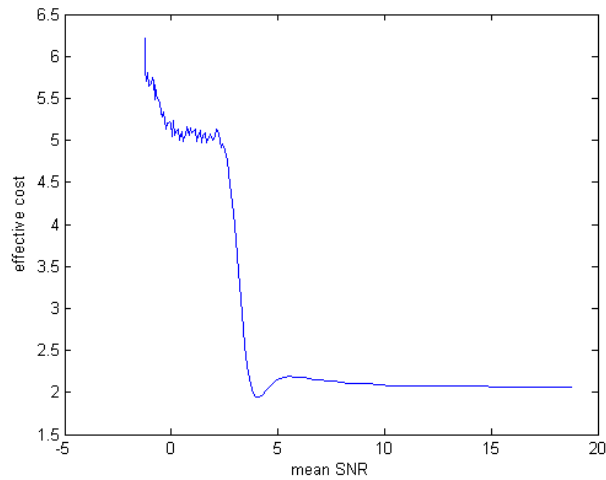


Σχήμα 57: Μόλυνση δικτύου ως προς το SNR

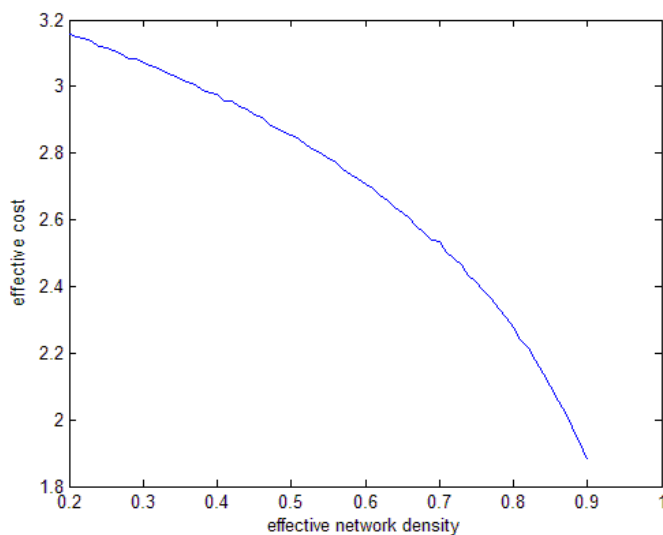
Τέλος στο σχήμα 59 βλέπουμε πως το ενεργό κόστος ελαττώνεται με την αύξηση της πυκνότητας δικτύου. Αυτό είναι λογικό, διότι στα πυκνά δίκτυα είναι πιο εύκολο να διαδοθεί η μόλυνση και συνεπώς αυξάνονται τα λαμβανόμενα διπλότυπα μηνύματα. Συνεπώς, σύμφωνα με το προτεινόμενο σχήμα, η πιθανότητα προώθησης προσαρμόζεται προς χαμηλότερες τιμές.

8.1.3 Συζήτηση

Σε χαμηλές τιμές SNR ενθαρρύνεται η αύξηση του β καθώς το PER πλησιάζει τη μονάδα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλό ενεργειακό κόστος λόγω των πολύ συχνών εκπομπών και της ανεπαρκούς μόλυνσης, όπως επιβάλλει το (θορυβώδες) περιβάλλον. Ιδίως στις πιο



Σχήμα 58: Ενεργό ενεργειακό κόστος ως προς το SNR



Σχήμα 59: Ενεργό ενεργειακό κόστος ως προς την πυκνότητα δικτύου

θορυβώδεις συνθήκες, όπως με τον τρόπο 1 του ΠΔΚ (AMC) δεν υπάρχει δυνατότητα βελτίωσης της εξάπλωσης της μόλυνσης. Δεν υπάρχει άλλος χαμηλότερος τρόπος ο οποίος θα εξυπηρετούσε χαμηλότερα SNR. Αυτό εξηγεί την απότομη συμπεριφορά κατωφλίου του σχήματος 57. Υψηλές πιθανότητες προώθησης σε θορυβώδεις συνθήκες έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλή εξάπλωση της μόλυνσης και υψηλό ενεργειακό κόστος, χωρίς ουσιαστικό όφελος.

Από την άλλη μεριά, μεσαία προς υψηλά SNR επιτρέπουν ρύθμιση του AMC προς τρόπους που διατηρούν το PER σε λογικές τιμές. Σε τέτοιες περιπτώσεις τα διπλότυπα πακέτα είναι πιθανότερα και παίζουν σημαντικότερο ρόλο. Συνεπώς η μόλυνση εξαπλώνεται βραδύτερα και είναι πιο περιορισμένη από τη μη προσαρμοστική (στατική) περίπτωση.

Το μειωμένο β επιτρέπει χαμηλότερο ενεργειακό κόστος. Σε υψηλά SNR (> 5 dB) παρα-

τηρείται σύγκλιση προς σταθερή τιμή μόλυνσης δικτύου. Αυτή παραμένει παράλληλα με τη μειωμένη τιμή του β . Σ' αυτές τις περιπτώσεις το ενεργειακό κόστος υφίσταται μείωση (πρβ. σχήματα 55, 57, 58).

Χαμηλά β_0 έχουν την τάση να μην ωθούν το β σε περαιτέρω ελάττωση. Σ' αυτές τις συνθήκες επικρατεί ασθενική εξάπλωση επιδημίας και καμιά βελτίωση ως προς το ενεργειακό κόστος. Καθώς τα διπλότυπα είναι λίγα, ο κυρίαρχος παράγοντας που επηρεάζει τη ρύθμιση του β είναι τα κατεστραμμένα πακέτα, οπότε σε μεσαία προς χαμηλά β_0 η ενίσχυση του β προκαλεί υψηλό ενεργειακό κόστος χωρίς όμως αυτό να συνοδεύεται από ικανοποιητική εξάπλωση της επιδημίας. Αυτό ερμηνεύει την αύξηση του ενεργού κόστους γι' αυτές τις τιμές του β_0 .

Συμπεραίνουμε ότι μπορούμε να χρησιμοποιούμε την επίγνωση πλαισίου και να αναπροσαρμόζουμε το β . Αυτή η ιδέα είναι ήδη γνωστή από τότε που διατυπώθηκε και αντιμετωπίστηκε το broadcast storm problem. Έτσι το δίκτυο αντιμετωπίζεται ως σύστημα ελέγχου με ανάδραση (όπως δείχτηκε στο σχήμα 46), στο οποίο μεταβάλλουμε την εισοδο (β) για να επιτύχουμε την επιθυμητή έξοδο (ενεργειακό κόστος, μόλυνση δικτύου). Μπορούν όμως να γίνουν μερικές ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις:

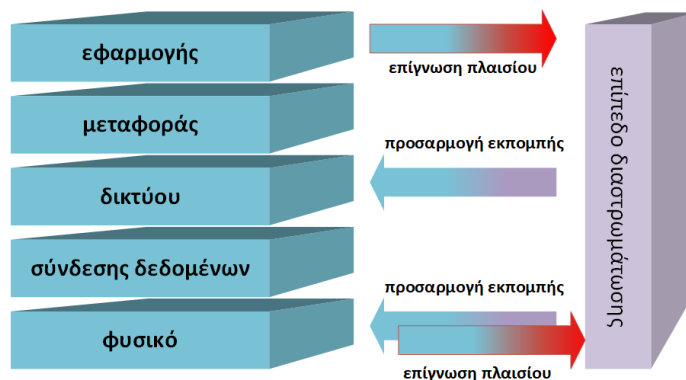
- Οι επιθυμητές τιμές ενεργειακού κόστους και μόλυνσης δικτύου (τουλάχιστον η του ενεργειακού κόστους) δεν είναι ρητά εκφρασμένες ποσοτικά σε πραγματικό χρόνο.
- Η πληροφορία πλαισίου είναι στοχαστικής φύσεως.
- Η σχέση εισόδου (β) και εξόδου (ενεργειακού κόστους και μόλυνσης δικτύου) δεν είναι αναλυτικά γνωστή σε κλειστή μορφή.

Μελετώντας τις επιδόσεις της παρούσας μεθόδου παρατηρούμε ότι:

- Η πιθανότητα προώθησης ενός κόμβου περιορίζεται όταν οι γείτονές του είναι μολυσμένοι σε μεγάλο βαθμό, διότι τότε περιττεύει η προσπάθεια να τους μολύνει. Ο τρόπος του ΠΔΚ αυξομειώνεται ανάλογα με τη διακύμανση του κατά μέσο όρο θορύβου στα κανάλια με τους γείτονές του· έτσι γίνεται πιθανότερη η μόλυνση σε θορυβώδεις συνθήκες, αλλά και δεν ξοδεύεται ενέργεια άσκοπα σε ισχυρές κωδικοποιήσεις σε περίπτωση που ο χαμηλός θόρυβος τις καθιστά περιττές.
- Το β συγκλίνει· συνήθως σε κάποια μειωμένη σε σχέση με την αρχική τιμή, εκτός αν αρχίζει από πολύ χαμηλή τιμή ήδη.
- Το ποσοστό μόλυνσης δικτύου επίσης συγκλίνει, σε συμφωνία με τη θεωρία της επιδημικής διάδοσης και μάλιστα όχι πάντα κοντά στη μονάδα, ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων του προβλήματος.
- Το ενεργειακό κόστος μειώνεται σοβαρά σε σχέση με ένα σχήμα με αμετάβλητο β . Αυτή η μείωση είναι λογική συνέπεια της μείωσης εν γένει του β .
- Η σημαντικότερη μείωση ενεργειακού κόστους συνοδεύεται από περιορισμένο συμβιβασμό στην εξάπλωση της επιδημίας. Αυτή είναι και η σημαντικότερη συνεισφορά του παρόντος μηχανισμού.

Σε σχέση με την προηγούμενη έρευνα επιτεύχθηκαν τα ακόλουθα:

- Μελετήθηκε ένα σχήμα προσαρμογής χαρακτηριστικών ευρεεκτομπής με αναδραστικό χαρακτήρα.
- Μελετήθηκε ο ρόλος του θορύβου σε επιδημικό περιβάλλον.
- Οι επιδόσεις του σχήματος ως προς την εξάπλωση της επιδημίας και το ενεργειακό όφελος είναι στα πλαίσια της προηγούμενης έρευνας, ξεκινώντας από το broadcast storm problem.
- Εισήχθη η ιδέα της διαστρωμάτωσης: τα διπλότυπα επί της ουσίας ορίζονται βάσει του περιεχομένου των μολυνόντων μηνυμάτων. Επηρεάζονται πολλά στρώματα του δικτύου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 60 : Η επίγνωση πλαισίου πηγάζει από το σύνδεσης δικτύου (μέτρηση ποσοστού κατεστραμμένων) και το εφαρμογής (μέτρηση ποσοστού διπλοτύπων). Η προσαρμογή χαρακτηριστικών εκπομπής συμβαίνει στο σύνδεσης δικτύου (προσαρμογή τρόπου ΠΔΚ) και το δικτύου (προσαρμογή πιθανότητας προώθησης).



Σχήμα 60: Διαστρωματική αντίληψη του σχήματος επιδημικής διάδοσης

Επομένως, παρουσία θορύβου, ρυθμίζεται το β έτσι ώστε να ελαττώνονται οι περιττές εκπομπές σε ήδη μολυσμένο δίκτυο και επίσης έτσι ώστε οι συμβαινουσες (εκπομπές) να είναι αρκετά ανθεκτικές στο θόρυβο ώστε να επιτυγχάνεται η εξάπλωση της επιδημίας στο εν λόγω περιβάλλον. Η επιδημία εξαπλώνεται σχεδόν τόσο όσο και αν δεν ελαττωνόταν η πιθανότητα προώθησης και μάλιστα με πολύ σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

8.2 Επιδημική Διάδοση με Πρόβλεψη: Συνάρτηση Οφέλους με Απλή Σύγκριση (*beauty contest*)

IJWIN 2013: "Wireless Channel State-Aware and Adaptive Epidemic Dissemination in Ad Hoc Networks"

8.2.1 Μοντέλο και Παραδοχές

Στο κεφάλαιο αυτό εισάγεται η προσπάθεια προληπτικής (proactive) προσαρμογής των χαρακτηριστικών εκπομπής σε περιβάλλον προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης. Διατηρούμε τις προηγούμενες παραδοχές και υποθέσεις εργασίας μας από το κεφάλαιο 7 τις οποίες ανακεφαλαιώνουμε με διευκρινίσεις και προσθήκες:

- Η πιθανότητα προώθησης παίρνει διακριτές τιμές και προσαρμόζεται έτσι ώστε να παίρνει πάντα επιτρεπτή τιμή. Οι επιτρεπτές τιμές καθορίζονται από το μοντέλο που παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 7.5· το β αυξομειώνεται κατά πολλαπλάσια του βήματος της συστολής, δηλαδή $\beta(t+1) = \beta(t) - \nu\Delta\beta$ ή $\beta(t+1) = \beta(t) + \Delta\beta$.
- Ο τρόπος του ΠΔΚ μεταβάλλεται ήπια, δηλαδή κατά 1 προς κάθε κατεύθυνση: $\mu(t+1) = \mu(t) \pm 1$.
- Κάθε κόμβος έχει γνώση του πλήθους των γειτόνων του, μολυσμένων και όχι (αλλά και όχι της καταστάσεώς τους), του χάρη στη συνδρομή ενός αξιόπιστου μηχανισμού ραδιοφάρων (beacons). Η λειτουργία beaconing συνίσταται σε περιοδική ευρυεκπομπή μηνυμάτων χαιρετισμού (hello messages), λαμβανομένων από τους άμεσους γείτονες. Το σχετικό ενεργειακό κόστος είναι ανεξάρτητο από οποιαδήποτε άλλο κίνηση ή διάλογο.
- Στα κανάλια μεταξύ κόμβων υποτίθεται η ύπαρξη λευκού προσθετικού γκαουσιανού θορύβου.
- Στα κανάλια μεταξύ κόμβων υποτίθεται η ύπαρξη διαλείψεων λόγω πολυδιόδευσης.

Με τη βοήθεια των προηγούμενων, κάνουμε την ακόλουθη σκέψη: κάθε χρονική στιγμή η κατάσταση ενός κόμβου περιγράφεται από το ζεύγος $h = (\beta, \mu)$. Αφού το πλήθος των τρόπων του ΠΔΚ είναι πεπερασμένο και το πλήθος των δυνατών τιμών της πιθανότητας προώθησης έχει γίνει επίσης αποδεκτό ως τέτοιο, καθίσταται πεπερασμένο και το πλήθος των δυνατών καταστάσεων h .

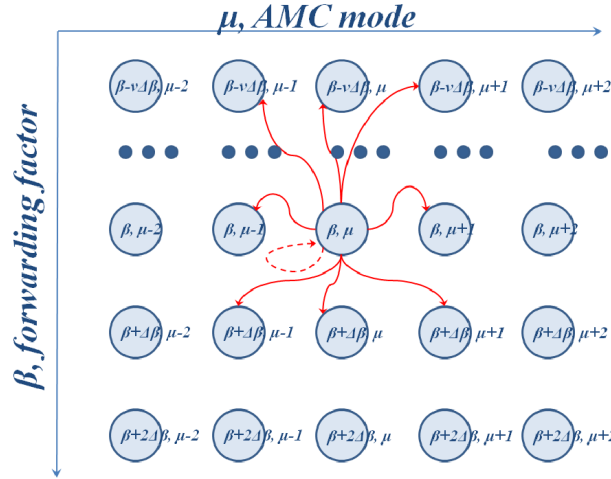
Λεπτομερέστερα, για τις τιμές της πιθανότητας προώθησης δεχόμαστε πως ισχύει ότι:

$$\beta \in B = \{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{|B|}\}, \beta_k \in (0, 1] \quad (8.19)$$

Προφανώς το βήμα της συστολής είναι:

$$\beta_{k+1} - \beta_k = \beta_{l+1} - \beta_l \equiv \Delta\beta \quad \forall k, l : 1 < k < |B|, 1 < l, |B| \quad (8.20)$$

Συνεπεία των πιο πάνω, η μαρκοβιανή μηχανή διακριτών καταστάσεων που περιγράφει τις μεταπτώσεις της κατάστασης του κόμβου (β, μ) είναι αυτή που αποδίδεται στο σχήμα (61).



Σχήμα 61: Μαρκοβιανή μηχανή διακριτών καταστάσεων που περιγράφει τις μεταπτώσεις της κατάστασης ενός κόμβου

Θεωρούμε τον ακόλουθο μηχανισμό προσαρμογής της κατάστασης του κόμβου: Σε μια τυχαία χρονική στιγμή t , τυχαίος κόμβος i βρίσκεται στην κατάσταση $(\beta, \mu) = (\beta_i(t), \mu_i(t))$, δηλ. έχει πιθανότητα προώθησης $\beta_i(t)$ της μολύνουσας πληροφορίας και αν το κάνει θα συμβεί με τον τρόπο $\mu_i(t)$ του ΠΔΚ. Η πιθανότητα θεραπείας δ συνοψίζει όλους τους πιθανούς μηχανισμούς θεραπείας και υποτίθεται αρκετά μικρότερη της πιθανότητας προώθησης, έτσι ώστε να μην εξαλειφθεί η επιδημία, δηλ. $\delta(t) \ll \beta(t)$. Επομένως ένας κόμβος i παραμένει μολυσμένος με πιθανότητα $1 - \delta_i(t)$

Αν ο i παραμείνει μολυσμένος, ευρεεκπέμπει τη μολύνουσα πληροφορία σε όλους τους γείτονές του j στη γειτονιά του που συμβολίζουμε με V_i . Η εκπομπή και η λήψη συνεπάγονται ενεργειακό κόστος, ακόμα κι αν το πακέτο ληφθεί παραμορφωμένο από το θόρυβο. Έστω E_{Tx} και E_{Rx} το κόστος εκπομπής και λήψης ενός πακέτου. Τότε μια εκπομπή προκαλεί ολικό κόστος στο δίκτυο, δηλαδή στην ουσία στη γειτονιά του, E_{tot} που δίνεται στην εξίσωση 8.21.

$$E_{tot} = E_{Tx} + |V_i| \times E_{Rx} \quad (8.21)$$

και η εκπεμπόμενη πληροφορία θα φτάσει επιτυχώς (δηλ. αλώβητη από το θόρυβο και τις διαλείψεις του καναλιού) με πιθανότητα:

$$P_{sd} = (1 - \delta)\beta(1 - PER^n) \quad (8.22)$$

όπου PER το ποσοστό εσφαλμένων (κατεστραμμένων, παραμορφωμένων απ' το θόρυβο) πακέτων και $n = |V_i|$ το πλήθος γειτόνων. Η πιθανότητα P_{sd} λέγεται πιθανότητα επιτυχούς αποστολής successful delivery probability. Στη (8.22) έχει παραλειφθεί ο δείκτης i , δηλωτικός της ταυτότητας του κόμβου, για απλότητα. Προφανώς ο όρος PER^n δηλώνει

την πιθανότητα να έχουμε διαλείψεις και θόρυβο σε καταστρεπτικό βαθμό στα κανάλια με όλους τους γείτονες ταυτόχρονα.

Η πιθανότητα μόλυνσης P_{inf} είναι φυσικά μικρότερη από την της επιτυχούς λήψεως:

$$P_{inf} < P_{sd} \quad (8.23)$$

Θεωρούμε τώρα μια εκπομπή πακέτου τη χρονική στιγμή (θυρίδα) t . Ένα bit πληροφορίας κοστίζει ενέργεια E_b για να εκπνεμφθεί και η καθαρή, μη κωδικοποιημένη πληροφορία έχει μήκος L_0 bits. Ο ισχύων τρόπος $\mu(t)$ υπαγορεύει κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος με ρυθμό R_c . Τότε το αναμενόμενο ενεργειακό κόστος της εκπομπής για τον εκπέμποντα κόμβο μόνο είναι:

$$C(t) \equiv E_{Tx} = (1 - \delta(t))E_b\beta(t)\frac{L_0}{R_c} \quad (8.24)$$

Στόχος μας είναι να αυξήσουμε την πιθανότητα μόλυνσης P_{inf} . Ταυτόχρονα όμως θέλουμε και να μετριάσουμε το ενεργειακό κόστος λόγω περιττών εκπομπών. Για το σκοπό αυτό εισάγουμε συναρτήσεις οφέλους οι εκφράζουν το άμεσο όφελος από μια εκπομπή μολύνουσας πληροφορίας. Εισάγουμε τις ακόλουθες τρεις εναλλακτικές συναρτήσεις οφέλους:

- Πιθανότητα επιτυχούς λήψης $U_1 = P_{sd}$
- Πιθανότητα επιτυχούς λήψης ως προς το κόστος εκπομπής $U_2 = \frac{P_{sd}}{C}$
- Πιθανότητα επιτυχούς λήψης επί το κέρδος επί του κόστους, δηλ: $U_3 = P_{sd} * H$, όπου το κέρδος επί του κόστους. Αυτό ορίζεται ως η διαφορά του πραγματικού κόστους από το μέγιστο κόστος εκπομπής. Το μέγιστο κόστος εκπομπής αντιστοιχεί σε εκπομπή με $\beta = 1$ και $R_c = 1/2$ σύμφωνα με την (8.24) και την [92] από την οποία υιοθετείται ο ΠΔΚ.

Με βάση αυτά είναι τετριμμένο να δει κανείς ότι το μέγιστο κόστος είναι $C_{max} = 1.8 * L_0 * E_b$ και το κέρδος επί του κόστους είναι

$$H = P_{sd}L_0E_b\left[1.8 - (1 - \delta)\frac{\beta}{R_c}\right] \quad (8.25)$$

Παρατηρεί κανείς εύκολα ότι οι συναρτήσεις οφέλους, εκτός από την πρώτη (U_1), λαμβάνουν υπ' όψη και το κόστος εκπομπής.

Ο προτεινόμενος μηχανισμός είναι ο ακόλουθος: Κάθε χρονική στιγμή, κάθε μολυσμένος και μη θεραπευμένος κόμβος, θεωρεί τις τέσσερις υποψήφιες πράξεις του πίνακα 13 σχετικά με την προσαρμογή των παραμέτρων εκπομπής του β και μ .

Υπολογίζει την τιμή της συνάρτησης οφέλους για την κάθε μια τους και υιοθετεί απ' αυτές την πιο συμφέρουσα. Η πλέον συμφέρουσα πράξη είναι αυτή η οποία υπόσχεται το υψηλότερο άμεσο όφελος, δηλαδή την υψηλότερη τιμή της συνάρτησης οφέλους.

Η προσαρμογή μιας ποσότητας κρίνεται αν θα είναι αύξηση ή μείωση σύμφωνα με τον συλλογισμό ότι σε περίπτωση που ο θόρυβος αυξάνεται, επιλέγεται συχνότερη εκπομπή

Πίνακας 13: Υποψήφιες πράξεις

πράξη	α_1	α_2	α_3	α_4
β	προσαρμογή	διατήρηση	προσαρμογή	διατήρηση
μ	διατήρηση	προσαρμογή	προσαρμογή	διατήρηση

με ισχυρότερη κωδικοποίηση ενώ η ελάττωση του θορύβου υπαγορεύει ελάττωση εκπομπών και ασθενέστερη κωδικοποίηση. Η περιγραφή του μηχανισμού αυτού συνοψίζεται στον πίνακα 14. Οι αλλαγές αυτές των β και μ γίνονται με συνδυασμένη δηλ. ταυτόχρονη

Πίνακας 14: Επιλογή αύξησης ή μείωσης των β, μ ανάλογα με τη μεταβολή του γ (SNR)

$\gamma(t)$	-	+
$\beta(t+1)$	$\beta(t) + \Delta\beta$	$\beta(t) - \nu\Delta\beta$
$\mu(t+1)$	$\mu(t) - 1$	$\mu(t) + 1$

προσαρμογή τους. Η λειτουργία της συνδυασμένης προσαρμογής τους είναι μια πράξη απ' αυτές που ορίστηκαν στον πίνακα 13. Το σύνολο αυτών των δυνατών πράξεων το συμβολίζουμε με \mathcal{A} . Για απλότητα $\mathcal{A} = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}$ και $P = \{1, 2, 3, 4\}$ το σύνολο των δεικτών τους.

Ο πίνακας 13 μπορεί να αναπτυχθεί στη μορφή του πίνακα 15. Τα σύμβολα + και - συμβολίζουν αύξηση και ελάττωση μιας ποσότητας, ενώ το * συμβολίζει τη διατήρηση της τιμής της.

Πίνακας 15: Υποψήφιες πράξεις-λεπτομέρειες

	$\mu +$	$\mu -$	$\mu *$
$\beta +$	απροσδιόριστη	α_3	α_1
$\beta -$	α_3	απροσδιόριστη	α_1
$\beta *$	α_2	α_2	α_2

Έτσι, ο πίνακας 15 δείχνει ότι, για παράδειγμα, σε περίπτωση μείωσης του γ (αύξησης θορύβου), θα πρέπει να αυξηθεί το β , ώστε με περισσότερες εκπομπές να γίνει πιθανότερη η ορθή λήψη, και να μειωθεί το μ , έτσι ώστε να ενισχυθεί η αντοχή στο θόρυβο. Οι πίνακες 15 και 13 περιγράφουν αυτή την πράξη ως πράξη α_3 . Η λίστα 8 εκθέτει το μηχανισμό επιλογής πράξης σε ψευδοκώδικα.

Λίστα 8: Διαδικασία προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης με πρόβλεψη

```

node  $i$ , forw prob  $\beta(t)$ , AMC mode  $\mu(t)$ , SNR  $\gamma(t)$ ,  $\gamma(t-1)$ ,
utility function  $U_k$ , actions  $j \in P$ 
for each  $j \in P$ 
    calculate  $\beta_{cand,i,j}$ 
    calculate  $\mu_{cand,i,j}$ 
    calculate  $P_{sd,i,j}$ 
    calculate  $C_{i,j}$ 
    calculate  $h = random(0, \xi), 0 < \xi < 1$ 
     $S_j = U_k(P_{sd,i,j}, C_{i,j})(1 + h)$ 
end

for each  $j \in P$ 
    if  $S_j = max\{S\}$ 
        if  $\beta_{cand,i,j} \neq \beta(t)$ 
            if  $\gamma(t+1) > \gamma(t-1)\beta_{cand,i,j} = max(\beta(t)-\nu\Delta\beta, 1)$ 
                elseif  $\gamma(t+1) < \gamma(t-1)\beta_{cand,i,j} = min(\beta(t) + \Delta\beta, 1)$ 
            end
        end
        if  $\mu_{cand} \neq \mu(t)$ 
            if  $\gamma(t+1) > \gamma(t-1)$ 
                 $\mu_{cand,j} = min(\mu(t) + 1, 6)$ 
            else if  $\gamma(t+1) < \gamma(t-1)$ 
                 $\mu_{cand,i,j} = max(\mu(t)-1, 1)$ 
            end
             $(\beta(t+1), \mu(t+1)) = (\beta_{cand,i,j}, \mu_{cand,i,j})$ 
        end
    end
end
end
    
```

Οι δείκτες i και j δηλώνουν κόμβο και υποψήφια πράξη αντίστοιχα. Έτσι, για παράδειγμα, η ποσότητα $C_{i,j}$ είναι το κόστος εκπομπής που θα προκύψει εάν ο κόμβος i υιοθετήσει την πράξη j , αλλάξει την κατάστασή του σύμφωνα με ό,τι αυτή υπαγορεύει και εκπέμψει έτσι. Ο πίνακας 16 συνοψίζει τις ποσότητες που εμφανίζονται στη λίστα 8.

Πίνακας 16: Οι ποσότητες που εμφανίζονται στη λίστα 8

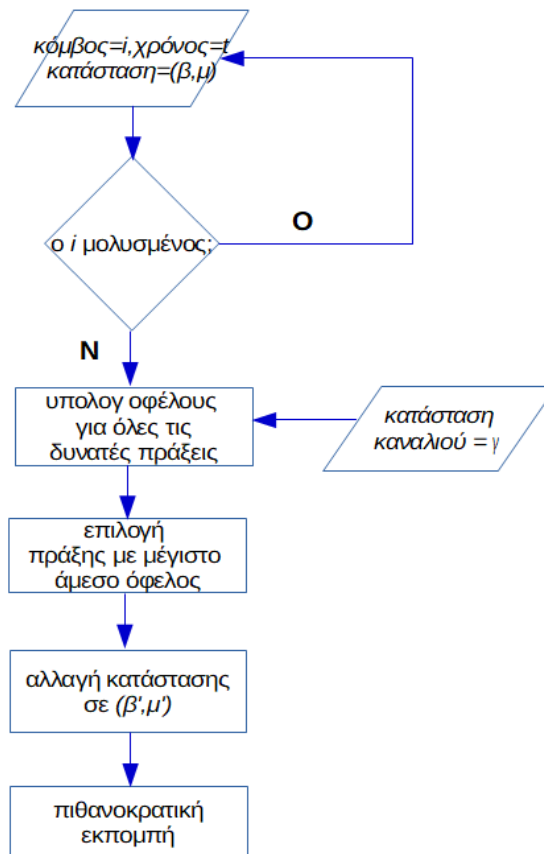
σύμβολο	σημασία
$\beta_{cand,i,j}$	το β που θα υιοθετήσει ο i αν προβεί στην πράξη j
$\mu_{cand,i,j}$	το μ που θα υιοθετήσει ο i αν προβεί στην πράξη j
$P_{sd,i,j}$	πιθανότητα λήψης των εκπομπών από τον i αν προβεί στην πράξη j
$C_{i,j}$	κόστος εκπομπής που θα προκύψει εάν ο κόμβος i υιοθετήσει την πράξη j
h	τυχαίος αριθμός για την αποφυγή «ισοπαλίας» μεταξύ τιμών της U

Για τη λειτουργία του μηχανισμού που περιγράψαμε μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε απ' τις συναρτήσεις οφέλους που παρουσιάστηκαν. Θα μπορούσαμε ακόμα να χρησιμοποιήσουμε ως κόστος της πράξης όχι απλώς το κόστος εκπομπής (εξίσωση 8.24)

αλλά να συμπεριλάβουμε και το κόστος λήψης από τους γείτονες (εξίσωση 8.21). Υπάρχει αρκετή ελευθερία, λοιπόν, στην επιλογή της συνάρτησης οφέλους.

Εν γένει οι συναρτήσεις οφέλους είναι συναρτήσεις του κόστους εκπομπής και της πιθανότητας P_{sd} .

Στο σχήμα 62 παρουσιάζεται ο παρών μηχανισμός με μορφή λογικού διαγράμματος.



Σχήμα 62: Λογικό διάγραμμα

Για την αξιολόγηση του μηχανισμού, ορίζονται μερικές μετρικές απόδοσης.

- Ενέργεια για πλήρη κάλυψη (energy to full coverage, E2FC) Το ενεργειακό κόστος μέχρι να μολυνθούν όλοι οι κόμβοι για πρώτη φορά
- Ενέργεια για 90% κάλυψη (energy to 90% coverage, E29C). Το ενεργειακό κόστος μέχρι να μολυνθεί το 90% των κόμβων για πρώτη φορά.
- Χρόνος για πλήρη κάλυψη (time to full coverage, T2FC). Ο χρόνος μέχρι να μολυνθούν όλοι οι κόμβοι για πρώτη φορά
- Χρόνος για 90% κάλυψη (time to 90% coverage, T29C). Ο χρόνος μέχρι να μολυνθεί το 90% των κόμβων για πρώτη φορά.

- Βελτίωση ενεργειακού κόστους ως προς τη στατική περίπτωση (cost gain improvement):

$$G(t) = \frac{C_0(t) - C(t)}{C_0(t)} \quad (8.26)$$

όπου $C(t)$ και $C_0(t)$ το κόστος για το προτεινόμενο και για το στατικό σχήμα αντίστοιχα. Με τον όρο *στατικό* εννοούμε ένα σχήμα το οποίο ξεκινάει με την ίδια τιμή για το β αλλά δεν την προσαρμόζει.

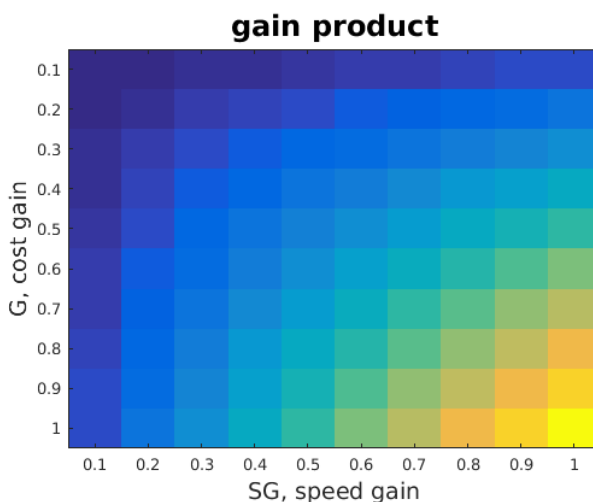
- Επιτάχυνση πλήρους μόλυνσης (full infection speed gain) Η κανονικοποιημένη βελτίωση της μετρικής T2FC:

$$SG = \frac{T2FC_0 - T2FC}{T2FC_0} \quad (8.27)$$

- Γινόμενο κέρδους (gain product). Το γινόμενο των δυο προηγούμενων μετρικών, δηλ:

$$R = SG \times G(T2FC) \quad (8.28)$$

Η μετρική αυτή είναι μέτρο της αντιστάθμισης ((tradeoff)) μεταξύ της ενεργειακής εξοικονόμησης και της επιτάχυνσης της μόλυνσης. Η ενεργειακή εξοικονόμηση υπολογίζεται για το χρόνο T2FC. Προφανώς οι επιθυμητές τιμές της μετρικής αυτής είναι οι μη αρνητικές υψηλές τιμές, με $G > 0$ βέβαια. Αρνητικές τιμές μπορούν να σημαίνουν επιβράδυνση της μόλυνσης, η οποία όμως μπορεί να είναι ανεκτή αν το ενεργειακό κέρδος είναι σημαντικό. Εποπτική εικόνα της δίνεται στο σχήμα 63.

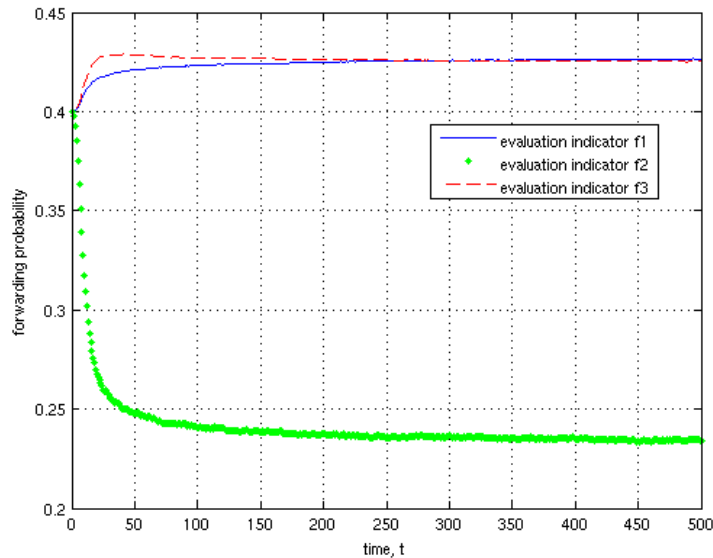


Σχήμα 63: Πιο επιθυμητές τιμές του gain product είναι οι υψηλές μη αρνητικές τιμές, και μάλιστα αυτές που προκύπτουν ως γινόμενο θετικών SG και G

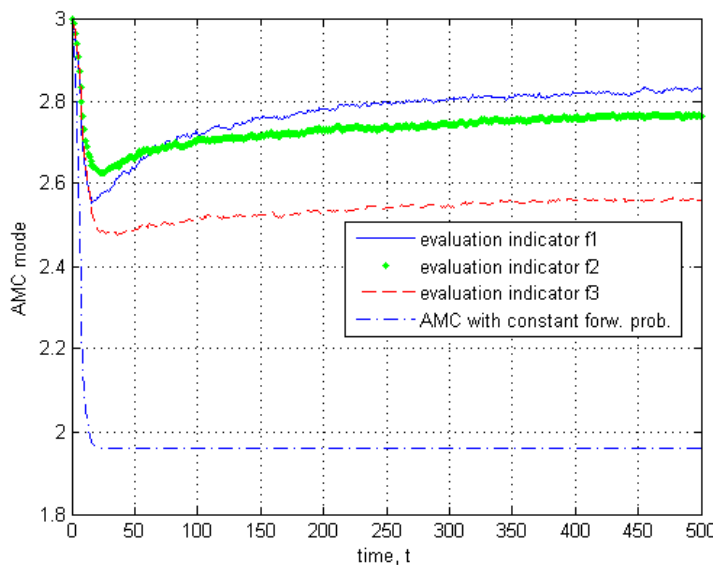
8.2.2 Αποτελέσματα και συζήτηση

Ο έλεγχος της απόδοσης της μεθόδου βασίζεται σε προσομοιώσεις. Στα σχήματα 64 και 65 εκτίθεται η χρονική εξέλιξη των βασικών παραμέτρων εκπομπής β και μ , όπως

Τις υπαγορεύει το προτεινόμενο σχήμα για τις διάφορες εκδοχές της συνάρτησης οφέλους (evaluation indicator στα σχήματα). Παρατηρεί κανείς εύκολα ότι η συνάρτηση οφέλους U_2 επιτρέπει σοβαρή ελάττωση των εκπομπών και κωδικοποίηση με σχετικά μικρό overhead. Αυτές οι προσαρμογές μάς οδηγούν να περιμένουμε ελαττωμένο ενεργειακό κόστος.



Σχήμα 64: Χρονική εξέλιξη της πιθανότητας προώθησης. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3 .

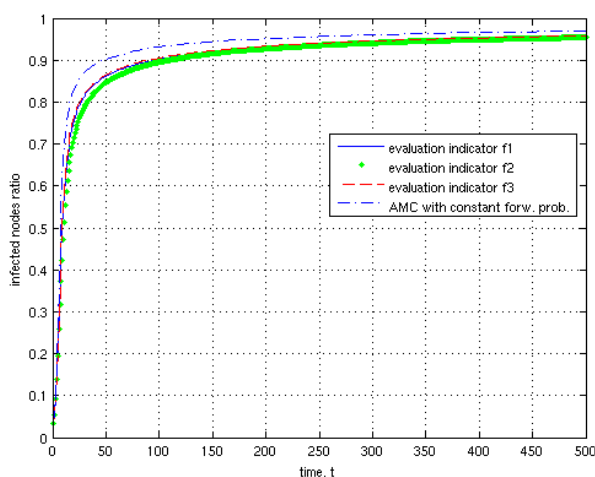


Σχήμα 65: Χρονική εξέλιξη της τρόπου του ΠΔΚ. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3 .

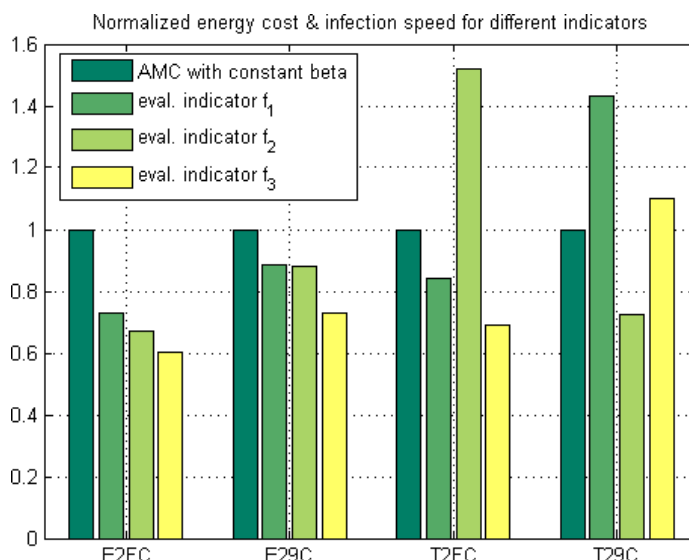
Στο σχήμα 66 παρουσιάζεται η επίδραση της προσαρμογής των παραμέτρων εκπομπής

στην εξάπλωση της επιδημίας. Είναι ενθαρρυντικό το γεγονός ότι ο συμβιβασμός είναι μικρός σε σχέση με στατικό σχήμα.

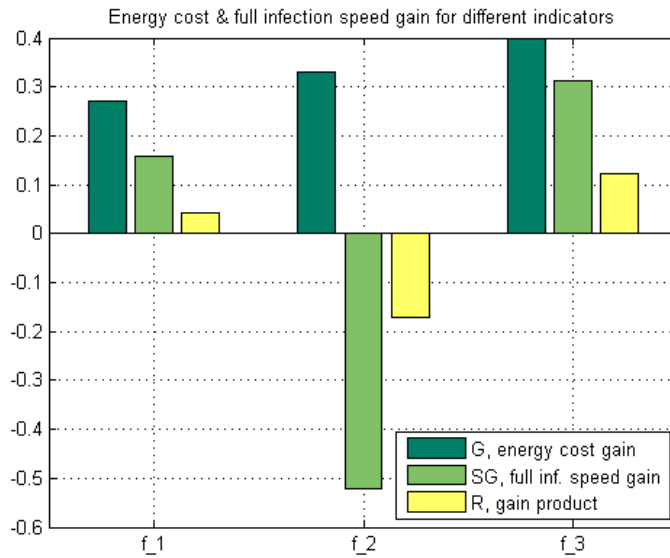
Η παρατήρηση των μετρικών που ορίσαμε προηγουμένως μας προσφέρει μια πιο συνολική αποτίμηση των επιδόσεων. Στο σχήμα 67 φαίνεται η ενεργειακή εξοικονόμηση και η τάση να μην επιβραδυνθεί η εξάπλωση της επιδημίας. Το σχήμα 68 δείχνει βελτίωση των διαφόρων μετρικών απόδοσης. Προφανώς αυτό σημαίνει πως η εξάπλωση της επιδημίας γίνεται «αποτελεσματικότερη» δηλαδή με μικρότερο ενεργειακό κόστος.



Σχήμα 66: Η επίδραση της προσαρμογής των παραμέτρων εκπομπής στην εξάπλωση της επιδημίας. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3

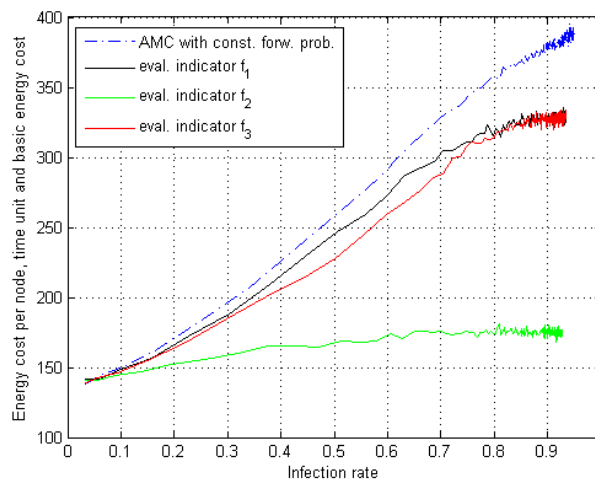


Σχήμα 67: Επίδραση της δυναμικής προσαρμογής παραμέτρων στο ενεργειακό κόστος και την ταχύτητα μόλυνσης. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3 .

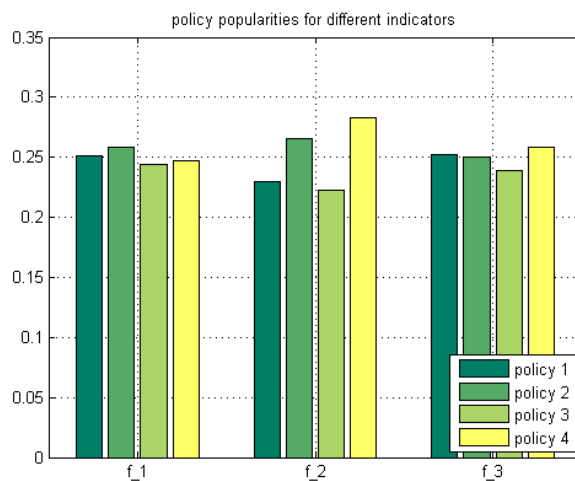


Σχήμα 68: Επίδραση της δυναμικής προσαρμογής παραμέτρων στις μετρικές που ορίστηκαν. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3

Το κόστος της μόλυνσης φαίνεται ρητά στο σχήμα 69. Σ' αυτό απεικονίζεται το ενεργειακό κόστος ανά μονάδα του χρόνου και κόμβο δικτύου ως προς το χρόνο. Τα προσαρμοστικά σχήματα, με οποιαδήποτε από τις δοκιμασμένες συναρτήσεις οφέλους φτάνουν σε σαφώς χαμηλότερο κόστος για να επιτύχουν την ίδια μόλυνση. Οι ηπιότερες (χαμηλότερες) κλίσεις των καμπύλων καταδεικνύουν πιο αποτελεσματικά σχήματα. Αυτό, μάλιστα, επιτυγχάνεται με μια σχετική ισοκατανομή μεταξύ των διαθέσιμων πράξεων (σχήμα 70).



Σχήμα 69: Η εκλυόμενη ενέργεια ως προς τη μόλυνση. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3

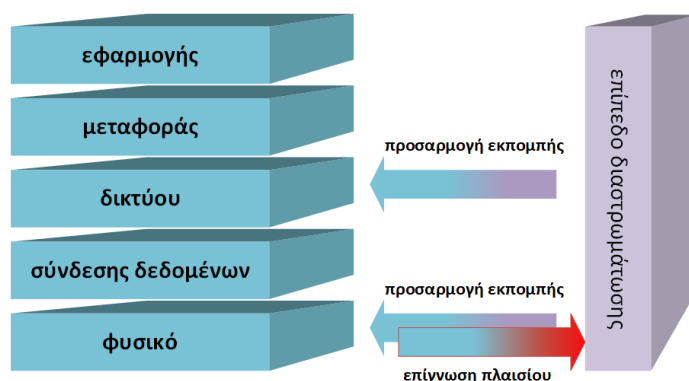


Σχήμα 70: Η σχετική δημοφιλία των δυνατών πράξεων. Οι διαφορετικές συναρτήσεις οφέλους U_1, U_2, U_3 αναφέρονται ως evaluation indicators f_1, f_2, f_3

8.2.3 Σύνοψη

Το παρόν υποκεφάλαιο σηματοδοτεί τη μετάβαση από την αναδραστική στην προβλεπτική αντιμετώπιση της Π.Ε.Δ. Η υπόθεση εργασίας ότι η πιθανότητα προώθησης περιγράφεται από διακριτή μεταβλητή απλοποιεί πολύ τους υπολογισμούς. Βοηθά στη διατύπωση μοντέλου συμπεριφοράς του δικτύου και με τον τρόπο αυτό μπορούμε να επικεντρώσουμε την προσοχή στα ουσιαστικά πορίσματα:

- Η κατάσταση κόμβου που συντελεί μέρος στη λειτουργία Π.Ε.Δ. αδόμητου ασύρματου δικτύου περιγράφεται από το ζεύγος *πιθανότητας προώθησης* και *τρόπου ΠΔΚ* (β, μ).
- Το πεπερασμένο πλήθος τιμών του β επιτρέπει πεπερασμένο πλήθος δυνατών καταστάσεων κόμβου, οι μεταβάσεις μεταξύ των οποίων επιτυγχάνονται με επιλογή μιας από ένα σύνολο δυνατών πράξεων και μπορούν να απεικονισθούν με μαρκοβιανή αλυσίδα.
- Η επιλογή πράξεως βασίζεται σε «μυωπική» εκτίμηση του άμεσου οφέλους με τη χρήση συνάρτησης οφέλους. Η κατασκευή της συνάρτησης οφέλους επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του σχήματος.
- Η ελάττωση του ενεργειακού κόστους είναι σημαντική και συνοδεύεται από διατήρηση της μόλυνσης σε υψηλά επίπεδα.
- Το εξεταζόμενο σχήμα ενσωματώνει διαστρωματική λογική. Το επίπεδο διαστρωμάτωσης συλλέγει πληροφορία πλαισίου από το φυσικό στρώμα (SNR) και υπαγορεύει την προσαρμογή παραμέτρων στα στρώματα φυσικό και δικτύου (τρόπος του ΠΔΚ και πιθανότητα προώθησης αντίστοιχα). Η λογική αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 71



Σχήμα 71: Διαστρωματική αντίληψη του σχήματος προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης με απλή σύγκριση

Έτσι, Η «μυωπική», βασιζόμενη στο άμεσο όφελος, επιλογή μια πράξης που επιφέρει αλλαγή της κατάστασης του κόμβου αποδίδει εξοικονόμηση ενέργειας και επικράτηση της μόλυνσης με ταυτόχρονη ευελιξία στην κατασκευή της συνάρτησης οφέλους.

8.3 Επιδημική Διάδοση με Βελτιστοποίηση

ISCC 2015: "Epidemic Information Dissemination Controlled by Wireless Channel Awareness"

8.3.1 Μοντέλο και Παραδοχές

Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο κάναμε το λογικό βήμα να προχωρήσουμε από ένα μηχανισμό ανάδρασης που αντιδρά στις αλλαγές του περιβάλλοντος σε έναν «ευφυέστερο» που προβλέπει έστω και μυωπικά την καλύτερη από ένα πεπερασμένο πλήθος επιλογών για την προσαρμογή μερικών παραμέτρων εκπομπής. Σιωπηρά υποθέσαμε ότι η επιλογή προσαρμογής γίνεται κάθε χρονική στιγμή. Στο παρόν κεφάλαιο εισάγουμε έναν περιορισμό που εισάγει μια συνιστώσα βελτιστοποίησης στον προηγούμενο μηχανισμό.

Ας θεωρήσουμε το δικτυακό περιβάλλον του προηγούμενου υποκεφαλαίου. Η στοχαστικότητα της μεταβολής των συνθηκών (της κατάστασης καναλιού) παραμένει. Έτσι, όπως και νωρίτερα:

- Κάθε κόμβος παρατηρεί την κατάσταση όλων των καναλιών που τον συνδέουν με τους γείτονές του.
- Υπολογίζει την τιμή μιας συνάρτησης οφέλους για κάθε δυνατή πράξη με τον ίδιο τρόπο.
- Έχει να επιλέξει μεταξύ των ίδιων πράξεων για την προσαρμογή της κατάστασής του (β, μ) .

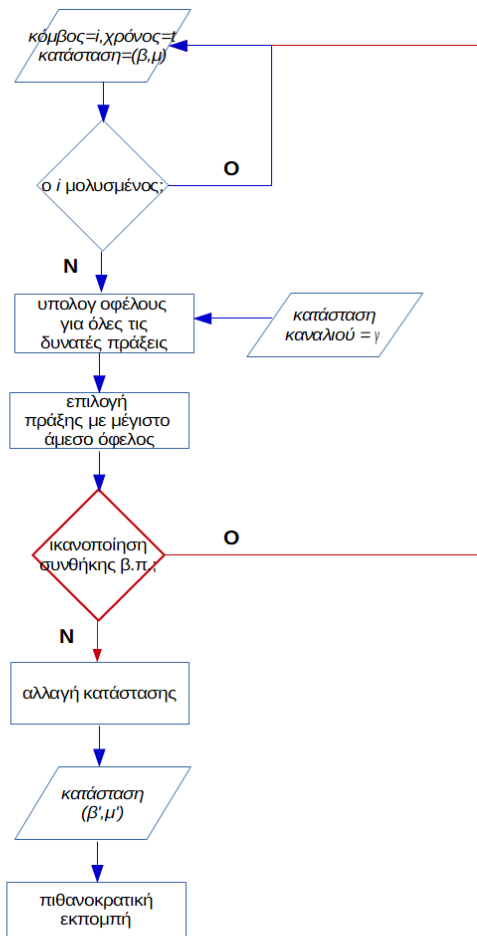
Εισάγουμε την εξής προσθήκη:

*Ο κόμβος προβαίνει σε μεταβολή της καταστάσεώς του υιοθετώντας την πράξη που προσφέρει την υψηλότερη τιμή συνάρτησης οφέλους **αν και μόνο αν** ικανοποιείται η ακόλουθη συνθήκη βέλτιστης παύσης (β.π.):*

$$\hat{U}_{calc,a}^i(t+1) \geq E[\hat{U}(t)] \quad (8.29)$$

... όπου $\hat{U}_{calc,a}^i(t+1)$ είναι η υπολογιζόμενη τιμή της (γενικευμένης) συνάρτησης οφέλους για τον κόμβο i την επόμενη χρονική στιγμή αν αυτός υιοθετήσει την πράξη a : και $E[\hat{U}(t)]$ η αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης οφέλους. Αυτή είναι η συνθήκη 1sla (one-step look-ahead) με αόριστο ορίζοντα. Έτσι το λογικό διάγραμμα του σχήματος 45 του προηγούμενου υποκεφαλαίου μεταπίπτει σ' αυτό του σχήματος 72 του παρόντος.

Ακολουθεί ο κατάλληλος φορμαλισμός του προβλήματος. Έστω B και M το σύνολα των δυνατών τιμών του β και του μ αντίστοιχα. Τότε το $B \times M$ είναι το σύνολο δυνατών καταστάσεων ενός κόμβου η αλλιώς ο χώρος καταστάσεων του (state space).



Σχήμα 72: Λογικό διάγραμμα για επιδημική διάδοση με βελτιστοποίηση

Σε κάθε χρονική στιγμή t και για κάθε κόμβο i , υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης οφέλους για κάθε δυνατή πράξη $\alpha U_{\alpha,i}(t)$. Η πράξη α_0 που παρέχει το υψηλότερο άμεσο όφελος είναι και η υποψήφια για υιοθέτηση:

$$\alpha_0 = \operatorname{argmax}_{\alpha} U_{\alpha,i}(t) \quad (8.30)$$

Η υιοθέτηση της πράξης λαμβάνει χώρα μόνο αν πληροίται η συνθήκη β.π. Αυτή πληροίται αν και μόνο αν η $U_{\alpha_0,i}(t)$ ικανοποιεί την (8.29). Ως συνάρτηση οφέλους μπορούμε να επιλέξουμε την της (8.31), η οποία μας είναι γνωστή και από το προηγούμενο υποκεφάλαιο.

$$U_{\alpha} = \frac{P_{sd,\alpha}}{E_{\alpha}} \quad (8.31)$$

... όπου $P_{sd,\alpha}$ η πιθανότητα επιτυχούς λήψης για την εκπομπή που θα γίνει αφού υιοθετηθεί η πράξη α και E_{α} το ενεργειακό κόστος στην ίδια περίπτωση. Σημειωτέον ότι ο δείκτης

i που αντιπροσωπεύει τον κόμβο έχει εδώ παραλειφθεί για λόγους απλότητας. Ο ορισμός της συνάρτησης της (8.31) μπορεί να διευρυνθεί αν εισάγουμε την ιδέα του χαμηλοπερατού φιλτραρίσματος, δηλ. την εξαγωγή μέσης τιμής σ' ένα ολισθαίνον παρελθοντικό παράθυρο εύρους w , όπως στην (8.32)

$$\hat{U}_\alpha(t) = \sum_{\tau=t-w}^t [U_\alpha(\tau)] \quad (8.32)$$

Ενδεικτικές τιμές του w παρατίθενται στον πίνακα 17. Για διαφορετικές τιμές του w έχουμε διαφορετικές εκδοχές (flavors) της συνάρτησης οφέλους.

Πίνακας 17: Εκδοχές της συνάρτησης οφέλους ανάλογα με το εύρος του w .

παράθυρο w	ονομασία εκδοχής	ερμηνεία
1	aggressive	χωρίς φιλτράρισμα
3	conservative	φιλτράρισμα στο πρόσφατο παρελθόν
χρόνος ζωής παρούσας κατάστασης κόμβου	lazy	λαμβάνεται υπ' όψιν συμπεριφορά καναλιού από τελευταία προσαρμ. κατάστ. κόμβου

Όπως περιγράψαμε και στο υποκεφάλαιο 6.1.4, η θεωρία βέλτιστης παύσης [111] μας δίνει τα ακόλουθα σχετικά με τον κανόνα 1sla:

- Σε προβλήματα με πεπερασμένο ορίζοντα, τα οποία έχουν επί πλέον την ιδιότητα της μονοτονικότητας, το κριτήριο 1sla δίνει τη βέλτιστη λύση.
- Σε περίπτωση που ο ορίζοντας είναι αόριστος, το κριτήριο 1sla δίνει πάλι τη βέλτιστη λύση όταν το πρόβλημα είναι μονότονο εάν ικανοποιούνται μερικές συνθήκες ακόμα [111].

Παρατηρούμε ότι, στην περίπτωση μας, η συνάρτηση οφέλους δεν είναι μονότονη· είναι χωρίς επαναφορά, δηλαδή δε μπορούν να ανακληθούν παρελθούσες μετρήσεις που έδιναν υψηλότερη τιμή οφέλους. Μπορούμε όμως να αποδείξουμε ότι το κριτήριο 1sla δίνει τη βέλτιστη λύση με πεπερασμένη πιθανότητα με το ακόλουθο θεώρημα:

Θεώρημα: Το κριτήριο 1sla δίνει τη βέλτιστη λύση με πεπερασμένη πιθανότητα. Ας θεωρήσουμε πρόβλημα βελτιστοποίησης με καθορισμένη συνάρτηση οφέλους και μια γενικευμένη (φιλτραρισμένη) συνάρτηση οφέλους ορισμένη όπως η της εξίσωσης (8.32). Αν η συνάρτηση οφέλους είναι κανονικά (κατά Gauss) κατανομημένη, τότε η ιδιότητα μονοτονικότητας (6.9) ικανοποιείται με πεπερασμένη πιθανότητα.

Απόδειξη:

Η συνθήκη μονοτονίας για τη γενικευμένη συνάρτηση οφέλους μπορεί να γραφεί ως:

$$E[\hat{U}(t+1)] \leq \hat{U}(t) \Rightarrow E[\hat{U}(t+2)] \leq \hat{U}(t+1) \quad (8.33)$$

Θεωρούμε ότι η γενικευμένη (χαμηλοπερατά φιλτραρισμένη) αθροιστική συνάρτηση οφέλους της (8.32) είναι γκαουσιανή. Θα δείξουμε ότι τότε η μονοτονικότητα ισχύει με πεπερασμένη πιθανότητα. Η 8.33 μπορεί να γραφτεί με τη βοήθεια της (8.32) ως εξής:

$$\sum_{\tau=1}^{t+1} \mu_{\tau} \leq \sum_{\tau=1}^t U(\tau) \Rightarrow \sum_{\tau=1}^{t+2} \mu_{\tau} \leq \sum_{\tau=1}^{t+1} U(\tau) \quad (8.34)$$

όπου $\mu_t = E[U(t)]$. Η εξαγωγή της (8.35) είναι τετριμμένη:

$$\sum_{\tau=1}^{t+2} \mu_{\tau} \leq \sum_{\tau=1}^{t+1} U(\tau) \Leftrightarrow \sum_{\tau=1}^{t+1} \mu_{\tau} \leq \sum_{\tau=1}^t U(\tau) + U(t+1) - \mu_{t+2} \quad (8.35)$$

Συνεπώς για να αποδειχθεί η (8.33) αρκεί η κατανομή της $U(t)$ να αλλάζει αρκετά αργά ώστε $\mu_{t+1} \approx \mu_{t+2}$ και να ισχύει και η (8.36):

$$U(t+1) - \mu_{t+1} \geq 0 \quad (8.36)$$

Κάνουμε την πιο πάνω παραδοχή και επίσης δείχνουμε ότι η 8.36 ισχύει με πεπερασμένη πιθανότητα. Για απλοποίηση του συμβολισμού εισάγουμε το $\delta = U(t+1) - \mu_{t+1}$. Δεν αναμένεται σύγχυση του δ αυτού με την πιθανότητα θεραπείας κόμβου. Θα δείξουμε ότι

το δ είναι θετικό με πεπερασμένη πιθανότητα. Ας θεωρήσουμε ότι η $U(t)$ είναι γκαουσιανή με μέση τιμή μ και διασπορά σ^2 . Για $\epsilon > 0$ ισχύει ότι

$$P(0 < \delta \leq \epsilon) = \frac{1}{2}P(|\delta| \leq \epsilon) = \frac{1}{2}(1 - P(|\delta| \geq \epsilon)) \quad (8.37)$$

Η ανισότητα 8.34 με τη χρήση της ανισότητας του Chebyshev και της (8.35) δίνει τη (8.38)

$$P(0 < \delta \leq \epsilon) \geq \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{\sigma}{\epsilon} \right)^2 \right] \quad (8.38)$$

Άρα η (8.36) και η ισοδύναμή της στο δεξιό σκέλος της (8.34) ισχύουν με πεπερασμένη πιθανότητα για $\epsilon > \sigma$. ■

Συνεπώς, με τη χρήση ενός κριτηρίου βέλτιστης παύσης είναι πιθανό να πλησιάσουμε τη βέλτιστη λύση με τις προϋποθέσεις:

- Η $U(t)$ δε μεταβάλλεται πολύ απότομα με το χρόνο
- Ισχύει ότι $U(t) \geq \mu_{t+1}$

Ο μηχανισμός που περιγράψαμε στα προηγούμενα μπορεί να συνοψιστεί στον ψευδοκώδικα της λίστας 9

Λίστα 9: Διαδικασία προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης

```

node  $i$ , time  $t$ 
set of possible actions  $\mathcal{A}$ 
set of candidate actions  $\mathcal{A}'$ 
action to adopt  $\alpha_0$ 

for each  $i, t$ 
  for each  $\alpha \in \mathcal{A}$ 
    calculate  $U_{calc, \alpha}^i(t+1)$ 
    if  $U_{calc, \alpha}^i(t+1) \geq E[U(t)]$ 
       $\mathcal{A}' = \mathcal{A}' \cup \{\alpha\}$ 
    else
      continue
  endif
endfor
if  $\mathcal{A}' \neq \emptyset$ 
  adopt  $\alpha_0 \in \mathcal{A}' : U_{calc, \alpha}^i(t+1) = \max_{\alpha} \{U_{calc, \alpha}^i\}$ 
endif
endfor
    
```

8.3.2 Αποτελέσματα και Συζήτηση

Με τη βοήθεια προσομοιώσεων, οι επιδόσεις του περιγραφόμενου σχήματος αποτιμώνται σε σχέση με το λεγόμενο στατικό σχήμα, το οποίο μας εξυπηρετεί ως σχήμα αναφοράς

(benchmark). Αυτό ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \beta(t+1) &= \beta(t) \quad \forall t \\ \mu(t+1) &= n : \gamma_n \leq \gamma < \gamma_{n+1} \end{aligned} \tag{8.39}$$

Δηλαδή το β παραμένει στην αρχική του τιμή και το μ μεταβάλλεται απλώς όπως υπαγορεύει η τιμή του SNR.

Στον πίνακα 18 παρατίθενται οι τιμές παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις .

Πίνακας 18: Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις

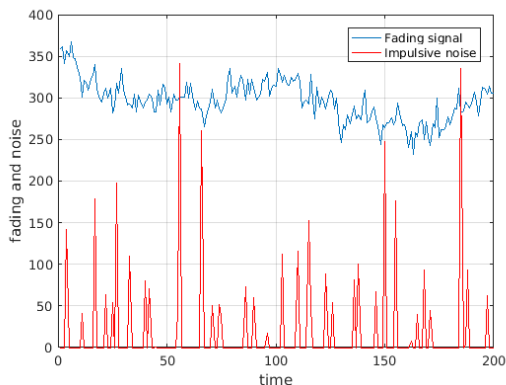
παράμετρος	περιγραφή	τιμή
T	χρόνος προσομοίωσης	100
N	πλήθος κόμβων	50
L_0	μήκος μολύνοντος πακέτου πριν την κωδικοποίηση	50 bits
$I(1)$	αρχικό πλήθος μολυσμένων κόμβων	3
β_ν	ν -οστή επιτρεπτή τιμή της πιθανότητας προώθησης αριθμός τρόπων του ΠΔΚ	$\beta_\nu = 0.2 + 0.02\nu$ 6

Μια σημαντική παραδοχή στο σχήμα αυτό πρέπει να παρατεθεί ρητά. Υποθέτουμε ότι ο υποβιβασμός του σήματος στα ασύρματα κανάλια είναι συνέπεια των εξής δυο μηχανισμών:

- της πολυδιόδευσης που είναι και η πηγή των διαλείψεων
- του θερμικού θορύβου, ο οποίος έχει τη μορφή μιας παλμοσειράς πλησιοπεριοδικών παλμών. Δηλαδή υποθέτουμε την άφιξη παλμών θορύβου γύρω από τακτές (περιοδικές) χρονικές στιγμές. Η κατανομή της στιγμής αφίξεώς τους γύρω από αυτές είναι κανονική (γκουσιανή) της μορφής $\mathcal{N}(nT, \sigma_1)$, όπου n φυσικός και επίσης φυσικός η απόσταση μεταξύ διαδοχικών χρονικών στιγμών γύρω από τις οποίες συσπειρώνονται οι αφίξεις των παλμών. Το σ_1 είναι προφανώς η απόκλιση της κατανομής. Ομοίως και η κατανομή του πλάτους τους ακολουθεί την $\mathcal{N}(A, \sigma_1)$, όπου A το πιθανότερο πλάτος θορύβου. Στο σχήμα 73 αποδίδονται οι δυο μηχανισμοί στο πεδίο του χρόνου.

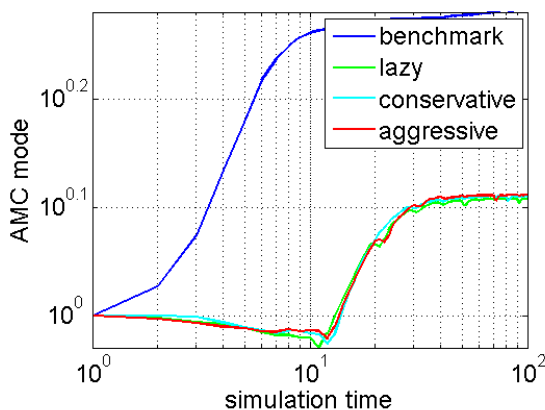
Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, εξακολουθούμε να χρησιμοποιούμε το μοντέλο από την [92], το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στα προηγούμενα. Σημειώνουμε, όμως, ότι τα ποσοτικά συμπεράσματα της [92] για το PER στους διάφορους τρόπους του ΠΔΚ αυστηρά ισχύουν μόνο για την περίπτωση που έχουμε μόνο προσθετικό λευκό γκαουσιανό θόρυβο (AWGN). Επομένως παραδεχόμαστε ότι τα χρησιμοποιούμε καταχρηστικά.

Η χρήση προσομοιώσεων δίνει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Παρατηρούμε από τα σχήματα (74) και (75) ότι το μ μεταβάλλεται πιο συντηρητικά σε σχέση με το στατικό σχήμα



Σχήμα 73: Τυχαίος παλμικός θόρυβος και διαλείψεις στο πεδίο του χρόνου

αναφοράς (benchmark). Αυτό ισχύει για όλες τις εκδοχές (aggressive, conservative, lazy). Επί της ουσίας τα σχήματα αυτά δείχνουν τάση για πιο ενεργοβόρα κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος σε συνδυασμό με πιο οικονομική συχνότητα εκπομπών. Ο συγκερασμός των δυο τακτικών έχει τα αποτελέσματα που φαίνονται στα σχήματα (75) και (77). Το σχήμα (76) δείχνει το ποσοστό μόλυνσης ως προς το χρόνο. Παρουσία του θορύβου που θεωρήσαμε, το σχήμα μας επιτυγχάνει μάλλον ταχύτερη μόλυνση, επωφελούμενο από την παραμονή σε «ισχυρότερους» τρόπους του ΠΔΚ.

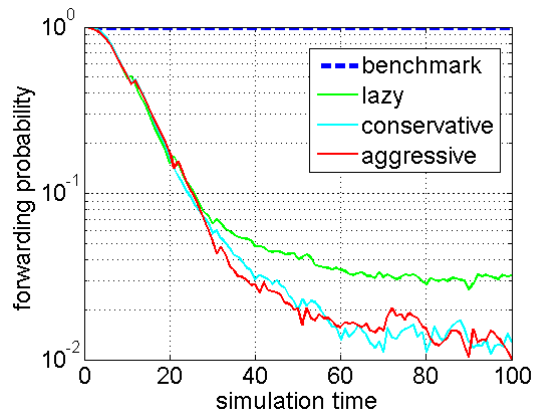


Σχήμα 74: Χρονική μεταβολή του τρόπου του ΠΔΚ

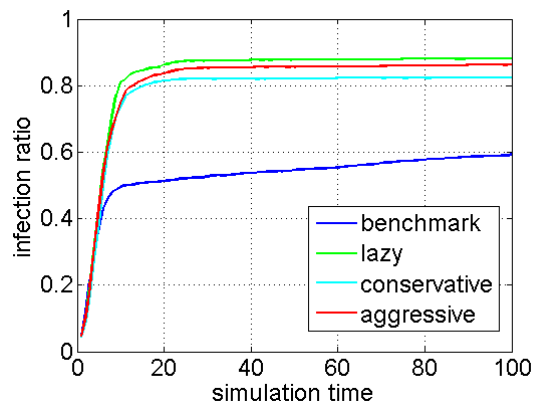
Το σχήμα (77) απεικονίζει το ενεργό ενεργειακό κόστος το οποίο ορίζεται στην (8.40) ως το αθροιστικό κόστος κανονικοποιημένο ως προς το κόστος εκπομπής ενός bit.

$$E_{eff}(t) = \frac{E(t)}{E_b} \quad (8.40)$$

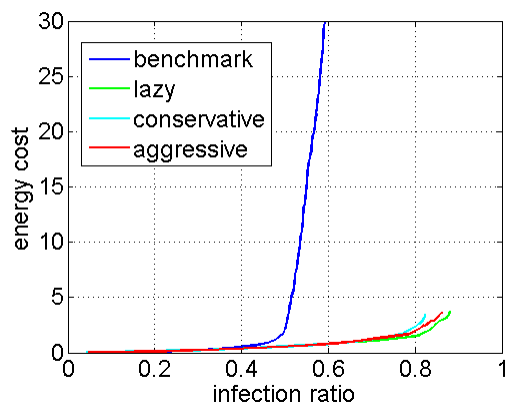
Επομένως, η μόλυνση είναι αποτελεσματική και ταυτόχρονα πιο οικονομική. Αυτή η συμπεριφορά είναι συνεπής για διάφορες τιμές της συστολής του β , δηλ. όσο κι αν «ντοπάρουμε» την περικοπή εκπομπών. Αυτό εκτίθεται στο σχήμα (78).



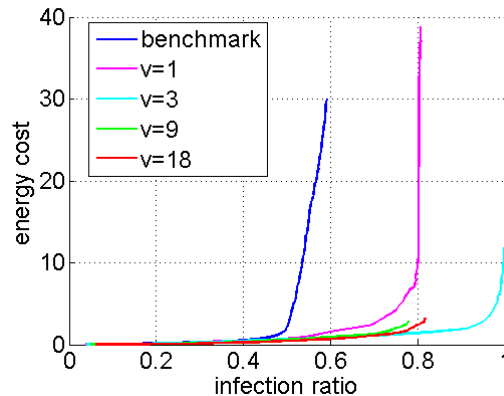
Σχήμα 75: Χρονική μεταβολή της πιθανότητας προώθησης



Σχήμα 76: Κανονικοποιημένο ενεργειακό κόστος ως προς το ποσοστό μόλυνσης για τις διάφορες εκδοχές του σχήματος (aggressive, conservative, lazy)



Σχήμα 77: Ενεργό ενεργειακό κόστος ως προς το ποσοστό μόλυνσης για τις διάφορες εκδοχές του σχήματος

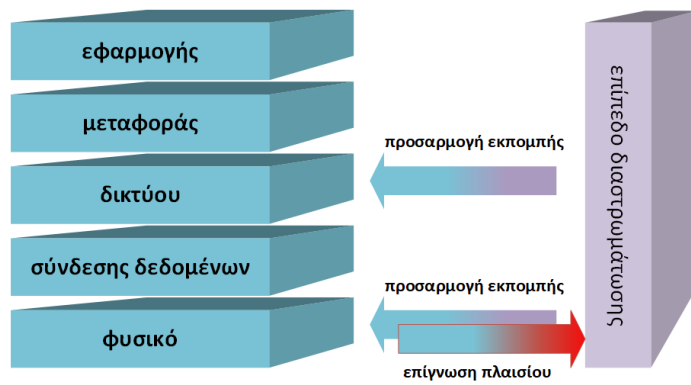


Σχήμα 78: Ενεργό ενεργειακό κόστος ως προς το ποσοστό μόλυνσης για διάφορες τιμές της συστολής του β

8.3.3 Σύνοψη

Το παρόν σχήμα προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης έχει σημαντικές ομοιότητες με το του υποκεφαλαίου 8.2. Η βασική ιδέα της εκτίμησης μεταξύ των υποψηφίων πράξεων σε κάθε (διακριτή) χρονική στιγμή είναι κοινή μεταξύ των δύο. Εισάγεται, όμως, η ιδέα της συντηρητικότερης απόφασης αλλαγής κατάσταση με την εισαγωγή της ανάγκης ικανοποίησης συνθήκης β.π. Οι ακόλουθες παρατηρήσεις συνοψίζουν τη μορφή, τις επιδόσεις και τη συμβολή του:

- Το ενεργειακό όφελος σε σχέση με την άνευ όρων εκπομπή εξακολουθεί να είναι σημαντικό.
- Στον τομέα της εξάπλωσης μόλυνσης, το παρουσιαζόμενο σχήμα εμφανίζεται να παρέχει επίσης σημαντικότερη βελτίωση, μένοντας ουσιαστικά αλώβητο από την παρουσία της παλμοσειράς του θερμικού θορύβου (σχήμα 76). Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι το αποτέλεσμα αυτό βασίζεται στην υπόθεση ότι οι υπολογισμοί του PER είναι οι ίδιοι με την περίπτωση καναλιού με θόρυβο AWGN και μόνο.
- Και αυτό το σχήμα είναι διαστρωματικού χαρακτήρα. Μετρήσεις από το φυσικό στρώμα (SNR) χρησιμοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την προσαρμογή παραμέτρων σε διάφορα άλλα στρώματα· αυτά είναι το φυσικό στρώμα και το στρώμα δικτύου, όπως και στο προηγούμενο σχήμα. Η διαστρωματική απεικόνιση του παρόντος σχήματος δίδεται στο σχήμα 79.



Σχήμα 79: Διαστρωματική αντίληψη του σχήματος προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης με βελτιστοποίηση

8.4 Βέλτιστος Χρονοπρογραμματισμός με Πλησιοπεριοδικές Εκπομπές

WINET 2017: "Adaptive epidemic dissemination as a finite-horizon optimal stopping problem"

8.4.1 Μοντέλο και Παραδοχές

Εξετάζουμε τώρα τη δυνατότητα επέκτασης των προηγούμενων ιδεών σε ένα ενδιαφέρον πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού. Έστω επιθυμούμε τη διάχυση πληροφορίας σε ένα αδόμητο ασύρματο δίκτυο. Αυτό επιδιώκεται με την περιοδική εκπομπή της μολύνουσας πληροφορίας από τους μολυσμένους κόμβους. Αυτό το πρόβλημα παρουσιάζεται σε εφαρμογές όπως το σχήμα Directed Diffusion [117] ή σε πρωτόκολλα δρομολόγησης στα οποία η φάση ανακάλυψης μονοπατιών εκκινείται με διάχυση *μηνυμάτων αιτήματος μονοπατιού* route request messages, RREQ [118], [119].

Η απλούστερη, «στατική» αντιμετώπιση του προβλήματος είναι η εξής:

- Τις στιγμές $t = n\epsilon, n \in \mathbb{N}$ ο μολυσμένος κόμβος ευρεεκπέμπει την απαιτούμενη πληροφορία· πρόκειται δηλαδή για περιοδικές ευρεεκπομπές με περίοδο ϵ .

Μπορούμε εύκολα να μετασχηματίσουμε το παραπάνω τοπίο άνευ όρων ευρεεκπομπών σε πρόβλημα επιδημικής διάδοσης, κατά το οποίο οι περιοδικές ευρεεκπομπές είναι επιδημικές, δηλαδή:

- Τις στιγμές $t = n\epsilon, n \in \mathbb{N}$ ο μολυσμένος κόμβος ευρεεκπέμπει με πιθανότητα $\beta(t) = \beta_0 < 1$ και τρόπο $\mu(t)$ σύμφωνα με την 8.41

$$\mu(t) = \mu_i \text{ ανν } \gamma_i < \gamma < \gamma_{i+1} \quad (8.41)$$

όπου οι τιμές γ_i λαμβάνονται από τον πίνακα 7 του υποκεφαλαίου 5.3. Αυτή η προσαρμογή του τρόπου του ΠΔΚ είναι η ίδια που υποτέθηκε στο κεφάλαιο 8.1 και στα 8.2 και 8.3 ως στατικό σχήμα αναφοράς.

Προφανώς αυτή η τεχνική δε χρησιμοποιεί τη γνώση των συνθηκών του καναλιού την οποία επιδιώκουμε να εκμεταλλευτούμε για να επιτύχουμε τη μόλυνση του δικτύου με χαμηλότερο ενεργειακό κόστος. Προτείνουμε την αναχώρηση από τον ανελαστικά περιοδικό χρονοπρογραμματισμό των ευρεεκπομπών και τη μετάβαση στο ακόλουθο σχήμα:

Αντιμετωπίζουμε την επιδημική διάχυση της απαιτούμενης πληροφορίας ως πρόβλημα προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης σύμφωνα πάντα με το μοντέλο SIS. Υποθέτουμε αρχικά περιορισμένο πλήθος μολυσμένων κόμβων. Οι υποθέσεις εργασίας είναι όμοιες με το προηγούμενο κεφάλαιο 8.3. Μοναδικές τροποποιήσεις είναι οι ακόλουθες:

- Η θεραπεία συμβαίνει με πιθανότητα δ αλλά επί πλέον ενισχύεται από μηχανισμό θεραπείας βάσει εξαντλήσεως ενός χρόνου ζωής μολύνουσας πληροφορίας (expiry time threshold).

- Οι εκπομπές δε συμβαίνουν κάθε χρονική στιγμή, αλλά μια φορά εντός ενός χρονικού παραθύρου εύρους, ϵ , της επονομαζόμενης *εποχής*, ίσου σε διάρκεια με την περίοδο των περιοδικών εκπομπών που εγκαταλείψαμε.
- Κάθε κόμβος γνωρίζει τους γείτονές του μέσω των ευρυεκπομπών τους. Προφανώς, η μέθοδος αυτή δεν προσφέρει ακριβή γνώση διότι: μαθαίνει μόνο τους μολυσμένους, εφ' όσον οι ευάλωτοι «σιωπούν»· επίσης ακόμα και οι μολυσμένοι κόμβοι μπορεί να έχουν μειωμένες εκπομπές λόγω της προσαρμογής της πιθανότητας προώθησης.
- Κάθε κόμβος μαθαίνει την κατάσταση του ασύρματου καναλιού (ανάκτηση ΠΚΚ) προς κάθε έναν από τους γείτονές του. Αυτή η γνώση επιτυγχάνεται με ευρυεκπομπές ανεξάρτητες του σχήματός μας. Αυτός ο μηχανισμός ευρυεκπομπών υποτίθεται αξιόπιστος αλλά και ενεργοβόρος. Δηλαδή το κόστος του είναι μη μηδενικό και γνωστό.
- Στα ασύρματα κανάλια υπάρχει ανταγωνισμός για κατάληψη πόρων. Αυτός περιγράφεται από το ακόλουθο μοντέλο: Έστω μολυσμένοι κόμβοι A και B και ευάλωτος Γ με τον Γ να είναι στη γειτονιά (εμβέλεια εκπομπής) και των δύο άλλων. Έστω τη χρονική στιγμή t ο A ευρυεκπέμπει και το ίδιο κάνει και ο B. Τότε οι δυο αυτές εκπομπές αλληλοπαρεμβάλλονται με αποτέλεσμα την αμοιβαία καταστροφή τους και την αδυναμία από την πλευρά του Γ να λάβει επιτυχώς οποιαδήποτε από αυτές. Έτσι ο Γ μένει ευάλωτος.

Με αυστηρότερη διατύπωση, έστω ο δυαδικός πίνακας C διαστάσεων $N \times N$ ο οποίος περιγράφει την κατάσταση κατάληψης του καναλιού i, j έτσι ώστε $C_{i,j} = C_{j,i} = 1$ αν και μόνο αν οι i και j επικοινωνούν και $C_{i,j} = 0$ αλλιώς. Αν A ο πίνακας γειτνίασης που έχει ήδη οριστεί (4.3.4, 5.4.1), τότε η συνθήκη αλληλοπαρεμβολής εκφράζεται ως εξής:

$$A_{i,k} = A_{j,k} = A_{i,j} = 1 \wedge C_{i,k} = C_{j,k} = 1 \Rightarrow \text{συμφόρηση στα κανάλια } i, k \text{ και } i, j \\ \text{και οι μεταξύ τους εκπομπές αχρηστεύονται. (8.42)}$$

- Οι κόμβοι είναι κινητοί. Η κίνησή τους περιγράφεται από μοντέλο κινητικότητας random waypoint.

Για την επίλυση του προβλήματος ακολουθούμε τον εξής μηχανισμό:

- Κάθε στιγμή t , η κατάσταση του κόμβου περιγράφεται, κατά τα γνωστά, από το ζεύγος $(\beta(t), \mu(t))$.
- Ο χρόνος χωρίζεται σε διαδοχικά, ξένα μεταξύ τους διαστήματα εύρους ϵ , τα οποία ονομάζονται *εποχές*.
- Μέσα σε κάθε εποχή, ο μολυσμένος κόμβος επιλύει το κλασσικό πρόβλημα του γραμματέως με πεπερασμένο, γνωστό, σταθερό ορίζοντα [111] ίσο με ϵ .

- Εξετάζει κάθε χρονική στιγμή t ποια από τις δυνατές πράξεις (που περιγράφονται ήδη στο κεφάλαιο 8.2) υπόσχεται το υψηλότερο άμεσο όφελος και τη θεωρεί υποψήφια. Για την εκτίμηση αυτή χρησιμοποιείται η συνάρτηση οφέλους που ορίζεται στην εξίσωση 8.43.

$$\hat{U}(t) = \frac{1}{w} \sum_{\tau=t-w}^t U(\tau) \quad (8.43)$$

όπου

$$U(t) = \frac{P_{sd}(t)}{E(t)} \quad (8.44)$$

... όπου $P_{sd}(t)$ η πιθανότητα επιτυχούς λήψης και $E(t)$ το αναμενόμενο ενεργειακό κόστος. Αν συμπεριληφθεί και δείκτης i δηλωτικός του κόμβου οι συμβολισμοί μετπίπτουν στους $U_i(t)$, $\hat{U}(t)$, $P_{sd,i}(t)$ και $E_i(t)$ με προφανή αντιστοιχία. Κάθε στιγμή t από όλες τις δυνατές πράξεις $\alpha_i \in \mathcal{A}$ ως υποψήφια επιλέγεται αυτή με το υποσχόμενο υψηλότερο άμεσο κέρδος, έστω α^* , δηλαδή:

$$\alpha^* \in \mathcal{A} : U_{\alpha^*} = \max_{\alpha} \{U_{\alpha}\} \quad (8.45)$$

- Εάν πληροίται η συνθήκη βέλτιστης παύσης (8.46), γνωστή για το κλασσικό πρόβλημα του γραμματέως με γνωστό, πεπερασμένο και σταθερό ορίζοντα, υιοθετείται η προτεινόμενη πράξη και έτσι μεταβάλλεται η κατάσταση του (μολυσμένου) κόμβου προς νέα εν γένει διαφορετική $(\beta(t), \mu(t)) \neq (\beta(t-1), \mu(t-1))$.

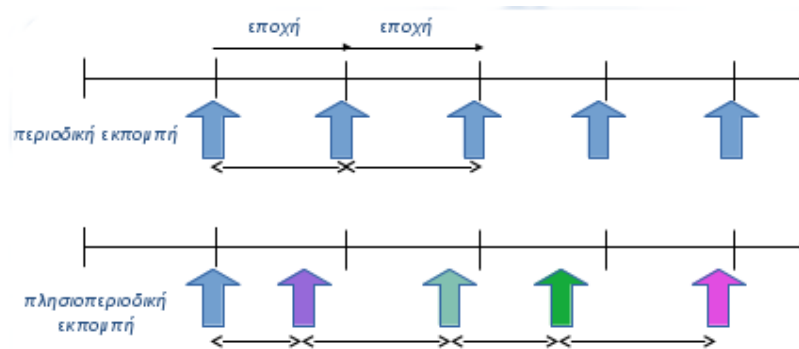
$$t \geq \frac{\epsilon}{e} \wedge \hat{U}(t) > \hat{U}(\tau) \forall \tau < t \quad (8.46)$$

- Επιχειρεί επιδημική ευρυεκπομπή, δηλαδή με πιθανότητα $(\beta(t))$ ευρυεκπέμπει τη μολύνουσα πληροφορία χρησιμοποιώντας τον τρόπο $\mu(t)$ του ΠΔΚ.
- Μετά την επιδημική ευρυεκπομπή εντός μιας εποχής, ο μολυσμένος κόμβος παύει να στέλνει ΠΚΚ στους γείτονές του μέχρι το τέλος της τρέχουσας εποχής.

Η διαδικασία που μόλις περιεγράφη, απεικονίζεται στο σχήμα 80 σε αντιπαραβολή με το στατικό από το οποίο αναχωρήσαμε. Στο 80(α) απεικονίζεται η απλή «άνευ όρων» περιοδική (με περίοδο ϵ) ευρυεκπομπή από μολυσμένο κόμβο. Στο 80(β) οι εκπομπές είναι και πάλι μοναδικές μέσα σε χρονικό παράθυρο εύρους ϵ , αλλά η ανελαστική περιοδικότητα έχει πλέον αναιρεθεί. Αντ' αυτής, οι χρόνοι εκπομπών μετατίθενται στις «καταλληλότερες» στιγμές μέσα σε χρονικό παράθυρο εύρους ϵ .

Υιοθετούνται, δηλαδή, επαναλαμβανόμενες εκπομπές οι οποίες εκτελούνται εντός καθορισμένων χρονικών ορίων αλλά χωρίς η χρονική απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών να είναι αυστηρά σταθερή. Αυτό το καθεστώς εκπομπών το ονομάζουμε *πλησιοπεριοδικό*.

Ο ψευδοκώδικας της λίστας 10 και το λογικό διάγραμμα του σχήματος 81 αποδίδουν το μηχανισμό αυτό.



Σχήμα 80: Από την περιοδική στην πλησιοπεριοδική ευρευεκπομπή

Λίστα 10: Μηχανισμός βέλτιστης παύσης

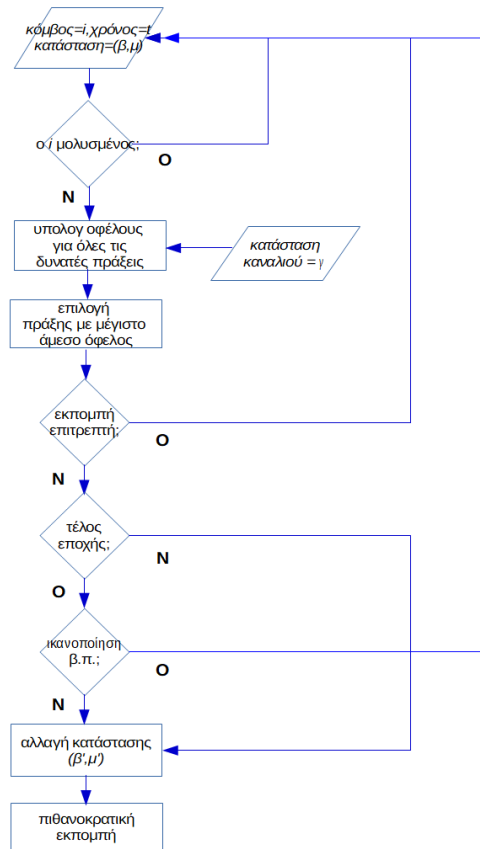
```

state = ( $\beta, \mu$ )
if node  $i$  infected
  for each action  $\alpha$ 
    calculate  $U_{i,\alpha}(t)$ 
  end
   $U_i(t) = \max_i(U_{i,\alpha}(t))$ 
  if ost_satisfied == true
    if do_not_retransmit_in_epoch( $i$ ) == false
      assume new state ( $\beta', \mu'$ )
      attempt epidemic transmission with state ( $\beta', \mu'$ )
      set flag do_not_retransmit_in_epoch( $i$ ) := true
    end
  else
    if  $\text{mod}(t, \epsilon) == 0$ 
      assume new state ( $\beta'', \mu''$ )
      attempt epidemic transmission with the state ( $\beta'', \mu''$ )
    end
  end
end
end
    
```

8.4.2 Βελτίωση ποιότητας πληροφορίας

Ο μηχανισμός που περιεγράφη μπορεί να συλλειτουργήσει με επί πλέον τροποποιήσεις. Μια εύλογη πρόταση είναι η βελτίωση της ποιότητας της διαχεόμενης πληροφορίας. Για το σκοπό του κεφαλαίου αυτού συνδέουμε την ποιότητα της πληροφορίας με την ηλικία της: η νεώτερη πληροφορία είναι καλύτερης ποιότητας.

Ας θεωρήσουμε ότι σε κάθε χρονική στιγμή γεννάται νέα μολύνουσα πληροφορία. Αν π.χ. η μολύνουσα πληροφορία είναι μετρήσεις ενός φυσικού μεγέθους (π.χ. θερμοκρασίας) από αισθητήρες, τότε η πιο νέα πληροφορία είναι και πιο έγκυρη. Έστω, επίσης, ότι μολύνουσα πληροφορία γεννάται κάθε χρονική στιγμή από ένα πεπερασμένο μικρό πλήθος κόμβων. Για παράδειγμα, αυτοί οι κόμβοι μπορούν να φέρουν αισθητήρες, οι οποίοι διεξάγουν τακτικά νέες μετρήσεις. Εφ' όσον η πληροφορία όλων των ηλικιών διαχέεται επιδημικά, είναι προφανές ότι οι διάφοροι κόμβοι μπορούν να είναι μολυσμένοι με



Σχήμα 81: Μηχανισμός βέλτιστης παύσης

πληροφορία διαφορετικών ηλικιών.

Θα τροποποιήσουμε το σχήμα μας με στόχο να ελαττώσουμε τη μέση ηλικία της μολύνουσας πληροφορίας φερόμενης από μολυσμένους κόμβους. Για το σκοπό αυτό εισάγουμε την έννοια της «επιδείνωσης» (aggravation) της επιδημίας για μεμονωμένο κόμβο [5]: Έστω κόμβος i μολυσμένος με πληροφορία ηλικίας α_i . Λαμβάνει επιτυχώς μολύνουσα πληροφορία από τον κόμβο j με ηλικία α_j . Τότε διακρίνουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- $\alpha_i > \alpha_j$: Ο κόμβος i είναι μολυσμένος με παλαιότερη πληροφορία και μολύνεται εκ νέου με τη νεότερη που λαμβάνει από τον j . Τότε μιλάμε για *επιδείνωση της επιδημίας* για τον κόμβο i . Η ηλικία της φερόμενης από τον i πληροφορίας μεταπίπτει από α_i σε α_j με $\alpha_j < \alpha_i$.
- $\alpha_i \leq \alpha_j$: Ο κόμβος i είναι μολυσμένος με νεότερη ή ίσης ηλικίας πληροφορία και απορρίπτει τη ληφθείσα από τον j ως ξεπερασμένη (outdated, stale).

Επί της ουσίας σε περιβάλλον με δυνατότητα επιδείνωσης της επιδημίας μπορούμε να θεωρήσουμε τα ακόλουθα: Έστω w η ηλικία της παλαιότερης υπάρχουσας μολύνουσας

πληροφορίας στο δίκτυο τη στιγμή t . Αυτή η πληροφορία παρήχθη τη στιγμή $t - w$. Τότε έχουμε $w + 1$ το πλήθος διακριτές εν δράσει επιδημίες. Κάθε μια από αυτές έχει να κάνει με μολύνουσα πληροφορία με «χρονολογία γέννησης» $t - \tau, \tau = 0, 1, 2, \dots, w$. Για κάθε μια επιδημία, ευάλωτοι κόμβοι είναι αυτοί οι οποίοι φέρουν παλαιότερη πληροφορία δηλ. συμμετέχουν σε παλαιότερες επιδημίες. Έτσι για την επιδημία με παλαιότερο χρόνο γέννησης τον $t - \tau$, ευάλωτοι είναι οι κόμβοι που συμμετέχουν σε επιδημίες με χρόνο γέννησης $t - \tau' : \tau < \tau' < w$, δηλ. $t - w, t - w + 1, \dots, t - \tau - 1$. Η διαδικασία επιδείνωσης της επιδημίας συνοψίζεται στη λίστα 11.

Λίστα 11: Διαδικασία επιδείνωσης της επιδημίας

```

state = ( $\beta, \mu$ )
transmitting node  $i$ 
receiving node  $j$ 
infection state  $A(i)$ 
age  $age(i)$ 

for each round  $t$ 
  if  $j$  receives info from node  $i$ :
    if  $A(j) == \text{false}$ 
      set  $A(j) = \text{true}$ 
    else if  $A(j) == \text{true}$ 
      if  $age(j) \leq age(i)$ 
        do nothing
      else if  $age(j) > age(i)$ 
        set  $age(j) = age(i)$ 
      end if
    end if
  end if
end for

```

Πρόκειται, λοιπόν, για πρόβλημα πολυ-επιδημικής διάδοσης [5]. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, επέρχεται επιδείνωση της επιδημίας για έναν κόμβο όταν, ενώ αυτός είναι ήδη μολυσμένος, λαμβάνει πληροφορία μικρότερης ηλικίας και καθίσταται πλέον μολυσμένος από αυτήν.

Δεν υπάρχει η εκδοχή της μερικής θεραπείας: Στο παρόν περιβάλλον πολυ-επιδημικής διάδοσης, η μερική θεραπεία θα είχε το εξής νόημα: Αν κόμβος φέρων επιδημία ηλικίας w_1 δεχθεί πληροφορία ανήκουσα σε επιδημία ηλικίας w_2 με $w_2 > w_1$, μολύνεται απ' αυτή και εντάσσεται σε «γνηραιότερη» επιδημία. Αυτό δε συμβαίνει στο μοντέλο μας· υιοθετείται ρητά ο μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίον, *μολυσμένος κόμβος ο οποίος λαμβάνει πληροφορία παλαιότερη, την απορρίπτει χωρίς να μολυνθεί από αυτήν.*

Από το [5] μαθαίνουμε ότι για να ενθαρρυνθεί μια από τις πολλές επιδημίες αρκεί να ενισχύσουμε την πιθανότητα μόλυνσης από τη μολύνουσα πληροφορία που αντιστοιχεί σ' αυτήν. Η πιθανότητα αυτή δίνεται από την (8.47) [5], η οποία μεταπίπτει στην (8.48) για την περίπτωση που δεν υπάρχει μερική θεραπεία και που η πιθανότητα θεραπείας δεν

είναι κατ' ανάγκη σταθερή.

$$P_{i,t+1}^\tau = q \sum_{j \in V_i} P_{j,t}^\tau + (1 - \sum_{\rho < \tau} \delta_{\tau\rho}) P_{i,t}^\tau + \sum_{\sigma > \tau} \delta_{\sigma\tau} P_{i,t}^\tau \quad (8.47)$$

$$P_{i,t+1}^\tau = \sum_{j \in V_i} q_{i,t}^\tau P_{j,t}^\tau + P_{i,t}^\tau \quad (8.48)$$

... όπου $q_{i,t}^\tau$ είναι η πιθανότητα τη στιγμή t ο κόμβος i να μολύνει άλλον κόμβο με πληροφορία γεννημένη την τ , $P_{j,t}^\tau$ είναι η πιθανότητα τη στιγμή t ο κόμβος j να είναι ήδη μολυσμένος με πληροφορία γεννημένη την τ . Επίσης με το $\delta_{\tau\rho}$ συμβολίζεται η πιθανότητα μετάβασης ενός κόμβου από την κατάσταση μόλυνσης με πληροφορία γεννημένη τη στιγμή τ σε κατάσταση μόλυνσης με πληροφορία γεννημένη τη στιγμή ρ . Με V_i συμβολίζεται η γειτονιά του i .

Προτείνουμε τη χρήση μιας προσαρμοστικής ενίσχυσης του β , σύμφωνα με την (8.49)

$$\tilde{\beta}(t+1) = \beta(t+1)(1 + \eta d(t)) \quad (8.49)$$

όπου $\beta(t)$ η πιθανότητα προώθησης όπως δίνεται από το μηχανισμό του υποκεφαλαίου 8.4.1. Με το $d(t)$ συμβολίζεται το ποσοστό διπλοτύπων, αλλά εδώ διπλότυπες για έναν μολυσμένο κόμβο εννοούμε τις λήψεις πληροφορίας μεγαλύτερης ηλικίας από αυτή που φέρει ήδη αυτός (stale data). Η παράμετρος η ονομάζεται *παράγοντας ενίσχυσης* και προφανώς έχει σημαντικό ρόλο στην επίδοση του σχήματος ως προς το ενεργειακό κόστος. Το νόημα του σχήματος είναι ότι ενθαρρύνεται η διάδοση με πληροφορία νεώτερη. Το πλήθος (ποσοστό) διπλοτύπων που λαμβάνει ένας μολυσμένος κόμβος i λαμβάνεται ως μέτρο της μόλυνσης της γειτονιάς του με παλιότερη πληροφορία. Στη μέτρηση αυτή υπάρχει παράγοντας ανακρίβειας διότι αγνοούνται οι ευάλωτοι (πλήρως μη μολυσμένοι) κόμβοι. Συνεπώς, όσο περισσότερα διπλότυπα λαμβάνει, τόσο περισσότεροι κόμβοι είναι μολυσμένοι με παλιότερη πληροφορία και τόσο ενισχύεται η πιθανότητα προώθησης της νεώτερης πληροφορίας εκ μέρους του κόμβου i .

8.4.3 Επιδόσεις του σχήματος

Οι επιδόσεις του προτεινόμενου σχήματος αποτιμώνται σε σύγκριση με μια ποικιλία σχημάτων αναφοράς (benchmarks). Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης ορίζουμε πέντε το πλήθος σχήματα αναφοράς, τα οποία περιγράφονται στα αμέσως επόμενα:

8.4.3.1 Σχήμα αναφοράς 1 (benchmark 1)

Απλή άνευ όρων ευρειακπομπή (flooding). Κάθε μολυσμένος κόμβος ευρειακπέμπει με πιθανότητα $\beta = 1$ στο τέλος κάθε εποχής. Ούτε το β , ούτε το μ προσαρμόζονται με την πάροδο του χρόνου.

8.4.3.2 Σχήμα αναφοράς 2 (benchmark 2)

Επιδημική διάδοση χωρίς προσαρμοστικό χαρακτήρα, επί της ουσίας probabilistic gossiping (PG). Κάθε μολυσμένος κόμβος ευρεεκτέμπει με μια σταθερή πιθανότητα $\beta \equiv \beta_0 < 1$ στο τέλος κάθε εποχής. Το β δεν προσαρμόζεται αλλά παραμένει σταθερό και ίσο με β_0 . Το μ προσαρμόζεται ανάλογα με την κατάσταση των ασυρμάτων καναλιών, έτσι ώστε να ικανοποιείται η (8.41), γνωστή από τα κεφάλαια 8.1 και στα 8.2 και 8.3 ως στατικό σχήμα αναφοράς, όπως ειπώθηκε ήδη.

8.4.3.3 Σχήμα αναφοράς 3 (benchmark 3)

Προσαρμοστική επιδημική διάδοση χωρίς χρήση βέλτιστης παύσης. Κάθε μολυσμένος κόμβος ευρεεκτέμπει με μια προσαρμοζόμενη πιθανότητα $\beta < 1$ στο τέλος κάθε εποχής. Τη στιγμή εκείνη, αποτιμά τις τιμές της συνάρτησης οφέλους από όλες τις δυνατές πράξεις και επιλέγει άμεσα και άνευ όρων την πράξη που προσφέρει το υψηλότερο άμεσο όφελος. Αυτό το σχήμα θυμίζει αυτό του κεφαλαίου 8.2. Το ονομάζουμε και «διαγωνισμό ομορφιάς» (beauty contest) και συνοψίζεται στο σχήμα (82)



Σχήμα 82: Διάγραμμα ροής του σχήματος αναφοράς 3

8.4.3.4 Σχήμα αναφοράς 4 (benchmark 4)

Ενεργή προσαρμοστική επιδημική διάδοση με χρήση ερωταποκρίσεων (polling). Οι μολυσμένοι κόμβοι ευρυσκέπτονται στο τέλος κάθε εποχής. Κατά τη διάρκεια κάθε εποχής, διεξάγουν διάλογο (με ευρυσκέπτες) με τους γείτονές τους ρωτώντας τους για την κατάσταση μόλυνσής τους και λαμβάνοντας τις απαντήσεις αυτών. Οι ερωταποκρίσεις υποτίθενται αξιόπιστες, δηλ. δεν εξετάζεται η φθορά της διερχόμενης θορυβώδους κανάλι πληροφορίας. Επίσης αγνοούμε τα φαινόμενα ανταγωνισμού και αλληλοπαρεμβολών στο κανάλι. Οι αποδεκτές τιμές του β είναι πάντα διακριτές. Το β προσαρμόζεται σύμφωνα με την (8.50)

$$\beta(t+1) = \beta(t)(1-n) - \text{mod}[\beta(t)(1-n)\Delta\beta] \quad (8.50)$$

όπου n το ποσοστό μοναδικών μολυσμένων γειτόνων, όπως αυτοί γίνονται γνωστοί από τον παραπάνω διάλογο. Ο τρόπος μ του ΠΔΚ προσαρμόζεται όπως και στο σχήμα αναφοράς 2. Η χρήση του modulo στην (8.50) υιοθετείται για να εξασφαλίσει ότι μόνο επιτρεπτές τιμές του β μπορούν να υιοθετηθούν.

8.4.3.5 Σχήμα αναφοράς 5 (benchmark 5)

Προσαρμοστική επιδημική διάδοση. Οι μολυσμένοι κόμβοι ευρυσκέπτονται στο τέλος κάθε εποχής. Η κατάσταση του κόμβου προσαρμόζεται σύμφωνα με τις εξισώσεις (8.51) και (8.52).

$$\beta(t+1) = \beta(t)(1-d(t)/Q) - \text{mod}[\beta(t)(1-d(t)/Q), \Delta\beta] \quad (8.51)$$

$$\mu(t+1) = \max(1, \mu(t)(1-c(t) - \text{mod}(\mu(t)(1-c(t)), 1)) \quad (8.52)$$

όπου $c(t)$ και $d(t)$ είναι αντίστοιχα τα ποσοστά φθαρμένων και διπλοτύπων πακέτων. Τα β και μ εξακολουθούν να είναι διακριτά, όπως και πριν. Η παράμετρος Q είναι θετικός.

Το σχήμα αυτό είναι παρόμοιο, αν και όχι πανομοιότυπο, με το counter-based-scheme (CBS) [41]. Στο παρόν σχήμα αναφοράς, η προσαρμογή του β εξαρτάται από τα διπλότυπα και επίσης λαμβάνεται υπ' όψη και η κατάσταση των καναλιών. Το CBS επιτρέπει την ευρυσκέπτη μετά την παρέλευση μιας περιόδου αναμονής αν το πλήθος των διπλοτύπων υπερβεί ένα προκαθορισμένο κατώφλι (παράμετρος του σχήματος). Επί της ουσίας, τόσο το σχήμα αναφοράς 5 όσο και το CBS είναι προσαρμοστικά επιδημικά σχήματα, στα οποία η πιθανότητα προώθησης προσαρμόζεται σύμφωνα με την πιθανότητα υπέρβασης του κατωφλίου. Αυτή η πιθανότητα είναι ανάλογη με την πιθανότητα να υπερβεί ένα κατώφλι η μόλυνση του δικτύου τοπικά.

Στο σχήμα μας αναφοράς 5, αυτή η πιθανότητα εξαρτάται μόνο από την παράμετρο Q . Η πιθανότητα προώθησης ρυθμίζεται από το ποσοστό των διπλοτύπων αλλά όχι με τον δυαδικό (ναι/όχι) τρόπο του CBS. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που καθιστά αυτό το σχήμα αναφοράς (το 5) πιο ενήμερο για το ενεργειακό κόστος είναι η ταυτόχρονη ρύθμιση του τρόπου του ΠΔΚ. Η περίοδος αναμονής του CBS αντιστοιχεί στο υπόλοιπο (εναπομείναν)

διάστημα της τρέχουσας εποχής μετά την εκπομπή, σύμφωνα με το προτεινόμενο σχήμα. Στο σχήμα αναφοράς 5 δεν προβλέπεται τέτοια περίδος, αφού εκπέμπει πάντα στο τέλος της εποχής

8.4.4 Εξοικονόμηση ενέργειας

Ο ΠΔΚ που χρησιμοποιήθηκε και πάλι ελήφθη από την [92]. Για τον υπολογισμό του ενεργειακού κόστους υποτίθεται ότι οι ενέργειες εκπομπής και λήψεως ενός bit είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, αλλά με την εκπομπής μεγαλύτερη [48]. Για τους σκοπούς της εκτίμησης της απόδοσης του προτεινόμενου σχήματος υφίσταται κανονικοποίηση ως προς το άθροισμα κόστους για εκπομπή και λήψη ενός bit.

Η αξιολόγηση του σχήματος γίνεται με χρήση προσομοιώσεων και στον πίνακα 19 παρουσιάζονται μερικές σημαντικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές.

Πίνακας 19: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις

παράμετρος	τιμή
N , πλήθος κόμβων	50 ή 80
T , διάρκεια προσομοίωσης	100, εκτός αν αναφέρεται αλλιώς
αρχική πιθανότητα προώθησης	$0.22 + \nu 0.05$ με ν i.i.d. στο $\{1, 2, \dots, 40\}$
αρχικός τρόπος ΠΔΚ	i.i.d. στο $\{1, 2, \dots, 6\}$
πλήθος επιτρεπτών τιμών του β	40
$\Delta\beta$, «βήμα» του β	0.05
$I(0)$, πλήθος αρχικά μολυσμένων κόμβων	4
πλήθος κόμβων που γεννούν νέα πληροφορία περιοδικά	1
πιθανότητα γεινίασης τυχαίων κόμβων	0.15
πλήθος καταστάσεων καναλιού	6
εκδοχή προσαρμοστικού σχήματος (flavor)	<i>συντηρητικό</i> , εκτός αν αναφέρεται αλλιώς
χρόνος εκπομπής της ισχύος της πληροφορίας	32 sec, εκτός αν αναφέρεται αλλιώς
διάρκεια εποχής	5 sec
L_0 μέγεθος μη κωδικοποιημένου μολύνοντος πακέτου	2048 bits, εκτός αν αναφέρεται αλλιώς
μέγεθος πληροφορίας στο διάλογο απόκτησης ΠΚΚ	$L_0/2 = 1024$ bits
διαστάσεις γηπέδου κίνησης με μοντέλο random waypoint	$500 m \times 500 m$
μέγιστη διάρκεια στάσης	10 sec
μέγιστη ταχύτητα	10 m/sec
ελάχιστη ταχύτητα	5 m/sec

Στο σχήμα 83 παρουσιάζεται η επίδραση της εφαρμογής του προτεινόμενου σχήματος στη χρονική εξέλιξη της πιθανότητας προώθησης. Για ευκολότερη αξιολόγηση, η ποσότητα αυτή παρουσιάζεται κανονικοποιημένη ως προς την αρχική της τιμή. Είναι παρατηρήσιμο ότι η πιθανότητα προώθησης ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου συμβάλλοντας έτσι στη μείωση του ενεργειακού κόστους.

Μια από τις σηματικότερες άμεσες συνέπειες που εξετάζονται είναι η επίδραση στη μόλυνση του δικτύου. Αυτή παρουσιάζεται ως προς το χρόνο στο σχήμα (84). Ο συμβιβασμός στο θέμα αυτό είναι οριακός.

Τα επόμενα σχήματα μας δίνουν το ενεργειακό κόστος της εξάπλωση της μόλυνσης στο δίκτυο. Στο σχήμα (85) παρουσιάζεται σύγκριση με τα σχήματα αναφοράς που παρουσιάστηκαν ήδη. Το προτεινόμενο σχήμα εμφανίζεται ενεργειακά συγκρίσιμο με τα σχήματα αναφοράς 3, 4, 5. Στο σχήμα (86) παρατηρούμε ότι οι διάφορες εκδοχές (flavors) του σχήματος έχουν ελαφρώς διαφορετικές επιδόσεις. Και οι τρεις εκδοχές, όμως, δείχνουν εξοικονόμηση ενέργειας χάρη στη χρήση βέλτιστης παύσης.

Σημειώνουμε ότι η παρατηρούμενη περίπου γραμμική αύξηση του συσσωρευτικού ενεργειακού κόστους με το χρόνο οφείλεται στο γεγονός ότι η πιθανότητα προώθησης συγκλίνει σε μια σταθερή τιμή με το χρόνο.

Στα σχήματα (87) και (88) δείχνεται η συστηματική εξοικονόμηση ενέργειας για διάφορες τιμές μεγέθους πακέτου και εύρους συστολής του β . Η υιοθέτηση μεγάλου εύρους συστολής είναι αναμφίβολα ένας «μεροληπτικός» τρόπος μείωσης του ενεργειακού κόστους. Παρατηρείται όμως σοβαρή ενεργειακή βελτίωση ακόμα και στην περίπτωση που $\nu = 1$ δηλαδή όταν δεν «μεροληπτούμε» υπέρ της μείωσης του β .

Σημειώνεται ότι το μέγεθος πακέτου αναφέρεται στο μέγεθος του πακέτου της μολύνουσας πληροφορίας πριν κωδικοποιηθεί συνελικτικά για έλεγχο σφάλματος.

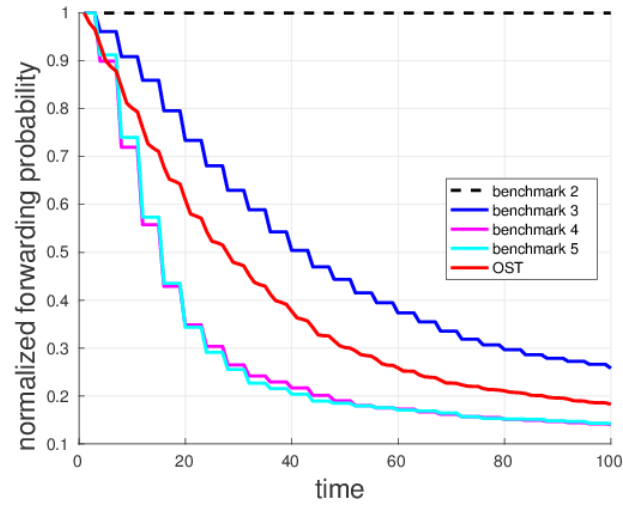
Μια ενδιαφέρουσα προοπτική των αποτελεσμάτων εκτίθεται στο σχήμα (89). Εδώ συγκρίνονται οι ενεργειακές επιδόσεις των σχημάτων αναφοράς 4 και 5 (ενεργό με ερωταποκρίσεις και παθητικό αντίστοιχα) με το προτεινόμενο. Γίνεται επί πλέον η διάκριση ποιο κομμάτι του ενεργειακού κόστους του προτεινόμενου σχήματός μας οφείλεται στις πλησιοπεριοδικές εκπομπές με στόχο τη διάδοση μολύνουσας πληροφορίας (ost-based w/o csi) και ποιο στην απόκτηση ΠΚΚ (ost-based csi). Η σύγκριση αυτή γίνεται για διάφορες τιμές των παραμέτρων του προβλήματος, και για την ακρίβεια τιμές μεγέθους μη κωδικοποιημένου μολύνοντος πακέτου και εύρους συστολής του β . Οι τιμές παραμέτρων για τις οποίες έγιναν οι συγκρίσεις του σχήματος (89) εκτίθενται στον πίνακα (20).

Πίνακας 20: Τιμές παραμέτρων για σύγκριση επιδόσεων με σχήματα αναφοράς

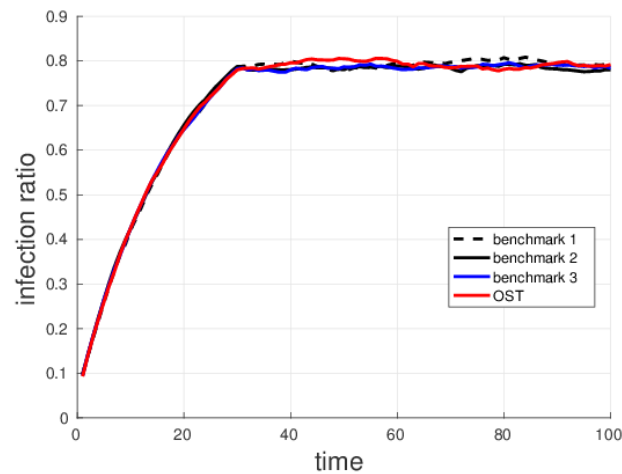
παραμέτρος	ρύθμιση 1	ρύθμιση 2	ρύθμιση 3
εύρος συστολής β	7	18	24
ελάχιστη τιμή β	0.02	0	0
μέγεθος μολύνοντος πακέτου	512	16	16
μέγεθος πακέτου ΠΚΚ	64	16	16

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι το προτεινόμενο σχήμα απαλλάσσει από περιττές και από μη αποδοτικές ευρυεκπομπές. Επιτυγχάνει ταχεία και ενεργειακά οικονομική μόλυνση. Παρατηρεί κανείς ότι σημαντικό μέρος του κόστους οφείλεται στην ανάκτηση ΠΚΚ.

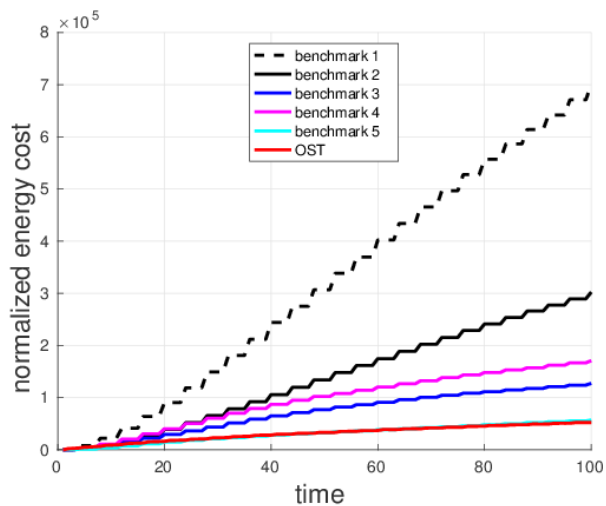
Στο σχήμα 90 αναδεικνύεται μια ακόμα ενδιαφέρουσα διάσταση: το κλάσμα συγκρούσεων λόγω ανταγωνισμού στην κατάληψη καναλιού προς το πλήθος εκπομπών μειώνεται σημαντικά με την υιοθέτηση του παρουσιαζόμενου σχήματος. Το κλάσμα αυτό αποτελεί ένα μέτρο της σπατάλης λόγω άσκοπων εκπομπών.



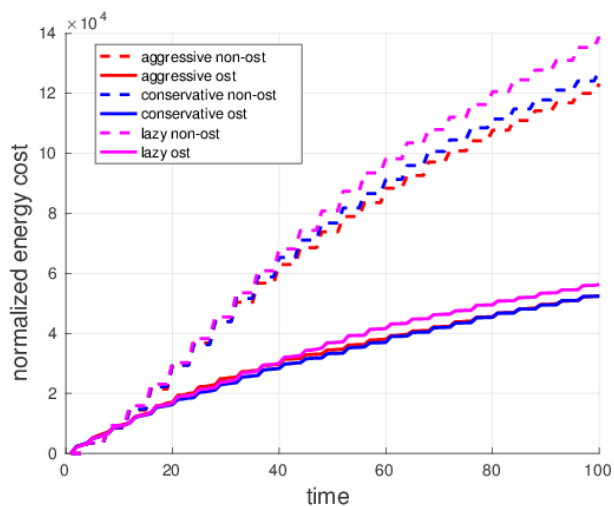
Σχήμα 83: Χρονική εξέλιξη της πιθανότητας προώθησης. Το προτεινόμενο σχήμα αποδίδεται ως OST (optimal stopping theory)



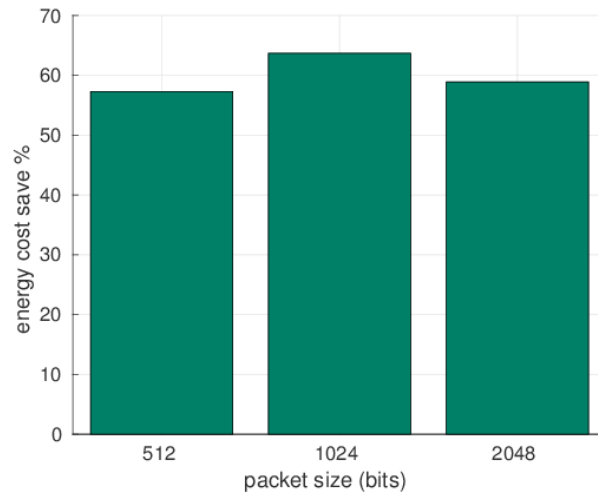
Σχήμα 84: Χρονική εξέλιξη της μόλυνσης. Το προτεινόμενο σχήμα αποδίδεται ως OST



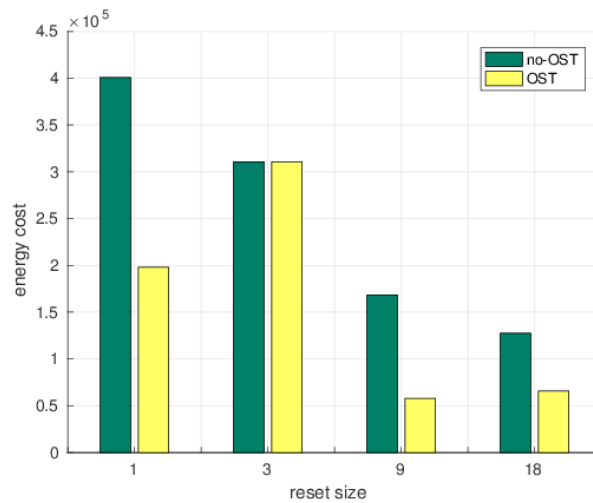
Σχήμα 85: Ενεργειακό κόστος ως προς το χρόνο σε σύγκριση με τα σχήματα αναφοράς. Το προτεινόμενο σχήμα αποδίδεται ως OST



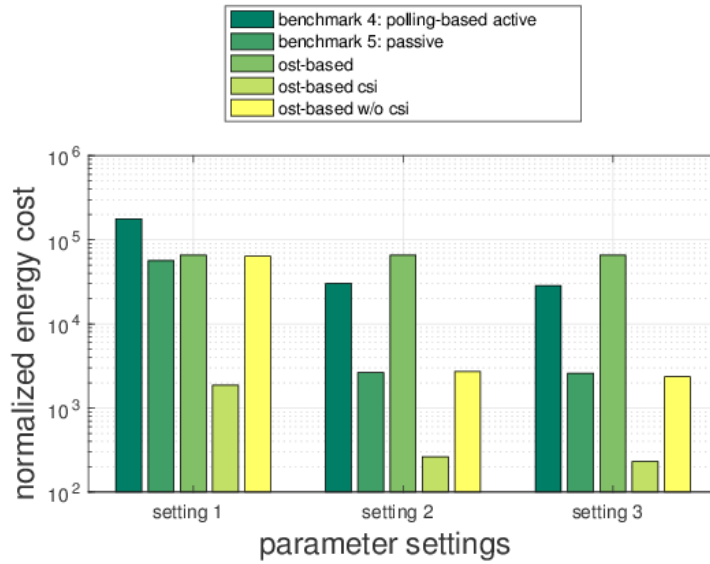
Σχήμα 86: Ενεργειακό κόστος ως προς το χρόνο για διάφορες εκδοχές (flavors) του σχήματος



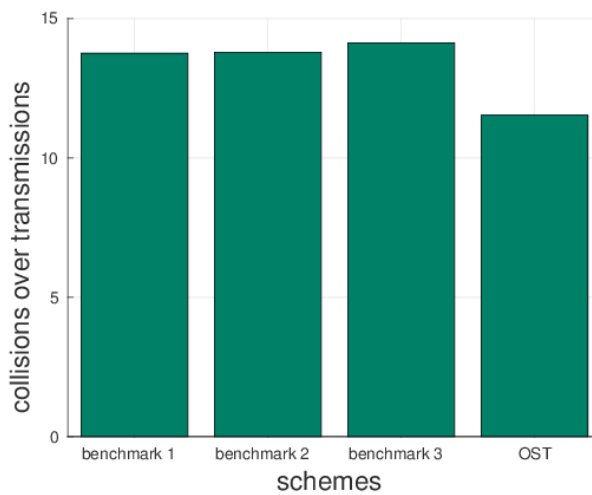
Σχήμα 87: Εξοικονόμηση ενέργειας ως προς το μέγεθος του πακέτου της καθαρής μολύνουσας πληροφορίας



Σχήμα 88: Ενεργειακό κόστος ως προς το εύρος συστολής του β . Με non-OST και OST το σχήμα αναφοράς 3 και το προτεινόμενο σχήμα αντίστοιχα.



Σχήμα 89: Ανάλυση ενεργειακού κόστους για διάφορα σχήματα και διάφορες ρυθμίσεις παραμέτρων (settings 1, settings 2, settings 3)



Σχήμα 90: Λόγος πλήθους συγκρούσεων προς πλήθος εκπομπών. Με OST το προτεινόμενο σχήμα.

8.4.5 Βελτίωση ποιότητας πληροφορίας

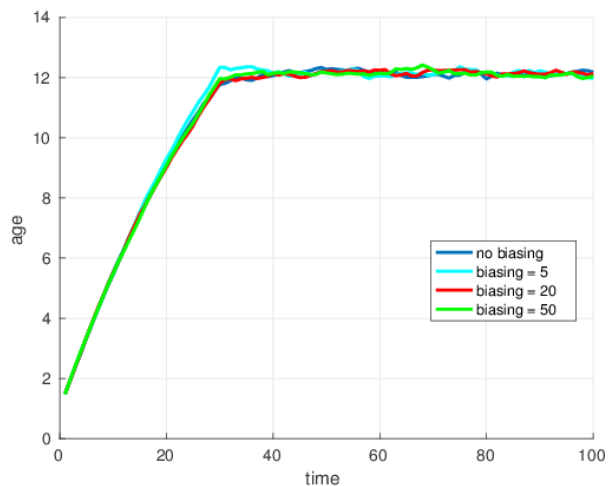
Όπως ήδη ειπώθηκε, το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση του ενεργειακού κόστους σε ενεργοβόρα περιβάλλοντα. Η σκέψη είναι πως εφ' όσον εξοικονομεί ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με ενεργοβόρους μηχανισμούς ώστε να μετριάσει το κόστος τους. Καθοδηγούμαστε, λοιπόν, να διερευνήσουμε την επίδραση του προσαρμοστικού σχήματος της εξίσωσης (8.49). Αυτή η τακτική υιοθετείται και εξετάζεται σ' αυτό το κεφάλαιο.

Εδώ χρησιμοποιείται η έννοια της εκπνοής της μολύνουσας πληροφορίας: Θεωρούμε ότι η μολύνουσα πληροφορία έχει πεπερασμένο χρόνο ζωής από τη γέννησή της. Με την παρέλευση του χρονικού διαστήματος αυτού («χρόνος εκπνοής», T_{expiry}) η πληροφορία παύει να υφίσταται· δε διαδίδεται περαιτέρω και μάλιστα οι φέροντες αυτήν κόμβοι θεραπεύονται. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αυτή χρησιμοποιείται ως αρχική τιμή μιας παραμέτρου time-to-live TTL.

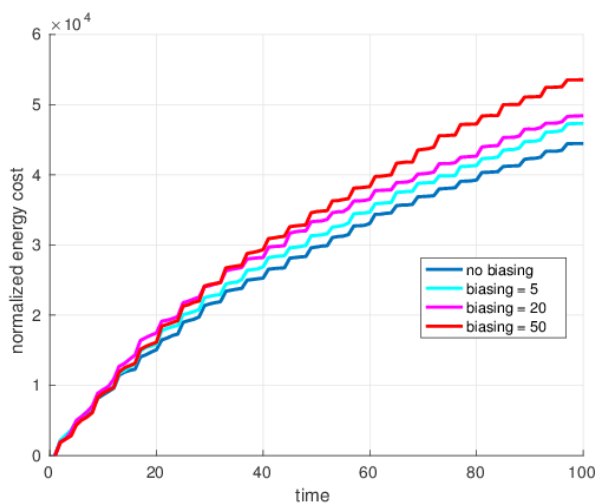
Για κάθε $\tau \in \{1, 2, \dots\}$ υπάρχει επιδημία η οποία γεννήθηκε τη στιγμή τ και μπορεί να επιζήσει το πολύ έως τη στιγμή $\tau + T_{expiry}$, όπου η παράμετρος T_{expiry} αντιπροσωπεύει το μέγιστο χρόνο ζωής της μολύνουσας πληροφορίας που μόλις εισάγαμε. Σύμφωνα με τα ειπωθέντα, κάθε επιδημία υποχωρεί έναντι των νεωτέρων της και σβήνει εντός χρόνου όχι περισσότερο από T_{expiry} .

Παρατηρούμε στο σχήμα 91 ότι η ηλικία της μολύνουσας πληροφορίας, η οποία φέρεται από το δίκτυο, δε βελτιώνεται (μειώνεται) παρά οριακά με την εφαρμογή της ενίσχυσης της προηγούμενης παραγράφου. Ταυτόχρονα, προστίθεται ενεργειακό κόστος (σχήμα 92). Αυτό είναι αναμενόμενο, από τη στιγμή που το σχήμα μας υπαγορεύει την ενίσχυση των ευρυεκπομπών. Βλέπουμε, όμως, ότι χάρη στη χρήση του μηχανισμού που τις βελτιστοποιεί, η αύξηση του κόστους διατηρείται σε μέτρια επίπεδα.

Αναδύεται, έτσι, μια εξισορρόπηση μεταξύ αύξησης εκπομπών με στόχο την ελάττωση ηλικίας και ελάττωσης εκπομπών με στόχο την ελάττωση κόστους. Η εύρεση του κατάλληλου σημείου ισορροπίας έγκειται στο επί μέρους πρόβλημα ή εφαρμογή. Σοβαρή ενεργειακή επιβάρυνση θα ήταν ανεκτή μόνο σε περίπτωση προβλήματος στο οποίο η νεότητα της πληροφορίας είναι κρίσιμη.



Σχήμα 91: Ηλικία πληροφορίας ως προς το χρόνο για διάφορες τιμές του παράγοντα ενίσχυσης η («ντοπάρισμα» ή «biasing»)



Σχήμα 92: Ενεργειακό κόστος ως προς το χρόνο για διάφορες τιμές του παράγοντα ενίσχυσης («ντοπάρισμα»)

8.4.6 Εφαρμογή στη δρομολόγηση με το πρωτόκολλο AODV

Τα πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρει το προτεινόμενο σχήμα μας ωθούν να σκεφτούμε τρόπους εφαρμογής του σε περιοχές στις οποίες χρησιμοποιείται επιδημική διάδοση δεδομένων ή πληροφορίας. Μια τέτοια περιοχή είναι ορισμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης χρησιμοποιούμενα σε αδόμητα ασύρματα δίκτυα. Ας θεωρήσουμε το πρωτόκολλο AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector) [118]. Συνοψίζουμε την αρχή λειτουργίας του: Έστω κόμβος-πηγή A χρειάζεται να αποστείλει πληροφορία προς κόμβο-παραλήπτη B . Τον B τον ονομάζουμε και τελικό παραλήπτη ή καταναλωτή της πληροφορίας. Στα παραδοσιακά, γνωστά από τα ενσύρματα δίκτυα, πρωτόκολλα δρομολόγησης, οι κόμβοι διατηρούν πίνακες δρομολόγησης με τη βοήθεια των οποίων βρίσκουν το δρόμο προς τους παραλήπτες των αποστέλλομενων πακέτων. Στην περίπτωση του AODV τα πράγματα είναι διαφορετικά: Οι πίνακες δρομολόγησης περιέχουν πληροφορία δρομολόγησης μόνο προς προορισμούς με τους οποίους υπάρχει ενεργή επικοινωνία. Με την παύση της επικοινωνίας, οι σχετικές καταχωρήσεις διαγράφονται. Έτσι εξοικονομείται ενέργεια διότι εκλείπει και η ανάγκη για *μηνύματα χαιρετισμού* (hello messages). Όταν ανακύπτει μια νέα ανάγκη επικοινωνίας, όπως από τον A προς τον B στο παράδειγμά μας, ακολουθούνται τα ακόλουθα βήματα:

- Ο A ευρεεκπέμπει ένα μήνυμα ζήτησης μονοπατιών route request (RREQ) το οποίο διαχέεται περαιτέρω στο δίκτυο από όλους τους κόμβους που το λαμβάνουν.
- Η διάχυση αυτή συνεχίζεται έως ότου μηδενιστεί μια παράμετρος time-to-live (TTL) την οποία φέρει το μήνυμα.
- Όταν το RREQ ληφθεί από τον B ή κάποιον κόμβο, ο οποίος κατέχει πληροφορία δρομολόγησης προς τον B , αυτός αποκρίνεται με μήνυμα route response (RREP) το οποίο επαναπροωθείται (βάσει δρομολόγησης) μέχρι να φτάσει στον κόμβο-πηγή A .
- Όταν ο A λάβει το RREP, εμπλουτίζει τον πίνακα δρομολόγησης του με μια καταχώρηση για τον B και αποστέλλει τη δρομολογήσιμη πλέον πληροφορία προς τον B .

Στην εξάπλωση του μηνύματος RREQ του πρωτοκόλλου AODV [118], παίζουν ρόλο δυο παράμετροί του: ο χρόνος εκπνοής του (lifetime) και ο αριθμός ταυτότητάς του (RREQ ID). Έστω ο κόμβος A ο οποίος αναζητεί ένα μονοπάτι εκπέμποντας μήνυμα RREQ με συγκεκριμένη ταυτότητα έστω ID_1 . Ένας άλλος κόμβος π.χ. B που το λαμβάνει RREQ το ευρεεκπέμπει μια φορά. Εάν ο A δεν λάβει απάντηση (RREP) εντός καθορισμένου χρονικού ορίου, εκπέμπει νέο RREQ με ανανεωμένη ταυτότητα π.χ. ID_2 . Όταν ο B το λάβει θα το ευρεεκπέμπει με την προϋπόθεση ότι δεν το έχει ευρεκπέμπει. Δηλαδή κάθε RREQ με συγκεκριμένη ταυτότητα ευρεκπέμπεται μόνο μια φορά από κάθε κόμβο που το λαμβάνει. Αυτή η δυναμική διάδοσης του μηνύματος RREQ αποκαλείται και δυναμική επεκτεινόμενου δακτυλίου (expanding ring).

Παρατηρούμε ότι το πρώτο βήμα, δηλ. της διάχυσης του RREQ είναι κλασσικό πρόβλημα επιδημικής διάδοσης. Επιστούμε την προσοχή στο ότι εδώ ο στόχος δεν είναι να μολυνθεί το κατά το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα του δικτύου, αλλά να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα να μολυνθεί ο B. Φυσικά, οι δυο αυτοί στόχοι είναι αλληλένδετοι.

Ένας μολυσμένος κόμβος που λαμβάνει μήνυμα νεώτερης ηλικίας από αυτό που τον έχει ήδη μολύνει, στην ουσία λαμβάνει μήνυμα με άλλη ταυτότητα και το προωθεί και αυτό μια φορά. Οι περαιτέρω κόμβοι συμπεριφέρονται ομοίως μέχρι το μήνυμα να καταναλώσει το χρόνο εκπνοής του.

Προτείνουμε, λοιπόν, πως αντί για με άνευ όρων ευρυεκπομπή, το RREQ μπορεί να διαχυθεί με τη χρήση της προτεινόμενης προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης. Το σκεπτικό είναι πως η πιθανότητα να προσεγγιστεί ο B είναι συγκρίσιμη με την περίπτωση του flooding, αλλά με σοβαρή εξοικονόμηση ενέργειας.

Με χρήση προσομοιώσεων, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα:

Στο σχήμα 93 παρατηρούμε ότι ο συμβιβασμός στη μόλυνση του δικτύου είναι σημαντικός. Αυτό ισχύει ακόμα και στην περίπτωση που εφαρμόζεται ενίσχυση για να ευνοηθεί η νεώτερη πληροφορία, όπως αναπτύχθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο (8.4.5) όπως και στην περίπτωση προσαρμοστικής διάδοσης χωρίς χρήση β.π, όπως του σχήματος αναφοράς 3. Στο σχήμα δείχνεται ενδεικτικά η επίδοση για αρχική τιμή του TTL ίση με $3 \times \epsilon$. Αυτό ταυτίζεται με το χρόνο εκπνοής T_{expiry} που ήδη αναφέρθηκε. Σ' αυτή την ύπαρξη πεπερασμένου χρόνου εκπνοής οφείλεται η απότομη πτώση μετά το χρόνο $3 \times \epsilon$.

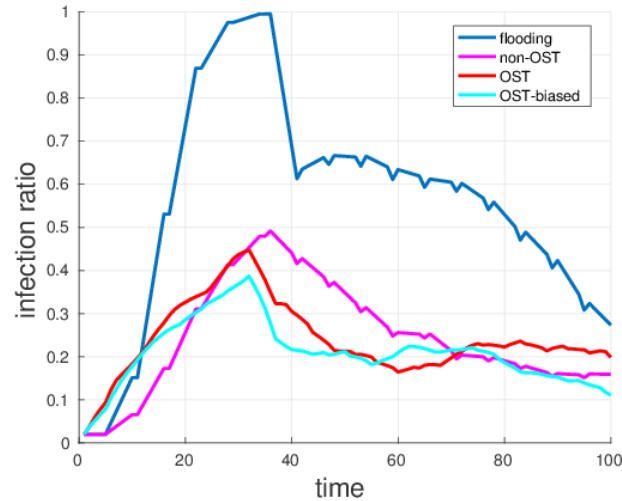
Από την άλλη μεριά, η ενεργειακή εξοικονόμηση είναι αξιοσημείωση (σχήμα 94). Τα προσαρμοστικά σχήματα έχουν σαφώς καλύτερες ενεργειακές επιδόσεις από τις άνευ όρων εκπομπές. Η χρήση συνθήκης β.π. βελτιώνει επί πλέον τις επιδόσεις.

Παρομοίως, σημαντική βελτίωση παρατηρείται και στο θέμα της ηλικίας της μολύνουσας πληροφορίας (95). Σε περιβάλλον εκπομπών άνευ όρων, η παλιότερη πληροφορία επικρατεί για μακρότερο χρονικό διάστημα, ενώ στα προσαρμοστικά επιδημικά σχήματα η νεώτερη πληροφορία έχει εντονότερη παρουσία παρά τις δυνάμει αραιότερες εκπομπές.

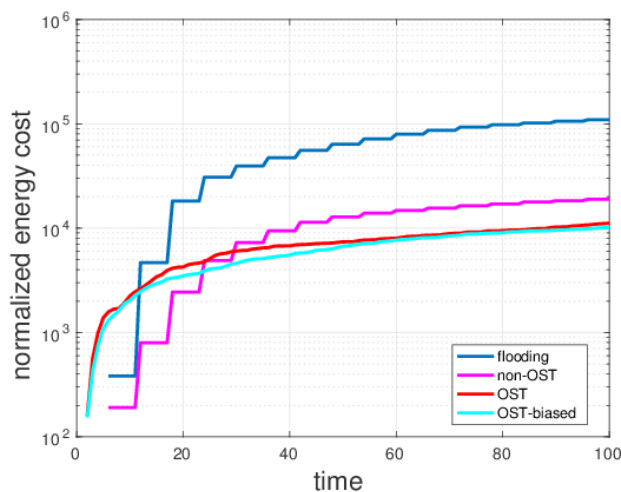
Βέβαια, η νεότητα της πληροφορίας είναι περιζήτητη σε εφαρμογές δρομολόγησης. Φυσικά, οι επιδόσεις ενός τέτοιου σχήματος εξαρτώνται πάρα πολύ από την τιμή του TTL. Η ταχεία εξάντλησή του περιορίζει τις πολλές εκπομπές, αλλά και ελαττώνει την πιθανότητα να βρεθεί ο κόμβος-στόχος. Αυτή η ισορροπία (tradeoff) αποδίδεται στα σχήματα 95 και 96.

Προφανώς ένα βραχύ TTL επιτρέπει τη σύντομη απόσβεση (φθορά) της επιδημίας λόγω των λιγότερων ενεργοβόρων εκπομπών.

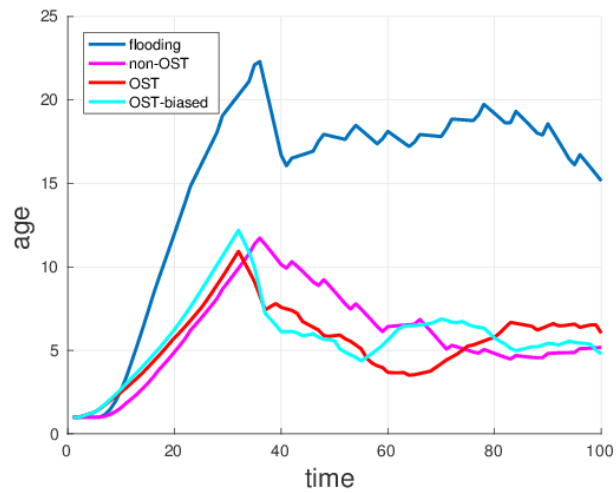
Αναδύεται, λοιπόν, ανταγωνισμός ανάμεσα στην επικράτηση της επιδημίας -έστω και παλιότερης- και του ενεργειακού κόστους. Η ευρέως διαδεδομένη επιδημία -ακόμα και με «γρηραιότερη» πληροφορία- συνεπάγεται και υψηλότερο κόστος, εφ' όσον υπάρχουν και περισσότεροι μολυσμένοι κόμβοι, οι οποίοι ενδέχεται να εκπέμπουν. Το βέλτιστο σημείο του ισοζυγίου εξαρτάται από την εφαρμογή.



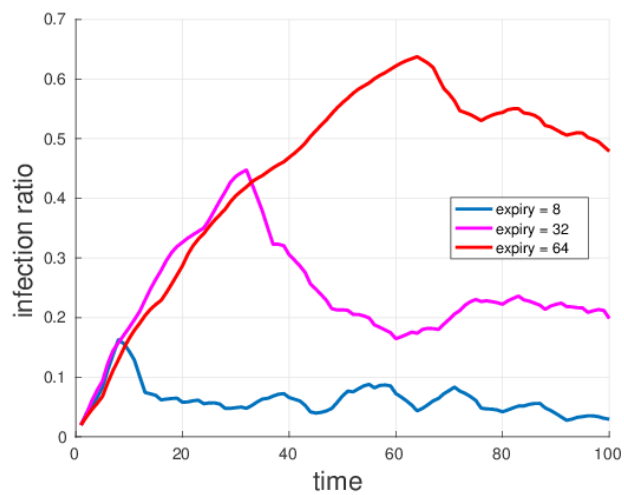
Σχήμα 93: Διάχυση του RREQ στο AODV: Ποσοστό μόλυνσης για ευρεκπομπή άνευ όρων (σχήμα αναφοράς 1, «flooding»), για επιδημικό σχήμα χωρίς β.π. (σχήμα αναφοράς 3, «non-OST») και για σχήματα με β.π. χωρίς («OST») και με («OST-biased») ενίσχυση του β .



Σχήμα 94: Διάχυση του RREQ στο AODV: Ενεργειακό κόστος για ευρεκπομπή άνευ όρων (σχήμα αναφοράς 1), για επιδημικό σχήμα χωρίς β.π. (σχήμα αναφοράς 3) και για σχήματα με β.π. χωρίς και με ενίσχυση του β .



Σχήμα 95: AODV: Μέση ηλικία του μηνύματος RREQ για ευρυεκπομπή άνευ όρων (σχήμα αναφοράς 1), για επιδημικό σχήμα χωρίς β.π. (σχήμα αναφοράς 3) και για σχήματα με β.π. χωρίς και με ενίσχυση του β .



Σχήμα 96: Διάχυση του RREQ στο AODV: Η επίδραση του χρόνου εκπνοής στο ποσοστό μόλυνσης.

8.4.7 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό είδαμε ότι η διάχυση πληροφορίας με περιοδικές ευρυεκπομπές μπορεί να αντικατασταθεί από αποδοτικότερα σχήματα βασισμένα σε πλησιοπεριοδικές εκπομπές τις πλέον σύμφωρες χρονικές στιγμές. Η διαστρωματική επίγνωση πλαισίου έχει κεντρικό ρόλο στη λειτουργία τέτοιων σχημάτων χρονοπρογραμματισμού.

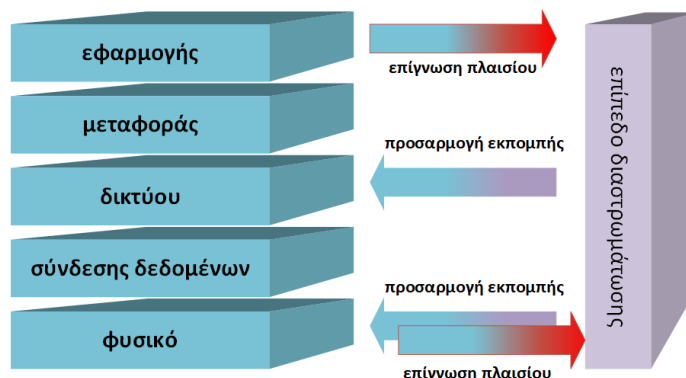
Βασικές προϋποθέσεις και παραδοχές είναι οι ακόλουθες:

- Χρήση μηχανισμού βέλτιστης παύσης
- Γνώση γειτόνων και ΠΚΚ μέσω μιας ενεργοβόρας διαδικασίας
- Εκπομπή την πιο κατάλληλη στιγμή εντός πεπερασμένου χρονικού διαστήματος
- Μετάβαση σε πλησιοπεριοδικότητα

Τα ουσιαστικότερα οφέλη από την υιοθέτηση τέτοιου σχήματος είναι:

- Εξοικονόμηση ενέργειας για διάχυση της πληροφορίας
- Διατήρηση της μόλυνσης σε ευρεία κλίμακα στο δίκτυο
- Αποδοτικότερη τακτική από απλή επιλογή
- Αποδοτικότερη τακτική από ενεργά σχήματα και συγκρίσιμη με παθητικά
- Ανάδειξη του ισοζυγίου ενεργειακού κόστους-ποιότητας (ηλικίας)

Η διαστρωματική απεικόνιση του σχήματος δίνεται στο σχήμα 97. Η επίγνωση πληροφο-



Σχήμα 97: Διαστρωματική αντίληψη της εφαρμογής στη δρομολόγηση με αξιοποίηση πληροφορίας ηλικίας

ρίας πλαισίου στο φυσικό στρώμα αναφέρεται, βέβαια, στη γνώση του SNR δηλαδή στην

απόκτηση ΠΚΚ. Η πληροφορία του στρώματος εφαρμογής (5-7 κατά OSI) έχει εφαρμογή στο πολυ-επιδημικό περιβάλλον στο οποίο η ηλικία της μολύνουσας πληροφορίας έχει καθοριστικό ρόλο.

Στο μηχανισμό πλησιοπεριοδικών εκπομπών που περιεγράφη στο παρόν κεφάλαιο, προσαρμόζονται παράμετροι των στρωμάτων φυσικό και δικτύου (τρόπος ΠΔΚ και πιθανότητα προώθησης, αντίστοιχα). Η προσαρμογή τους επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση της πληροφορία πλαισίου που μόλις αναφέρθηκε.

8.5 Εφαρμογή στη δρομολόγηση

8.5.1 Μοντέλο και Παραδοχές

Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στη συνέχιση της διερεύνησης δυνατοτήτων εφαρμογής β.π. στη διάχυση πληροφορίας στα πλαίσια λειτουργίας πρωτοκόλλων δρομολόγησης με τη χρήση διευρυμένης πληροφορίας επίγνωσης πλαισίου.

Η μελέτη μας εστιάζει στον τομέα των κατ' αντίδραση (reactive) πρωτοκόλλων δρομολόγησης, πρώτα κατά την ανακάλυψη μονοπατιού και μετά κατά την εκπομπή με μονοεκπομπή (unicast). Η λειτουργία των πρωτοκόλλων αυτών βασίζεται στη διαγραφή μονοπατιών από τον πίνακα δρομολόγησης όταν η ενεργός επικοινωνία με τον κόμβο-στόχο παύει και την εκκίνηση νέας φάσης ανακάλυψης μονοπατιού όταν η ανάγκη επικοινωνίας με κάποιον κόμβο στόχο ανακύψει. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα AODV, DSR, LOADng, κ.ά.

Η φάση ανακάλυψη μονοπατιού εκκινείται με την ευρεία διάχυση στο δίκτυο ενός μηνύματος ζήτησης μονοπατιού (RREQ, route request) εκ μέρους του κόμβου-πηγής δηλαδή αυτού που αναζητά μονοπάτι για να αποστείλει πληροφορία (δεδομένα) προς κάποιον κόμβο-καταναλωτή.

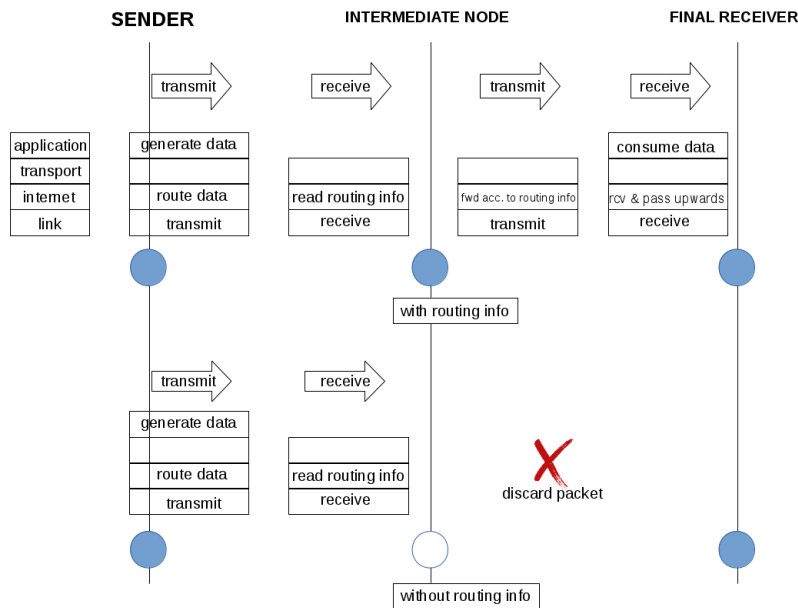
Σκοπός μας στο κεφάλαιο αυτό είναι να εφαρμόσουμε ένα διαστρωματικό μηχανισμό βελτιστοποίησης στην εν λόγω επικοινωνία μεταξύ κόμβων στα αδόμητα ασύρματα δίκτυα. Ένα τέτοιο σχήμα μπορεί να ικανοποιεί τις απαιτήσεις πρωτοκόλλων δρομολόγησης, με χρήση πληροφορίας του περιβάλλοντος (επίγνωσης πλαισίου).

Σε πρωτόκολλα όπως το AODV [118], το LOADng [120] και το DSR [119], η αρχική φάση ανακάλυψης μονοπατιών περιλαμβάνει την κατά το δυνατόν ευρύτερη διάχυση μηνυμάτων ζήτησης μονοπατιών. Αυτό θα το αντιμετωπίσουμε ως πρόβλημα επιδημικής διάδοσης περιορίζοντας τις άνευ όρων ευρυεκπομπές σε πιθανοκρατικές (gossiping).

Με την ανακάλυψη του ζητούμενου μονοπατιού και την καταγραφή του σε πίνακα δρομολόγησης (στην περίπτωση του AODV και του LOADng αλλά όχι του DSR) ξεκινά η εκπομπή της καθ' αυτό πληροφορίας (δεδομένων, data) χρησιμοποιώντας τακτική μονοεκπομπής. Στην ασύρματη εκπομπή, όλες οι εκπομπές στο φυσικό επίπεδο είναι φύσει ευρυεκπομπές. Η τεχνική της μονοεκπομπής χρησιμοποιείται όταν ο κόμβος που λαμβάνει μια εκπομπή, την επαναπροωθεί μόνο αν είναι προδιαγεγραμμένος (προγραμματισμένος) παραλήπτης. Αυτό γίνεται, βέβαια, στο στρώμα δικτύου βάσει είτε πίνακα δρομολόγησης (AODV, LOADng) είτε με τη βοήθεια source routing (DSR). Αυτός ο μηχανισμός παρουσιάζεται για εποπτικούς λόγους στο σχήμα 98.

Θα συγκεκριμενοποιήσουμε την έρευνά μας στη διάδοση της πληροφορίας σύμφωνα με το πρωτόκολλο δρομολόγησης AODV και τέλος θα δούμε κατά πόσο μπορεί η λογική μας να έχει εφαρμογή και σε άλλα πρωτόκολλα. Με τα προηγούμενα έχουμε ένα σύνολο εργαλείων για να εξετάσουμε το ισοζύγιο που αναδύεται μεταξύ εξοικονόμησης ενέργειας και εύρεσης του κόμβου-στόχου (τελικού παραλήπτη). Αυτή η μελέτη γίνεται για:

- Διάχυση του μηνύματος RREQ έως ότου βρεθεί ο τελικός παραλήπτης ή μονοπάτι προς αυτόν



Σχήμα 98: Αποστολή δεδομένων με μονοεκπομπή

- Εκπομπή και λήψη της πληροφορίας (payload) για χάρη της οποίας κινήθηκε ο μηχανισμός ανεύρεσης μονοπατιού.

Για το σκοπό αυτόν υιοθετούμε το προηγούμενο περιβάλλον ασύρματων εκπομπών που ήδη περιγράψαμε στο κεφάλαιο 8.4 και τις ίδιες υποθέσεις εργασίας με μερικές μικρές τροποποιήσεις:

- Θεωρούμε τοπικό AODV στο οποίο ο κόμβος-πηγή A επιθυμεί να αποστείλει δεδομένα στον B για τον οποίο δεν έχει πληροφορία δρομολόγησης. Για το σκοπό αυτό εκκινεί τη διάχυση μηνύματος ζήτησης μονοπατιών (RREQ, route request).
- Τα μηνύματα ζήτησης μονοπατιού (RREQ, route request) γεννώνται σε κάθε γύρο από έναν και μοναδικό κόμβο, ο οποίος είναι εκείνος που ψάχνει νέο μονοπάτι για να αποστείλει δεδομένα σε άλλον κόμβο-καταναλωτή.
- Τα μηνύματα ζήτησης μονοπατιού (RREQ, route request) του πρωτοκόλλου περιέχουν πεδίο TTL, time-to-live (ή συνοδεύονται από φέρον πρωτόκολλο επιπέδου δικτύου το οποίο έχει τέτοιο πεδίο (AODV [118], πρωτόκολλο ip [121]), το οποίο μειώνεται με κάθε λήψη. Ως προς την επιδημική διαδικασία, ο μηδενισμός του TTL είναι ο μοναδικός μηχανισμός που περιορίζει την εξάπλωση της επιδημίας. Όταν ένας κόμβος μολυνθεί από μήνυμα με $TTL = 1$, μηδενίζει την τιμή του και δεν προωθεί το μήνυμα περαιτέρω. Σε προώθηση μπορεί να προβεί μόνον αν ξαναμολυνθεί από μήνυμα με μεγαλύτερο TTL και μάλιστα με νέο RREQ ID.
- Αμελούμε το μηχανισμό ανταγωνισμού για κατάληψη ασύρματων καναλιών τον οποίον χρησιμοποιήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

- Θεωρούμε πως κάθε κόμβος αποκτά επίγνωση των γειτόνων του μέσω ενός αξιόπιστου και ενεργοβόρου μηχανισμού ραδιοφάρων (beaconing). Όπως θα δούμε, αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει την επίγνωση της τοπικής πυκνότητας κόμβων στο δίκτυο. Η εμπέλεια εκπομπής είναι ίδια για όλους τους κόμβους και σταθερή.
- Με τον ίδιο διάλογο, κάθε κόμβος αποκτά επίγνωση της κατάστασης των καναλιών με τους γείτονές του (ΠΚΚ). Ο υποβιβασμός σήματος στα κανάλια οφείλεται στις διαλείψεις και σε τυχαίο θόρυβο. Αυτοί οι μηχανισμοί καθορίζουν την κατάσταση καναλιού την οποία περιγράφει η ΠΚΚ.
- Οι κόμβοι κινούνται· λόγω της κίνησης η γειτονιά τους μεταβάλλεται.
- Ο κόμβος προσαρμόζει την κατάστασή του κρίνοντας από την ΠΚΚ και το πλήθος των γειτόνων του· ακριβέστερα από την τάση μεταβολής του SNR και της τοπικής πυκνότητας κόμβων στη γειτονιά του. Αυτή η πληροφορία πλαισίου είναι ευρύτερη από την του κεφαλαίου 8.4
- Το δίκτυο μπορεί να έχει είτε τυχαία τοπολογία είτε να είναι δίκτυο χωρίς κλίμακα (κεφάλαια 5.4.3, 7.4.3).

Σύμφωνα λοιπόν με τα αμέσως προηγούμενα, εισάγουμε έναν ακόμα βαθμό ελευθερίας στην προσαρμογή της κατάστασης του κόμβου (β, μ) : την τοπική πυκνότητα του δικτύου ρ η οποία ορίζεται ως ανάλογη με τη μέση πιθανότητα να είναι γείτονες δυο τυχαίοι κόμβοι (εξίσωση 7.4). Έτσι ο πίνακας (13) του κεφαλαίου 8.2 μεταπίπτει στον πίνακα (21)

Πίνακας 21: Υποψήφιες πράξεις

	αύξηση SNR	μείωση SNR
αύξηση ρ	μείωση β , αύξηση μ	μείωση β , μείωση μ
μείωση ρ	αύξηση β , αύξηση μ	αύξηση β , μείωση μ

Έτσι και ο αλγόριθμος προσαρμογής παίρνει τη μορφή που παρουσιάζεται στη λίστα 12.

Λίστα 12: Διάχυση μηνύματος RREQ με μηχανισμό βέλτιστης παύσης

```

state = ( $\beta, \mu$ )
if node  $i$  infected
  if present RREQ ID sent before
    set broadcast_allowed := false
  end
  if broadcast_allowed == true
    for each action  $\alpha$ 
      calculate  $U_{i,\alpha}(t)$ 
    end
     $U_i(t) = \max_i(U_{i,\alpha}(t))$ 
    if ost_satisfied == true
      if do_not_retransmit_in_epoch( $i$ ) == false
        assume new state ( $\beta', \mu'$ )
        attempt epidemic transmission with state ( $\beta', \mu'$ )
        set flag do_not_retransmit_in_epoch( $i$ ) := true
      end
    else
      if  $\text{mod}(t, \epsilon) == 0$ 
        assume new state ( $\beta'', \mu''$ )
        attempt epidemic transmission with the state ( $\beta'', \mu''$ )
      end
    end
  end
end
end
end

```

Το λογικό διάγραμμα του σχήματος 99 περιγράφει τον ίδιο μηχανισμό.

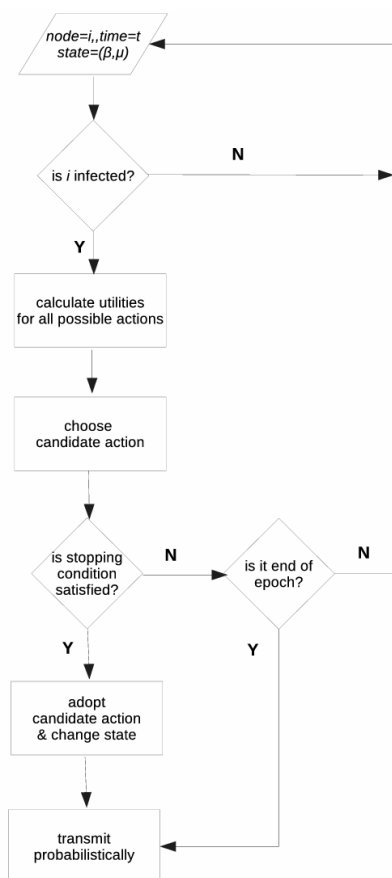
8.5.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων και συζήτηση

8.5.2.1 Παραδοχές και περιβάλλον

Οι επιδόσεις του προτεινόμενου σχήματος ελέγχονται με τη χρήση προσομοιώσεων τόσο για τη φάση ανακάλυψης μονοπατιού όσο και για τη δρομολογούμενη εκπομπή δεδομένων. Στον πίνακα 22 παρουσιάζονται οι τιμές μερικών βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται.

Η τοπολογία γενικά δεν εξετάζεται διεξοδικά σε προβλήματα επιδημικής διάδοσης. Η απλούστερη εκδοχή τοπολογίας είναι η τυχαία σύμφωνα με την οποία κάθε κόμβος του δικτύου έχει πεπερασμένη και σταθερή πιθανότητα να είναι γείτονας με οποιονδήποτε άλλον. Στα κεφάλαια 5.4.3 και 7.4.3 όμως εισάγαμε την ιδέα των δικτύων χωρίς κλίμακα. Σε τέτοια δίκτυα η πιθανότητα να είναι ένας κόμβος γείτονας με άλλον εξαρτάται από το βαθμό του δευτέρου, δηλαδή το άθροισμα των γειτόνων του. Διερευνούμε τις επιδόσεις του σχήματός μας και σε δίκτυα χωρίς κλίμακα, με μερικές υποθέσεις εργασίας.

- Υιοθετούμε την εξίσωση 7.11 για να περιγράψουμε τις σχέσεις γειτνίασης στο δίκτυο.
- Υποθέτουμε κινητικότητα και αποδίδουμε την ιδιότητα της ιστορικής μνήμης της γειτνίασης με τη *συνέπεια γειτνίασης* (εξίσωση 7.12)

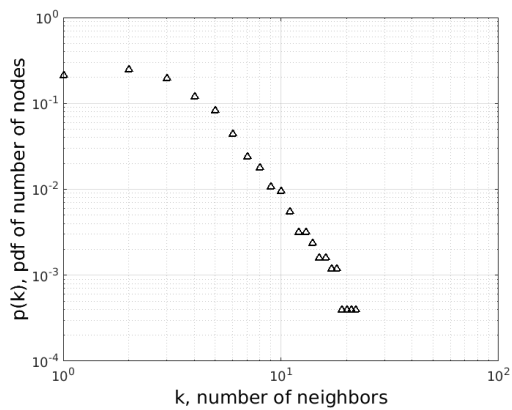


Σχήμα 99: Λογικό διάγραμμα εφαρμογής β.π. στη διάχυση μηνύματος ζήτησης μονοπατιού

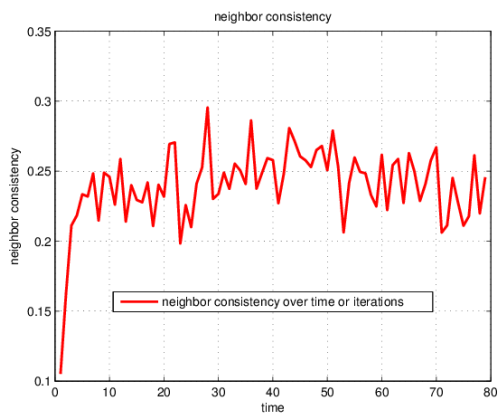
Με βάση τα προηγούμενα, και για την εξυπηρέτηση των προσομοιώσεων, κατασκευάζουμε δίκτυα Barabasi σύμφωνα με τα ειπωθέντα στο κεφάλαιο 7.4.3. Τα προκύπτοντα δίκτυα χαρακτηρίζονται από πυκνότητα πιθανότητας πλήθους γειτόνων που δίνεται από το σχήμα 100. Λόγω της κινητικότητας, το δίκτυο κατασκευάζεται εκ νέου σε κάθε χρονοθυρίδα (γύρο) και η ιστορικότητα εκφράζεται με τη συνέπεια γειτνίασης, της οποίας ένα παράδειγμα απεικονίζεται στο σχήμα 101.

8.5.2.2 Αποτελέσματα

Στο σχήμα (102) γίνεται φανερό ότι το προτεινόμενο σχήμα ευνοεί την εξοικονόμηση ενέργειας ως προς την άνευ όρων εκπομπή στην περίπτωση της διάχυσης του RREQ. Αυτό είναι λογικά αναμενόμενο, από τη στιγμή που οι εκπομπές μετριάζονται. Πολύ ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι η μεγαλύτερη οικονομία που επιτυγχάνεται σε περίπτωση δικτύων χωρίς κλίμακα. Συγκρίνονται, βέβαια, δίκτυα με παρόμοια μέση σ' ολόκληρο το δίκτυο πυκνότητα. Ταυτόχρονα, όμως, αναδύεται το πρόβλημα ισοζυγίου που αναφέρθηκε στα προηγούμενα: ο περιορισμός του ενεργειακού κόστους συνοδεύεται από σοβαρή ελάττωση της εξάπλωσης της μόλυνσης στο δίκτυο (σχήμα 103). Στην πράξη αυτό σημαί-



Σχήμα 100: Πυκνότητα πιθανότητας πλήθους γειτόνων



Σχήμα 101: Συνέπεια γειτνίασης

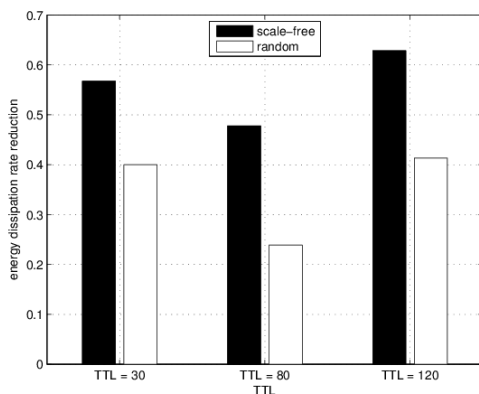
Πίνακας 22: Τιμές παραμέτρων για τις προσομοιώσεις

παράμετρος	τιμή
N , πλήθος κόμβων	50
T , διάρκεια προσομοίωσης	100 ή 200
αρχική πιθανότητα προώθησης	$0.22 + \nu 0.05$ με ν i.i.d. στο $\{1, 2, \dots, 40\}$
αρχικός τρόπος ΠΔΚ	i.i.d. στο $\{1, 2, \dots, 6\}$
πλήθος επιτρεπτών τιμών του β	40
$\Delta\beta$, βήμα συστολής β	0.05
πυκνότητα δικτύου	0.05
πλήθος δυνατών καταστάσεων καναλιού	6
TTL	80, εκτός αν αναφέρεται αλλιώς
ϵ , διάρκεια εποχής σε γύρους	5
L_0 μέγεθος μη κωδικοποιημένου πακέτου μολύνουσας πληροφορίας	512 bits
μέγεθος πακέτου μηχανισμού ραδιοφάρων	$L_0/2$
w εύρος παραθύρου υπολογισμού μ.ό.	3
νέο RREQ εκπέμπεται από τον αρχικά μολυσμένο κόμβο κάθε	1 γύρο
εκπομπή δεδομένων από τον αρχικά μολυσμένο κόμβο κάθε	1 γύρο
ελάχιστος βαθμός κόμβου σε δίκτυα χωρίς κλίμακα m	8
πλήθος αρχικά συνδεδεμένων κόμβων σε δίκτυα χωρίς κλίμακα m_0	10

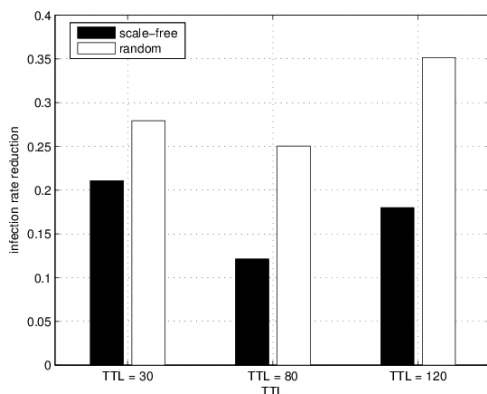
νει ότι μικραίνει η πιθανότητα να είναι ο τελικός παραλήπτης ανάμεσα στους μολυσμένους κόμβους που θα λάβουν το RREQ. Και πάλι τα δίκτυα χωρίς κλίμακα δείχνουν πιο ευνοϊκή συμπεριφορά.

Τα ίδια αποτελέσματα επιτρέπουν τη διαπίστωση του γεγονότος ότι το κόστος μόλυνσης για δίκτυα χωρίς κλίμακα είναι σαφώς χαμηλότερο (σχήμα 104). Αυτή η διαφορά μπορεί να αποδοθεί στο ότι η μέση απόσταση μεταξύ κόμβων είναι μικρότερη στα δίκτυα χωρίς κλίμακα από ό,τι στα τυχαία.

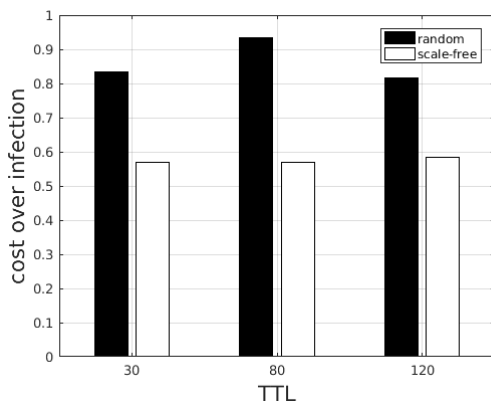
Στο σχήμα (105) αναλύεται το ενεργειακό κόστος ως προς τους επί μέρους μηχανισμούς γενέσεως του και συγκρίνεται με το κόστος της άνευ όρων ευρυεκπομπής. Η τελευταία λαμβάνεται ως σχήμα αναφοράς διότι αποτελεί στοιχείο του AODV στην αρχική του μορφή [118]. Στο σχήμα αυτό, μεγάλο μέρος του κόστους οφείλεται στην καθ' αυτό διαδικασία διάχυσης πληροφορίας («adaptive diss»). Παρατηρείται, όμως, ότι και το κόστος ΠΚΚ και μηχανισμού ραδιοφάρων («csi and beaconing») είναι σημαντικό κομμάτι του συνολικού. Τυχόν απαλλαγή από την ανάγκη αυτή θα επέφερε σημαντική περαιτέρω μείωση κόστους.



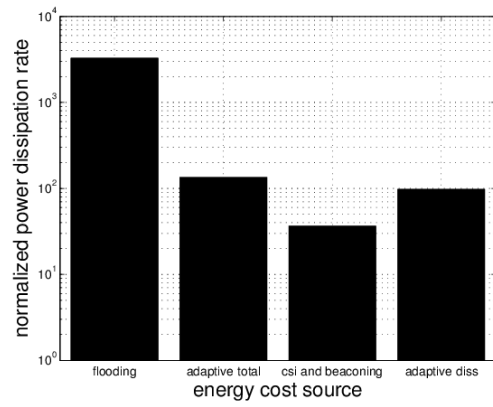
Σχήμα 102: Ελάττωση ρυθμού κατανάλωσης ενέργειας



Σχήμα 103: Ελάττωση ποσοστού μόλυνσης του δικτύου



Σχήμα 104: Λόγος κόστους προς μόλυνση για διάφορες τιμές του TTL



Σχήμα 105: Ανάλυση ενεργειακού κόστους

8.5.3 Εκπομπή δεδομένων με μονοεκπομπή (unicast)

Η μελέτη της εκπομπής του μηνύματος βάσει πληροφορίας δρομολόγησης είναι διαφορετικό πρόβλημα. Ας θεωρήσουμε έναν κόμβο μολυσμένο με την προς μετάδοση πληροφορία ο οποίος επίσης ήδη έχει αποκτήσει πληροφορία δρομολόγησης προς τον τελικό παραλήπτη. Η δρομολογούμενη πληροφορία μεταδίδεται με μονοεκπομπή. Όμως η μονοεκπομπή είναι λογική· από φυσικής πλευράς, στα ασύρματα δίκτυα έχουμε πάντα ευρυεκπομπή (broadcast). Έτσι, όταν ο κόμβος «SENDER» του σχήματος 98 εκπέμπει την πληροφορία προς τον επόμενο κόμβο (next hop), η πληροφορία λαμβάνεται από όλους τους γείτονες. Όλοι οι γείτονες ξοδεύουν ενέργεια για τη λήψη και το άνοιγμα του πακέτου. Απλώς, εάν ο τυχαίος γείτονας-παραλήπτης δεν είναι ο next hop, απορρίπτει το πακέτο χωρίς να το προωθήσει.

Στο περιβάλλον αυτό δε μας ενδιαφέρει τόσο η διάχυση της πληροφορίας σε ευρύ σύνολο κόμβων, αλλά ο χρόνος μέχρι να φτάσει στον κόμβο-καταναλωτή και η πιθανότητα να συμβεί αυτό. Έτσι ορίζουμε τις ακόλουθες μετρικές:

- Χρησιμοποιούμε τον όρο *ποιότητα υπηρεσίας* (quality of service, QoS) για να εκτιμήσουμε την απόδοση του σχήματος. Ως υπηρεσία νοείται η διάδοση του RREQ ως τον επιθυμητό παραλήπτη. Εφ' όσον επιθυμητά είναι χαμηλά ποσοστά σφαλμάτων και περιπτώσεων διπλοτύπων, όπως και καθυστέρησης, η ποιότητα υπηρεσίας μπορεί να οριστεί όπως στην (8.53):

$$QoS = \frac{1}{(c(t) + d(t))\mathcal{L}} \quad (8.53)$$

όπου $d(T)$, $c(T)$ και \mathcal{L} είναι αντίστοιχα τα ποσοστά διπλοτύπων και κατεστραμμένων λόγω θορύβου αντίστοιχα τη χρονική στιγμή t και η καθυστέρηση (latency) που ορίζεται στη (8.54).

$$\mathcal{L} = f(t)t + \sum_{i=1}^{s(t)} T2CI_i \quad (8.54)$$

όπου $s(t)$ και $f(t)$ αντίστοιχα το πλήθος επιτυχημένων και αποτυχημένων (λόγω φθοράς της μολύνουσας πληροφορίας στο θορυβώδες κανάλι) μολύνσεων ως τη στιγμή t . Ο όρος $T2CI_i$ είναι ο χρόνος από την εκπομπή ως τη μόλυνση (time to consumer infection) για το i -στό συμβάν επιτυχημένης μόλυνσης. Επί της ουσίας η καθυστέρηση υπολογίζεται ως το άθροισμα των χρόνων ταξιδιού των επιτυχημένων εκπομπών $(\sum_{i=1}^{s(t)} T2CI_i)$ συν έναν όρο $f(t)t$ που συνοψίζει την επιβάρυνση («ποινή») λόγω των αποτυχημένων εκπομπών.

- Η ενεργός ποιότητα υπηρεσίας (effective QoS) ορίζεται ως η πιο πάνω ποσότητα προς το ρυθμό έκλυσης ενέργειας $P(t)$ που απαιτείται για να επιτευχθεί (8.55):

$$QoS_{eff} = \frac{QoS}{P(t)} = [(d(t) + c(t))P(t)\mathcal{L}]^{-1} \quad (8.55)$$

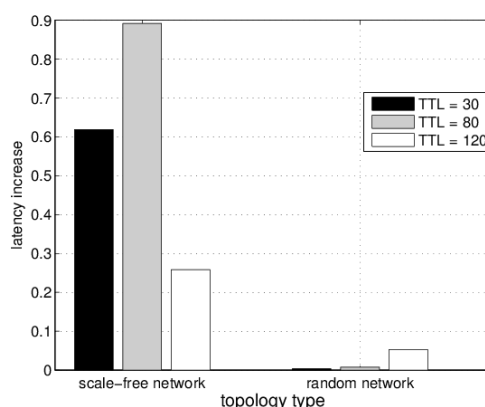
Η έκλυση ενέργειας συμπεριλαμβάνει τόσο τις εκπομπές όσο και τις λήψεις όλου του δικτύου. Με τη βοήθεια των πιο πάνω ορισμών, παρατηρούμε ότι αν και η λήψη της δρομολογούμενης πληροφορίας τείνει να είναι βραδύτερη (σχήματα 106, 107, 108), είναι πιο οικονομική με την ευρεία έννοια. Δηλαδή επιτυγχάνεται καλύτερη QoS για τον ίδιο ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας.

Από την προηγούμενη περιγραφή και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, παρατηρούμε ότι για μια ακόμα φορά αναδύεται ένα ισοζύγιο, δηλαδή ένα ζήτημα ισορροπίας μεταξύ δυο τάσεων: Μειώνοντας το ενεργειακό κόστος της αποστολής και λήψης της δρομολογούμενης πληροφορίας, ελαττώνουμε και την ταχύτητα με την οποία επιτυγχάνεται. Η μετάδοση είναι ενεργειακά αποδοτικότερη αν αγνοηθεί η κρισιμότητα ταχείας λήψης των δεδομένων.

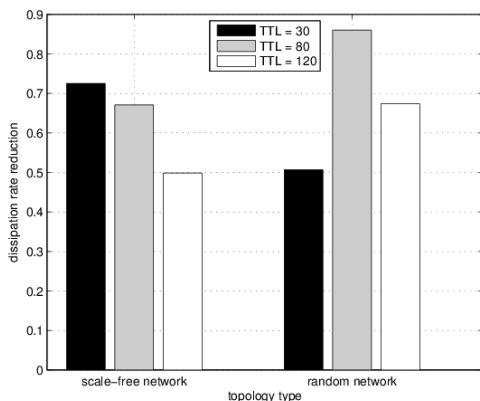
Επομένως, η μέχρι τώρα μελέτη μας είναι μια εισαγωγή στον προβληματισμό αυτό η οποία φέρνει στο προσκήνιο την ύπαρξη του εν λόγω ισοζυγίου με σαφή τρόπο.

Οι συνέπειες της καθυστέρησης της άφιξης της πληροφορίας στον κόμβο-καταναλωτή εξαρτώνται από την εφαρμογή-χρήστη της. Εάν στο συλλογισμό μας συμπεριλάβουμε και επανεκπομπές υπογορευόμενες από από τον κόμβο-στόχο, το ισοζύγιο που εξετάζουμε χρήζει ευρύτερης έρευνας.

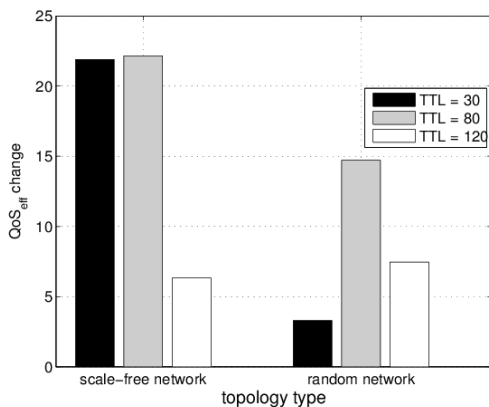
Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, έχει νόημα να εξεταστεί η απόδοση ενός τέτοιου μηχανισμού ως προς το πόσο εύκολο είναι να βρεθεί η πληροφορία δρομολόγησης κατά τη διάχυση του RREQ, δηλαδή το να συναντηθεί και μολυνθεί κόμβος που την κατέχει. Ορίζουμε ως *πιθανότητα δρομολόγησης* (qualprob) την πιθανότητα ένας κόμβος που λαμβάνει επιτυχώς το RREQ να έχει τη ζητούμενη πληροφορία ή να είναι ο ίδιος ο B. Αυτή είναι μια έκφραση του πόσο συχνή είναι η ζητούμενη πληροφορία δρομολόγησης στο δίκτυο. Το σχήμα (109) αποδίδει την εξάρτηση της ενεργού ποιότητας υπηρεσίας από την πιθανότητα δρομολόγησης. Σ' αυτό δείχνεται ότι ο χρόνος λήψεως (χρόνος ταξιδιού) αυξάνεται με την υιοθέτηση του προτεινόμενου σχήματος. Αυτό, βέβαια αποδίδεται στο ότι οι εκπομπές μειώνονται.



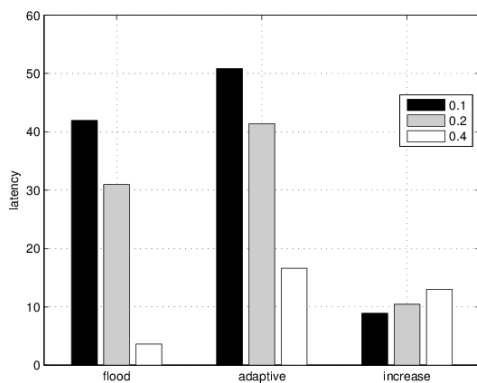
Σχήμα 106: Ποσοστό αύξηση της καθυστέρησης



Σχήμα 107: Ποσοστό μείωσης ρυθμού κατανάλωσης ενέργειας



Σχήμα 108: Μεταβολή ενεργού ποιότητας υπηρεσίας



Σχήμα 109: Επίδραση της παραμέτρου qualprob στην ενεργό ποιότητα υπηρεσίας

8.5.4 Δυνατότητα εφαρμογής σε άλλα πρωτόκολλα

Η προηγούμενη μελέτη έγινε με βάση το πρωτόκολλο δρομολόγησης AODV. Αυτό επελέγη λόγω του ότι η λειτουργία του βασίζεται στην απλή διάχυση πληροφορίας με ευρυεκπομπή, λόγω του ότι είναι σημαντικό *κατ' αντίδραση* (reactive) πρωτόκολλο και λόγω της διαδεδομένης χρήσης του.

Για τη λειτουργία του AODV ισχύουν τα επόμενα:

- Γίνεται περιοδική επανεκπομπή του μηνυματος RREQ υπό όρους με χρήση TTL. Πρόκειται για διάχυση πληροφορίας με τη νοοτροπία *expanding ring*, όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 8.4.6.
- Εάν εντός χρόνου RING_TRAVERSAL_TIME ms δε ληφθεί απαντητικό RREP, επαναλαμβάνεται η εκπομπή του RREQ με νέο RREQ ID.
- Οι ανανεούμενες εκπομπές του RREQ γίνονται με σταδιακά αυξανόμενο TTL.
- Το πλήθος των επανεκπομπών είναι άνω φραγμένο από τον αριθμό RREQ_RETRIES
- Λαμβανόμενο RREQ με γνωστό RREQ ID δεν επανεκπέμπεται. Κάθε λαμβανόμενο RREQ πορωθείται μία φορά και μόνο αν ληφθεί νέο με άλλο RREQ ID γίνεται περαιτέρω προώθηση.

Αν και το AODV είναι καθιερωμένο στο χώρο των αδόμητων ασύρματων δικτύων και των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, δεν είναι και το μοναδικό. Δυο ακόμα λογικές επιλογές είναι τα πρωτόκολλα DSR [119] και MPL [122]. Εδώ θα επισημάνουμε μόνο τις διαφορές τους με το AODV, οι οποίες θα πρέπει να προσεχθούν στα πλαίσια της επέκτασης της μελέτης σ' αυτά.

Το DSR μοιάζει με το AODV στο ότι προβαίνει σε άνευ όρων διάχυση του δικτύου με μήνυμα RREQ. Σημαντική διαφορά είναι ότι η λειτουργία του δε βασίζεται σε πίνακες δρομολόγησης, αλλά σε *source routing*. Αυτό συνεπάγεται την ανάγκη προσάρτησης μιας στοίβας με *next hops* σε κάθε μήνυμα RREP και κάθε πακέτο δρομολογούμενης πληροφορίας. Για δίκτυα μεγάλης διαμέτρου, αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μακρά μηνύματα. Επίσης αυτό εισάγει έναν ακόμα βαθμό ελευθερίας στον υπολογισμό του ενεργειακού κόστους.

Το MPL, πάλι, βασίζεται στη σουίτα IPv6. Στο MPL, όπως και στο IPv6 γενικά, δεν υπάρχουν ευρυεκπομπές, αλλά πολυεκπομπές (*multicast*). Αυτό που πολυεκπέμπεται δεν είναι μήνυμα RREQ για την ανακάλυψη του μονοπατιού, αλλά η ίδια η πληροφορία προς κατανάλωση (*payload*). Επομένως:

- Δεν έχουμε ευρυεκπομπές αλλά πολυεκπομπές. Όμως, για τους κόμβους οι οποίοι συμμετέχουν στην πολυεκπομπή, το πρόβλημα είναι πρόβλημα διάχυσης πληροφορίας.

- Το ενεργειακό κόστος υπολογίζεται διαφορετικά. Η μεν διάχυση της πληροφορίας είναι πρόβλημα διάχυσης για τους συμμετέχοντες κόμβους, αλλά και οι μη συμμετέχοντες επιβαρύνονται με το κόστος της ακούσιας ασύρματης λήψης. Κατ' αυτόν τον τρόπο εισάγεται και παράπλευρο κόστος στο μηχανισμό διάδοσης.
- Εφ' όσον έχουμε TCP, πρόκειται για διάλογο με βάση συνεδρίες (TCP sessions). Για τον υπολογισμό του ενεργειακού κόστους πρέπει να συνηυπολογιστεί και το κόστος επανεκπομπών με τη βοήθεια κατάλληλου μοντέλου επιτυχούς λήψεως.

8.5.5 Διαστρωματική απεικόνιση και συζήτηση

Στο κεφάλαιο αυτό είδαμε ότι η διάχυση πληροφορίας ελέγχου στα πλαίσια πρωτοκόλλων δρομολόγησης μπορεί να ρυθμιστεί αξιοποιώντας επίγνωση πλαισίου. Η κρισιμότητα των συνεπειών στην επιβράδυνση της διάχυσης εξαρτάται από την εφαρμογή-χρήστη της πληροφορίας.

Με παρόμοιο τρόπο μπορεί να ρυθμιστεί η εκπομπή πληροφορίας χρήστη με πολυεκπομπές. Η πιο πάνω «διελκυστίνδα» μεταξύ οικονομίας και μόλυνσης γίνεται εδώ εντονότερη.

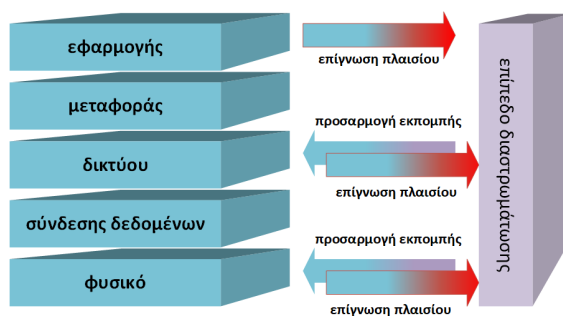
Η αντιμετώπιση του προβλήματος είναι παρόμοια με την του προηγούμενου κεφαλαίου (8.4) και οι βασικές προϋποθέσεις και παραδοχές για τη μελέτη αυτή είναι οι ακόλουθες:

- Προτείνεται η μετάβαση από περιοδική άνευ όρων σε πλησιοπεριοδική προσαρμοστική ευρυεκπομπή για την διάδοση του μηνύματος ζήτησης μονοπατιών (RREQ).
- Με παρόμοιο τρόπο, προτείνεται περιορισμός εκπομπών και στη μονοεκπομπή της δρομολογούμενης πληροφορίας χρήστη.

Τα αποτελέσματα είναι:

- Εξοικονόμηση ενέργειας όπως και στα προηγούμενα σχήματα
- Βραδύτερη μόλυνση λόγω της σοβαρής ελάττωσης εκπομπών
- Η μόλυνση που επιτυγχάνεται είναι ενεργειακά οικονομικότερη, δηλαδή γίνεται με αποδοτικότερη αξιοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας.
- Αναδεικνύεται ισοζύγιο ενέργειας-ποιότητας υπηρεσίας. Ακόμα και αν η μόλυνση είναι οικονομικότερη, η αυξημένη καθυστέρηση μπορεί να καταστεί απαγορευτική.

Το σχήμα 110 αποδίδει τη διαστρωματική λογική του παρόντος σχήματος. Η επίγνωση πλαισίου για το φυσικό στρώμα αναφέρεται στην ΠΚΚ· για τα επίπεδα 5-7 η γνώση έχει να κάνει με την τιμή της ηλικίας ή του υπολειπόμενου χρόνου ζωής, ενώ η επίγνωση μεταβολής στην πυκνότητα του δικτύου άπτεται του στρώματος δικτύου.



Σχήμα 110: Διαστρωματική αντίληψη της εφαρμογής στη δρομολόγηση με αξιοποίηση πληροφορίας ΠΚΚ και πυκνότητας κόμβων

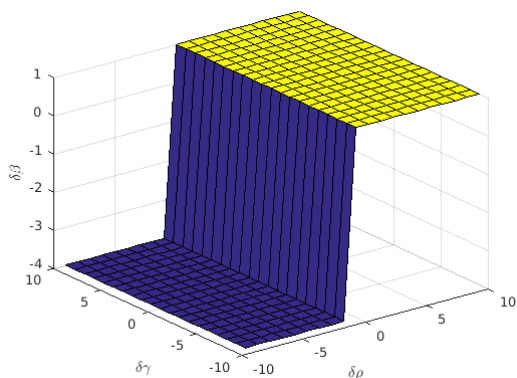
Πίνακας 23: Υποψήφιες πράξεις

	αύξηση SNR	μείωση SNR
αύξηση ρ	$\beta(t+1) = \beta(t) - \nu\Delta\beta, \mu(t+1) = \mu + 1$	$\beta(t+1) = \beta(t) - \nu\Delta\beta, \mu(t+1) = \mu(t) - 1$
μείωση ρ	$\beta(t+1) = \beta(t) + \Delta\beta, \mu(t+1) = \mu + 1$	$\beta(t+1) = \beta(t) + \Delta\beta, \mu(t+1) = \mu(t) - 1$

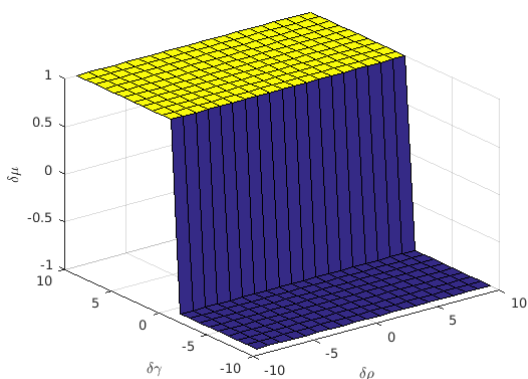
Με την εισαγωγή του επί πλέον αυτού βαθμού ελευθερίας, ο μηχανισμός προσαρμογής της κατάστασης του κόμβου μεταπίπτει από τον πίνακα 14 στον πίνακα 21 ο οποίος αναπτύσσεται με περισσότερη λεπτομέρεια στον 23.

Η επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών γ και ρ στα β και μ απεικονίζεται στα σχήματα 111 και 112 και το συνδυασμένο αποτέλεσμα στο σχήμα 113. Παρατηρούμε π.χ. στο σχήμα 111 ότι η ρύθμιση του β καθοδηγείται από τη μεταβολή του ρ . Αντίστοιχη παρατήρηση στέκει για το σχήμα 112 και τη ρύθμιση του μ που συνοψίζει.

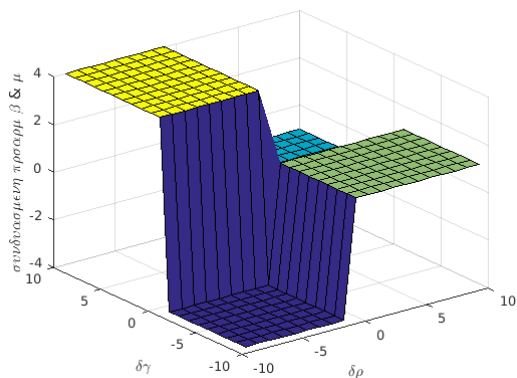
Στο σχήμα 113 εισάγεται για εποπτικούς λόγους η έκφραση της κατάστασης του κόμβου με βαθμωτό. Έτσι η μεταβολή της κατάστασης, που απεικονίζεται στον κατακόρυφο άξονα, εκφράζεται με την ποσότητα $\delta h = -\delta\mu \delta\beta$. Το σημαινόμενο είναι ότι οι διάφοροι δυνατοί συνδυασμοί αλλαγών των ρ και γ επιφέρουν διαφορετικές νέες καταστάσεις (β, μ) . Αυτή η απεικόνιση, βέβαια, δεν υπακούει αυστηρά στον μέχρι τώρα ορισμό της κατάστασης ως ζεύγους (β, μ) αλλά προορίζεται για ποιοτική παρά ποσοτική ανάγνωση για να δείξει την επίδραση των μεταβολών των γ και ρ στην κατάσταση του κόμβου.



Σχήμα 111: Επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων γ και ρ στο β . Οι τίτλοι $\delta\gamma$, $\delta\rho$ και $\delta\beta$ σημαίνουν αλλαγή ή προσαρμογή των αντίστοιχων ποσοτήτων



Σχήμα 112: Επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων γ και ρ στο μ . Οι τίτλοι $\delta\gamma$, $\delta\rho$ και $\delta\mu$ σημαίνουν αλλαγή ή προσαρμογή των αντίστοιχων ποσοτήτων



Σχήμα 113: Συνδυασμένη επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων γ και ρ στα β και μ . Οι τίτλοι $\delta\gamma$, $\delta\beta$, $\delta\rho$ και $\delta\mu$ σημαίνουν αλλαγή ή προσαρμογή των αντίστοιχων ποσοτήτων

8.6 Μελλοντική έρευνα: πληροφοριοκεντρική προσαρμογή

8.6.1 Φορμαλισμός και σύνδεση με τα προηγούμενα

Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν στα δυο προηγούμενα κεφάλαια 8.4 και 8.5 και η αντιμετώπισή τους μπορούν να διατυπωθούν με τον τρόπο που συνοψίζεται στα αμέσως επόμενα:

- Σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή, $t \in \mathbb{N}$ η κατάσταση ενός μολυσμένου κόμβου περιγράφεται από το διατεταγμένο ζεύγος $h = (\beta, \mu) \in B \times M$, όπου B και M τα (πεπερασμένα) σύνολα τιμών των β και μ αντίστοιχα.
- Η κατάσταση μπορεί να αλλάξει με την υιοθέτηση μιας πράξης α από ένα πεπερασμένο σύνολο δυνατών πράξεων \mathcal{A} , δηλαδή $\alpha \in \mathcal{A}$, τέτοια ώστε $(\beta, \mu) \xrightarrow{\alpha} (\beta', \mu')$. Ισχύει πάντα ότι $(\beta, \mu) \in B \times M$ και $(\beta', \mu') \in B \times M$. Δηλαδή το σύνολο $B \times M$ είναι κλειστό ως προς κάθε πράξη $\alpha \in \mathcal{A}$.
- Θεωρώντας το πεδίο του χρόνου διηρημένο σε ίσα, διαδοχικά και ξένα μεταξύ τους διαστήματα, τα οποία ονομάζονται *εποχές*, η πράξη α υιοθετείται (εκτελείται) τη χρονική στιγμή t_{ost} , δηλαδή *το πολύ* μία φορά εντός της τρέχουσας εποχής. Για την n -οστή ($n \in \mathbb{N}$) εποχή διάρκειας ϵ , αυτό μπορεί να γραφεί ως: $t_{ost} \in E_n = \{n\epsilon, n\epsilon + 1, \dots, (n+1)\epsilon - 1\}$. Επομένως επιζητείται σε κάθε εποχή, δηλ. $\forall n \in \mathbb{N}$, η βέλτιστη στιγμή για αλλαγή κατάστασης και εκπομπή από αυτή.
- Οι δυνατές πράξεις αξιολογούνται με τη βοήθεια της τιμής μιας συνάρτησης οφέλους U . Αυτή υπολογίζεται $\forall t \in \mathbb{N}$ άρα και $\forall t \in E_n$.

Για κάθε εποχή, δηλαδή $\forall n \in \mathbb{N}$, το διατεταγμένο ζεύγος $(\alpha, t_{ost}) \in \mathcal{A} \times E_n$ αποκαλείται η *βέλτιστη πολιτική* για την εποχή αυτή. Η *βέλτιστη πολιτική* είναι η απόφαση για το ποια είναι η κατάλληλη στιγμή εντός της εποχής για να εκτελεστεί η ωφελιμότερη πράξη, η οποία αλλάζει την κατάσταση του κόμβου· από τη νέα αυτή κατάσταση εκπέμπει, όπως είδαμε, ο κόμβος. Δηλαδή:

$$\forall n \in \mathbb{N}, \text{ ζητείται η πολιτική } (\alpha^*, t_{ost}^*) \in \mathcal{A} \times E_n : (\alpha^*, t_{ost}^*) = \operatorname{argmax}_{(\alpha, t_{ost})} U_n(\alpha, t_{ost})$$

Έτσι τη n -οστή εποχή αποκομίζεται όφελος έστω U_n , το οποίο είναι προφανώς το $U_n(\alpha^*, t_{ost}^*)$. Η μεγιστοποίηση του U_n συνεπάγεται και μεγιστοποίηση του αθροιστικού οφέλους $\sum_{n \in \mathbb{N}} U_n$.

Τα παραπάνω αποτελούν την αυστηρή διατύπωση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού το οποίο διαπραγματευόμαστε.

8.6.2 Οι δυνατές πράξεις

Οι πράξεις $\alpha \in \mathcal{A}$ έχουμε δει να εξαρτώνται από τις τιμές ή τις μεταβολές των μεγεθών γ (SNR) και ρ (πυκνότητα κόμβων). Αυτές άπτονται του φυσικού στρώματος και του στρώματος δικτύου. Στα δυο προηγούμενα κεφάλαια εισηγηθήκαμε προσαρμογές που συνοψίζονται στους πίνακες 24 και 25 συνοπτικά αναπαραγόμενους από τους 14 και 21 αντίστοιχα.

Πίνακας 24: Υποψήφιες πράξεις σύμφωνα με το κεφάλαιο 8.2

αύξηση SNR	μείωση SNR
μείωση β , αύξηση μ	αύξηση β , μείωση μ

Πίνακας 25: Υποψήφιες πράξεις σύμφωνα με το κεφάλαιο 8.5

αύξηση SNR		μείωση SNR
αύξηση ρ	μείωση β , αύξηση μ	μείωση β , μείωση μ
μείωση ρ	αύξηση β , αύξηση μ	αύξηση β , μείωση μ

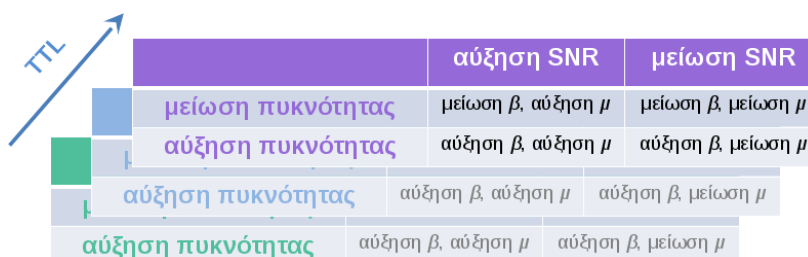
Έτσι ενώ στο κεφάλαιο 8.2 οι προσαρμογές καθορίζονται από τη μεταβολή του SNR, στο κεφάλαιο 8.5 καθορίζονται επί πλέον και από τις μεταβολές της τοπικής πυκνότητας δικτύου ρ .

Στο σημείο αυτό μπορούμε να εισάγουμε παραμετροποίηση στην προσαρμογή του β , κι έτσι να μην καθορίζεται μόνο από το σταθερό για το πρόβλημά μας εύρος συστολής αλλά και από άλλη παράμετρο ή άλλες παραμέτρους οι οποίες χαρακτηρίζουν την ποιότητα της φερόμενης πληροφορίας ή την κατάσταση ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας. Έτσι από τις $\beta(t+1) = \beta(t) + \Delta\beta$, $\beta(t+1) = \beta(t) - \nu\Delta\beta$ που εισήχθησαν στην εξίσωση 7.14 μπορούμε να μεταβούμε σε μια εξάρτηση της ευρύτερης μορφής $\beta(t+1) = \beta(t) + f(x)\Delta\beta$, όπου $f(x)$ μια συνάρτηση μιας παραμέτρου x έτσι ώστε $f(x) \leq 0$. Ήδη έχουμε δει ότι το εύρος συστολής παίζει ρόλο στην απόδοση του σχήματος προσαρμογής· εδώ τώρα το αντικαθιστούμε με μια συνάρτηση της κατάστασης, δηλαδή του δίνουμε επίγνωση πλαισίου.

Μπορούμε, λοιπόν, να εισάγουμε μια νέα εξάρτηση, όπως για παράδειγμα από το TTL, και έτσι προκύπτουν δηλαδή πολλές δυνατές εκδοχές του πίνακα 25 με την κάθε μια να εξαρτάται από την τιμή του TTL της φερόμενης μολύνουσας πληροφορίας, όπως δείχνεται στο σχήμα 114.

8.6.3 Παράδειγμα προσαρμογής κατάστασης με τη χρήση και του TTL

Αντικαθιστούμε τις απλές ανελαστικές εκφράσεις $\beta(t+1) = \beta(t) + \Delta\beta$ και $\beta(t+1) = \beta(t) - \nu\Delta\beta$ με την εναλλακτική $\beta(t+1) = \beta(t) + f(TTL)\Delta\beta$. Επιλέγουμε, δηλαδή, να παραμετροποιήσουμε την προσαρμογή του β με βάση το TTL. Έτσι υιοθετούμε συγκεκριμένα



Σχήμα 114: Προσαρμογή κατάστασης με χρήση γ , ρ και TTL

την εξάρτηση $f(TTL) = |B| \frac{TTL - \kappa TTL_0}{TTL_0}$ και μεταπίπτουμε στην 8.56 για την προσαρμογή του β .

$$\beta(t+1) = \beta(t) + |B| \frac{TTL - \kappa TTL_0}{TTL_0} \Delta\beta \quad (8.56)$$

όπου TTL_0 η αρχική τιμή του TTL κατά την πρώτη εκπομπή και $||$ το πλήθος δυνατών τιμών του β και $\kappa < 1$ πάντα.

Προφανώς, στο σχήμα αυτό, η προώθηση «αποθαρρύνεται» όταν το TTL πέσει χαμηλότερα από ένα ποσοστό της αρχικής τιμής του TTL_0 . Έτσι η εξάπλωση της επιδημίας βασίζεται περισσότερο σε πακέτα μολύνουσας πληροφορίας, τα οποία έχουν ακόμα αρκετά υπολειπόμενα άλματα, δηλαδή είναι πιο «νεαρά». Αυτά έχουν και τη δυνατότητα να μολύνουν περισσότερους ευάλωτους κόμβους.

Με την υιοθέτηση τέτοιου σχήματος, η εξάρτηση του β διατηρεί μεν τη μορφή της ποιοτικά, δηλαδή παραμένει όπως στο σχήμα 111 αλλά έχει ποσοτικές εκδοχές εξαρτώμενες από το TTL, όπως αποδίδεται στο σχήμα 115.

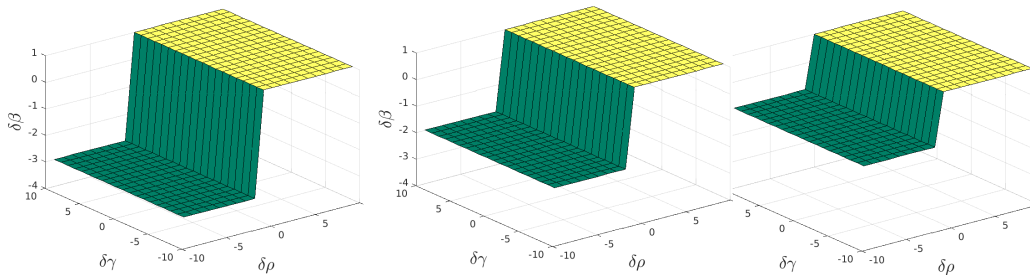
Σε αυτό δείχνεται ότι με ελάττωση της πυκνότητας δικτύου ($\delta\rho < 0$) το β ελαττώνεται ($\delta\beta < 0$). Στο 115(α) έχει δοθεί η συμβατική τιμή $\delta\beta = -3$. Αυτή είναι η μεταβολή του β κανονικοποιημένη ως προς το βήμα συστολής ($\Delta\beta$) όπως ορίστηκε στο υποκεφάλαιο 7.5 και χρησιμοποιήθηκε στο κείμενο αυτό. Όταν $\delta\rho \leq 0$, δηλαδή διαγιγνώσκεται αύξηση της πυκνότητας του δικτύου, το β αυξάνεται, κατά $\delta\beta = 2$ στο σχήμα.

Στις εκδοχές των 115(β) και 115(γ) το $\delta\beta$ παίρνει διαφορετικές τιμές λόγω διαφορετικών τιμών του TTL. Δηλαδή η βηματική (κατά βαθμίδα) μεταβολή της προσαρμογής του β ανάλογα με το πρόσημο της αλλαγής του ρ διατηρείται, αλλά το ύψος της βαθμίδας εξαρτάται από την τιμή του TTL.

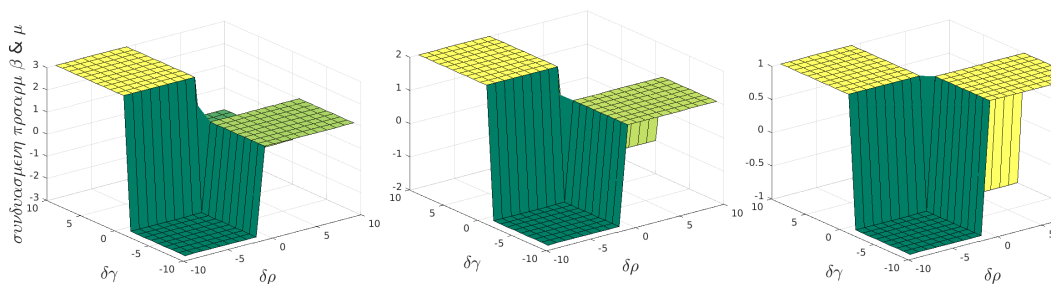
Το ίδιο ισχύει και γενικά για την αλλαγή κατάστασης κόμβου, είναι δηλαδή κι αυτή παραμετρική, όπως φαίνεται στα σχήματα 116 και 117.

Στο σχήμα 116 χρησιμοποιείται και πάλι η έκφραση της κατάστασης του κόμβου με βαθμωτό του οποίου η μεταβολή απεικονίζεται στον κατακόρυφο άξονα. Σκοπός του 116 είναι να δείξει ότι οι μεταβολές των γ και ρ έχουν διαφορετική επίδραση στην κατάσταση του κόμβου, ανάλογα με το TTL. Το σχήμα 117 είναι ακριβώς το ίδιο με τις επιφάνειες στραμμένες για εποπτικούς λόγους.

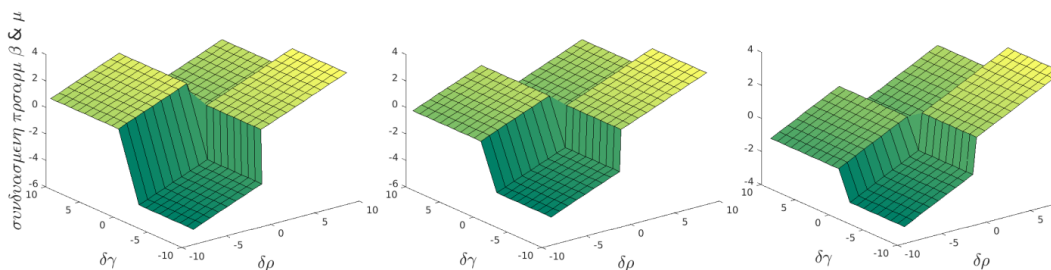
Στο σχήμα 118 εκτίθεται η σύγκριση της απόδοσης της πληροφοριοκεντρικής και της μη πληροφοριοκεντρικής Π.Ε.Δ. Η πληροφοριοκεντρική εκδοχή φαίνεται να πλεονεκτεί με



Σχήμα 115: Προσαρμογή πιθανότητας προώθησης με χρήση γ , ρ και TTL



Σχήμα 116: Προσαρμογή κατάστασης με χρήση γ , ρ και TTL



Σχήμα 117: Προσαρμογή κατάστασης με χρήση γ , ρ και TTL

όλους τους τρόπους.

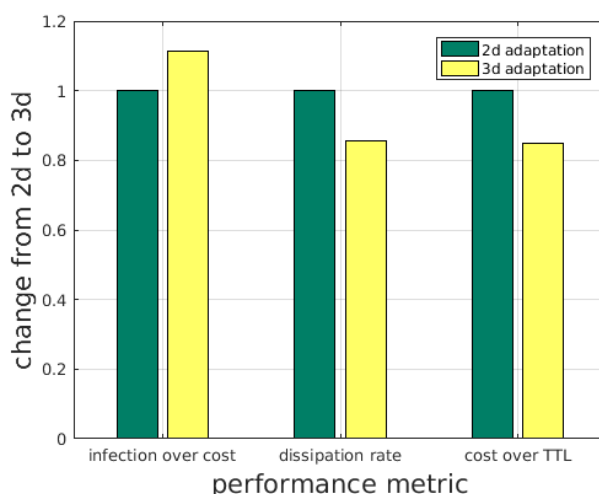
Μια χρήσιμη μετρική είναι η *μόλυνση κανονικοποιημένη ως προς το κόστος* (εξίσωση 8.57). Ορίζεται ως το ποσοστό μόλυνσης που επιτυγχάνεται με δεδομένο ενεργειακό κόστος (λίγο διαφορετικά από την 8.16). Επί της ουσίας είναι η ποσοτικοποίηση της ωφέλιμης αξιοποίησης της εκλυόμενης ενέργειας.

$$\epsilon(t) = \frac{i(t)}{E(t)} \quad (8.57)$$

Ο *ρυθμός έκλυσης ενέργειας* (dissipation rate) είναι επίσης χρήσιμη μετρική. Η πιθανότητα προώθησης συγκλίνει σε σταθερή περίπου τιμή στην Π.Ε.Δ., συνεπώς και ο ρυθμός έκλυσης συγκλίνει και το αθροιστικό ενεργειακό κόστος αυξάνεται περίπου γραμμικά.

Το *κόστος κανονικοποιημένο ως προς το TTL* συμπυκνώνει την απαίτηση για χαμηλό κόστος και ταυτόχρονη διατήρηση του TTL σε υψηλά επίπεδα.

Οι παραπάνω μετρικές αποτιμώνται με τη βοήθεια προσομοιώσεων. Έτσι μπορεί να παρατηρηθεί ότι αυτή η πληροφοριοκεντρική προσαρμογή επιφέρει αποδοτικότερη εξάπλωση της επιδημίας στο δίκτυο και βελτιωμένο πλήθος εναπομεινάντων αλμάτων για μικρότερο ενεργειακό κόστος (σχήμα 118) σε σχέση με την προηγούμενη «δισδιάστατη» προσαρμογή του πίνακα 25. Διαισθητικά αντιλαμβανόμαστε ότι η ρύθμιση εκπομπών ανάλογα με το TTL επηρεάζει τη μέση τιμή του στο δίκτυο. Από την άλλη μεριά, η ηλικία μεταβάλλεται λόγω της παρόδου του χρόνου ακόμα κι αν δεν υπάρχουν εκπομπές, δηλαδή εκεί έχουμε λιγότερο έλεγχο.



Σχήμα 118: Σύγκριση απόδοσης σχήματος πληροφοριοκεντρικής («3d») και μη πληροφοριοκεντρικής («2d») προσαρμογής

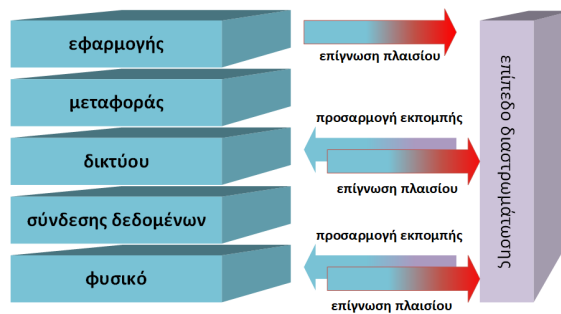
Η επίδραση του πληροφοριοκεντρικού χαρακτήρα είναι παρατηρήσιμη σε όλους τους τομείς, δηλαδή στην εξοικονόμηση ενέργειας, στην εξάπλωση της πληροφορίας και στη διατήρηση της ποιότητας πληροφορίας (υψηλό TTL).

8.6.4 Διαστρωμάτωση

Όπως και στα προηγούμενα κεφάλαια, η πληροφοριοκεντρική προσαρμογή σύμφωνα με το προτεινόμενο σχήμα στοχεύει να ρυθμίσει το κόστος και τη μόλυνση μέσω της προσαρμογής των β και μ , τα οποία συνδέσαμε με τα στρώματα δικτύου και φυσικό, αντίστοιχα.

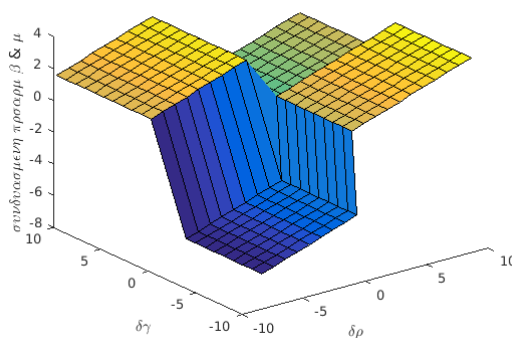
Η επίγνωση πλαισίου, όμως, είναι τώρα πιο πολυσυλλεκτική: η ΠΚΚ, δηλαδή η επίγνωση SNR σχετίζεται με το φυσικό στρώμα· η επίγνωση πυκνότητας κόμβων έχει να κάνει με τη δρομολόγηση, άρα με το στρώμα δικτύου και η γνώση TTL συνδέεται με το στρώμα εφαρμογής (5-7), διότι αυτού του στρώματος τα μηνύματα υφίστανται τον περιορισμό του άνω φραγμένου πλήθους προωθήσεων (TTL).

Η διαστρωματική λογική του προτεινόμενου πληροφοριοκεντρικού σχήματος αποδίδεται στο σχήμα 119.



Σχήμα 119: Διαστρωματική λογική σε παράδειγμα σχήματος πληροφοριοκεντρικής προσαρμογής

Η συνδυασμένη επίδραση των παραμέτρων γ και ρ στα β και μ σε τέτοιο μηχανισμό προσαρμογής αποδίδεται γενικευμένα στο σχήμα 120 το οποίο προορίζεται να διαβαστεί ποιοτικά και όχι ποσοτικά, αντίστοιχα με το σχήμα 117.



Σχήμα 120: Συνδυασμένη επίδραση των παραμέτρων γ και ρ στα β και μ σε σχήμα πληροφοριοκεντρικής προσαρμογής

8.6.5 Συζήτηση

Η προσαρμογή της κατάστασης του κόμβου (β, μ) μπορεί να γίνει με χρήση διαφόρων παραμέτρων πέραν των γ και ρ . Ήδη αναφέρθηκε το TTL ως τέτοια παράμετρος. Μερικά περαιτέρω παραδείγματα αναφέρονται ακολούθως:

- Ταυτότητα του κόμβου-προορισμού ή του κόμβου-πηγή: Μπορεί για παράδειγμα να ενισχυθεί η διάχυση της πληροφορίας που προέρχεται από συγκεκριμένο κόμβο. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται μια παράμετρος του τρίτου στρώματος (δικτύου) ή ανώτερου (εφαρμογής) για να ρυθμίσει τα χαρακτηριστικά της διάδοσης της επιδημίας. Μπορεί να βρει εφαρμογή όταν για παράδειγμα πρόκειται για τον κόμβο-ρίζα (root ή sink) ο οποίος διαφημίζει ένα ενδιαφέρον του ή για συγκεκριμένο κόμβο με αισθητήρα του οποίου οι μετρήσεις έχουν σημανθεί ως κρισιμότερες.
- Διαφημιζόμενο ενδιαφέρον: Το διαφημιζόμενο ενδιαφέρον μπορεί να χρησιμοποιείται για την ενίσχυση ή «φίμωση» της επιδημίας (π.χ. σε εφαρμογή τύπου Directed Diffusion [117]) πιθανώς λόγω του ότι κάποια ενδιαφέροντα έχουν πιο επείγοντα χαρακτήρα. Και αντίστροφα, οι απαντήσεις σε ορισμένες διαφημίσεις μπορεί να απαιτείται να είναι συχνότερες. Εδώ πρόκειται σαφώς για πληροφορία του επιπέδου εφαρμογής η οποία ρυθμίζει την εξάπλωση της επιδημίας.

Επισημαίνεται ότι αυτή η αντίληψη μας επιτρέπει τον έλεγχο της εξάπλωσης πληροφορίας αλλά και των *χαρακτηριστικών* της, δηλαδή να *ευνοείται η εξάπλωση πληροφορίας η οποία σχετίζεται με συγκεκριμένο διαφημιζόμενο ενδιαφέρον*. Αυτό είναι και το νόημα της πληροφοριοκεντρικής Π.Ε.Δ.

Το ουσιαστικό όφελος από τέτοιου είδους σχήματα είναι η ευελιξία και η συνεπαγόμενη δυνατότητα χρήσεως σε ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η ευελιξία αυτή συνίσταται στα ακόλουθα:

- Χρήση συναρτήσεων οφέλους ανάλογα με τις κατά περίπτωση ανάγκες, όπως για παράδειγμα:
 - Με επίγνωση πλαισίου από διάφορα στρώματα
 - Με έκπτωση (discounted utility function) αν π.χ. θέλουμε να προτιμήσουμε τις εκπομπές «νωρίς» μέσα σε κάθε εποχή
 - Αθροιστικές αν θέλουμε να εξασφαλίσουμε την ισχύ του κανόνα 1sla για βέλτιστη παύση
- Χρήση επίγνωσης πλαισίου από διάφορα στρώματα και προσαρμογής σε διάφορα στρώματα, δηλαδή πολλές εκδοχές και εκφάνσεις της διαστρωμάτωσης
- Δυνατότητα να ευνοηθεί η διάδοση, η εξοικονόμηση ενέργειας ή η ποιότητα πληροφορίας. Όπως έχει ήδη εκτεθεί:

- Η διάδοση της επιδημίας και η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ευθέως ανταγωνιστικές απαιτήσεις.
- Οι τιμές διαφόρων παραμέτρων ανωτέρων στρωμάτων στη μολύνουσα πληροφορία μπορούν να επηρεαστούν με «πόλωση» δηλαδή μεροληπτική ενίσχυση της διάδοσης. Για παράδειγμα, η ενίσχυση μηνυμάτων πληροφορίας με υψηλό TTL έχει ως συνέπεια την αύξηση του μέσου TTL της μολύνουσας πληροφορίας.

Διαπιστώνει κανείς ότι αναδύεται μια «τριελκυστίνδα», δηλαδή μια προσπάθεια να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα οι ακόλουθοι στόχοι:

- Εξοικονόμηση ενεργειακού κόστους: Σε όλα τα προηγούμενα κεφάλαια είδαμε ότι επιτυγχάνεται σημαντική ελάττωση ενεργειακού κόστους με τη βοήθεια της μείωσης των εκπομπών. Αυτή η μείωση όμως περιορίζει επί της αρχής και την εξάπλωση της πληροφορίας (δηλ. της επιδημίας). Στην περίπτωση, τώρα, που η επιδημία ενισχύεται ή φιμώνεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της φερόμενης πληροφορίας (κεφάλαια 8.3, 8.6) τότε επηρεάζεται και η ποιότητα της φερόμενης από το δίκτυο (της μολύνουσας το δίκτυο) πληροφορίας.
- Διατήρηση υψηλού ποσοστού μόλυνσης: Η αποτελεσματική μέθοδος που είδαμε ότι μπορεί να αντισταθμίσει την δυσμενή επίδραση της ελάττωσης εκπομπών στην εξάπλωση της μόλυνσης, είναι η χρήση προσαρμοστικής κωδικοποίησης έτσι ώστε οι έστω και μειωμένες εκπομπές να έχουν υψηλότερη πιθανότητα να είναι αποτελεσματικές (να καταλήξουν σε μόλυνση). Ταυτόχρονα, όμως, η υιοθέτηση «ισχυρών» τρόπων κωδικοποίησης και διαμόρφωσης τείνει να επιβαρύνει το ενεργειακό ισοζύγιο.
- Βελτίωση ποιότητας υπηρεσίας ή ποιότητας πληροφορίας: Η ποιότητα υπηρεσίας δεν ορίζεται κατ' ανάγκη σε όλα τα προβλήματα με τον ίδιο τρόπο. Στο κεφάλαιο 8.5 συνδέθηκε με την προσπάθεια να φτάσει η προς κατανάλωση πληροφορία επαρκώς γρήγορα στο στόχο· είδαμε ότι σ' αυτόν τον τομέα αναγκαζόμαστε να συμβιβαστούμε προς χάρη της ανάγκης για ελάττωση ενεργειακού κόστους. Επίσης, η έστω και μικρή βελτίωση της μέσης ηλικίας της μολύνουσας το δίκτυο πληροφορίας μπορεί να συνδέεται με σοβαρή ενεργειακή επιβάρυνση (8.4). Από την άλλη μεριά, η εύνοια προς πληροφορία με υψηλότερο TTL με κατά προτίμηση προώθησή της έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση του μέσου TTL της μολύνουσας το δίκτυο πληροφορίας.

Η διαστρωμάτωση είναι, λοιπόν, πολυσχιδής:

- Ανακτάται επίγνωση πλαισίου από πολλά στρώματα ταυτόχρονα
- Προσαρμόζονται παράμετροι σχετιζόμενες με πολλά στρώματα ταυτόχρονα
- Επηρεάζονται παράμετροι σχετιζόμενες με πολλά στρώματα ταυτόχρονα

9. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

9.1 Η ανάγκη αναχώρησης από τα ευριστικά μοντέλα

Η προσαρμοστική επιδημική διάδοση είναι πρόβλημα γνωστό εδώ και καιρό. Προτάθηκε με σκοπό την αντιμετώπιση προβλημάτων της απλής Ε.Δ. [61], [41] και η συνηθέστερη προσέγγιση είναι ευριστική. Για παράδειγμα στις έρευνες [41], [43] παρατηρούμε ότι η προσαρμογή γίνεται με τροποποίηση παραμέτρων εκπομπής, οι οποίες επηρεάζουν το ενεργειακό κόστος εκπομπών και λήψεων. Στην [41], για παράδειγμα, η συχνότητα εκπομπών μετριάζεται όταν τα διπλότυπα υπερβούν κάποιο προκαθορισμένο κατώφλι ή όταν το λαμβανόμενο μήνυμα προέρχεται από πολύ κοντινό πομπό. Στο [43], πάλι, προσαρμόζεται η ισχύς εκπομπής και συνεπώς η εμβέλεια του εκπέμποντος κόμβου. Και οι δυο παραπάνω αντιμετώπισεις, στην προσπάθειά τους να ελαττώσουν το ενεργειακό κόστος, τροποποιούν την πιθανότητα να μολυνθεί ένας ευάλωτος κόμβος. Στο [43] η πιθανότητα αυτή είναι:

$$P_{inf} = P_{sd} = (1 - \delta)\beta \frac{\pi r^2}{S} \quad (9.1)$$

όπου P_{inf} και P_{sd} οι πιθανότητες μόλυνσης και επιτυχούς λήψης αντίστοιχα, με την απαραίτητη υπόθεση απουσίας θορύβου καναλιού, και S το εμβαδόν της επιφάνειας στην οποία είναι κατανομημένο/ανεπτυγμένο το δίκτυο.

Η ισχύς εκπομπής μπορεί να δοθεί με τη βοήθεια του διανύσματος Poynting Και της πυκνότητας ισχύος από την 9.2.

$$P_{Tx} = 4\pi r^2 \frac{\mathcal{E}^2}{Z} \quad (9.2)$$

... όπου \mathcal{E} το ηλεκτρικό πεδίο και Z η εμπέδηση του μέσου διάδοσης.

Οπότε από τις (9.1) και (9.2) βλέπουμε ότι $P_{inf} \propto P_{Tx}$

Ομοίως, στο [41], η διακοπή εκπομπών για κάποιο χρονικό διάστημα ελαττώνει την πιθανότητα μόλυνσης ευάλωτων. Εδώ αυτή είναι, δεδομένου ότι δεν υποθέτουμε θόρυβο:

$$P_{inf} = P_{sd} = (1 - \delta)P_{susc}D \quad (9.3)$$

όπου P_{susc} η πιθανότητα να είναι ο κόμβος ευάλωτος μια τυχαία χρονική στιγμή και D το ποσοστό του χρόνου που ο κόμβος εκπέμπει (duty cycle).

Η αντιστάθμιση (tradeoff) μεταξύ μόλυνσης και κόστους έγινε εμφανής από τα πρώτα στάδια της επιδημικής διάδοσης [61], [57], [44]. Όμως, η επιδημική διάδοση ([66], [55], κ.ά.) μελετήθηκε μαθηματικά χωρίς να βρεθεί το ενεργειακό κόστος στο επίκεντρο. Βέβαια, με βάση τις πιο πάνω έρευνες, μπορούν να υπολογιστούν τα πλήθη εκπομπών. Αυτό θα το συσχετίζαμε με πλήθος εκπεμπομένων πακέτων στο σχήμα μας, χωρίς αναφορά στο μέγεθός τους ή στο αν λαμβάνονται κατεστραμένα λόγω θορύβου.

Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι η επιδημική διάδοση έχει γίνει κατανοητή σε μεγάλο βαθμό, με τη βοήθεια αναλυτικών μαθηματικών μοντέλων, αλλά η εξοικονόμηση ενέργειας και η εν

γένει προσπάθεια για τη βελτίωση της απόδοσής της βασίζεται σε ευριστικές προσεγγίσεις. Απ' αυτές λείπει η ολιστική, αφαιρετική εικόνα.

9.2 Οι κύριοι άξονες: διαστρωμάτωση και ανάδραση

Παρατηρώντας τις ευριστικές προσεγγίσεις της προηγούμενης έρευνας στην Π.Ε.Δ. ([41], [43] κ.ά.) σημειώνουμε ότι ενσωματώνει δυο κύριες συνιστώσες: τη *διαστρωμάτωση* και την *ανάδραση*:

- Όλες οι προσεγγίσεις είναι διαστρωματικές στην ουσία τους. Δηλαδή παρατηρούν μεγέθη από ένα ή περισσότερα στρώματα και τροποποιούν παραμέτρους από ένα ή περισσότερα συνήθως άλλα στρώματα, με σκοπό να επιτύχουν εξοικονόμηση ενέργειας ή τη βελτίωση κάποιας άλλης μετρικής επίδοσης. Για παράδειγμα, στο [43], η μετρούμενη ποσότητα είναι το ποσοστό των διπλοτύπων ή η απόσταση του πομπού. Αυτό απαιτεί λήψη, ξεπακετάρισμα και εκτίμηση του περιεχομένου της πληροφορίας. Δηλ, η μέτρηση (διπλότυπο ή όχι) αφορά τα στρώματα 5-7. Η προσαρμογή που συνεπάγεται αφορά στην ισχύ εκπομπής. Αυτή καθ' αυτή αφορά στο φυσικό στρώμα, αλλά η προσαρμογή της εμβέλειας τροποποιεί επί της ουσίας και την τοπολογία του δικτύου, δηλαδή τη δρομολόγηση η οποία εμπίπτει στο στρώμα δικτύου.

Η διαστρωμάτωση εισηγείται ριζική αποστασιοποίηση από τα παραδοσιακά μοντέλα δικτύων, είτε πρόκειται για το OSI, είτε για το του διαδικτύου.

Τα παραδοσιακά στρωματικά μοντέλα εισηγούνται ότι κάθε προσαρμογή παραμέτρων σε ένα στρώμα μπορεί να χρησιμοποιεί πληροφορία προερχόμενη μόνο από αμέσως γειτονικό του στρώμα (π.χ. υποκείμενο αυτού) και αντίστοιχα να πληροφορήσει άλλο γειτονικό του (π.χ. το αμέσως υπερκείμενό του), ώστε κι εκείνο να προβεί σε προσαρμογές, αν το κρίνει αναγκαίο.

Αυτό σημαίνει πρώτα-πρώτα ότι οι αποφάσεις για προσαρμογή λαμβάνονται *διαδοχικά* : πρώτα στο στρώμα A, μετά στο B (υπο- ή υπερκείμενό του, πάντως άμεσο γείτονά του) κλπ.

Η υιοθέτηση διαστρωμάτωσης επιτρέπει μεγαλύτερη ταχύτητα, διότι οι προσαρμογές σε όλα τα στρώματα γίνονται ταυτόχρονα αλλά και ευρύτερο χώρο τιμών, διότι είναι διαθέσιμες όλες οι δυνατές τιμές (της προσαρμοζόμενης παραμέτρου) σε κάθε στρώμα [74], [75].

- Τα σχήματα και οι μηχανισμοί που επιστρατεύονται για την προσαρμογή της επιδημικής διάδοσης είναι όλα αναδραστικά (με χρήση βρόχου ανάδρασης) και όχι με μηχανισμό πρόβλεψης. Αυτό στρέφει την προσοχή μας στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Σ' ένα σύστημα ελέγχου έχουμε προκαθορισμένες επιθυμητές τιμές μιας σειράς μετρήσιμων παραμέτρων. Τις μετράμε τακτικά, και παρατηρώντας απόκλιση, τροποποιούμε κάποιες άλλες παραμέτρους εισόδου ώστε το αποτέλεσμα μας να είναι το επιθυμητό. Συνήθως η προσαρμογή των παραμέτρων εισόδου εξαρτάται από την απόκλιση των παραμέτρων εξόδου από τις επιθυμητές τιμές τους.

Στο πρόβλημα που εξετάζουμε, όμως, αυτό δεν είναι ούτε απλό ούτε καν σαφές:

- Υπάρχει εξωγενής τυχαιότητα (στοχαστικότητα) που επηρεάζει τις μετρούμενες παραμέτρους (θόρυβος καναλιού)
- Δε γνωρίζουμε ακριβώς πώς η προσαρμογή των παραμέτρων εισόδου επηρεάζει τις τιμές των μετρούμενων. Αυτή η εξάρτηση εξαρτάται από την πιο πάνω τυχαιότητα.
- Δε γνωρίζουμε τις επιθυμητές τιμές εξόδου: γνωρίζουμε π.χ. την επιθυμητή τιμή του $I(t)$ ασυμπτωτικά, αλλά όχι σε πραγματικό χρόνο. Η στοχαστικότητα του καναλιού δεν επιτρέπει ντετερμινιστική σχέση μεταξύ παραμέτρων εισόδου και εξόδου. Επίσης, η ανάδραση επηρεάζει την άμεση τιμή παραμέτρων εξόδου. Ο τρόπος, όμως, που επηρεάζει την ασυμπτωτική μάζα είναι άγνωστος.

Το ερώτημα αυτό αντιμετωπίζεται με την αποχώρηση από την απλή θεωρία ανάδρασης και την κίνηση προς τη χρήση θεωρίας βέλτιστης παύσης στο περιγραφέν διαστρωματικό περιβάλλον.

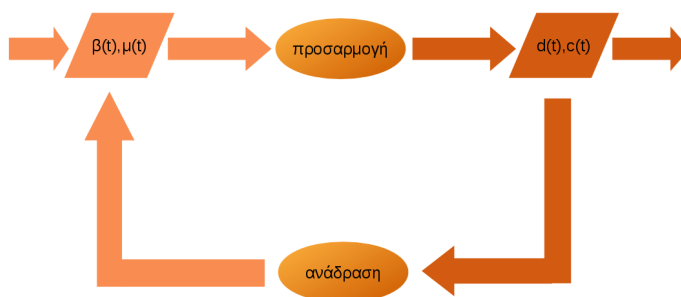
9.3 Δίκτυα χωρίς κλίμακα

Η μελέτη των δικτύων χωρίς κλίμακα είναι κλάδος ο οποίος έλαβε ανάπτυξη σχετικά πρόσφατα. Η μελέτη της επιδημικής διάδοσης σ' αυτά είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο.

Στην έρευνα [72] προκύπτει το ενδιαφέρον αποτέλεσμα ότι η συμπεριφορά της επιδημίας σε δίκτυο χωρίς κλίμακα διαφέρει από αυτή σε τυχαίο δίκτυο στο ότι δεν παρατηρείται κατώφλιο κάτω από το οποίο η μόλυνση σβήνει. Αντίθετα, επιβιώνει έστω και καλύπτοντας ένα μικρό πλήθος κόμβων. Αυτή η ριζική ποιοτική διαφορά μας προδιαθέτει πως η επιδημική διάδοση στα δίκτυα αυτά μπορεί να έχει διαφορετική συμπεριφορά στην οποία αρμόζει ενδελεχής πρωτότυπη έρευνα. Το ενεργειακό κόστος και τα σχήματα Π.Ε.Δ. σε δίκτυα χωρίς κλίμακα αποτελούν, συνεπώς, επίσης παρθένα πεδία έρευνας.

Ήδη οι διαφορετικές μέσες αποστάσεις μεταξύ κόμβων για τα δυο είδη δικτύων προκαλούν διαφορετική συμπεριφορά ως προς το εύρος και το κόστος της μόλυνσης. Η επίδρασή τους στην ποιότητα της πληροφορίας είναι ανδιαφέρον ανεξερεύνητο πεδίο.

Η παρούσα μελέτη ασχολείται με τη συμπεριφορά των προταθέντων σχημάτων Π.Ε.Δ. και σε τέτοια δίκτυα. Η συμπεριφορά τους σε σύγκριση με τα οικεία «τυχαία» δίκτυα αποτελεί έναν ακόμα καρπό της παρούσας έρευνας.



Σχήμα 121: Π.Ε.Δ. με βρόχο ανάδρασης: μετρούνται τα διπλότυπα και ποσοστά κατεστραμένων και προσαρμόζονται και επανατροφοδοτούνται η πιθ. προώθ. και ο τρόπος του ΠΔΚ.

9.4 Η πορεία προς τη λύση

Με την αντιμετώπιση του κεφ. 8.1 και την [1] βαδίσουμε σύμφωνα με ένα απλό αναδραστικό μοντέλο (σχήμα 121). Αυτού του είδους η αντιμετώπιση έχει προταθεί και σε προηγούμενη έρευνα. Ένα τέτοιο μοντέλο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι απεικονίζει ένα σύστημα ελέγχου. Αυτός ο μηχανισμός έχει είσοδο την κατάσταση του κόμβου (β, μ) και έξοδο τις μετρούμενες ποσότητες ποσοστά των διπλοτύπων και κατεστραμένων μηνυμάτων $(d(t)$ και $c(t)$ αντίστοιχα). Σε μια κλασική αντιμετώπιση, θα είχαμε μια ανάδραση της μορφής

$$\beta(t+1) - \beta(t) = \kappa(c - c_{desired}) + \lambda(d - d_{desired}) \quad (9.4)$$

και αντίστοιχα για το μ . Τα $\beta_{desired}$ και $\mu_{desired}$ θα 'πρεπε να ήταν γνωστά. Η χρήση της σχέσης (9.5) (αναπαράγεται από το κεφάλαιο 8.1) εκφράζει μια παρόμοια αντιμετώπιση.

$$\beta(t+1) = \beta(t)(1 + \kappa_1 c - \kappa_2 d) \quad (9.5)$$

Όμως οι παράμετροι κ και λ της 9.4 όπως και οι κ_1 και κ_2 της 9.5 δεν είναι ευθέως ή εύκολα προσδιορίσιμες. Μόνο με δοκιμές μπορεί να αποτιμηθεί η απόδοση ενός συστήματος που τις υιοθετεί.

Επίσης, οι παράμετροι εξόδου, δηλ οι μετρούμενες d και c δε μας δίνουν άμεσα εκτίμηση του ενεργειακού κόστους που θέλουμε να μειώσουμε. Μας δίνουν, βέβαια, εκτίμηση της μόλυνσης, αν και όχι με ακρίβεια.

Στο κεφάλαιο 8.1 είδαμε επίσης πως η εξοικονόμηση ενέργειας είναι σημαντικότερη σε σχέση με μια στατική αντιμετώπιση, ανάλογα με τις παραμέτρους του προβλήματος. Συνεπώς, μπορεί αυτή η τεχνική να εξοικονομεί ενέργεια αλλά τίποτα δε μας δείχνει την κατεύθυνση προς τη βέλτιστη λύση.

Αυτή η αναδραστική αντίληψη αναιρείται στο 8.2 και την [2]. Εδώ η προσαρμογή της κατάστασης του κόμβου γίνεται όχι με «διορθωτικές» αλλαγές μερικών παραμέτρων, αλλά -έστω και μυωπικά- με βάση το υπεσχημένο άμεσο όφελος.

Παρατηρούμε ότι οι συναρτήσεις οφέλους που εισήχθησαν εκεί περιέχουν τις ποσότητες

αναμενόμενο άμεσο κόστος και αναμενόμενη πιθανότητα επιτυχούς λήψης. Η ενέργεια καθορίζεται πλήρως από τις τιμές β και μ , άρα είναι πλήρως (ντετερμινιστικά) υπό τον έλεγχό μας.

Αυτή η μέθοδος είναι μέθοδος επιλογής με βάση την εκτίμηση του άμεσου οφέλους. Αυτό μπορεί να είναι επαρκές, από τη στιγμή που εκπομπές γίνονται κάθε χρονική στιγμή. Έτσι η μυωπική επιλογή ίσως δεν είναι τόσο μυωπική, αφού την επόμενη στιγμή θα υπάρξει νέα προσαρμογή.

Η απόδοση της μεθόδου είναι συγκρίσιμη με την της προηγούμενης, αλλά εδώ εισάγεται και ένα σημαντικό επί πλέον όφελος: Η δυνατότητα χρήσης διαφόρων συναρτήσεων οφέλους, οι οποίες υπολογίζονται με βάση διαφορετικές ποσότητες και συνεπώς εξυπηρετούν διαφορετικές απαιτήσεις, όπως π.χ. μόλυνση μόνο ή μόλυνση ΚΑΙ εξοικονόμηση ενέργειας.

Στο κεφάλαιο 8.3 και στην [3], η πιο πάνω διαδικασία «αυστηροποιείται» με την πρόσθετη εποβολή της απαίτησης ικανοποίησης συνθήκης βέλτιστης παύσης (β.π.). Η επί πλέον αυτή συνθήκη (η ικανοποίηση της οποίας απαιτείται για την υιοθέτηση της πλέον σύμφωρης πράξης) προφυλάσσει από βιαστικές αλλαγές στις οποίες ωθούμαστε από απότομες αλλαγές του περιβάλλοντος, δηλαδή διαλείψεων και θορύβου στα ασύρματα κανάλια. Σίγουρα αυτή η αντιμετώπιση παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από το προφίλ του θορύβου και των διαλείψεων, όπως εκφράζονται με τη χρονική εξέλιξη του SNR.

Η συνθήκη 1sla μας δείχνει αν μια επιλογή πράξης θα μας δώσει όχι απλώς το υψηλότερο άμεσο όφελος αλλά και υψηλότερο από το αναμενόμενο. Παρ' ότι η 1sla δεν πληροίται πάντα, μπορεί να πληροίται σχετικά συχνά σε περιβάλλοντα με σχετικά ήπιες μεταβολές θορύβου. Το ενεργειακό κέρδος παραμένει και με την επιβολή της επί πλέον αυτής συνθήκης.

Στο 8.4 και στην [4] επιστρατεύεται το οπλοστάσιο που συγκροτήθηκε στα προηγούμενα για την *αντιμετώπιση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού*. Έτσι το πρόβλημα διάχυσης πληροφορίας με περιοδικές ευρυεκπομπές αντιμετωπίζεται με μετάβαση στην πλησιοπεριοδικότητα. Παρά τη μετάβαση αυτή, ο χρόνος παραμένει κατανεμημένος σε διαδοχικά, μη επικαλυπτόμενα, διαστήματα σταθερής διάρκειας, τις *εποχές*. Προσπαθούμε, πλέον, εντός κάθε εποχής να βρούμε τη βέλτιστη στιγμή για αλλαγή κατάστασης προς την πλέον σύμφωρη, από την οποία ο κόμβος εκπέμπει επιδημικά, δηλαδή, όπως διατυπώθηκε στο υποκεφάλαιο 8.6:

$$\forall n \in \mathbb{N}, \text{ ζητείται η πολιτική } \alpha^*, t_{ost}^* \in \mathcal{A} \times E_n : \alpha^*, t_{ost}^* = \operatorname{argmax} U_n(\alpha, t_{ost})$$

Ένα επόμενο βήμα είναι η επιλεκτική ενίσχυση της διάχυσης της πληροφορίας ανάλογα με τις ιδιότητες ή το περιεχόμενο της μολύνουσας πληροφορίας. Ήδη αναδύεται η ανάγκη εξισορρόπησης μεταξύ εξοικονόμησης ενέργειας και επίδρασης στις ιδιότητες, δηλαδή στην ποιότητα, της μολύνουσας πληροφορίας. Στο εδώ σχήμα η προσπάθεια μείωσης της μέσης ηλικίας της διαχεόμενης πληροφορίας έχει σοβαρή επίπτωση στο ενεργειακό κό-

στος.

Το πρόβλημα της διάδοσης πληροφορίας με περιοδικές εκπομπές βρίσκει εφαρμογή σε πεδία όπως η δρομολόγηση σε αδόμητα ασύρματα δίκτυα. Σε τέτοια πρωτόκολλα δρομολόγησης κεντρικό ρόλο έχει η διάχυση αιτημάτων για ανεύρεση πληροφορίας δρομολόγησης (μηνυμάτων RREQ). Έτσι στα 8.4, [4] και 8.5 διερευνάται το πώς τα μηνύματα ελέγχου (αναζήτησης μονοπατιού) διαχέονται αποτελεσματικά δηλαδή ευρέως και με ελαττωμένο ενεργειακό κόστος. Μεγάλο ενδιαφέρον έχει και ο συνυπολογισμός κι άλλων ενεργοβόρων μηχανισμών όπως οι ραδιοφάροι (beaconing) και η ανάκτηση ΠΚΚ. Η ανάγκη συμβιβασμού μεταξύ αντικρουόμενων απαιτήσεων επιβεβαιώνεται.

Η χρήση παρόμοιου σχήματος για ευφυή μείωση εκπομπών στη μονοεκπομπή πληροφορίας χρήστη αποδεικνύεται πιο προβληματική: Η εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται με κόστος τη βραδύτερη άφιξη της πληροφορίας στον κόμβο-καταναλωτή που αποτελεί τον προορισμό της. Αυτός ο σοβαρός συμβιβασμός πρέπει να εξετάζεται βάσει των απαιτήσεων του εκάστοτε προβλήματος με τη χρήση μιας κατάλληλα ορισμένης *μετρικής ποιότητας υπηρεσίας* QoS.

Το εξεταζόμενο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού τίθεται σε νέα βάση με την πρόσθεση μιας νέας απαίτησης: *αυτήν της βελτίωσης της ποιότητας πληροφορίας*. Αυτή μπορεί να οριστεί με ποικίλους τρόπους.

Το εξεταζόμενο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού διατυπώνεται αυστηρά ως πρόβλημα βέλτιστης παύσης πεπερασμένου γνωστού ορίζοντα. Η διατύπωση αυτή μπορεί να επεκταθεί για να συμπεριλάβει και την απαίτηση της βελτίωσης της ποιότητας πληροφορίας.

Αρχικά θεωρείται ως ποιότητα η νεότητα της διαχεόμενης πληροφορίας. Προτείνεται προσαρμογή των χαρακτηριστικών εκπομπής με βάση τη νεότητα της πληροφορίας με στόχο τη βελτίωση της μέσης ηλικίας αυτής. Διερευνάται, λοιπόν, η δυνατότητα προσαρμογής των χαρακτηριστικών εκπομπής με βάση το *περιεχόμενο της ίδιας της φερόμενης πληροφορίας*.

Άλλη επιλογή, πέρα από τη νεότητα που μόλις αναφέρθηκε, είναι το TTL (time-to-live), το οποίο μπορεί και να αποτελεί και παράμετρο του πρωτοκόλλου στα πλαίσια του οποίου πραγματοποιείται η διάχυση της πληροφορίας. *Έτσι η ποιότητα πληροφορίας αναδεικνύεται σε μια τρίτη συνιστώσα πέρα από το ενεργειακό κόστος και το ποσοστό μόλυνσης, η οποία λαμβάνει μέρος στον υπό εξέταση αναδυόμενο ανταγωνισμό*. Ανάλογα με την οριζόμενη ποιότητα πληροφορίας είναι δυνατή η βελτίωση και στους τρεις τομείς.

Όπως δηλαδή ήδη εθίγη στο 8.4 και στην [4] είναι δυνατόν η προσαρμογή της κατάστασης του κόμβου να εξαρτάται και από το περιεχόμενο της ίδιας της διαχεόμενης πληροφορίας.

Αυτού του είδους η *πληροφοριοκεντρική προσαρμογή* (ΠΚΠ, κεφάλαιο 8.5) μπορεί να βασίζεται σε παραμέτρους, όπως π.χ. το TTL (υπολειπόμενος πλήθος προωθήσεων) που συνοδεύει τη διάδοση του μηνύματος RREQ στο AODV.

9.5 Πεδίο εφαρμογών

9.5.1 Περιοχές έρευνας

Το ερώτημα των εφαρμογών μεταπίπτει στο ερώτημα του σε ποιες περιπτώσεις υπάρχουν απαιτείται συμβιβασμός μεταξύ των αντικρουόμενων απαιτήσεων. Πολλές φορές, κάποια απαίτηση (π.χ. εξάπλωση της επιδημίας) έχει τόσο μεγάλη σημασία ώστε η ανάγκη ικανοποίησής της να μην υπόκειται σε συμβιβασμούς. Έτσι π.χ. μπορεί η επείγουσα ανάγκη εξάπλωσης της πληροφορίας να αγνοεί την ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας.

Οι προφανέστερες περιοχές έρευνας στις οποίες έχει νόημα η εφαρμογή τέτοιων σχημάτων Π.Ε.Δ. είναι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης και η τεχνική διάχυσης πληροφορίας Directed Diffusion.

Ας θεωρήσουμε ένα περιβάλλον Directed Diffusion στο οποίο κάποιος κόμβος διαχέει το ενδιαφέρον του για κάποια δεδομένα, π.χ. μετρήσεις αισθητήρων. Η διάχυση του ενδιαφέροντος αυτού είναι πρόβλημα ΕΔ. Μια απλή εφαρμογή θα ήταν λοιπόν ο περιορισμός των εκπομπών του μηνύματος τα οποία φέρουν τη διαφήμιση αυτή. Με ευφυή προσαρμογή, μπορεί να εξαπλωθεί επαρκώς το ενδιαφέρον εξοικονομώντας ενέργεια. Η πιθανή καθυστέρηση στην εξάπλωση θα πρέπει να αξιολογηθεί στα πλαίσια των αναγκών της εφαρμογής.

Το περιβάλλον του Directed Diffusion προσφέρεται επί πλέον και για εκμετάλλευση των ιδιοτήτων ή του περιεχομένου της ίδιας της διαχεόμενης πληροφορίας στα πλαίσια σχήματος Π.Ε.Δ. Πρόκειται δηλαδή για υποψήφιο πεδίο εφαρμογής της πληροφοριοκεντρικής εκδοχής των προτεινόμενων σ' αυτή τη μελέτη σχημάτων.

Για παράδειγμα, ιδιότητες της διαχεόμενου ενδιαφέροντος (πίνακας 26), όπως χρόνος εκπνοής (*expiresAt*) και ζητούμενη συχνότητα εκπομπών (*interval*) είναι εύλογες υποψήφιος. Το σχήμα Π.Ε.Δ. μπορεί να εκμεταλλευθεί την επίγνωσή τους για να επιβάλλει μεροληπτική προώθηση του διαχεόμενου μηνύματος. Για παράδειγμα, μπορεί να ενισχύεται η πιθανότητα προώθησης (η ποσότητα β που είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια) όταν το δημοσιευόμενο ενδιαφέρον απαιτεί συχνή πληροφόρηση, δηλαδή χαμηλή τιμή *interval* κατά το παράδειγμα του πίνακα 26.

Πίνακας 26: Παράδειγμα ιδιοτήτων ενδιαφέροντος διαφημιζόμενου με τεχνική Directed Diffusion

<i>type</i>	four-legged animal
<i>interval</i>	10ms
<i>rect</i>	10ms
<i>timestamp</i>	10ms
<i>expiresAt</i>	01:30:40

Στα πρωτόκολλα δρομολόγησης, τώρα, το προφανέστερο πεδίο εφαρμογής είναι η διάχυση του μηνύματος ζήτησης μονοπατιού (RREQ) με την οποία εκκινείται η διαδικασία ανακάλυψης μονοπατιού. Η περίπτωση του AODV και «συγγενών» του πρωτοκόλλων,

Πίνακας 27: Περιοχές έρευνας ως πιθανά πεδία εφαρμογής

Εφαρμογή	Χαρακτηριστικά
Directed Diffusion	Ρύθμιση διαφήμισης ενδιαφέροντος. Εκμετάλλευση πληροφορίας όπως <code>interval</code> και <code>expiresAt</code> για μεροληπτική προώθηση. Εκμετάλλευση επίγνωσης πλαισίου.
AODV, LOADng	Περιορισμός εκπομπών RREQ. Εκμετάλλευση πληροφορίας όπως TTL, χρόνος ζωής, πλήθος αλμάτων, πηγή ή προορισμός
DSR	Ρύθμιση εκπομπών RREQ. Κρίσιμο σε μεγάλα δίκτυα λόγω <code>source routing</code> (αυξανόμενο μήκος μηνύματος)
MPL	Περιορισμός ρυθμού πολυεκπομπής των δεδομένων. Ουσιαστικά ευρυεκπομπή εντός ομάδας προωθητών.

όπως το LOADng καλύπτεται ήδη από την παρούσα μελέτη. Η πληροφοριοκεντρική προσαρμογή μπορεί να εκμεταλλεύεται πληροφορία που σχετίζεται με το ίδιο το πρωτόκολλο του οποίου τα μηνύματα διαχέονται: TTL, πλήθος αλμάτων (`hop count`), κόμβος-πηγή, κόμβος-προορισμός, κ.λ.π.

Υπάρχουν κι άλλα πρωτόκολλα, τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν πεδίο εφαρμογής και λόγω των χαρακτηριστικών τους, αξίζουν ειδική μνεία.

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το DSR. Αυτό επίσης χρησιμοποιεί τη διάχυση μηνύματος ζήτησης μονοπατιού, αλλά έχει μια σημαντική διαφορά: δε συντηρεί και δε χρησιμοποιεί καθόλου πίνακες δρομολόγησης. Αντ' αυτού, η δρομολόγηση των μηνυμάτων γίνεται με την τεχνική `source routing`. Αυτό έχει ως άμεση συνέπεια τη συνεχή επιμήκυνση του μηνύματος ζήτησης μονοπατιού καθώς αυτό διασχίζει το δίκτυο. Συνεπώς, η ενεργειακή αξιολόγηση για ένα τέτοιου είδους πρωτόκολλο, δε μπορεί παρά να παρουσιάζει διαφορές από π.χ. αυτήν του LOADng και του AODV.

Τέλος, μια ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι το νεώτερο πρωτόκολλο MPL. Αυτό βασίζεται στο πρωτόκολλο `IPv6` στο στρώμα δικτύου (κατά OSI). Στο `IPv6` δεν υπάρχουν ευρυεκπομπές, παρά μόνο πολυεκπομπές (`multicast`). Στο MPL, η *πληροφορία χρήση* και όχι κάποιο μήνυμα ζήτησης μονοπατιού διαδίδεται με πολυεκπομπές.

Επομένως αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί ως πρόβλημα Ε.Δ. ή Π.Ε.Δ. μεταξύ των συμμετεχόντων κόμβων στην πολυεκπομπή, οι οποίοι λέγονται προωθητές (`forwarders`). Όμως, από ενεργειακή άποψη, πρέπει να ληφθεί υπ' όψη το ότι ακόμα και στην πολυεκπομπή, οι κόμβοι οι *μη* συμμετέχοντες (μη θεωρούμενοι ως παραλήπτες) επιβαρύνονται με περιττό ενεργειακό κόστος (`collateral energy cost`) λόγω της αναπόφευκτης («ακούσιας») λήψης ασυρματικών εκπομπών στη γειτονιά τους από τους συμμετέχοντες.

Τα πιο πάνω συνοψίζονται στον πίνακα 27.

9.5.2 Εφαρμογές

Οι υποθέσεις εργασίας οι οποίες έγιναν κατά την ερευνητική διαπραγμάτευση των προηγούμενων κεφαλαίων μεταφράζονται σε προϋποθέσεις για να είναι μια περιοχή πεδίο εφαρμογής της Π.Ε.Δ. όπως αυτή αναπτύχθηκε στην παρούσα μελέτη.

Εφαρμογές όπως η παρακολούθηση οικοσυστημάτων και η ανίχνευση φυσικών καταστροφών είναι προφανείς υποψήφιες για την εφαρμογή της Π.Ε.Δ. Τέτοιες λειτουργίες στηρίζονται στη διαβίβαση σχετικά λίγων δεδομένων (συνήθως μετρήσεων) από κόμβους-αισθητήρες οι οποίοι παρουσιάζουν σχετικά χαμηλή κινητικότητα. Ο πακτωμένος αισθητήρας θερμοκρασίας είναι ένα τέτοιο παράδειγμα. Ο αισθητήρας θέσης ενός ζώου σίγουρα παρουσιάζει κινητικότητα, αλλά πολύ μικρότερη από αυτήν που απαντάται σε εποχούμενα δίκτυα (vehicular networks).

Ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι και η χρήση ασυρμάτου αδόμητου δικτύου από ομάδες ταχείας ανταπόκρισης σε φυσικές καταστροφές. Τα μέλη τέτοιων ομάδων έχουν ανάγκη ανταλλαγής πληροφοριών σε περιστάσεις στις οποίες τα δίκτυα με υποδομή (GPRS, LTE, κ.λ.π.) βρίσκονται εκτός λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει κινητικότητα σε κάποιο βαθμό τουλάχιστον. Τα δεδομένα μπορεί να είναι από πολύ μικρά (μετρήσεις αισθητήρων) ως μεγαλύτερα (βίντεο). Ενδιαφέρον παρουσιάζει εδώ η δυνατότητα πληροφοριοκεντρικής προσαρμογής (μεροληπτικής προώθησης της επιδημίας). Χρήση χαρακτηρισμών ως προς το επείγον της φερόμενης πληροφορίας ή δημοσίευση ενδιαφέροντος σύμφωνα με την τεχνική Directed Diffusion [117] αποτελούν πρόσφορο έδαφος εφαρμογής πληροφοριοκεντρικής προσαρμογής στην Π.Ε.Δ.

Οι εφαρμογές για εποχούμενα δίκτυα παρουσιάζουν απαιτήσεις που αποκλίνουν από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν μέχρι τώρα. Στα δίκτυα αυτά (υποκεφάλαιο 3.2) παρουσιάζεται υψηλή κινητικότητα και διακοπτόμενη συνδεσιμότητα μεταξύ αρχικών πομπών και παραληπτών της πληροφορίας. Συνεπώς δεν αποτελούν την πιο εύλογη εφαρμογή της Π.Ε.Δ. όπως εξετάστηκε στην παρούσα μελέτη. Από την άλλη μεριά, τα δίκτυα έξυπνων συγκοινωνιών θα μπορούσαν να επωφεληθούν εάν οι σταθμοί βάσης χρησιμοποιούν ένα τέτοιο σχήμα με στόχο τη διάχυση πληροφορίας μεταξύ τους και σε διερχόμενους εποχούμενους κόμβους.

Τα πιο πάνω συνοψίζονται στον πίνακα 28.

Πίνακας 28: Πρακτικές εφαρμογές

Εφαρμογή	Χαρακτηριστικά
Παρακολούθηση οικοσυστημάτων	Σχετικά ήπια κινητικότητα, λίγα δεδομένα
Ανίχνευση φυσικών καταστροφών	Σχετικά ήπια κινητικότητα, λίγα δεδομένα, χαρακτηρισμός επείγοντος
Επιχειρήσεις διάσωσης	Κινητικότητα, περιεχόμενο μπορεί να παίζει ρόλο στη διάδοση, π.χ. ένδειξη επείγοντος. Ίσως μεγάλα δεδομένα.
Έξυπνες συγκοινωνίες	Κινητικότητα, μεγαλύτερο ενεργειακό απόθεμα. Για σταθμούς βάσης. Όχι για οχήματα.
Έξυπνες πόλεις, κοινές εφαρμογές WSN	Κινητικότητα από καθόλου ως μέτρια, λίγα δεδομένα.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

10.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της έρευνας που ανακεφαλαιώνεται εδώ, προσπαθήσαμε να βελτιώσουμε τις επιδόσεις της προσαρμοστικής επιδημικής διάδοσης αποστασιοποιούμενοι από ευριστικές τακτικές και εκμεταλλευόμενοι το φορμαλισμό και τα συμπεράσματα που μας δίνει η πρόσφατη έρευνα στη διαστρωματική μοντελοποίηση των δικτύων.

Προβάλλεται ο ανταγωνισμός μεταξύ διαφορετικών αναγκών στην προσαρμοστική επιδημική διάδοση πληροφορίας. Η επίτευξη συμβιβασμού μεταξύ τους επιχειρείται με τη χρήση μηχανισμών βέλτιστης παύσης οι οποίοι εκμεταλλεύονται τον ενδογενή διαστρωματικό χαρακτήρα της Π.Ε.Δ. Τα οφέλη που αποκομίζονται θα μπορούσαν να συνοψισθούν ως ακολούθως:

- Αναδεικνύεται η ανάγκη να βρεθεί ισορροπία ανάμεσα στις διαφορετικές απαιτήσεις για ευρεία διάδοση, για εξοικονόμηση ενέργειας από κόμβους χαμηλών δυνατοτήτων και για διατήρηση και βελτίωση ποιότητας πληροφορίας. Η τελευταία εκλαμβάνεται ανάλογα με το πρόβλημα και τον σχετικό με αυτό ορισμό της.
- Προτείνεται η χρήση συναρτήσεων οφέλους διαστρωματικής φύσης και η αξιοποίησή τους με βέλτιστη παύση. Οι συναρτήσεις αυτές αξιοποιούνται για να προσαρμοστεί η επιδημική διάδοση ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες.
- Το πρόβλημα διατυπώνεται ως πρόβλημα βέλτιστης παύσης και παρουσιάζεται η εξισορρόπηση μεταξύ των αντικρουόμενων απαιτήσεων με αξιοποίηση επίγνωσης πλαισίου διαστρωματικής φύσης.
- Δείχνεται η δυνατότητα σοβαρής εξοικονόμησης ενέργειας στη βάση του ανταγωνισμού ενέργειας- μόλυνσης.
- Προτείνονται εφαρμογές στη δρομολόγηση στα αδόμητα δίκτυα και αναδεικνύεται ο ανταγωνισμός ενέργειας-καθυστερήσης και ενέργειας-ποιότητας πληροφορίας ή ποιότητας υπηρεσίας.

10.2 Μελλοντική έρευνα

Η μελέτη που παρουσιάστηκε στην παρούσα διατριβή άπτεται πολλών ερευνητικών περιοχών.

Η πληροφοριοκεντρική προσαρμογή που περιεγράφη στο υποκεφάλαιο 8.6 αποτελεί μια από τις πιο συναρπαστικές επιλογές μελλοντικής έρευνας. Στη έρευνά μας ρυθμίστηκε η πιθανότητα εκπομπής βάσει της επίγνωσης πληροφορίας πλαισίου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των SNR των καναλιών στα οποία συμμετέχει ο κάθε κόμβος. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η ίδια ή παρόμοια επίγνωση πληροφορίας πλαισίου

για την αξιολόγηση των διαφόρων ανακαλυπτόμενων μονοπατιών. Η ιδέα του «κόστους» στα μονοπάτια που παρουσιάζονται σε πίνακες δρομολόγησης είναι καθιερωμένη ιδέα. Η συνεχής μεταβολή των συνθηκών απαιτεί και τη συχνή επαναξιολόγησή τους και τη μετάβαση από το ένα μονοπάτι στο άλλο ως προτιμώμενο. Η μετάβαση αυτή μπορεί να γίνεται με χρήση κατάλληλων συνθηκών β.π. ώστε να αποφεύγονται οι βιαστικές, σπασμωδικές μεταβολές.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι φυσικά ο κύριος χώρος εφαρμογής των παραπάνω ιδεών. Στενά συνυφασμένος με την απόδοση των εν λόγω πρωτοκόλλων είναι και ο χρόνος σύγκλισής τους, οπότε δε θα ήταν περιττή η μελέτη του σε μια βελτιωμένη έκδοση κάποιου πρωτοκόλλου.

Επίσης, τα μοντέλα κινητικότητας προσφέρουν ευρύ πεδίο περαιτέρω έρευνας. Στα αδόμητα ασύρματα δίκτυα η κινητικότητα μπορεί να γεννά διακοπές των συνδέσεων και γρήγορες μεταβολές της τοπολογίας.

Σε όλα τα σχήματα που παρουσιάστηκαν, υποτέθηκαν παρόμοια μοντέλα συμπεριφοράς του καναλιού και συθήκες β.π. Η επιλογή κατάλληλων συνθηκών β.π. σχετίζεται ισχυρά με το θεωρούμενο μοντέλο καναλιού. Με τη χρήση κατάλληλης μοντελοποίησης καναλιού, π.χ. με τυχαίο θόρυβο, παλμικό (Middleton-A), παρορμητικό παλμικό (Markov-Middleton), κ.λ.π. πρέπει να επιλέγονται οι κατάλληλες συνθήκες β.π. οι οποίες αποτρέπουν τις παρορμητικές προσαρμογές λόγω μιας απότομης αλλά παροδικής μεταβολής του περιβάλλοντος ή αντίθετα τις ακολουθούν για να αποφύγουν τη διακοπή της επικοινωνίας.

Τα δίκτυα χωρίς κλίμακα είναι ένας σχετικά νέος τομέας και η μελέτη της επιδημικής διάδοσης πληροφορίας σ' αυτά είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Τέτοια δίκτυα οποιουδήποτε είδους (όχι μόνο ασύρματα αλλά και π.χ. κοινωνικά) μπορούν να υφίστανται ταχείες μεταβολές συνθηκών λειτουργίας τους οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τη διάδοση της πληροφορίας. Ας θεωρήσουμε δίκτυο ιστοσελίδων σχηματιζόμενο από ειδησεογραφικές ιστοσελίδες. Σημαντικά γεγονότα στην ειδησεογραφία συνθέτουν το ταχέως μεταβαλλόμενο περιβάλλον διάδοσης όλων των ειδήσεων, σημαντικών και όχι. Έτσι την επομένη ενός σημαντικού γεγονότος, οι λιγότερο απρόσμενες ειδήσεις (οι πιο «αναμενόμενες») έχουν χαμηλότερη πιθανότητα να μεταδοθούν από έναν κόμβο σε άλλον και να τον *μολύνουν*, όπως είδαμε.

Το πιο ενδιαφέρον, ίσως, πεδίο έρευνας θα ήταν η πρακτική εφαρμογή των συμπερασμάτων της μελέτης. Αυτή θα απαιτούσε σημαντική προσπάθεια στην υλοποίηση ενδιάμεσου λογισμικού (middleware) στους κινητούς σταθμούς το οποίο θα αναλάμβανε το ρόλο του επιπέδου συντονισμού της διαστρωμάτωσης, όπως περιγράψαμε στο υποκεφάλαιο 5.1.2.

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ΕΔ	επιδημική διάδοση
Η/Μ	ηλεκτρομαγνητικός
ΠΕΔ	προσαρμοστική επιδημική διάδοση
ΠΚΚ	πληροφορία κατάστασης καναλιού
ΠΚΠ	πληροφοριοκεντρική προσαρμογή
ΠΔΚ	προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση ή προσ/κός διαμ/τής και κωδ/τής
ΣΔΚ	σύστημα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης
AMC	adaptive modulation and coding
AODV	ad hoc on-demand distance vector protocol
ARQ	automatic repeat request
AWGN	additive white gaussian noise
BER	bit error rate
BPSK	Binary phase-shift keying
CBS	counter-based scheme
CDF	cumulative distribution function
CQI	channel quality information
CSI	channel state information
DL	data link
DSR	dynamic source routing protocol
E29C	energy to 90% coverage
E2FC	energy to full coverage
EDGE	enhanced Data Rates for GSM Evolution
FP7	seventh Framework Programme
FSM	finite state machine
GPRS	general packet radio system

ksla	k-stage look-ahead
LOADng	lightweight On-demand Ad hoc Distance vector routing protocol, Next Generation
LTE	long term evolution
M2M	machine-to-machine
MAC	media access control
MANET	mobile ad hoc network
MCS	modulation and coding system
MPL	multicast protocol for low-power and lossy networks (MPL)
OSI	open systems interconnection
pdf	probability density function
PER	packet error rate
QoS	quality of service
QPSK	quadrature phase-shift keying (QPSK)
RREP	route reply message
RREQ	route request message
SIR	susceptible-infected-removed
SIRS	susceptible-infected-recovered-susceptible
SIS	susceptible-infected-susceptible
SNIR	signal-and-interference-to-noise ratio
SNR	signal-to-noise ratio
SoS	sum of sines
SPAN	smart phone ad hoc network
T29C	time to 90% coverage
T2FC	time to full coverage
TCP	transmission control protocol
TTL	time-to-live
UMTS	universal mobile telecommunications system
VANET	vehicular ad hoc network

WiFi	wireless fidelity
WSN	wireless sensor network
16-QAM	16 Quadrature amplitude modulation
1sla	one-stage look-ahead

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Theofanis Kontos, Evripidis Zaimidis, Christos Anagnostopoulos, Stathes Hadjiefthymiades, Evangelos Zervas, “An adaptive epidemic information dissemination scheme with cross-layer enhancements,” in *Proc. IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2011:230-235)*, (Corfu, Greece), Jul. 2011.
- [2] Theofanis Kontos, Christos Anagnostopoulos, Stathes Hadjiefthymiades, “Wireless Channel State-Aware and Adaptive Epidemic Dissemination in Ad Hoc Networks,” *IJWIN* 21(1): 58-67 (2014)
- [3] Theofanis Kontos, Christos Anagnostopoulos, Stathes Hadjiefthymiades, Evangelos Zervas, “Epidemic information dissemination controlled by wireless channel awareness,” *ISCC 2015*: 721-726
- [4] Theofanis Kontos, Christos Anagnostopoulos, Stathes Hadjiefthymiades, Evangelos Zervas, “Adaptive epidemic dissemination as a finite-horizon optimal stopping problem,” *Wireless Networks*, (), 1-18
- [5] Anagnostopoulos, Hadjiefthymiades, Zervas, “An analytical model for multi-epidemic information dissemination”, *Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC)*, Elsevier, vol. 71, issue 1, January 2011.
- [6] Alan J. Demers, Daniel H. Greene, Carl Hauser, Wes Irish, John Larson, Scott Shenker, Howard E. Sturgis, Daniel C. Swinehart, Douglas B. Terry, “Epidemic Algorithms for Replicated Database Maintenance,” *PODC 1987*: 1-12
- [7] Amin Vahdat, David Becker “Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks,” Technical Report CS-200006, Duke University
- [8] RFC 677: The Maintenance of Duplicate Databases
- [9] “A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics,” *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 115 (772): 700
- [10] Dietz K. “Transmission and control of arbovirus diseases,” *Epidemiology* (eds Ludwig D, Cooke KL, editors.), pp. 104–121 Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1974
- [11] Lidia Yamamoto, “Epidemic Dissemination in Ad Hoc Networks”, Extended Abstract, Dagstuhl Seminar 04411, Service Management and Self-Organization in IP-based Networks, Schloss Dagstuhl, Germany, October 2004.
- [12] Jau-Yang Chang and Pei-Hao Ju, “An efficient cluster-based power saving scheme for wireless sensor networks,” *EURASIP J. Wireless Comm. and Networking*, 2012:172, 2012.
- [13] E. Srie Vidhya Janani and P. Ganesh Kumar, “Energy efficient cluster based scheduling scheme for wireless sensor networks,” *The Scientific World Journal*, 2015, 2015.
- [14] N. Karthikeyan, V. Palanisamy, and K. Duraiswamy, “Reducing broadcast overhead using clustering based broadcast mechanism in mobile ad hoc networks,” *Journal of Computer Science*, 5(8):548–556, 2009.
- [15] Abdelmajid Khelil and Neeraj Suri “Gossiping: Adaptive and Reliable Broadcasting MANETs,” *Latin American Symposium on Dependable Computing 2007*, pp 123-141
- [16] Christos Anagnostopoulos, Odysseas Sekkas, Stathes Hadjiefthymiades: “An adaptive epidemic information dissemination model for wireless sensor networks,” *Pervasive and Mobile Computing* 8(5): 751-763 (2012)
- [17] P. Erdős, and A. Rényi. “On the evolution of random graphs,” *Publ. Math. Inst. Hungary. Acad. Sci.* (1960)
- [18] M. Cagalj, J.-P. Hubaux, and C. Enz. “Minimum-energy broadcast in all-wireless networks: NP-completeness and distribution issues,” *ACM MobiCom*, Atlanta, GA, USA, September 2002.
- [19] Crisostomo, S., Schilcher, U., Bettstetter, C., Barros, J.a., “Analysis of probabilistic flooding: how do we choose the right coin?” 2009 IEEE international Conference on Communications, ICC’09, pp. 2080–2085. IEEE Press, Piscataway, NJ, USA (2009)
- [20] Shibao Li, Linlin Lou, Li Hong “Directional Probabilistic Broadcast in Wireless Mobile Ad hoc Networks,” *Computational and Information Sciences (ICIS)*, 2013 Fifth International Conference on

- [21] Zygmunt J. Haas, Joseph Y. Halpern and Li Li, "Gossip-Based Ad Hoc Routing," IEEE INFOCOM, vol. 3, 2002, pp. 1707–1716
- [22] Patrick Th. Eugster, Rachid Guerraoui, "Hierarchical Probabilistic Multicast", Technical report, 2001
- [23] Alwi M. Bambhi and P. King, "AODV with dynamic power enhancement: Performance evaluation in MANETs," Journal of Communications Engineering and Networks, 2(1):23–33, 2014.
- [24] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci "Wireless sensor networks: a survey," Computer Networks 38(4): 393-422 (2002)
- [25] Ian F. Akyildiz, Mehmet Can Vuran *Wireless Sensor Networks*, Wiley, 2010.
- [26] Jeroen Hoebeke, Ingrid Moerman, Bart Dhoedt and Piet Demeester "An Overview of Mobile Ad Hoc Networks: Applications and Challenges," Journal of the communications networks 3(3). p.60-66 (2004)
- [27] Md Shahzamal, "Lightweight Mobile Ad-hoc Network Routing Protocols for Smartphones," CoRR abs/1804.02139 (2018)
- [28] Paul Baskett, Yi Shang, Wenjun Zeng, Brandon Guttersohn "SDNAN: Software-defined networking in ad hoc networks of smartphones," CCNC 2013: 861-862
- [29] Amitabh Mishra, *Security and Quality of Service in ad hoc Wireless Networks*, Cambridge University Press, 2008.
- [30] Subir Kumar Sarkar, T.G. Basavaraju and C. Puttamadappa, *Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Principles, Protocols, and Applications*., CRC Press, 20016.
- [31] <http://ipac.di.uoa.gr>
- [32] <http://idira.eu>
- [33] Magnus Frodigh, Per Johansson and Peter Larsson, "Wireless ad hoc networking—The art of networking without a network," Ericsson Review No. 4, 2000
- [34] J. Sarangapani, *Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Principles, Protocols, and Control*, CRC Press, 2007.
- [35] Marcelo G. Rubinstein, Igor M. Moraes, Miguel Elias, M. Campista, Luis Henrique M. K. Costa, and Otto Carlos M. B. Duarte "A Survey on Wireless Ad Hoc Networks," Mobile and Wireless Communication Networks pp 1-33.
- [36] Morteza Mohammadi Zanjireh and Hadi Larijani "A Survey on Centralized and Distributed Clustering Routing Algorithms for WSNs," Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2015 IEEE 81st.
- [37] Philo Juang, Hidekazu Oki, Yong Wang, Margaret Martonosi, Li-Shiuan Peh, and Daniel Rubenstein "Energy-Efficient Computing for Wildlife Tracking: Design Tradeoffs and Early Experiences with ZebraNet," ASPLOS 2002: 96-107
- [38] Klaus Herrmann, Kurt Geihs, "Self-Organization in Mobile Ad hoc Networks based on the Dynamics of Interaction," Erlangen, Germany, 2003, Frühjahrstreffen der GI-Fachgruppe Betriebssysteme. <http://www.kbs.cs.tu-berlin.de/publications/fulltext/gi0403.pdf>
- [39] Sooksan Panichpapiboon, Wasan Pattara-Atikom, "A Review of Information Dissemination Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks," 14(3): 784-798 (2012)
- [40] Fei Ye, Sumit Roy, Haobing Wang, "Efficient Data Dissemination in Vehicular Ad Hoc Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications 30(4): 769-779 (2012)
- [41] S. Ni, Y. Tseng, Y. Chen, and J. Sheu, "The Broadcast Storm Problem in Mobile Ad Hoc Networks," *Wireless Networks*, vol. 8, Numbers 2-3, pp. 153-167, Dec. 1997.
- [42] Doufexi, Armour, Butler, Nix et al. "A Comparison of the HIPERLAN/2 and IEEE 802.11a Wireless LAN Standards," *IEEE Communications Magazine*, May 2002.
- [43] Garbinato, Rochat, Tomassini, Vessaz, "Heterogeneous epidemic model for assessing data dissemination in opportunistic networks," *Future Generation Computer Systems*, vol. 26 issue 6, June 2010.
- [44] Elena Fasolo, Michele Rossi, Jörg Widmer, Michele Zorzi, "In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey," IEEE Wireless Commun. 14(2): 70-87 (2007).
- [45] Ramesh Rajagopalan and Pramod K. Varshney, "Data aggregation techniques in sensor networks: A survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials (Volume: 8, Issue: 4, Fourth Quarter 2006).
- [46] N.F. Zhao, L. Guibas *Wireless Sensor Networks*, Morgan Kaufmann, 2004
- [47] Z. Xiong, A. D. Liveris, and S. Cheng, "Distributed source coding for sensor networks," IEEE Signal Processing Mag., vol. 21, no. 5, pp. 80–94, Sep. 2004.

- [48] T. He, S. Krishnamurthy, J. A. Stankovic, T. Abdelzaher, L. Luo, R. Stoleru, T. Yan, L. Gu, J. Hui, B. Krogh, "Energy-efficient surveillance system using wireless sensor networks", *Proc. of 2nd Intl. Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services, (ACM MobiSys '04)*, (Boston, MA, USA), pp. 270-283, June 2004.
- [49] Hethcote, H. W. (1976) "Qualitative analyses of communicable disease models," *Math. Biosc.*, 28, 335-356.
- [50] Nicholas Valler, B. Aditya Prakash, Hanghang Tong, Michalis Faloutsos, Christos Faloutsos, "Epidemic Spread in Mobile Ad Hoc Networks: Determining the Tipping Point," *Networking (1)* 2011: 266-280
- [51] Mohammad Reza Sanatkar, Warren N. White, Balasubramaniam Natarajan, Caterina M. Scoglio, Karen A. Garrett, "Epidemic Threshold of an SIS Model in Dynamic Switching Networks," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 46(3): 345-355 (2016)
- [52] Eugenio Valdano, Luca Ferreri, Chiara Poletto and Vittoria Colizza "Analytical Computation of the Epidemic Threshold on Temporal Networks," *Phys. Rev. X* 5, 021005 – Published 8 April 2015
- [53] Deepayan Chakrabarti, Yang Wang, Chenxi Wang, Jure Leskovec, Christos Faloutsos, "Epidemic thresholds in real networks," *ACM Trans. Inf. Syst. Secur.* 10(4): 1:1-1:26 (2008).
- [54] Kephart, J. O. and White, S. R. "Directed-graph epidemiological models of computer viruses," *Proceedings of the 1991 IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy.* 343–359.
- [55] Vadim Alexeev, Liudmila Rozanova, Alexander Temerev, "Heterogeneous epidemic model for assessing data dissemination in opportunistic networks," in *Proc. 9th International Conference on Future Networks and Communications (FNC 2014)*, (Ontario, Canada), 17-20th of August, 2014.
- [56] X. Fu, M. Small and G. Chen *Propagation Dynamics on Complex networks*, Wiley, 2014
- [57] Patrick T. Eugster, Rachid Guerraoui, Anne-Marie Kermarrec, Laurent Massoulié "Epidemic Information Dissemination in Distributed Systems," *IEEE Computer* 37(5): 60-67 (2004).
- [58] Nåsell "On the time to extinction in recurrent epidemics," *J. Roy. Statist. Soc. B*.61, 309-330.
- [59] S. Voulgaris, M. Jelasity, and M. van Steen, "A Robust and Scalable Peer-to-Peer Gossiping Protocol," *Proc. 2nd Int'l Workshop Agents and Peer-to-Peer Computing, LNCS 2872*, Springer, 2003.
- [60] Irem Nizamoglu, Sinem Coleri Ergen, and Ozgur Ozkasap "EpiDOL: Epidemic Density Adaptive Data Dissemination Exploiting Opposite Lane in VANETs," *EUNICE 2013*: 221-232.
- [61] Wendi Rabiner Heinzelman, Joanna Kulik, Hari Balakrishnan "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," *MobiCom 1999*: 174-185.
- [62] M. Bani Yassein, M. Bani Khalaf "A Performance Comparison of Smart Probabilistic Broadcasting of Ad hoc Distance vector (AODV)," *Journal of Supercomputing* 53 (1), 196-211.
- [63] Miguel Matos, Valerio Schiavoni, Pascal Felber, Rui Oliveira, Etienne Riviere "BRISA: Combining Efficiency and Reliability in Epidemic Data Dissemination," *IPDPS 2012*: 983-994.
- [64] Massimo Vecchio, Aline Carneiro Viana, Artur Ziviani, Roy Friedman, "DEEP: Density-based proactive data dissemination protocol for wireless sensor networks with uncontrolled sink mobility," *Computer Communications* 33(8): 929-939 (2010).
- [65] Cigdem Sengul, Aline Carneiro Viana, Artur Ziviani "A Survey of Adaptive Services to Cope with Dynamics in Wireless Self-Organizing Networks," *ACM Comput. Surv.* 44(4): 23:1-23:35 (2012).
- [66] Patrick Th. Eugster, Rachid Guerraoui, Sidath B. Handurukande, Petr Kouznetsov, Anne-Marie Kermarrec "Lightweight Probabilistic Broadcast," *ACM Trans. Computer Systems*, vol. 21, no. 4, 2003, pp. 341-374.
- [67] Meng-Jang Lin, Keith Marzullo, Stefano Masini "Gossip versus Deterministically Constrained Flooding on small networks," *DISC 2000*: 253-267.
- [68] Nestor Mariyasagayam, Hamid Menouar, Massimiliano Lenardi, "An Adaptive Forwarding Mechanism for Data Dissemination in Vehicular Networks" *VNC 2009*: 1-5.
- [69] C. Anagnostopoulos, O. Sekkas, S. Hadjiefthymiades, "An adaptive epidemic information dissemination model for wireless sensor networks," *Pervasive and Mobile Computing Journal*, vol. 8, issue 5, pp. 751-763, October 2012.
- [70] Reka Albert and Albert-Laszlo Barabasi "Statistical mechanics of complex networks," *Reviews of modern physics*, 74(1):47, 2002.

- [71] Chiu, Dah-Ming; Raj Jain, "Analysis of increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks," *Computer Networks and ISDN systems*. 17: 1–14, 1989.
- [72] Romualdo Pastor-Satorras and Alessandro Vespignani "Epidemic spreading in scale-free networks," *Phys. Rev. Lett.* 86, 3200–3203 (2001)
- [73] Zygmunt J. Haas, "Design methodologies for adaptive and multimedia networks," *IEEE Communications Magazine*, Volume: 39 Issue: 11, November 2001.
- [74] Mihaela van der Schaar, Sai Shankar, "Cross-Layer Wireless Multimedia Transmission: Challenges, Principles, and New Paradigms," *IEEE Wireless Commun.* 12(4): 50-58 (2005).
- [75] Vineet Srivastava, Mehul Motani, "Cross-Layer Design: A Survey and the Road Ahead," *IEEE Communications Magazine* 43(12): 112-119 (2005).
- [76] Ian F. Akyildiz, Xudong Wang, "Cross-Layer Design in Wireless Mesh Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 57, No. 2, March 2008.
- [77] Van der Schaar, M., Krishnamachari, S. and Choi, S., "Adaptive Cross-Layer Protection Strategies for Robust Scalable Video Transmission Over 802.11 WLANs," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol 21, no.10. (2003).
- [78] Nicholas Mastrorade, Francesco Verde, Donatella Darsena, Anna Scaglione, Mihaela van der Schaar, "A decentralized cross-layer approach to cooperative video transmission," *GLOBECOM 2011*: 1-6.
- [79] Proakis, Saleh, *Digital Communications*, Mc Graw-Hill, Fifth Edition, 2008.
- [80] T. Shongwe, A. J. Han Vinck, and H. C. Ferreira, "A study on impulse noise and its models," *SAIEE Africa Research Journal*, vol.106, no.3, pp.119-131, Sept. 2015.
- [81] D. Middleton, *An introduction to statistical communication theory*, McGraw-Hill New York, 1960, vol. 960.
- [82] Ndo, Labeau, Kassouf "A Markov-Middleton Model for Bursty Impulsive Noise: Modeling and Receiver Design," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 28 Issue: 4, Oct. 2013.
- [83] E. N. Gilbert "Capacity of a burst-noise channel," *The Bell System Technical Journal* (Volume: 39, Issue: 5, Sept. 1960).
- [84] William C. Jakes, Editor (February 1, 1975), *Microwave Mobile Communications*, New York: John Wiley & Sons Inc.
- [85] Paetzold, Laue "Statistical properties of Jakes' fading channel simulator," 48th IEEE Vehicular Technology Conference, 1998. VTC 98.
- [86] Qingqing Zhang, Kassam, S.A., "Finite-state Markov model for Rayleigh fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, No. 11, 1999.
- [87] M. Pop and N. Beaulieu, "Limitations of Sum-of-Sinusoids Fading Channel Simulators," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, No. 4, April 2001.
- [88] E. O. Elliott, "Estimates of error rates for codes on burst-noise channels," *The Bell System Technical Journal* (Volume: 42, Issue: 5, Sept. 1963)
- [89] "Finite-state Markov channel—A useful model for radio communication channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 44, pp. 163–171, Feb. 1995.
- [90] K. Sam Shanmugam, *Digital and Analog Communication Systems*, Wiley, First Edition, 1979.
- [91] Shu Lin, Daniel J. Costello, *Error Control Coding*, Pearson, First Edition, 1983.
- [92] Qingwen Liu, Shengli Zhou, and Georgios B. Giannakis, "Cross-Layer Combining of Adaptive Modulation and Coding With Truncated ARQ Over Wireless Links", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, issue 5, pp. 1746-1755, Sept. 2004.
- [93] Martin Sauter, *From GSM to LTE: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*, Wiley, 2011.
- [94] M.-S. Alouini and A. J. Goldsmith "Adaptive modulation over Nakagami fading channels," *Kluwer J. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 1–2, pp. 119–143, May 2000.
- [95] A. J. Goldsmith and S.-G. Chua, "Adaptive coded modulation for fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, pp. 595–602, May 1998.
- [96] W. T. Webb and R. Steele, "Variable rate QAM for mobile radio," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, pp. 2223–2230, July 1995.
- [97] "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding," 3GPP TS 36.212 version 9.2.0 Release 9.

- [98] "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures," TS 36.213 version 8.5.0 Release 8.
- [99] "Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band," IEEE 802.11g-2003.
- [100] "IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz," IEEE SA - 802.11ac-2013.
- [101] "IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC)and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput," IEEE 802.11n-2009.
- [102] General Packet Radio System, 3GPP TS 23.060.
- [103] Albert Barabasi, *Network Science*, <http://networksciencebook.com>
- [104] R. Cohen and S. Havlin, "Scale free networks are ultrasmall," *Phys. Rev. Lett.* 90, 058701, 2003.
- [105] N.W. Aschroft, N. D. Mermin *Solid State Physics*, Saunders College, 1976
- [106] Bookstein, Abraham, "Informetric distributions, part I: Unified overview," *Journal of the American Society for Information Science*, 41 (5): 368–375, doi:10.1002/(SICI)1097-4571(199007)41:5<368::AID-ASI8>3.0.CO;2-C
- [107] Ayalvadi J. Ganesh, Laurent Massoulié, Donald F. Towsley, "The effect of network topology on the spread of epidemics," *INFOCOM 2005*: 1455-1466
- [108] Eguiluz, Klemm, "Epidemic Threshold in Structured Scale-Free Networks," *Phys Rev Lett*, vol 89, num 10, Sept 2002
- [109] Satoru Morita, "Six Susceptible-Infected-Susceptible Models on Scale-free Networks," *Scientific Reports* 6, 22506 (2016)
- [110] A. N. Shiryaef, *Optimal Stopping Rules*, Springer, 2008.
- [111] Thomas S. Ferguson, "Optimal Stopping and Applications," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012:318, 2012.
- [112] Fangwen Fu and Mihaela van der Schaar, "Dependent Optimal Stopping Framework for Wireless Multimedia Transmission," *ICASSP 2010*: 2354-2357.
- [113] M. Conti, G. Maselli, and G. Turi, "Cross-layering in a mobile ad hoc network design," *IEEE Comp. Soc.*, Feb. 2004, pp 4851, Commercial Implementation (2004)
- [114] K. Καρούμπalos, *Θεωρία Θορύβου*, Αθήνα, 1990.
- [115] Onnela, J. -P.; Saramaki, J.; Hyvonen, J.; Szabo, G.; Lazer, D.; Kaski, K.; Kertesz, J.; Barabasi, A. -L. "Structure and tie strengths in mobile communication networks," *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 104 (18): 7332–7336.
- [116] Choromanski, K.; Matuszak, M.; MieKisz, J. (2013). "Scale-Free Graph with Preferential Attachment and Evolving Internal Vertex Structure," *Journal of Statistical Physics*. 151 (6): 1175–1183.
- [117] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, Deborah Estrin, "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks," *MobiCom 2000*: 56-67.
- [118] RFC 3561: Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing
- [119] RFC 4728: The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4
- [120] Thomas H. Clausen, Jiazi Yi, Axel Colin de Verdiere "LOADng: Towards AODV Version 2," *VTC Fall 2012*: 1-5
- [121] RFC761: Internet Protocol, DARPA Internet Program, Protocol Specification
- [122] Multicast Protocol for Low-Power and Lossy Networks (MPL)
- [123] Venetis Kanakaris, David Ndzi, and Kyriakos Ovaliadis, "Improving AODV performance using dynamic density driven route request forwarding," *CoRR*, abs/1107.3630, 2011. 31565
- [124] Venetis Kanakaris, David Ndzi, Kyriakos Ovaliadis, and Yanyan Yang, "A new RREQ message forwarding technique based on bayesian probability theory," *EURASIP J. Wireless Comm. and Networking*, 2012:318, 2012.

