

Πανεπιστήμιο Πατρών
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής

Διδακτορική Διατριβή

**Σχεδιασμός, Προσομοίωση και Αξιολόγηση
Ενεργειακά Αποδοτικών Αλγορίθμων
για Ασύρματα Δίκτυα Μικροαισθητήρων**

Αθανάσιος Κίναλης

Επιβλέπων

Σωτήρης Νικολετσέας, Επίκουρος Καθηγητής

Πάτρα, Δεκέμβριος 2008

Πανεπιστήμιο Πατρών
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής

Διδακτορική Διατριβή

**Σχεδιασμός, Προσομοίωση και Αξιολόγηση
Ενεργειακά Αποδοτικών Αλγορίθμων
για Ασύρματα Δίκτυα Μικροαισθητήρων**

Αθανάσιος Κίναλης

Επιβλέπων

Σωτήρης Νικολετσέας, Επίκουρος Καθηγητής

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Χρήστος Κακλαμάνης, Καθηγητής

Σωτήρης Νικολετσέας, Επίκουρος Καθηγητής

Παύλος Σπυράκης, Καθηγητής

Εξεταστική Επιτροπή

Εμμανουήλ Βαρβαρίγος, Καθηγητής

Ιωάννης Γαροφαλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Παναγιώτης Τριανταφύλλου, Καθηγητής

Αθανάσιος Τσακαλίδης, Καθηγητής

Πάτρα, Δεκέμβριος 2008

Πρόλογος

Τα ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων αποτελούνται από ένα πολύ μεγάλο πλήθος συσκευών που τοποθετούνται σε μία περιοχή ενδιαφέροντος και αυτο-οργανώνονται σε ένα αδόμητο δίκτυο, προκειμένου να καταγράψουν/μετρήσουν/παρακολουθήσουν κάποια περιβαλλοντική μετρική ή φαινόμενο και εν συνεχεία να μεταφέρουν τα δεδομένα σε κάποιο κέντρο ελέγχου. Λόγω των πολύ περιορισμένων δυνατοτήτων των συσκευών, ειδικά όσον αφορά την εμβέλεια επικοινωνίας και τα αποθέματα ενέργειας, αλλά και λόγω του μεγάλου πλήθους τους, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη νέων αλγορίθμων και πρωτοκόλλων σχεδιασμένων για τα ιδιαίτερα προβλήματα των δικτύων αισθητήρων.

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζουμε έρευνα επικεντρωμένη στην ανάπτυξη, προσομοίωση και αξιολόγηση ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων, βασικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Παρά τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας του υλικού, το πρόβλημα βελτιστοποίησης της ενέργειας των συσκευών αισθητήρων παραμένει επίκαιρο αφού οι υπάρχουσες και άμεσα διαφαινόμενες λύσεις μέσω υλικού δεν έχουν δώσει ικανοποιητική απάντηση.

Επικεντρώνουμε την έρευνά μας σε τρεις βασικές κατευθύνσεις που στοχεύουν στην εξοικονόμηση και βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας σε διαφορετικά επίπεδα. Κοινός στόχος είναι η μείωση του κόστους επικοινωνίας, μέσω της ανάδειξης καινοτόμων τεχνικών που δίνουν ώθηση στην ανάπτυξη νέων αλγορίθμων. Συγκεκριμένα, διερευνήσαμε τεχνικές *κατανεμημένης προσαρμογής* της λειτουργίας ενός πρωτοκόλλου όπου χρησιμοποιούμε πληροφορία διαθέσιμη τοπικά σε κάθε κόμβο ώστε με καθαρά τοπικές επιλογές, να βελτιώσουμε τη συνολική συμπεριφορά και απόδοση ενός πρωτοκόλλου. Επίσης προτείνουμε *τεχνικές τοπικής συλλογής και εκμετάλλευσης περιορισμένης γνώσης* των συνθηκών του δικτύου. Με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο συλλέγουμε επιπλέον πληροφορία που χρησιμοποιούμε προκειμένου να επιτευχθούν βελτιστοποιήσεις όπως ο σχηματισμός ενεργειακά αποδοτικών, χαμηλής καθυστέρησης και ανθεκτικών σε σφάλματα μονοπατιών για μετάδοση δεδομένων. Ακόμα, διερευνούμε *τεχνικές διαχείρισης της κινητικότητας* σε περιπτώσεις δικτύων όπου χαρακτηριστικό είναι η κίνηση τόσο του κέντρου ελέγχου όσο και των συσκευών αισθητήρων. Εξετάσαμε μεθόδους διαπέρασης και κάλυψης του δικτύου από κινητά κέντρα ελέγχου που βασίζονται σε πιθανοτική κίνηση που ευνοεί την επίσκεψη κάποιων περιοχών με βάση τοπικά κριτήρια (συχνότητα προηγούμενων επισκέψεων, τοπική πυκνότητα δικτύου).

Οι αλγόριθμοι που αναπτύσσουμε βασισμένοι σε αυτές τις τεχνικές λειτουργούν α) σε επίπεδο διαχείρισης της ίδιας της συσκευής, β) σε επίπεδο πρωτοκόλλου δρομολόγησης και γ) συνολικά σε επίπεδο δικτύου, αναδεικνύοντας μακροσκοπική συμπεριφορά μέσα από τοπικές αλληλεπιδράσεις. Οι αλγόριθμοι εφαρμόζονται σε περιπτώσεις δικτύων με διαφορές στην πυκνότητα, κατανομή κόμβων, διαθέσιμη ενέργεια αλλά και με ριζικές διαφοροποιήσεις στο μοντέλο αφού εξετάζουμε δίκτυα με παρουσία σφαλμάτων, σταδιακή ανάπτυξη κόμβων ακόμα και με κινούμενους κόμβους. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις οι τεχνικές μας πετυχαίνουν σημαντικά οφέλη γεγονός που αναδεικνύει την αξία τους σαν εργαλεία αλγοριθμικής σχεδίασης.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που στήριξε την προσπάθειά μου όλα αυτά τα χρόνια. Η υπομονή και κατανόηση που έδειξαν μου έδωσε κουράγιο στο να ολοκληρώσω την εργασία αυτή, γι' αυτό το λόγο τους την αφιερώνω.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Σωτήρη Νικολετσέα, Επίκουρο Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πατρών, για την βοήθεια που μου παρείχε όποτε την χρειάστηκα, την καθοδήγηση και την εποικοδομητική συνεργασία μας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστώ τους συνεργάτες και φίλους Δρ. Ιωάννη Χατζηγιαννάκη, Χαρίλαο Ευθυμίου, Χριστόφορο Ραπτόπουλο, Γιώργο Μυλωνά και Παναγιώτα Παναγοπούλου για την βοήθεια και την παρέα τους στην παράλληλη πορεία μας αυτά τα χρόνια.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους υπόλοιπους φίλους μου, που με βοήθησαν στη διαμονή μου στην Πάτρα, μου κράτησαν παρέα και με ενθάρρυναν να συνεχίσω την προσπάθειά μου. Επίσης οφείλω να ζητήσω ένα μεγάλο συγνώμη από όσους παραμέλησα όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Αντικείμενο διατριβής	1
1.2	Βασικά προβλήματα	3
1.2.1	Το πρόβλημα αποδοτικής διαχείρισης πόρων και εξοικονόμησης ενέργειας σε δυναμικά δίκτυα μικροαισθητήρων	4
1.2.2	Το πρόβλημα της ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης δεδομένων	5
1.2.3	Το πρόβλημα της διαχείρισης της κινητικότητας σε δίκτυα μικροαισθητήρων	7
2	Προσαρμοστικές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας για αποδοτική διάδοση δεδομένων σε ετερογενή δίκτυα αισθητήρων	9
2.1	Εισαγωγή	9
2.1.1	Σχετική βιβλιογραφία και συζήτηση	10
2.1.2	Η προσέγγισή μας	11
2.2	Το μοντέλο	12
2.3	Προσαρμοστικό πρωτόκολλο για εξοικονόμηση ενέργειας APCP	14
2.3.1	Το υποπρωτόκολλο παρακολούθησης πυκνότητας (P_{density})	16
2.3.2	Το υποπρωτόκολλο μέτρησης ενέργειας (P_{energy})	16
2.4	Αρχιτεκτονική υλοποίησης των πρωτοκόλλων	18
2.5	Πειραματική αξιολόγηση	19
2.5.1	Οργάνωση των πειραμάτων	19
2.5.2	Μετρικές απόδοσης	20
2.5.3	Πειραματικά αποτελέσματα και αξιολόγηση	21
2.6	Συμπεράσματα και επεκτάσεις	34
3	Τεχνικές χρήσης περιορισμένης γνώσης για αποδοτική και ανθεκτική σε σφάλματα δρομολόγηση δεδομένων	41
3.1	Εισαγωγή	41
3.1.1	Η προσέγγισή μας	41
3.1.2	Σχετική βιβλιογραφία και συζήτηση	42
3.2	Μοντέλο	43
3.3	Το πρωτόκολλο CKN	45
3.3.1	Αρχικοποίηση πρωτοκόλλου	46
3.3.2	Η φάση αναμονής	47
3.3.3	Η φάση σχεδίασης μονοπατιού	49

3.3.4	Η φάση διάδοσης δεδομένων	52
3.3.5	Σχεδιαστικά θέματα του πρωτοκόλλου	53
3.4	Πειραματική αξιολόγηση	57
3.4.1	Μετρικές απόδοσης	57
3.4.2	Οργάνωση των πειραμάτων	58
3.4.3	Αποτελέσματα πειραμάτων	59
3.5	Συμπεράσματα και επεκτάσεις	76
4	Τεχνικές διαχείρισης κινητικότητας κέντρων ελέγχου για εξοικονόμηση ενέργειας	77
4.1	Εισαγωγή	77
4.1.1	Η προσέγγισή μας	79
4.1.2	Σχετική βιβλιογραφία και συζήτηση	79
4.2	Μοντελοποίηση δικτύων αισθητήρων με κινητό κέντρο ελέγχου	81
4.3	Τεχνικές για συλλογή δεδομένων με κινητό κέντρο ελέγχου	83
4.3.1	P1: Τυχαίος περίπατος με παθητική συλλογή δεδομένων	84
4.3.2	P2: Μερικός τυχαίος περίπατος με περιορισμένα μονοπάτια διάδοσης	85
4.3.3	P3: Ευνοιοκρατικός τυχαίος περίπατος με παθητική συλλογή δεδομένων	87
4.3.4	P4: Ντετερμινιστικός περίπατος με μονοπάτια διάδοσης μεγάλου βάθους	89
4.4	Πειραματική αξιολόγηση	91
4.4.1	Οργάνωση των πειραμάτων	91
4.4.2	Μετρικές απόδοσης	91
4.4.3	Αποτελέσματα πειραμάτων	92
4.5	Συμπεράσματα και συζήτηση	107
4.6	Τεχνικές καταναμεμημένου συντονισμού κινητών κέντρων ελέγχου	108
4.6.1	Μοντελοποίηση δικτύων αισθητήρων με κινητά στοιχεία	108
4.6.2	Πρωτόκολλα κίνησης και συλλογής πληροφορίας για πολλά κινητά κέντρα ελέγχου	108
4.6.3	Αποτελέσματα και συμπεράσματα	110
5	Προσαρμοστική διάδοση δεδομένων με κινητούς αισθητήρες	113
5.1	Εισαγωγή	113
5.1.1	Σχετική βιβλιογραφία και συζήτηση	114
5.1.2	Η προσέγγισή μας	115
5.2	Μοντελοποίηση κινητών δικτύων αισθητήρων	116
5.3	Εκτιμώντας τα επίπεδα κίνησης	117
5.4	Προσαρμοζόμενη διάχυση πληροφορίας	118
5.4.1	Προσαρμογή της τιμής β	119
5.4.2	Επιλογή γειτόνων	121
5.4.3	Αποτροπή πλημμυρίδας μηνυμάτων	122
5.5	Μοντελοποιώντας πολύμορφη κίνηση	122
5.5.1	Ρόλοι κινητικότητας	123
5.5.2	Μεταβολές των ρόλων κινητικότητας	123
5.6	Πειραματική αξιολόγηση	126
5.6.1	Οργάνωση των πειραμάτων	126

5.6.2 Αποτελέσματα πειραμάτων	127
5.7 Συμπεράσματα και επεκτάσεις	131
5.8 Ρεαλιστική προσομοίωση ασύρματων δικτύων με κινητικότητα, εμπόδια και αποτυχίες κόμβων	132
6 Επίλογος	135

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια οι ραγδαίες εξελίξεις στην τεχνολογία της μικροηλεκτρονικής έκαναν δυνατή την κατασκευή μικρότερων και ταχύτερων ημιαγωγών. Παράλληλα, η εκρηκτική ανάπτυξη στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών αποδοτικών τεχνικών για ασύρματη επικοινωνία. Ο συνδυασμός των δύο τομέων έκανε δυνατή τη δημιουργία των *ασύρματων δικτύων μικροαισθητήρων*.

Τα ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων αποτελούνται από ένα πολύ μεγάλο πλήθος συσκευών που τοποθετούνται σε μία περιοχή ενδιαφέροντος και αυτο-οργανώνονται σε ένα ασύρματο δίκτυο, προκειμένου να μετρήσουν/παρακολουθήσουν κάποια περιβαλλοντική μετρική και να αναφέρουν τις μετρήσεις σε κάποιο κέντρο αναφοράς. Οι συσκευές είναι χαμηλού κόστους, αυτόνομες, μικροσκοπικές, εξοπλισμένες με αισθητήρες, επεξεργαστή και δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας. Οι υπολογιστικές και επικοινωνιακές ικανότητες των συσκευών είναι πολύ περιορισμένες σε σύγκριση με άλλες κατηγορίες ασύρματων δικτύων, ενώ *η αυτονομία τους καθορίζεται από την ενσωματωμένη πηγή ενέργειας* που διαθέτουν. Λόγω αυτών των περιορισμών είναι αναγκαία η ανάπτυξη πρωτοκόλλων που λαμβάνουν υπόψη τους τις ιδιαιτερότητες των δικτύων μικροαισθητήρων. Η προοπτική των συσκευών αισθητήρων είναι να σμικρυνθούν σε όγκο μικρότερο του κυβικού χιλιοστού, σαν κόκκοι σκόνης. Λόγω αυτού του μικρού μεγέθους στη βιβλιογραφία αναφέρονται και σαν *δίκτυα έξυπνης σκόνης* ενώ οι συσκευές αναφέρονται και σαν σωματίδια ή κόκκοι. Για μία εξαιρετική εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων δείτε [2].

1.1 Αντικείμενο διατριβής

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζουμε έρευνα επικεντρωμένη στην ανάπτυξη, προσομοίωση και αξιολόγηση ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων. Βασικός μας στόχος είναι η ελάττωση της κατανάλωσης της ενέργειας των αισθητήρων και η βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Ο στόχος μας είναι διττός: αφενός προσπαθούμε να εξοικονομήσουμε ενέργεια στο δίκτυο ώστε να γίνει πιο προσιτή και βιώσιμη, από οικονομικής αλλά και τεχνικής άποψης, η λειτουργία μεγάλης κλίμακας δικτύων αισθητήρων. Αφετέρου προσπαθούμε να διατηρήσουμε σε ικανοποιητικά επίπεδα ή και να αυξήσουμε, την συνολική απόδοση των δικτύων, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των πολλών εφαρμογών που αναπτύσσονται έχοντας ως βάση τα δίκτυα αισθη-

τήρων. Συχνά ο δεύτερος στόχος έρχεται σε αντίθεση με τον πρώτο και αυτός είναι ο λόγος που κάνει τόσο επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων και την έρευνα στο τομέα αυτό τόσο ενδιαφέρουσα.

Παρά τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας του υλικού, το πρόβλημα βελτιστοποίησης της ενέργειας των συσκευών αισθητήρων παραμένει επίκαιρο αφού οι υπάρχουσες και άμεσα διαφαινόμενες λύσεις μέσω υλικού δεν έχουν δώσει ικανοποιητική απάντηση. Οι συσκευές καταναλώνουν ενέργεια κυρίως για να λειτουργήσουν τα αισθητήρια κυκλώματα, ο επεξεργαστής και το υπόλοιπο υπολογιστικό κύκλωμα, και ο *πομποδέκτης επικοινωνίας*. Εκ των τριών, η λειτουργία του πομποδέκτη απαιτεί τα μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, ιδίως όταν αποστέλλονται και λαμβάνονται μηνύματα, αλλά και όταν απλά παρακολουθείται το ασύρματο κανάλι.

Επικεντρώνουμε την έρευνά μας σε τρεις βασικές κατευθύνσεις (αναφέρονται παρακάτω) που στοχεύουν στην εξοικονόμηση και βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας σε διαφορετικά επίπεδα. Κοινός στόχος είναι η μείωση του κόστους επικοινωνίας, μέσω της ανάδειξης καινοτόμων τεχνικών που δίνουν ώθηση στην ανάπτυξη νέων αλγορίθμων. Η έρευνά μας ανάδειξε τρεις σημαντικές τεχνικές για τη σχεδίαση ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων. Συγκεκριμένα, διερευνήσαμε:

- *τεχνικές κατανεμημένης προσαρμογής* της λειτουργίας ενός πρωτοκόλλου. Σε συνδυασμό με πληροφορία διαθέσιμη στην άμεση περιοχή του δικτύου που αντιλαμβάνεται ένας κόμβος, μπορούμε με καθαρά τοπικές αποφάσεις που βασίζονται σε απλές μετρικές, να βελτιώσουμε τη συνολική συμπεριφορά ενός πρωτοκόλλου.
- *τεχνικές τοπικής συλλογής και εκμετάλλευσης περιορισμένης γνώσης* των συνθηκών του δικτύου, τόσο της τοπολογίας όσο και άλλων χαρακτηριστικών, όπως η μέση διαθέσιμη ενέργεια. Με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο συλλέγουμε επιπλέον πληροφορία που βοηθά σημαντικά στην επίτευξη καλύτερων επιδόσεων, αφού, εφόσον η πρόσθετη γνώση χρησιμοποιηθεί κατάλληλα, μπορούν να επιτευχθούν βελτιστοποιήσεις όπως ο σχηματισμός αποδοτικότερων μονοπατιών για τη μετάδοση δεδομένων.
- *τεχνικές διαχείρισης της κινητικότητας* σε περιπτώσεις δικτύων όπου χαρακτηριστικό είναι η κίνηση τόσο του κέντρου ελέγχου όσο και των συσκευών αισθητήρων. Εξετάσαμε μεθόδους διαπέρασης και κάλυψης του δικτύου από κινητά κέντρα ελέγχου που βασίζονται σε πιθανοτική κίνηση που ευνοεί την επίσκεψη κάποιων περιοχών με βάση τοπικά κριτήρια (συχνότητα προηγούμενων επισκέψεων, τοπική πυκνότητα δικτύου). Ακόμα διερευνήσαμε τεχνικές κατηγοριοποίησης και εκμετάλλευσης της εγγενούς κίνησης των αισθητήρων προκειμένου να πετύχουμε οικονομική παράδοση δεδομένων.

Οι αλγόριθμοι που αναπτύσσουμε βασισμένοι σε αυτές τις τεχνικές λειτουργούν α) σε επίπεδο διαχείρισης της ίδιας της συσκευής, β) σε επίπεδο πρωτοκόλλου δρομολόγησης και γ) συνολικά σε επίπεδο δικτύου, αναδεικνύοντας μακροσκοπική συμπεριφορά μέσα από τοπικές αλληλεπιδράσεις. Συγκεκριμένα, σε επίπεδο κόμβου εξετάζουμε τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας εναλλάσσοντας περιοδικά το λειτουργικό κύκλο της συσκευής από την κανονική λειτουργία σε κατάσταση αδράνειας κατά την οποία παύει η επικοινωνία του κόμβου με τους υπόλοιπους. Κατά αυτό τον τρόπο, εξοικονομούνται σημαντικά ποσά ενέργειας αλλά αλλάζει δυναμικά η τοπολογία του δικτύου. Η καινοτομία στην έρευνά μας είναι στο ότι λαμβάνουμε υπόψη τις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου τοπικά και με κατανεμημένο τρόπο ώστε μέσω κατάλληλης προσαρμογής του λειτουργικού κύκλου, να διατηρήσουμε την απόδοση πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε

1.2 Βασικά προβλήματα

υψηλά επίπεδα. Επίσης εξετάζουμε διαφορετικές τοπολογίες και διατάξεις δικτύου καθώς και την επίπτωση τεχνικών σταδιακής ανάπτυξης ετερογενών κόμβων για την αναζωογόνηση του δικτύου.

Σε επίπεδο πρωτοκόλλου δρομολόγησης προτείνουμε τη βελτίωση του μονοπατιού διάδοσης πληροφορίας προκειμένου να σχηματιστούν μονοπάτια χαμηλής καθυστέρησης και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Η βελτιστοποίηση δεν αφορά εκ των προτέρων ολόκληρο το μονοπάτι από την πηγή στον προορισμό, κάτι που θα απαιτούσε πλήρη γνώση της τοπολογίας του δικτύου και σημαντικούς πόρους. Αντίθετα, προτείνουμε τη βελτίωση του μονοπατιού τμηματικά και τοπικά χρησιμοποιώντας λίγους πόρους και περιορισμένη πρόσθετη γνώση. Επίσης, λαμβάνουμε υπόψη την πιθανότητα εμφάνισης σφαλμάτων λειτουργίας στους κόμβους και επισκευάζουμε αποδοτικά τα μονοπάτια.

Σε επίπεδο δικτύου εξετάζουμε το ενδεχόμενο κίνησης του κέντρου ελέγχου, μία υπόθεση που μόλις σχετικά πρόσφατα έκανε την εμφάνισή της στη διεθνή βιβλιογραφία. Προτείνουμε και αξιολογούμε χαρακτηριστικές στρατηγικές κίνησης, οι οποίες είναι εγγενώς διαφορετικές αφού ορίζουν τυχαίες, πιθανοτικές ή ντετερμινιστικές πορείες. Κάθε στρατηγική κίνησης συνδυάζεται με κατάλληλες μεθόδους συλλογής δεδομένων. Επιπλέον, εξετάζουμε την παρουσία πολλών κέντρων ελέγχου, τόσο κινητών όσο και ακίνητων. Προτείνουμε μεθόδους κατανεμημένου συντονισμού των κινητών κέντρων ελέγχου ώστε να αξιοποιηθεί αποδοτικότερα η κινητικότητα τους μέσω της επίτευξης καλών αντισταθμίσεων ενέργειας και καθυστέρησης. Ακόμα, προτείνουμε πρωτόκολλα που εκμεταλλεύονται την εγγενή κινητικότητα που χαρακτηρίζει τους αισθητήρες σε ορισμένες κατηγορίες δικτύων. Συγκεκριμένα, ποσοτικοποιούμε την κίνηση και κατατάσσουμε τους κόμβους ανάλογα με την ικανότητά τους να μεταφέρουν γρήγορα δεδομένα. Επιλέγοντας τους καταλληλότερους για να διαχέουν πληροφορία στο δίκτυο πετυχαίνουμε οικονομική διάδοση δεδομένων.

Οι τεχνικές και αλγόριθμοι που αναπτύξαμε εδώ διαφέρουν και επεκτείνουν την διεθνή βιβλιογραφία στους ακόλουθους τομείς, (α) οι τεχνικές μας βασίζονται σε πληροφορία που μπορεί να αποκτηθεί με οικονομικό τρόπο, τοπικά σε κάθε κόμβο και να χρησιμοποιηθεί κατανεμημένα για την βελτίωση της συμπεριφοράς του δικτύου, (β) μέσω των τεχνικών και αλγορίθμων μας, εντοπίζονται αντισταθμίσεις ανάμεσα στις μετρικές απόδοσης και αναδεικνύονται μέθοδοι για την επίτευξη καλών συμβιβασμών κυρίως ανάμεσα στην κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση παράδοσης δεδομένων, (γ) υποθέτουμε ασθενή μοντέλα και απλοποιούμε τους αλγορίθμους ώστε να είναι εφικτή η υλοποίησή τους σε συσκευές περιορισμένων δυνατοτήτων, (δ) εξετάζουμε και προτείνουμε νέα μοντέλα δικτύων, όπως ετερογενή δίκτυα με σταδιακή ανάπτυξη κόμβων και δίκτυα με κινητικότητα· οι τεχνικές μας προσαρμόζουν την λειτουργία του δικτύου και εκμεταλλεύονται αυτές τις καταστάσεις ώστε να βελτιώσουν περαιτέρω την απόδοση του δικτύου.

1.2 Βασικά προβλήματα

Στην παρούσα εργασία εντοπίζουμε τρία κύρια προβλήματα τα οποία και αντιμετωπίζουμε με τις τεχνικές και τους αλγορίθμους που προτείνουμε στα επόμενα κεφάλαια.

1.2.1 Το πρόβλημα αποδοτικής διαχείρισης πόρων και εξοικονόμησης ενέργειας σε δυναμικά δίκτυα μικροαισθητήρων

Όπως έχουμε επισημάνει το κόστος επικοινωνίας είναι συνήθως μεγαλύτερο από το κόστος λειτουργίας των αισθητήρων και επεξεργασίας των δεδομένων. Είδαμε επίσης ότι τα πρωτόκολλα διάδοσης δεδομένων συνήθως χρειάζεται να εκτελέσουν πολλές μεταδόσεις προκειμένου να παραδοθεί στον τελικό της προορισμό η πληροφορία. Όμως, ένας κόμβος δε χρειάζεται να συμμετέχει συνεχώς στη διαδικασία διάδοσης δεδομένων, αφού δεν υπάρχει πάντα σταθερή ροή δεδομένων ενώ πολλοί κόμβοι δεν συμμετέχουν στα μονοπάτια διάδοσης. Επίσης, ανάλογα με την εφαρμογή που εκτελείται στο δίκτυο πολύ συχνά δεν απαιτείται και η συνεχής παρακολούθηση του περιβάλλοντος και καταγραφή στοιχείων. Επομένως, η ενεργειακή κατανάλωση διαφέρει από συσκευή σε συσκευή, αυτή η παρατήρηση μας οδηγεί στην ιδέα ότι είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιας μορφής διαχείρισης των πόρων του δικτύου τόσο σε επίπεδο συσκευής ώστε να αυξάνεται η διάρκεια ζωής των κόμβων, όσο και σε καθολικό επίπεδο ώστε να αυξάνεται η ωφέλιμη διάρκεια ζωής του δικτύου.

Οδηγούμενοι από αυτή την παρατήρηση, ένας σημαντικός αριθμός από ερευνητές προτείνουν τη λειτουργία των συσκευών μικροαισθητήρων σε διακριτές φάσεις. Πιο συγκεκριμένα, προτείνουν την δυνατότητα πέρα από την συνηθισμένη κατάσταση λειτουργίας που μία συσκευή συμμετέχει στην καταγραφή γεγονότων και την διάδοση πληροφορίας, την ύπαρξη και μίας δεύτερης κατάστασης λειτουργίας χαμηλής ενέργειας. Σε αυτή τη κατάσταση μία συσκευή βρίσκεται σε αδράνεια και έχει απενεργοποιήσει το κύκλωμα που είναι υπεύθυνο για την ασύρματη επικοινωνία οπότε δεν συμμετέχει στις λειτουργίες του δικτύου. Η εναλλαγή ενός κόμβου από την κατάσταση αδράνειας στην κατάσταση εγρήγορης αποτελεί αντικείμενο μελέτης της διαχείρισης πόρων σε τοπικό επίπεδο.

Ειδικότερα, οι απαιτήσεις από ένα κόμβο συχνά εξαρτώνται από την κατάσταση του δικτύου στην ευρύτερη περιοχή του κόμβου. Σε περιοχές όπου υπάρχει έντονη δραστηριότητα και καταγραφή μεγάλου όγκου δεδομένων, κάθε κόμβος χρειάζεται να παραμένει ενεργός. Σε περιοχές όπου η δραστηριότητα είναι μικρή ή υπάρχουν υπεραρκετοί κόμβοι για να καλύψουν τις ανάγκες του δικτύου, κάποιοι πλεονάζοντες κόμβοι μπορεί να εξοικονομήσουν ενέργεια μεταπίπτοντας στην κατάσταση αδράνειας. Επιπλέον, υπάρχουν τέσσερις κύριες αιτίες που προκαλούν σπατάλη της ενέργειας των συσκευών μικροαισθητήρων:

- *Συγκρούσεις:* Συγκρούσεις συμβαίνουν όταν 2 ή περισσότεροι κόμβοι εκπέμπουν δεδομένα ταυτόχρονα. Όταν χρησιμοποιείται η ίδια συχνότητα εκπομπής και ο (οι) παραλήπτης (παραλήπτες) βρίσκονται στην εμβέλεια και των δύο εκπομπών, τότε τα σήματα από τις εκπομπές παρεμβάλλονται το ένα στο άλλο με αποτέλεσμα τα δεδομένα να παραμορφώνονται και να μην είναι δυνατή η λήψη τους. Το αποτέλεσμα είναι η απώλεια των δεδομένων, επομένως είναι αναγκαία η επανάληψη και των δύο εκπομπών σε διαφορετικές χρονικές στιγμές που σημαίνει σπατάλη ενέργειας και αύξηση των καθυστερήσεων.
- *Αδρανείς κόμβοι:* Συχνά το κύκλωμα ραδιοεπικοινωνίας ενός κόμβου παραμένει ανοικτό αλλά αδρανές επειδή ο κόμβος περιμένει τη λήψη ενός μηνύματος. Φυσικά, ακόμα και στην κατάσταση αναμονής για λήψη το κύκλωμα χρειάζεται ενέργεια για να λειτουργήσει. Η αιτία αυτής της σπατάλης ενέργειας βρίσκεται στο ότι η επικοινωνία στα ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων δεν γίνεται συγχρονισμένα, αφού ο πομπός με τον δέκτη λειτουργούν ανεξάρτητα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μη αμελητέοι χρόνοι αναμονής για την άφιξη

1.2 Βασικά προβλήματα

δεδομένων.

- *Άκυρες λήψεις:* Συχνά ένας κόμβος λαμβάνει μηνύματα που έχουν σαν προορισμό κάποιον άλλο κόμβο, επομένως τα δεδομένα που ελήφθησαν απλά απορρίπτονται. Αυτό συμβαίνει όταν ο δέκτης ενός κόμβου είναι προγραμματισμένος να «ακούει» το φάσμα των συχνοτήτων επικοινωνίας συνεχώς. Εκτός του ότι ξοδεύεται ενέργεια για τη λειτουργία του δέκτη, η διαδικασία αποκωδικοποίησης των ραδιοκυμάτων καθ'εαυτή είναι μια ενεργοβόρα διαδικασία που απαιτεί τη λειτουργία πολύπλοκων κυκλωμάτων αποδιαμόρφωσης.
- *Κόστος πρωτοκόλλου:* Το ίδιο το πρωτόκολλο επικοινωνίας χρειάζεται να εκπέμπει κάποια μηνύματα προκειμένου να επιτελέσει το έργο του. Αυτά τα επιπλέον μηνύματα χαρακτηρίζουν και το κόστος λειτουργίας του πρωτοκόλλου. Ανάλογα με το πρωτόκολλο, ο αριθμός και το μέγεθος αυτών των μηνυμάτων διαφέρει και υπό αντίξοες συνθήκες το κόστος του πρωτοκόλλου μπορεί να είναι συγκρίσιμο με το κόστος μετάδοσης δεδομένων.

1.2.2 Το πρόβλημα της ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης δεδομένων

Η κυριότερη λειτουργία που επιτελεί ένα επικοινωνιακό δίκτυο είναι η μεταφορά δεδομένων από ένα κόμβο του δικτύου σε έναν άλλο. Επομένως ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα που πρέπει να λυθούν σε κάθε είδους δίκτυο προκειμένου να καταστεί λειτουργικό, είναι η δρομολόγηση των δεδομένων. Στα ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων η διαδικασία της δρομολόγησης δεδομένων παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις λόγω της ίδιας της φύσης του δικτύου. Συνήθως η δρομολόγηση που συμβαίνει σε ένα ασύρματο δίκτυο μικροαισθητήρων έχει το χαρακτήρα της ροής δεδομένων από τις συσκευές αισθητήρων προς ένα ή περισσότερα κέντρα ελέγχου στα οποία πρέπει να αναφέρονται οι συλλεγμένες πληροφορίες. Λόγω της μικρής εμβέλειας αλλά και της κατανομής των συσκευών σε μεγάλη γεωγραφική περιοχή, η απ' ευθείας επικοινωνία και αναφορά των δεδομένων σε κάποιο κέντρο ελέγχου συνήθως είναι αδύνατη. Επομένως οι πληροφορίες μεταδίδονται από συσκευή σε συσκευή ως ότου φτάσουν στον τελικό τους προορισμό. Συνεπώς, η κίνηση των δεδομένων ακολουθεί συγκεκριμένα πρότυπα που δεν εμφανίζονται σε άλλες κατηγορίες δικτύων, ενώ και ο μεγάλος αριθμός κόμβων στα δίκτυα μικροαισθητήρων απαιτεί μεγάλη ευελιξία και ικανότητα κλιμάκωσης εκ μέρους των πρωτοκόλλων.

Οι κυριότερες απαιτήσεις για ένα αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης για δίκτυα μικροαισθητήρων εντοπίζονται στην σωστή, έγκυρη και οικονομική μεταφορά της πληροφορίας στο κέντρο ελέγχου. Η ορθότητα εγγυάται την σωστή μετάδοση των δεδομένων στον προορισμό τους, ενώ για πολλές εφαρμογές είναι πολύ σημαντική και η αναφορά της συλλεγμένης πληροφορίας σε σύντομο, περιορισμένο από τις απαιτήσεις της εφαρμογής χρονικό διάστημα. Η τρίτη απαίτηση είναι η οικονομία, δηλαδή η αποτελεσματική χρήση των πόρων, ειδικά της ενέργειας, των συσκευών του δικτύου. Στην έρευνά μας επικεντρώνουμε στην αποδοτικότητα ως συνάρτηση της ενέργειας που πρέπει να ξοδέψει το δίκτυο προκειμένου να παραδοθούν ορθά και έγκαιρα τα δεδομένα που συλλέγονται από τις συσκευές στο κέντρο ελέγχου. Ένας ενεργειακά αποδοτικός αλγόριθμος δρομολόγησης έχει σαν σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας στις συσκευές μικροαισθητήρων σε καθολικό επίπεδο. Ο απώτερος στόχος είναι η καλύτερη λειτουργία του δικτύου καθώς και η συνολική παράταση της ωφέλιμης ζωής του.

Επιπλέον, ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει να αντιμετωπίζει και τις ιδιομορφίες του δικτύου που δημιουργούν προβλήματα στην διάδοση πληροφορίας. Σφάλματα παρουσιάζονται

συχνά στις συσκευές και μπορεί να προκαλέσουν την αποσύνδεση των μονοπατιών διάδοσης πληροφορίας που κατασκευάζει ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης. Στην έρευνά μας εντοπίζουμε το χαρακτηριστικό της ανοχής σε σφάλματα για ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης, ως την ικανότητα του πρωτοκόλλου να ανακλύπει από τα σφάλματα που παρουσιάζονται στα μονοπάτια και να επισκευάζει ή να κατασκευάζει ένα νέο μονοπάτι έγκαιρα χωρίς να χάνεται η πληροφορία που έχει συλλεχθεί στο δίκτυο.

Όπως αναφέραμε ήδη, η δρομολόγηση δεδομένων είναι μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες που πρέπει να φέρει εις πέρας ένα ασύρματο δίκτυο μικροαισθητήρων προκειμένου να επιτελέσει την λειτουργία του. Ειδικότερα δε εντοπίζουμε το πρόβλημα σε δύο σημαντικά χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτει ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης, να είναι ενεργειακά αποδοτικό και να είναι ανεκτικό σε σφάλματα. Ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης υλοποιεί έναν αλγόριθμο που έχοντας ως δεδομένα την πηγή και τον προορισμό ενός πακέτου πληροφορίας, μπορεί να κατασκευάσει μία λίστα από ενδιάμεσους προορισμούς, δηλαδή ένα μονοπάτι, που ακολουθεί το πακέτο προκειμένου να καταλήξει στον τελικό του προορισμό. Πολύ συχνά, ο αλγόριθμος εκτελείται κατανεμημένα και κάθε ένας από τους ενδιάμεσους προορισμούς πρέπει να ανακαλύψει το επόμενο βήμα. Ακριβώς επειδή η δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων εμπλέκει ένα σημαντικό αριθμό από συσκευές, πρέπει να είναι αποδοτική ώστε να μην σπαταλώνται οι πόροι των συσκευών. Επίσης, αφού ο αλγόριθμος εκτελείται τοπικά, είναι σημαντικό να μπορεί να λειτουργήσει βασισμένος σε πληροφορίες που υπάρχουν τοπικά σε κάθε κόμβο ή μπορούν να αποκτηθούν εύκολα.

Έχει δειχθεί [2] ότι το ενεργειακό κόστος για τη μετάδοση δεδομένων είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο απ'ότι για την επεξεργασία δεδομένων και την λειτουργία των αισθητήρων. Ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας πρέπει να μειώσει όσο το δυνατόν περισσότερο τη συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο εξοικονομώντας ενέργεια σε καθεμία από τις συσκευές. Επομένως η διαδικασία κατασκευής μονοπατιού πρέπει να εμπλέκει όσο το δυνατόν λιγότερους κόμβους του δικτύου και να χρειάζεται μικρό αριθμό σύντομων μηνυμάτων. Δεν αρκεί όμως μόνο να κατασκευάζεται αποδοτικά ένα μονοπάτι, αλλά και να χρησιμοποιούνται αποδοτικά όλες οι συσκευές. Λόγω ανομοιογένειας στο δίκτυο αλλά και εξαιτίας της εγγενούς ανομοιομορφίας της κίνησης δεδομένων, κάποιες συσκευές μπορεί να συμμετέχουν στη διάδοση περισσότερων δεδομένων από κάποιες άλλες. Για παράδειγμα οι συσκευές που βρίσκονται κοντά στο κέντρο ελέγχου και έχουν άμεση επικοινωνία μαζί του, πρέπει να συμμετέχουν στη δρομολόγηση των δεδομένων που έρχονται από το υπόλοιπο δίκτυο. Επομένως οι συσκευές αυτές καταναλώνουν ενέργεια με ταχείς ρυθμούς, όταν εξαντληθούν τα αποθέματά τους η δρομολόγηση δεδομένων προς το κέντρο ελέγχου θα είναι αδύνατη. Έτσι παρόλο που συνολικά στο δίκτυο μπορεί να έχει καταναλωθεί μόνο ένα μικρό ποσοστό ενέργειας, πλέον δεν είναι δυνατή η συλλογή δεδομένων. Ένα ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει αντιμετωπίζει τέτοια προβλήματα και να βελτιστοποιεί τη δρομολόγηση ώστε να παρατείνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου.

Πέρα όμως από την κατανάλωση ενέργειας που επηρεάζει τη λειτουργικότητα ενός δικτύου, ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει να αντιμετωπίζει και τις ιδιομορφίες του δικτύου που δημιουργούν προβλήματα στην διάδοση πληροφορίας. Πιο συγκεκριμένα, από τη στιγμή που σαν μέσο διάδοσης της πληροφορίας χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, αυτόματα μειώνεται η αξιοπιστία στην επικοινωνία. Το φυσικό μέσο επηρεάζεται τόσο από καιρικά φαινόμενα και άλλους εξωγενείς παράγοντες (πχ παρεμβολές από άλλες πηγές) όσο και από τη μορφολογία του εδάφους που προκαλεί αναπόφευκτες παραμορφώσεις εξαιτίας ανακλάσεων

1.2 Βασικά προβλήματα

και περίθλασης του σήματος. Πέρα όμως από τις χαμηλού επιπέδου δυσκολίες, που μπορούν να αντιμετωπιστούν και με εξειδικευμένα πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (**MAC**), το πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει να αντιμετωπίσει τη δυναμική φύση ενός ασύρματου δικτύου μικροαισθητήρων. Λόγω των φθινών εξαρτημάτων από τα οποία κατασκευάζονται οι συσκευές μικροαισθητήρων και της έκθεσης στο φυσικό περιβάλλον, είναι πολύ πιθανόν ότι ένας αριθμός συσκευών παύει να λειτουργεί είτε προσωρινά είτε μόνιμα λόγω κάποιας βλάβης. Αυτοί οι παράγοντες προκαλούν την αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου και την διακοπή κάποιων μονοπατιών που χρησιμοποιούνται για τη δρομολόγηση δεδομένων. Επομένως είναι σημαντικό η δρομολόγηση να διαθέτει ανοχή σε τόσο σε σφάλματα επικοινωνίας όσο και σε αλλαγές τις τοπολογίας.

1.2.3 Το πρόβλημα της διαχείρισης της κινητικότητας σε δίκτυα μικρο-αισθητήρων

Πρόσφατα μία νέα κατηγορία εφαρμογών για ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων έκανε την εμφάνισή της, στην οποία χαρακτηριστικό του υπό εξέταση συστήματος είναι η κινητικότητα. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές οι συσκευές βρίσκονται προσκολλημένες σε οντότητες όπως ζώα, ανθρώπους και οχήματα που κινούνται σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα σε τέτοιες κινούμενες συσκευές και τους κόμβους σταθερής υποδομής θα δώσει ώθηση σε εφαρμογές όπως η παρακολούθηση αγρίων ζώων, παρακολούθηση κίνησης οχημάτων, έξυπνες κατοικίες και έλεγχο περιβαλλοντικής μόλυνσης. Σε τέτοιες περιπτώσεις δικτύων η συνήθης προσέγγιση όπου τα κέντρα ελέγχου είναι ακίνητα σε κάποια περιοχή του δικτύου δεν είναι αποδοτική.

Μία νέα προσέγγιση αναπτύχθηκε εμπνευσμένη από τέτοιες εφαρμογές, προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα και να αναπτυχθούν νέες αποδοτικότερες τεχνικές διαχείρισής της κινητικότητας. Πλέον ο φόρτος της διάδοσης πληροφορίας μεταφέρεται από τις συσκευές αισθητήρων στο κέντρο ελέγχου. Η βασική ιδέα είναι ότι το κέντρο ελέγχου διαθέτει σημαντικά αποθέματα ενέργειας τα οποία μπορούν να αναπληρωθούν εύκολα, και μπορεί να κινηθεί αυτοδύναμα μέσα στη περιοχή που καλύπτει το δίκτυο. Κατά την περιήγησή του στο δίκτυο, το κέντρο ελέγχου βρίσκεται συνεχώς σε κοντινή απόσταση από ένα (συνήθως μικρό) υποσύνολο κόμβων. Επομένως, η πληροφορία μπορεί να μεταδοθεί στο κέντρο ελέγχου από τους κοντινούς του κόμβους, με χαμηλό κόστος ενέργειας αφού η μετάδοση γίνεται σε μικρή απόσταση. Με την περιήγηση σε ολόκληρη την περιοχή που εκτείνεται το δίκτυο, το κέντρο ελέγχου μπορεί να συλλέξει όλη τη διαθέσιμη πληροφορία.

Νέες προκλήσεις ανακύπτουν όταν τίθεται σε εφαρμογή αυτή η ιδέα. Όταν μία περιοχή του δικτύου βρίσκεται μέσα στην ακτίνα μετάδοσης δεδομένων του κέντρου ελέγχου θεωρούμε ότι αυτή καλύφθηκε. Προφανώς, για να λειτουργήσει αποτελεσματικά ένα δίκτυο με κινητό κέντρο ελέγχου, πρέπει η κίνηση να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε σε σύντομο χρονικό διάστημα να καλύπτεται ολόκληρη η περιοχή που εκτείνεται το δίκτυο. Στην περίπτωση που κάποιες περιοχές δεν καλυφθούν, τότε η πληροφορία που έχουν συλλέξει οι συσκευές εκεί δεν παραδίδεται ποτέ. Επιπλέον, η ταχύτητα με την οποία κινείται το κέντρο ελέγχου είναι περιορισμένη και, κατά κανόνα, μικρότερη από την ταχύτητα με την οποία γίνεται η διάδοση πληροφορίας από συσκευή σε συσκευή. Η κίνησή του κέντρου ελέγχου πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μειώνεται ο χρόνος κάλυψης του δικτύου ώστε να μην παρατηρούνται σημαντικές καθυστερήσεις στην συλλογή των δεδομένων. Επιπρόσθετα, υπάρχουν και εφαρμοσμένες τεχνικές και πρωτόκολλα για στατικά

δίκτυα, δεν μπορούν να αποδώσουν στο δυναμικό περιβάλλον ενός δικτύου με κινητικότητα. Θα πρέπει να τροποποιηθούν ή να αντικατασταθούν από λύσεις ειδικά σχεδιασμένες για δίκτυα μικροαισθητήρων όπου η κίνηση θεωρείται χαρακτηριστικό του συστήματος.

Παρόλο που τα προβλήματα που προκύπτουν είναι πολλά, η ιδέα αυτή δίνει σημαντικές νέες δυνατότητες. Συγκεκριμένα, το κυριότερο πλεονέκτημα ύπαρξης ενός ή περισσότερων κινητών κέντρων ελέγχου είναι η αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου. Έχουμε ήδη συζητήσει (δείτε ενότητα 1.2.2) το πρόβλημα της ενεργειακής αποδοτικότητας των πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Λόγω των πολλών κόμβοι προς κόμβο μεταδόσεων ξοδεύονται σημαντικά ποσά ενέργειας ενώ λόγω της στατικής τοποθέτησης του κέντρου ελέγχου, η περιοχή γύρω από αυτό δέχεται μεγάλο φόρτο εργασίας που οδηγεί στη εξάντληση των συσκευών και τη διακοπή της λειτουργίας του δικτύου. Ένα κινητό κέντρο ελέγχου μπορεί να μειώσει την απόστασή του από τις συσκευές απαιτώντας έτσι λιγότερες μεταδόσεις για την αναφορά των δεδομένων. Συνεπώς, εξοικονομούνται σημαντικά ποσά ενέργειας στις συσκευές. Από την άλλη, για τη μετακίνηση του κέντρου ελέγχου ξοδεύεται ενέργεια, όμως θεωρείται ότι η λειτουργικότητα του δικτύου δεν επηρεάζεται, αφού το κέντρο ελέγχου μπορεί να είναι κάποιο όχημα που κατευθύνεται από ανθρώπους ή κάποιο αυτόματο ρομπότ που περιοδικά επιστρέφει σε σταθμούς υποστήριξης για ανεφοδιασμό.

Επίσης ένα σημαντικό όφελος των κινητών κέντρων ελέγχου είναι και η δυνατότητα για καλύτερο χειρισμό δικτύων με χαμηλό αριθμό κόμβων που μπορεί να μην συνδέονται μεταξύ τους. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πρέπει να μπορούν να ανακαλύπτουν μονοπάτια από διαδοχικούς κόμβους γείτονες. Σε αραιά δίκτυα είναι πολύ πιθανόν να μην υπάρχει τέτοιο μονοπάτι προς κάποιους κόμβους. Το κινητό κέντρο ελέγχου μπορεί να γεφυρώσει τέτοια κενά, αυτό συνεπάγεται ότι μπορεί να μειωθεί ο αριθμός των κόμβων που πρέπει να απλωθούν σε μία περιοχή μειώνοντας έτσι το λειτουργικό κόστος του δικτύου. Επιπλέον οι κόμβοι μπορούν να μειώσουν και την ισχύ εκπομπής τους στα αναγκαία επίπεδα για την επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου, μειώνοντας έτσι ακόμα περισσότερο την κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, το κινητό κέντρο ελέγχου μπορεί να παρακάμψει προβληματικές περιοχές που βρίσκονται μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος, όπως είναι μικρές λίμνες, περιοχές με πυκνή βλάστηση ή ανώμαλο έδαφος που εμποδίζουν την επικοινωνία. Στην περίπτωση των στατικών δικτύων εξειδικευμένα πρωτόκολλα απαιτούνται που ξοδεύουν πολύ ενέργεια για να παρακάμψουν τέτοιες προβληματικές περιοχές, επομένως η παρακολούθηση πιο τραχών περιοχών γίνεται ευκολότερη.

Επιπλέον η επικοινωνία γίνεται πιο αξιόπιστη, η μετάδοση κόμβο προς κόμβο εμπεριέχει μία πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος σε κάθε μετάδοση. Η συνολική πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος στην επικοινωνία ανάμεσα σε δύο απομακρυσμένους κόμβους, αυξάνεται αθροιστικά με κάθε μετάδοση. Στην περίπτωση εμφάνισης σφάλματος είτε ξαναμεταδίδονται τα δεδομένα σπαταλώντας ενέργεια είτε χάνονται. Η μείωση του αριθμού μεταδόσεων που απαιτούνται στην περίπτωση του κινητού κέντρου ελέγχου βοηθά στην αποφυγή τέτοιων προβλημάτων. Επίσης, σε στρατιωτικές εφαρμογές και γενικότερα εφαρμογές που υπάρχουν θέματα εμπιστευτικών δεδομένων, γίνεται πιο δύσκολη η υποκλοπή τους. Στην περίπτωση του στατικού δικτύου, ο αντίπαλος μπορεί να υποκλέψει μεγάλο μέρος της πληροφορίας χρησιμοποιώντας συσκευές παρακολούθησης ή καταλαμβάνοντας κόμβους σε στρατηγικά σημεία. Με την μείωση του αριθμού μεταδόσεων και τη μείωση της απόστασης που διανύει η πληροφορία μόνο ένα πολύ μικρό μέρος της πληροφορίας γίνεται διαθέσιμο σε όλο το δίκτυο και επομένως μειώνεται η ποσότητα των διαρροών πληροφορίας.

Κεφάλαιο 2

Προσαρμοστικές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας για αποδοτική διάδοση δεδομένων σε ετερογενή δίκτυα αισθητήρων

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο ασχολούμαστε με το καίριο πρόβλημα της εξοικονόμησης ενέργειας. Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την ποικιλία των συσκευών αισθητήρων που απαρτίζουν το δίκτυο. Το μοντέλο του *ομογενούς* δικτύου αισθητήρων αποτελείται από πανομοιότυπους κόμβους, δηλαδή συσκευές ισοδύναμες όσον αφορά την υπολογιστική ισχύ, τις δυνατότητες ανίχνευσης του περιβάλλοντος, την ικανότητα επικοινωνίας και τα αποθέματα ενέργειας. Αυτή η υπόθεση είναι αλληλένδετη με την την ιδέα της ταυτόχρονης ανάπτυξης ενός μεγάλου αριθμού συσκευών στην περιοχή του δικτύου [2]. Σε αυτό το σενάριο, έχουν προταθεί πολλές ενεργειακά αποδοτικές λύσεις για την διανομή δεδομένων στο δίκτυο, για μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα δείτε [37, 24, 18, 35]. Μία πιο πρόσφατη εκδοχή του μοντέλου του δικτύου αισθητήρων, που βασίζεται σε νέες τεχνολογικές εξελίξεις, είναι τα *ετερογενή* ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Κύρια υπόθεση είναι ότι οι συσκευές έχουν διαφορετικές δυνατότητες. Βασισμένοι σε αυτό το μοντέλο, στο [38] εξετάζεται η περίπτωση που ένα δίκτυο, αποτελείται από μικρό αριθμό υψηλών επιδόσεων κόμβων με βελτιωμένες ικανότητες επικοινωνίας και αναπτύσσεται σε συνδυασμό με ένα δίκτυο κοινών αισθητήρων. Μια ιεραρχική δομή διαμορφώνεται και οι συσκευές αισθητήρων προωθούν τα δεδομένα στους κόμβους υψηλών δυνατοτήτων που μπορούν να τα μεταδώσουν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Θεωρητικά, αυτό επιτρέπει να ακολουθηθούν γρηγορότερες διαδρομές μέσω του δικτύου και οδηγεί στη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι να μην εισαχθούν κόμβοι υψηλών επιδόσεων στο δίκτυο αλλά αντί αυτών να χρησιμοποιηθούν κόμβοι αισθητήρων που έχουν περισσότερους ενεργειακούς πόρους διαθέσιμους ή που τροφοδοτούνται από κάποια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, πχ είναι συνδεδεμένοι με το δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Μια κρίσιμη πτυχή στο σχεδιασμό και την αποδοτική λειτουργία των ασύρματων δικτύων μι-

κροαισθητήρων είναι να εξοικονομηθεί ενέργεια και να διατηρηθεί το δίκτυο σε λειτουργία για όσο το δυνατό μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν προταθεί αρκετές εργασίες στη διεθνή βιβλιογραφία, οι οποίες χρησιμοποιούν χαρακτηριστικά εξοικονόμησης ενέργειας που υπάρχουν ενσωματωμένα στις συσκευές αισθητήρων, όπως την εναλλαγή του κύκλου εργασιών μίας συσκευής από την φυσιολογική κατάσταση λειτουργίας της, που θα ονομάζουμε και *κατάσταση εγρήγορσης* ή κατάσταση αφύπνισης, σε μία κατάσταση απενεργοποίησης των λειτουργιών της και συνεπώς χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, την *κατάσταση αδράνειας* (δείτε [21, 54]) που αναφέρεται και σαν κατάσταση ύπνου. Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη τις περιορισμένες δυνατότητες παροχής ενέργειας και ανεξάρτητα από την ενεργειακή αποδοτικότητα των πρωτοκόλλων, η ενέργεια των συσκευών αισθητήρων (αναπόφευκτα) θα εξαντληθεί. Η αποσύνδεση ορισμένων συσκευών αισθητήρων, είτε λόγω εξάντλησης των ενεργειακών αποθεμάτων είτε λόγω βλάβης, προκαλεί αλλαγές τοπολογίας στο δίκτυο των αισθητήρων. Τέτοιες αλλαγές τοπολογίας μπορούν να μειώσουν την γενική αποδοτικότητα του δικτύου και ακόμη και την αναμενόμενη αποτελεσματικότητά του στο να συγκεντρώνει δεδομένα, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η συνεκτικότητα του δικτύου δεν μπορεί να διατηρηθεί. Στο [10], προτείνονται ενεργειακά αποδοτικές μέθοδοι λειτουργίας των συσκευών του δικτύου, χωρίς να διαταράσσεται η τοπολογία του.

Ένα πιθανό σενάριο για να αντιμετωπιστεί μια τέτοια κατάσταση είναι να προστεθούν επιπλέον συσκευές αισθητήρων οι οποίες θα «αντικαταστήσουν» τους κόμβους που εμφανίζουν δυσλειτουργίες, ενώ το δίκτυο παραμένει σε λειτουργία (δείτε [2]), προκειμένου να επεκταθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου αισθητήρων. Σε αυτή την περίπτωση, αναμένεται ότι οι νέες συσκευές θα έχουν υψηλότερα διαθέσιμα ποσά συνολικής ενέργειας από τις συσκευές που αναπτύχθηκαν νωρίτερα στην περιοχή, εξασφαλίζοντας έτσι την συνεχή λειτουργία του δικτύου. Αυτή η στρατηγική αναφέρεται και σαν *κλιμακούμενη ανάπτυξη*.

2.1.1 Σχετική βιβλιογραφία και συζήτηση

Το πρόβλημα της κάλυψης του δικτύου από ασύρματους αισθητήρες που εναλλάσσουν τη λειτουργία τους ανάμεσα σε κατάσταση αδράνειας και εγρήγορσης προκειμένου να εξοικονομήσουν ενέργεια, διερευνάται στα [36, 10]. Δύο μηχανισμοί εξετάζονται, το τυχαίο χρονοπρόγραμμα αδρανοποίησης όπου κάθε κόμβος αποφασίζει ανεξάρτητα από τους άλλους τις περιόδους αδράνειας, και το συντονισμένο χρονοπρόγραμμα όπου οι κόμβοι απενεργοποιούνται ανά ομάδες. Δείχνεται ότι το συντονισμένο χρονοπρόγραμμα είναι πιο ωφέλιμο αλλά με κόστος τα μηνύματα που ανταλλάσσονται για το συντονισμό. Στο [33] παρόμοια πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας μελετώνται αλλά για ένα διαφορετικό πρόβλημα, την ανίχνευση κινούμενων στόχων. Οι συγγραφείς προτείνουν ανεξάρτητα υπολογισμένα προγράμματα αδράνειας και συνεργατικά προγράμματα ανάμεσα στους κόμβους μιας γειτονίας. Για το ίδιο πρόβλημα, στο [42] ένα τυχαίο χρονοπρόγραμμα εναλλαγών αδράνειας εγρήγορσης προτείνεται που εγγυάται κ-κάλυψη του δικτύου. Οι συγγραφείς συσχετίζουν την ανάγκη για ύπαρξη ενός ελάχιστου αριθμού ενεργών κόμβων ώστε να επιτύχει η ανίχνευση κινητού στόχου. Επισημάνουμε πως *καμία από τις παραπάνω προσεγγίσεις δεν προσαρμόζει το χρονοπρόγραμμα καταστάσεων αδράνειας εγρήγορσης*. Όλες οι στρατηγικές είτε υποθέτουν ανταλλαγή επιπλέον μηνυμάτων ελέγχου ή συγχρονισμό ανάμεσα στους κόμβους. Αντίθετα εμείς χρησιμοποιούμε *προσαρμοστικές τεχνικές* που δεν επιφέρουν σχεδόν κανένα κόστος επικοινωνίας και χωρίς να απαιτούν συγχρονισμό.

Στο [50], δίκτυα αισθητήρων με ετερογένεια εξετάζονται, υποτίθεται ότι δύο ομάδες αισθη-

2.1 Εισαγωγή

τήρων με διαφορετική ενέργεια και δυνατότητα επικοινωνίας αναπτύσσονται ομογενώς σε μια περιοχή δικτύου. Στο μοντέλο μας δεν περιορίζουμε τον αριθμό των διαφορετικών αισθητήρων σε δύο ομάδες, αλλά επιτρέπουμε πολλές διαφορετικές. Μια προσέγγιση βασισμένη σε ομαδοποίηση παρουσιάζεται στο [27], όπου μελετούν το πρόβλημα διαρκούς παρακολούθησης με δίκτυα αισθητήρων, ποσοτικοποιούν την κατανάλωση ενέργειας και μελετούν τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Στο [9] ένα κατανεμημένο πρωτόκολλο προτείνεται (EAD), το οποίο χρησιμοποιεί μια ευρετική μέθοδο ώστε να βελτιώσει την δρομολόγηση δεδομένων. Το πρωτόκολλο με βάση την ενέργεια του κάθε κόμβου, κατασκευάζει ένα δένδρο διάδοσης ανεξάρτητο από τοπολογία για δρομολόγηση δεδομένων. Δείτε [11], για μια επισκόπηση αποδοτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Για μια διαφορετική προσέγγιση στην εξισορρόπηση ενέργειας δείτε [56, 43, 28]. Για ένα συνδυασμό εξισορρόπησης ενέργειας και αποφυγής εμποδίων δείτε [3]. Πλήρη κάλυψη των θεμάτων που προκύπτουν στα δίκτυα αισθητήρων, μπορεί να βρεθεί στο [8].

2.1.2 Η προσέγγισή μας

Με βάση όσα επισημάνσαμε παραπάνω, διαπιστώνουμε ότι οι συνθήκες στο δίκτυο μπορεί να παρουσιάζουν σημαντικές ανομοιογένειες ή να αλλάξουν άρδην μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Τέτοιες περιπτώσεις θέτουν σοβαρές δυσκολίες στην αποδοτική λειτουργία των πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Επιπλέον η χρήση πρωτοκόλλων εξοικονόμησης ενέργειας που βασίζεται σε εναλλαγές καταστάσεων «αδράνειας-εγρήγορσης» μπορεί να επιδεινώσει την κατάσταση αφού μεταβάλει περαιτέρω την τοπολογία αλλάζοντας βασικές παράμετρους όπως η κάλυψη και η συνεκτικότητα. Ιδανικά, αν ήταν δυνατό να ελεγχθούν όλες οι εναλλαγές στην τοπολογία, τότε ένας βέλτιστος αλγόριθμος θα καθόριζε τις αλλαγές κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούν τη συνεκτικότητα του δικτύου και ένα ικανό αριθμό συσκευών ενεργών ανά πάσα στιγμή, ώστε να συνεχίζεται απρόσκοπτα η λειτουργία του δικτύου. Κινούμενοι προς αυτή την κατεύθυνση, *διερευνούμε τεχνικές προσαρμογής* της λειτουργίας των μηχανισμών εξοικονόμησης ενέργειας οι οποίες βασίζονται σε γνώση που μπορεί να αποκτηθεί τοπικά σε κάθε κόμβο προκειμένου να αντιμετωπίσουν αλλαγές στις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο. Ενσωματώνουμε τις τεχνικές αυτές σε ένα νέο πρωτόκολλο εξοικονόμησης ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ότι η εναλλαγή των αισθητήρων μεταξύ αυτών των καταστάσεων αναστατώνει αναπόφευκτα τη λειτουργία των δικτύων, αφού αλλάζουν βασικές παράμετροι όπως η κάλυψη και η συνεκτικότητα, το πρωτόκολλό μας ελέγχει τις τοπικές συνθήκες του δικτύου και ρυθμίζει δυναμικά τα προγράμμάτα ύπνου-αφύπνισης των κόμβων, σύμφωνα με μια δεδομένη στρατηγική. Αυτή η *δυναμική προσαρμογή* του προγράμματος εναλλαγών καταστάσεων είναι μια σημαντική νέα συμβολή όσον αφορά τις σχετικές ιδέες που παρουσιάζονται στο [21] και τη σχετική βιβλιογραφία. Μελετάμε δύο στρατηγικές προσαρμογής:

- α) προσαρμογή με κριτήριο την τρέχουσα πυκνότητα κόμβων στο δίκτυο, η οποία έχει ως στόχο να αντιμετωπίσει τις βλάβες, την ανακατανομή των αισθητήρων, την εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων ορισμένων αισθητήρων κλπ.
- β) την προσαρμογή με κριτήριο τη διαθέσιμη ενέργεια, όπου και στοχεύουμε στην εξισορρόπηση των ενεργειακών αποθεμάτων μεταξύ των συσκευών και την παράταση της διάρκειας ζωής του συστήματος.

Το πρωτόκολλό μας δεν χρησιμοποιεί επιπλέον μηνύματα ελέγχου για να συλλέξουν πληροφορία και να συγχρονίσουν τους αισθητήρες, αλλά αντίθετα, λειτουργεί με ένα σύνολο απλών

κανόνων που είναι βασισμένοι μόνο στις τοπικά μετρούμενες συνθήκες.

2.2 Το μοντέλο

Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από έναν πολύ μεγάλο αριθμό εξαιρετικά-μικρών ομοιογενών (στη γενική περίπτωση) συσκευών αισθητήρων, τις οποίες καλούμε εδώ και κόκκους ή σωματίδια (δείτε επίσης [22, 21]). Κάθε σωματίδιο είναι μια πλήρως-αυτόνομη συσκευή υπολογισμού και επικοινωνίας, που χαρακτηρίζεται κυρίως από τη διαθέσιμη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος (μπαταρία) και το ενεργειακό κόστος του υπολογισμού και της διαβίβασης δεδομένων. Τέτοιες συσκευές (στο μοντέλο μας) δεν κινούνται. Έστω n ο αριθμός συσκευών που αναπτύσσονται σε μια περιοχή $\mathcal{A}$. Υπάρχει ένα μοναδικό σημείο στην περιοχή του δικτύου $\mathcal{S}$, που αντιπροσωπεύει ένα κέντρο ελέγχου όπου πρέπει να μεταδοθούν τα δεδομένα.

Υποθέτουμε δύο μεθόδους κατανομής των αισθητήρων στο δίκτυο: (α) *ομοιόμορφη κατανομή* όπου οι συσκευές τοποθετούνται με τυχαίο και ομοιόμορφο τρόπο στο δίκτυο, (β) *επικεντρωμένη κατανομή* στο $\mathcal{S}$, η οποία είναι τέτοια ώστε η τοποθέτηση συσκευών στο δίκτυο να ακολουθεί μία μη ομοιόμορφη τυχαία κατανομή (πχ Gaussian) και η πυκνότητα των κόμβων να είναι μεγαλύτερη όσο πλησιάζουμε το κέντρο ελέγχου (δείτε το Σχήμα 2.1). Αυτή η υπόθεση γίνεται επειδή έχει δείχθει ότι η περιοχή κοντά στο κέντρο ελέγχου δέχεται μεγάλο φόρτο μηνυμάτων, αφού όλη η κίνηση πρέπει να διέλθει από εκεί για να φτάσει στο $\mathcal{S}$.

Επίσης προκειμένου να μοντελοποιήσουμε τεχνικές *κλιμακωτής ανάπτυξης* (δηλαδή προσθήκη συσκευών ενώ το δίκτυο βρίσκεται ήδη σε λειτουργία), υποθέτουμε ότι οι n συσκευές που απαρτίζουν το δίκτυο είναι μοιρασμένες σε g ομάδες $g_0, g_1, \dots, g_{g-1}$ οι οποίες απαριθμούν αντίστοιχα $n_0, n_1, \dots, n_{g-1}$ μέλη, ώστε $n = \sum_{i=0}^{g-1} n_i$. Οι συσκευές που ανήκουν στην ομάδα g_0 αναπτύσσονται στη χρονική στιγμή $t = 0sec$, δηλαδή κατά τη δημιουργία του δικτύου, ενώ κάθε ομάδα g_i , με $0 < i < g$, αναπτύσσεται τη χρονική στιγμή t_i .

Τα σωματίδια είναι εξοπλισμένα με ένα σύνολο οργάνων μέτρησης διάφορων συνθηκών (αισθητήρες) για το φως, την πίεση, τη θερμοκρασία κλπ. Κάθε συσκευή έχει έναν πομπό/δέκτη για ασύρματη επικοινωνία που χαρακτηρίζεται από την εμβέλειά του R . Κάθε συσκευή είναι εξοπλισμένη με μια παροχή ηλεκτρικού ρεύματος (πχ μπαταρία), η οποία προσφέρει έναν μηχανισμό που παρέχει μετρήσεις των υπολειπόμενων αποθεμάτων της.

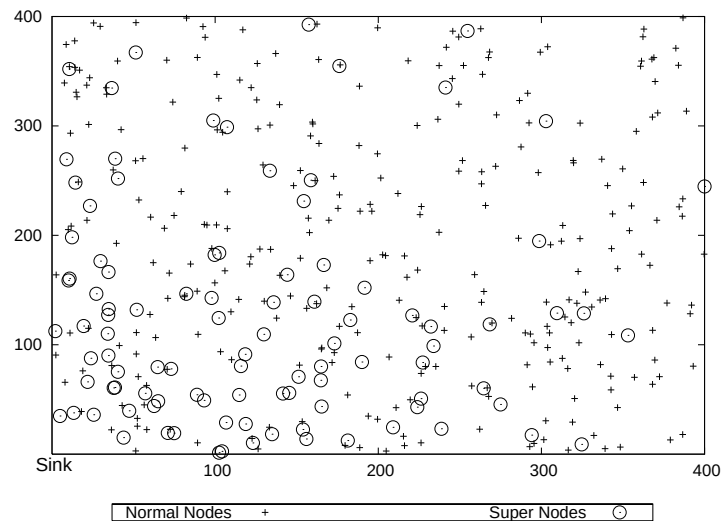
Ορισμός 1 Έστω E_i η διαθέσιμη ενέργεια του κόμβου i στη δεδομένη χρονική στιγμή.

Επίσης υποθέτουμε ότι μπορούμε να αναπτύξουμε στο δίκτυο *ετερογενείς συσκευές*, υπό την έννοια ότι οι συσκευές έχουν διαφορετικά αρχικά αποθέματα ενεργείας, δηλαδή κάποιοι κόμβοι έχουν περισσότερη ενέργεια από άλλους.

Οποιαδήποτε στιγμή, κάθε συσκευή μπορεί να είναι σε μία από τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις κατανάλωσης ενέργειας: (α) μετάδοση ενός μηνύματος, (β) λήψη ενός μηνύματος, (γ) αναμονή επικοινωνίας και αντίληψη των γεγονότων, και (δ) κατάσταση ύπνου. Κατά τη διάρκεια της κατάστασης ύπνου, η συσκευή αναστέλλει οποιαδήποτε επικοινωνία με το περιβάλλον, κατά συνέπεια είναι ανίκανο να λάβει οποιοδήποτε μήνυμα ή να αισθανθεί ένα γεγονός. Από αυτή την άποψη, υποθέτουμε ότι η κατανάλωση ενέργειας ενός σωματιδίου σε κατάσταση ύπνου είναι αμελητέα.

Για την περίπτωση μετάδοσης ενός μηνύματος, υποθέτουμε ότι το κύκλωμα του πομπού καταναλώνει ένα ποσό ενέργειας ανάλογο προς το μέγεθος του μηνύματος. Για να μεταδώσει

2.2 Το μοντέλο



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα ομοιόμορφης κατανομής «κανονικών» κόμβων και ανομοιόμορφης κατανομής «ισχυρών» κόμβων

ένα μήνυμα μήκους $k\text{bit}$, ο πομπός χρησιμοποιεί ενέργεια $E_T(k) = \epsilon_{trans} \cdot k \text{ Watt}$ και για να λάβει ένα μήνυμα $k \text{ bits}$, το κύκλωμα λήψης χρησιμοποιεί ενέργεια $E_R(k) = \epsilon_{recv} \cdot k \text{ Watt}$ όπου $\epsilon_{trans}, \epsilon_{recv}$ είναι σταθερές που εξαρτώνται από το ραδιοκύκλωμα και την ακτίνα μετάδοσης των κόκκων.

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν τρία διαφορετικά αίτια κατανάλωσης ενέργειας: (α) E_T , ενέργεια που καταναλώνεται για τη μετάδοση μηνυμάτων, (β) E_R , ενέργεια που καταναλώνεται για τη λήψη μηνυμάτων και (γ) E_{idle} , ενέργεια που καταναλώνεται σε κατάσταση αναμονής. Για την κατάσταση αναμονής, υποθέτουμε ότι καταναλώνεται ενέργεια για τη λειτουργία των κυκλωμάτων η οποία είναι σταθερή στη μονάδα του χρόνου και ίση με E_{elec} (η χρονική μονάδα είναι 1 δευτερόλεπτο). Σημειώνουμε ότι στις προσομοιώσεις μας μετράμε ρητά τις ανωτέρω ενεργειακές δαπάνες, ενώ οι ακριβείς τιμές των ϵ_{trans} , ϵ_{recv} και E_{idle} επιλέχθηκαν ώστε να ταιριάζουν όσο είναι δυνατόν με τις προδιαγραφές της πλατφόρμας **mica** [1].

Τέλος, υποθέτουμε ότι μια συγκεκριμένη, υψηλού επιπέδου, εφαρμογή εκτελείται από τα σωματίδια που απαρτίζουν το δίκτυο. Τα γεγονότα για τα οποία «ενδιαφέρεται» η εφαρμογή, πραγματοποιούνται σε όλη τη περιοχή του δικτύου, ενώ κάθε γεγονός «συλλαμβάνεται» από ένα μόνο αισθητήρα, που δημιουργεί ένα μήνυμα προκειμένου να διαδοθεί η πληροφορία στο κέντρο ελέγχου. Η εφαρμογή χαρακτηρίζεται από την ποσότητα λ , που εκφράζει τον ολικό ρυθμό παραγωγής μηνυμάτων του δικτύου αισθητήρων, που μετρείται σε αριθμό μηνυμάτων ανά χρονικό διάστημα.

2.3 Προσαρμοστικό πρωτόκολλο για εξοικονόμηση ενέργειας APCP

Το πρωτόκολλο που παρουσιάζουμε σε αυτό το κεφάλαιο, βασίζεται στο ότι υπάρχει ένας μηχανισμός που επιτρέπει σε κάθε συσκευή να εναλλάσσει την κατάσταση λειτουργίας της σε περιόδους «ύπνου» και «αφύπνισης». Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου ύπνου, τα σωματίδια παύουν οποιαδήποτε επικοινωνία με το περιβάλλον, κατά συνέπεια η κατανάλωση ενέργειας θεωρείται ότι είναι ελάχιστη και σχεδόν αμελητέα, ενώ όταν ένα σωματίδιο είναι σε εγρήγορση, καταναλώνει ενέργεια όπως περιγράψαμε στο μοντέλο. Υποθέτουμε ότι τα χρονικά διαστήματα ύπνου/αφύπνισης εναλλάσσονται στοχαστικά ανεξάρτητα σε κάθε συσκευή και έχουν διάρκειες T_s , T_w αντίστοιχα, αυτό μπορεί να επιτευχθεί εύκολα εάν κατά τη διάρκεια της φάσης αρχικοποίησης του δικτύου, κάθε συσκευή διατηρεί ένα χρονόμετρο, το οποίο θέτει σε μία τυχαία χρονική στιγμή που επιλέγεται από το χρονικό πλαίσιο $T = T_s + T_w$ των περιόδων ύπνου/αφύπνισης. Ο μηδενισμός του χρονόμετρου, σηματοδοτεί την αλλαγή κατάστασης και την έναρξη μιας νέας χρονομέτρησης. Η μέθοδος ύπνου/αφύπνισης ορίζει μία καθολική τιμή γ που εκφράζει την αναλογία μεταξύ των διαρκειών των περιόδων ύπνου και αφύπνισης, η αναλογία αυτή στο στάδιο της αρχικοποίησης καθορίζει το χρονοδιάγραμμα παραμονής των σωματιδίων σε κάθε κατάσταση, δηλαδή καθορίζει τις τιμές T_s , T_w . Θεωρούμε

$$\gamma = \frac{T_s}{T_w}$$

ο λόγος αυτός ποσοτικοποιεί την εξοικονόμηση ενέργειας, που συμβολίζουμε με en , που πετυχαίνει το πρωτόκολλο στις συσκευές αισθητήρων, δηλαδή έχουμε

$$en = \frac{T_s}{T_s + T_w} = 1 - \frac{1}{1 + \gamma}$$

Όταν η τιμή en τείνει στο 0 τα σωματίδια βρίσκονται συνέχεια σε κατάσταση εγρήγορσης και δεν εξοικονομούν καθόλου ενέργεια, ενώ όταν τείνει στο 1 έχουμε μόνιμη κατάσταση ύπνου και μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας.

Κάθε συσκευή μετρά το χρονικό διάστημα που βρίσκεται σε μια κατάσταση, ώστε η διάρκεια μιας περιόδου να μην ξεπεράσει το καθορισμένο χρονοπρόγραμμα. Η λήξη μιας περιόδου σηματοδοτεί την εναλλαγή από την τρέχουσα κατάσταση στην επόμενη. Η διάρκεια του χρονικού πλαισίου T ορίζεται ως το άθροισμα της χρονικής διάρκειας στην κατάσταση ύπνου και της χρονικής διάρκειας στην κατάσταση αφύπνισης, δηλαδή $T = T_s + T_w$, το χρονοπρόγραμμα καθορίζεται από διαδοχικά χρονικά πλαίσια διάρκειας T . Αφού το χρονόμετρο κάθε σωματιδίου αρχικοποιείται σε μία τυχαία στιγμή του χρονικού πλαισίου, τα χρονοπρογράμματα των συσκευών θα είναι διαφορετικά. Επομένως, εξασφαλίζεται ότι οι μεταβάσεις περιόδων ύπνου και αφύπνισης δεν εμφανίζονται ταυτόχρονα, αλλά μάλλον κατά τρόπο τυχαίο.

Τα πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας για τέτοια ενεργειακά περιορισμένα συστήματα πρέπει τουλάχιστον να εγγυηθούν ότι το κέντρο ελέγχου λαμβάνει τελικά τα μηνύματα που αναφέρουν ένα κρίσιμο γεγονός. Η επιτυχία τέτοιων πρωτοκόλλων εξαρτάται από την πυκνότητα και την κατανομή των συσκευών αισθητήρων στην περιοχή κάλυψης του δικτύου A , της διάρκειας των χρονικών περιόδων ύπνου και αφύπνισης και, φυσικά, της ακτίνας ραδιοεπικοινωνίας R . Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν την ύπαρξη διαδρομών προς το κέντρο ελέγχου και συνεπώς και την ικανότητα διάδοσης δεδομένων διαμέσου του δικτύου.

2.3 Προσαρμοστικό πρωτόκολλο για εξοικονόμηση ενέργειας APCP

Στο [21], παρουσιάζονται μερικά πρώτα αναλυτικά αποτελέσματα για την αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των παραμέτρων. Εντούτοις σημειώνουμε ότι μέχρι τώρα πρωτόκολλα που βασίζονται σε χρονοπρογράμματα εναλλαγής καταστάσεων έχουν μελετηθεί στις περιπτώσεις που δεν σημειώνεται καμία σύγκρουση κατά την επικοινωνία των συσκευών (δηλαδή κάτω από ένα ιδανικό πρωτόκολλο **MAC**). Επιπλέον, οι παράμετροι λειτουργίας της μεθόδου ύπνου/αφύπνισης είναι στατικές, δηλαδή *δεν προσαρμόζονται στις αλλαγές των παραμέτρων (πχ πυκνότητα) του δικτύου*.

Υποθέτοντας ότι τα σωματίδια κατανέμονται τυχαία και ομοιόμορφα στο χώρο του δικτύου μικροαισθητήρων, η πυκνότητα σωματιδίων μπορεί να υπολογιστεί, όπως προτείνεται στο [13], ως

$$\mu(\mathcal{R}) = \frac{(n \pi R^2)}{\mathcal{A}}$$

όπου n είναι ο συνολικός αριθμός σωματιδίων που αναπτύσσονται στην περιοχή $\mathcal{A}$ και R η ακτίνα μετάδοσης. Βασικά, το $\mu(\mathcal{R})$ δίνει τον μέσο αριθμό σωματιδίων εντός της ακτίνας μετάδοσης κάθε σωματιδίου στην περιοχή $\mathcal{A}$. Εντούτοις, δεδομένου ότι κάθε συσκευή εναλλάσσει την κατάσταση της μεταξύ των περιόδων ύπνου και αφύπνισης, το $\mu(\mathcal{R})$ είναι στην πραγματικότητα ένα άνω όριο στον αριθμό σωματιδίων που είναι σε εγρήγορση. Έτσι, *θεωρούμε ότι το $\mu_a(\mathcal{R})$ είναι ο αριθμός ενεργών σωματιδίων στην περιοχή $\mathcal{A}$* . Άρα, δεδομένου ότι το μήκος κάθε περιόδου ύπνου και αφύπνισης ρυθμίζεται από τον παράγοντα εξοικονόμησης ενέργειας en , αναμένουμε ότι θα ισχύει $\frac{\mu_a(\mathcal{R})}{\mu(\mathcal{R})} \propto 1 - en$.

Προφανώς, εάν οι παράμετροι που έχουν επιπτώσεις στην απόδοση των πρωτοκόλλων διάδοσης (όπως η πυκνότητα του δικτύου, η ακτίνα ραδιοφωνικής μετάδοσης), είναι (λίγο πολύ) γνωστές εκ των προτέρων, ο παράγοντας εξοικονόμησης ενέργειας en μπορεί να ρυθμιστεί από το χειριστή του δικτύου ώστε να μεγιστοποιηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα και να διατηρηθεί το δίκτυο λειτουργικό για όσο το δυνατό περισσότερο. Παραδείγματος χάριν, στα αραιά δίκτυα (δηλαδή με χαμηλό $\mu(\mathcal{R})$) η τιμή en πρέπει να είναι μικρή έτσι ώστε αρκετά σωματίδια να συμμετέχουν στη διάδοση των μηνυμάτων. Αφετέρου, στα πυκνά δίκτυα (δηλαδή με μεγάλο $\mu(\mathcal{R})$) ένας μεγαλύτερος αριθμός σωματιδίων μπορεί να τεθεί σε κατάσταση ύπνου κάθε στιγμή προκειμένου να εξοικονομηθεί περισσότερη ενέργεια. Με άλλα λόγια, το en μπορεί να ρυθμίσει το μέσο αριθμό ενεργών σωματιδίων στο δίκτυο ώστε να επιτευχθεί ένα επιθυμητό $\mu_a(\mathcal{R})$ λαμβάνοντας υπόψη το αναμενόμενο $\mu(\mathcal{R})$.

Εντούτοις, έχουμε επισημάνει ήδη ότι στα πραγματικά δίκτυα έξυπνης σκόνης, είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί η πυκνότητα των κόμβων με ακρίβεια, ειδικά εάν εξετάζουμε τις περιπτώσεις όπου τα σωματίδια αναπτύσσονται τυχαία στον τομέα ενδιαφέροντος. Επιπλέον, η πυκνότητα των δικτύων αλλάζει συνεχώς, με την πάροδο του χρόνου η τοπολογία του δικτύου εξελίσσεται, αφού λόγω των περιορισμένων αποθεμάτων της μπαταρίας, η ενέργεια των συσκευών μικροαισθητήρων (αναπόφευκτα) θα εξαντληθεί. Είναι επίσης δυνατό σωματίδια να σταματήσουν να λειτουργούν λόγω βλαβών είτε εξαιτίας της καταστροφής τους από τους εξωτερικούς παράγοντες (πχ διερχόμενα ζώα) ή εξαιτίας της αποτυχίας του χαμηλού κόστους εξοπλισμού. Λόγω αυτού του γεγονότος, αναμένουμε ότι το $\mu(\mathcal{R})$ (και κατ'επέκταση το $\mu_a(\mathcal{R})$) θα μειωθεί με την πάροδο του χρόνου. Έτσι, η επίδραση της αρχικής τιμής του en , που σκοπό έχει να οδηγήσει σε ένα δίκτυο με συγκεκριμένο $\mu_a(\mathcal{R})$, θα είναι να φτάσουμε σε μία διαφορετική πυκνότητα μικρότερη από την επιθυμητή. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι το δίκτυο θα λειτουργεί σε επίπεδα μειωμένης απόδοσης.

Όπως συζητείται στο [2], είναι δυνατό να αναπτύξουμε πρόσθετα σωματίδια, ενώ το δίκτυο είναι σε λειτουργία, προκειμένου «να αντικαταστήσουμε» τα δυσλειτουργώντας σωματίδια ή λόγω αλλαγής των απαιτήσεων της εφαρμογής (πχ απαίτηση για αύξηση της κάλυψης της περιοχής για πιο λεπτομερή παρακολούθηση). Κατ' αυτό τον τρόπο ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να επαναφέρει το $\mu(\mathcal{R})$ στα επιθυμητά επίπεδα. Ακόμα, η φύση της διαδικασίας κλιμακωτής κατανομής είναι τέτοια που ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης των νέων συσκευών αισθητήρων (και επομένως της «τοπικής» πυκνότητας) είναι αδύνατος. Αυτό μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ανομοιομορφων κατανομών των συσκευών αισθητήρων.

Στο πλαίσιο της παραπάνω συζήτησης, θέλουμε το πρωτόκολλό μας να έχει την ικανότητα να αντιλαμβάνεται και να αντιδρά κατάλληλα σε αλλαγές στις τοπικές συνθήκες του δικτύου, ρυθμίζοντας το βαθμό εξοικονόμησης ενέργειας en . Η ρύθμιση θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η επιθυμητή τοπική πυκνότητα $\mu_a(\mathcal{R})$ να προσεγγίζεται, ενώ παράλληλα να εξισορροπείται, στο βαθμό που είναι δυνατό, η κατανάλωση ενέργειας ανάμεσα σε γειτονικούς κόμβους. Προκειμένου να ανιχνεύσουμε τις τοπικές συνθήκες στο δίκτυο, χρησιμοποιούμε δύο υποπρωτόκολλα.

2.3.1 Το υποπρωτόκολλο παρακολούθησης πυκνότητας ($P_{density}$)

Καλούμε d_{local} το μέσο αριθμό γειτονικών σωματιδίων που αντιλαμβάνεται μια συσκευή σε μια ορισμένη περιοχή, δηλαδή την τοπική πυκνότητα στη «γειτονία» του σωματιδίου. Αρχικά $d_{local} = d_{init}$, όπου το d_{init} τίθεται από το διαχειριστή του δικτύου με σκοπό να απεικονίσει τις (αναμενόμενες ή επιθυμητές) συνθήκες του δικτύου. Ο αναμενόμενος βαθμός ενός κόμβου συσχετίζεται με την πυκνότητα του δικτύου, δηλαδή $d_{init} \propto d$.

Το $P_{density}$ συνεχώς επιθεωρεί όλα τα λαμβανόμενα πακέτα και αποθηκεύει το μοναδικό αριθμό ταυτοποίησης του κάθε αποστολέα, που περιέχεται στην επικεφαλίδα κάθε πακέτου, σε έναν πίνακα. Για κάθε είσοδο στον πίνακα ένας χρονομετρητής αρχικοποιείται στην τιμή $t_{inactive}$ (πχ $t_{inactive} = 1hr$). Το $t_{inactive}$ τίθεται από τον διαχειριστή του δικτύου και αντιπροσωπεύει το ρυθμό με τον οποίο αναμένονται αλλαγές στην τοπολογία. Όταν ο αριθμός ταυτότητας που μεταφέρει το πακέτο υπάρχει ήδη στον πίνακα, ο αντίστοιχος μετρητής τίθεται σε $t_{inactive}$. Περιοδικά, το $P_{density}$ διατρέχει τον κατάλογο και αφαιρεί εκείνες τις καταχωρήσεις των οποίων ο μετρητής έχει φθάσει στο μηδέν. Δηλαδή σκοπός του μετρητή είναι να αφαιρούνται οι κόμβοι που παραμένουν αδρανείς για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Κατ' αυτό τον τρόπο, ο αριθμός των γειτόνων που η συσκευή αντιλαμβάνεται ως ενεργούς δίνεται από το πλήθος των καταχωρήσεων στον πίνακα. Προσέξτε ότι για τη μέτρηση αυτή χρησιμοποιούμε μόνο τα μηνύματα που μεταφέρουν πληροφορία και όχι επιπλέον μηνύματα ελέγχου. Επίσης, ο υπολογισμός του d_{local} εκτελείται δυναμικά και υπόκειται σε αλλαγές κατά τη διάρκεια του χρόνου. Επομένως, μπορούμε να ορίσουμε τη συνάρτηση ως προς το χρόνο $d_{local}(t)$ που αναφέρεται στην τιμή που μετρά το $P_{density}$ στη χρονική στιγμή t , αρχικά έχουμε $d_{local}(0) = d_{init}$.

2.3.2 Το υποπρωτόκολλο μέτρησης ενέργειας (P_{energy})

Όποτε ένα μήνυμα διαβιβάζεται, το P_{energy} περικλείει στην επικεφαλίδα του μηνύματος μια εκτίμηση της εναπομένουσας ενέργειας E_i . Το P_{energy} διατηρεί έναν πίνακα όπου αποθηκεύει τις ταυτότητες όλων των αποστολέων που του έστειλαν μήνυμα, μαζί με έναν καταχωρητή ενέρ-

2.3 Προσαρμοστικό πρωτόκολλο για εξοικονόμηση ενέργειας APCP

γείας που δείχνει την υπολειπόμενη ενέργεια που είχαν οι κόμβοι όταν διαβιβάστηκε το μήνυμα. Το υποπρωτόκολλο επιθεωρεί συνεχώς όλα τα λαμβανόμενα πακέτα και ενημερώνει ανάλογα τον τοπικό πίνακα, όπως το P_{density} .

Με βάση αυτόν τον πίνακα που αποθηκεύονται οι ενεργειακοί καταχωρητές, το P_{energy} υπολογίζει σε κάθε συσκευή την τιμή E_{avg} , δηλαδή τη μέση ενέργεια των γειτονικών σωματιδίων στην περιοχή κάλυψης ενός σωματιδίου. Παρατηρήστε ότι ο υπολογισμός του E_{avg} εκτελείται δυναμικά και η τιμή του υπόκειται σε αλλαγή κατά τη διάρκεια του χρόνου. Επομένως μπορούμε να το εκφράσουμε σαν συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή έχουμε $E_{\text{avg}}(t)$ και $E_{\text{avg}}(0) = E_i$.

Αρχικά, όλα τα σωματίδια επιλέγουν ένα τυχαίο χρονοπρόγραμμα περιόδων ύπνου και αφύπνισης με τη διάρκεια του T_s και του T_w να καθορίζονται από το διαχειριστή του δικτύου. Με την πάροδο του χρόνου, κάθε συσκευή πριν μεταπηδήσει στην κατάσταση ύπνου υπολογίζει μια νέα τιμή για το T_s και το T_w , βασιζόμενη στην πληροφορία που έχουν συλλέξει τα υποπρωτόκολλα P_{density} και P_{energy} και τη συγκεκριμένη τιμή d_{init} . Η τιμή d_{init} τίθεται από το διαχειριστή του δικτύου και αντιπροσωπεύει μία εξιδανικευμένη *εκτίμηση* της ελάχιστης πυκνότητας γειτόνων που απαιτούνται για την ομαλή λειτουργία του δικτύου.

$$dSW_d = T_s(0) \cdot \frac{d_{\text{local}}(t)}{d_{\text{init}}} - T_s(0) \quad (2.1)$$

$$dSW_e = T_s(0) \cdot \frac{E_i}{E_{\text{avg}}(t)} - T_s(0) \quad (2.2)$$

$$T_s(t) = T_s(t-1) + \alpha \cdot dSW_d - \beta \cdot dSW_e \quad (2.3)$$

$$T_w(t) = T_w(t-1) - \alpha \cdot dSW_d + \beta \cdot dSW_e \quad (2.4)$$

Στις εξισώσεις 2.1 και 2.2, υπολογίζεται η συμβολή με βάση την πληροφορία κάθε υποπρωτοκόλλου στην τελική προσαρμογή, δηλαδή οι ποσότητες dSW_d, dSW_e . Το αποτέλεσμα με βάση την πυκνότητα είναι οι συσκευές να τίθενται σε κατάσταση ύπνου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα όταν η ανιχνευμένη από το P_{density} τοπική πυκνότητα είναι υψηλότερη από το d_{init} που έθεσε ο διαχειριστής του δικτύου. Έτσι εξοικονομείται ενέργεια όταν υπάρχει πλεόνασμα κόμβων. Αντίθετα, όταν η μετρούμενη τοπική πυκνότητα είναι μικρότερη από το d_{init} , τα σωματίδια βρίσκονται στην κατάσταση εγρήγορσης περισσότερη ώρα για να διατηρηθεί η πυκνότητα σε ανεκτά επίπεδα. Όσον αφορά την ενέργεια, μια συσκευή τίθεται σε κατάσταση ύπνου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα όταν η ανιχνευμένη από το P_{energy} μέση ενέργεια στη γειτονία του σωματιδίου είναι υψηλότερη από τα ενεργειακά αποθέματά του. Αυτό το σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος κόμβος εξαντλείται οπότε πρέπει να εξοικονομήσει περισσότερη ενέργεια από τους γείτονές του. Αντίθετα, όταν η μετρούμενη τοπική μέση διαθέσιμη ενέργεια είναι μικρότερη από τα ενεργειακά αποθέματα ενός σωματιδίου, τότε αυξάνεται η διάρκεια της κατάστασης εγρήγορσης, προκειμένου να αναλάβει περισσότερο φόρτο ο κόμβος με την περισσότερη ενέργεια.

Στις εξισώσεις 2.3 και 2.4 οι ποσότητες αυτές συνδυάζονται προκειμένου να υπολογιστούν οι νέες διάρκειες των περιόδων ύπνου και αφύπνισης του κόμβου. Χάριν στη διαφορετική πληροφορία που συγκεντρώνουν τα δύο υποπρωτόκολλα, οι ποσότητες μεταβολής dSW_d, dSW_e , ανταποκρίνονται σε διαφορετικές συνθήκες του δικτύου ή κάθεμια και λειτουργούν συμπληρωματικά ή μία στην άλλη. Ο συνδυασμός τους μας δίνει τη δυνατότητα να πετύχουμε σημαντικά κέρδη

σε δίκτυα με πολύ διαφορετικές συνθήκες. Οι παράμετροι α και β τίθενται από το διαχειριστή του δικτύου και επιτρέπουν τον λεπτομερή έλεγχο της διαδικασίας προσαρμογής. Πολλαπλασιάζοντας τις ποσότητες dSW_d, dSW_e με το α και β αντίστοιχα, η τελική συνεισφορά της κάθε μεθόδου προσαρμογής ρυθμίζεται με ακρίβεια. Θέτοντας $\alpha = 0$, η προσαρμογή γίνεται μόνο με βάση την ενέργεια, ενώ αντίθετα επικρατεί η προσαρμογή με βάση την πυκνότητα όταν $\beta = 0$. Επιπλέον, ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να ρυθμίσει την ισχύ της προσαρμογής, θέτοντας μικρές τιμές για τα α και β έχουμε μικρότερες αλλαγές, ενώ για τιμές μεγαλύτερες του 1 ενισχύονται οι αλλαγές. Τυπικές τιμές για α και β είναι $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$.

Κατά συνέπεια, το πρωτόκολλο προσπαθεί σε κάθε φάση προσαρμογής να συγκλίνει σε μια βέλτιστη (όσον αφορά την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου) διαδικασία εξοικονόμησης ενέργειας. Με βάση τις εξισώσεις 2.3, 2.4, η ποσότητα $T_s(t) + T_w(t)$ είναι σταθερή και παραμένει αμετάβλητη από την διαδικασία προσαρμογής. Αυτό το χαρακτηριστικό της διαδικασίας προσαρμογής προσπαθεί να αποτρέψει καταστάσεις όπου ορισμένοι αισθητήρες αυξάνουν συνεχώς το T_s (ή το T_w), που οφείλονται στις τοπικά μετρούμενες συνθήκες, αποτρέποντας έτσι τα σωματίδια να βρίσκονται σε κατάσταση ύπνου ή αφύπνισης για εξαιρετικά μακριές χρονικές περιόδους.

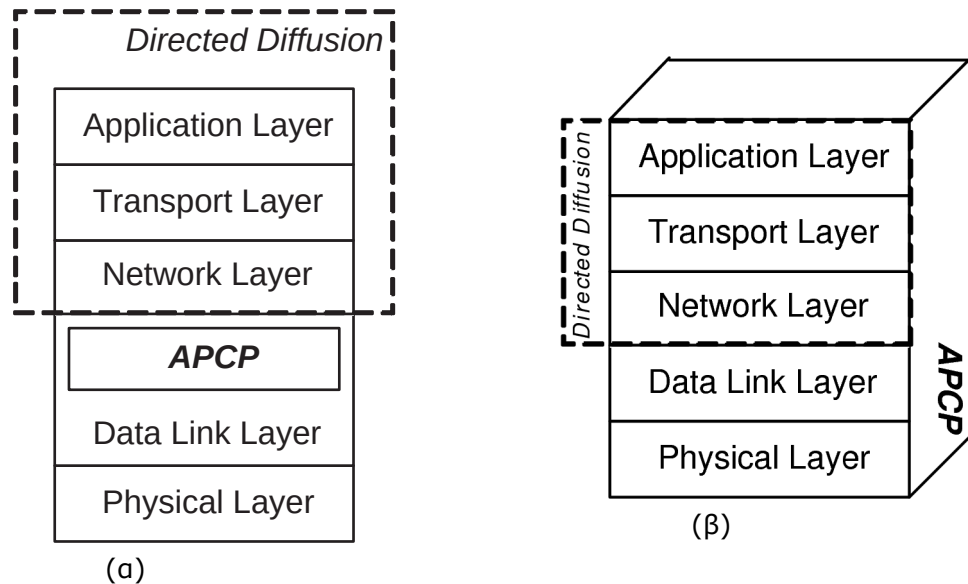
2.4 Αρχιτεκτονική υλοποίησης των πρωτοκόλλων

Μια σημαντική πρόκληση κατά το σχεδιασμό πρωτοκόλλων, όπως το **APCP** που παρουσιάζουμε εδώ, είναι να ενσωματωθούν αυτά τα πρωτόκολλα όσο το δυνατόν ομαλότερα με τα υπάρχοντα. Στη συνέχεια εξετάζουμε δύο διαφορετικές προσεγγίσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενσωματώσουν το πρωτόκολλό μας στη στοίβα πρωτοκόλλων δικτύου μιας γενικής συσκευής μικροαισθητήρων.

Η πρώτη προσέγγιση, που παρουσιάζεται στον σχήμα 2.2α, τοποθετεί το πρωτόκολλό μας στα χαμηλά επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων, δηλαδή το επίπεδο **MAC**. Αυτή η προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα ότι οι τροποποιήσεις γίνονται σε μια ενιαία θέση αφού μόνο ένα επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλων δικτύωσης τροποποιείται. Επιπλέον, τα πρωτόκολλα μπορούν αποτελεσματικά να ελέγξουν τη συμπεριφορά των ανωτέρων επιπέδων της στοίβας. Όμως, το γεγονός ότι το πρωτόκολλο είναι απομονωμένο από το υπόλοιπο της στοίβας πρωτοκόλλων δικτύωσης, απαγορεύει την αλληλεπίδραση με εφαρμογές που συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας. Αναφερόμαστε σε αυτήν την προσέγγιση ως «απόλυτη» υλοποίηση των πρωτοκόλλων αδράνειας-εγρήγορσης.

Στη δεύτερη προσέγγιση, που παρουσιάζεται στον σχήμα 2.2β, το **APCP** εκτίθενται σε όλα τα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων δικτύωσης και η αλληλεπίδραση επιτρέπεται μεταξύ του πρωτοκόλλου εξοικονόμησης ενέργειας, της εφαρμογής και του επιπέδου **MAC**. Όπως προτείνεται στο [2], όταν μπορούν να αλληλεπιδράσουν τα διαφορετικά επίπεδα πρωτοκόλλων, η συνολική απόδοση της στοίβας πρωτοκόλλων μπορεί να αυξηθεί, δεδομένου ότι τα χαμηλότερα επίπεδα μπορούν να συντονιστούν καλύτερα στις απαιτήσεις της εφαρμογής. Το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι προσεκτικά σχεδιασμένες διεπαφές απαιτούνται προκειμένου να διευκολυνθεί η αλληλεπίδραση χωρίς να διαταραχθεί η λειτουργία των πρωτοκόλλων. Καλούμε αυτήν την προσέγγιση «ενσωματωμένη» υλοποίηση. Στην υλοποίηση των πρωτοκόλλων που εξετάζουμε στη συνέχεια ακολουθούμε την ενσωματωμένη υλοποίηση.

2.5 Πειραματική αξιολόγηση



Σχήμα 2.2: Δύο διαφορετικές μέθοδοι ενσωμάτωσης του **Directed Diffusion** και του **APCP** στη στοίβα πρωτοκόλλων δικτύωσης μίας συσκευής αισθητήρων

2.5 Πειραματική αξιολόγηση

2.5.1 Οργάνωση των πειραμάτων

Αξιολογήσαμε το πρωτόκολλό μας εκτελώντας ευρείας κλίμακας προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή **ns-2**. Υλοποιήσαμε το **APCP** και το ενσωματώσαμε στα πρωτόκολλα δρομολόγησης **Directed Diffusion** και **PFR**, δοκιμάζοντας και περιπτώσεις δικτύων με ετερογενείς αισθητήρες και κλιμακωτή ανάπτυξη αισθητήρων. Το ενεργειακό μοντέλο που παρουσιάζεται στο 2.2 υλοποιείται από τον **ns-2**, οι ακριβείς τιμές των ϵ_{trans} , ϵ_{recv} και E_{idle} τέθηκαν ώστε να προσομοιώνουν όσο το δυνατόν πιο πιστά τις προδιαγραφές των συσκευών mica [1], ενώ η ακτίνα μετάδοσης κάθε σωματιδίου τέθηκε $R = 50m$. Το δίκτυο αισθητήρων εξαπλώνεται σε μία ορθογώνια περιοχή διαστάσεων $\mathcal{A} = 400 \times 400m$. Βασισμένοι στο μοντέλο μας, η κατανομή των κόμβων στο δίκτυο γίνεται με δύο τρόπους:

- (α) Οι κόμβοι αναπτύσσονται σε τυχαίες θέσεις με ομοιόμορφο τρόπο
- (β) Οι κόμβοι αναπτύσσονται με τυχαίο τρόπο αλλά έτσι ώστε να υπάρχουν περισσότεροι σε θέσεις κοντά στο κέντρο ελέγχου $\mathcal{S}$

Το κέντρο ελέγχου τοποθετείται πάντα στο σημείο $(0,0)$. Εξετάζουμε περιπτώσεις με διαφορετικούς αριθμούς σωματιδίων, $n = \{300, 400, 500, 600, 700\}$ με πυκνότητες (που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.3) $\mu(\mathcal{R}) = \{14.726, 19.634, 24.543, 29.452, 34.361\}$. Εδώ σημειώνουμε ότι στην πειραματική μελέτη που διεξαχθεί στο [37], εξετάστηκαν δίκτυα των διαφορετικών μεγεθών και με ποικίλο αριθμό σωματιδίων, αλλά με μια σχεδόν σταθερή πυκνότητα σωματιδίων $R = 9.817$. Επιπλέον, το **PFR** είναι ένα πρωτόκολλο που ακολουθεί πολλαπλά μονοπάτια

διάδοσης, έχειδειχθεί (δείτε [25]) ότι είναι πολύ αποδοτικό όταν $\mu(\mathcal{R}) \approx 31.5$, δηλαδή σε σχετικά πυκνά δίκτυα, τα οποία συμπεριλαμβάνονται στις παραμέτρους της προσομοίωσης που διεξάγουμε. Η αρχική τιμή d_{init} τίθεται για όλα τα πειράματα στην τιμή 16.

Υποθέτουμε ότι μία εφαρμογή παρακολούθησης περιβαλλοντικών συνθηκών εκτελείται και «ανακαλύπτει» (παράγει) $\lambda = 2$ γεγονότα ανά δευτερόλεπτο. Κάθε γεγονός συλλαμβάνεται από μια τυχαία επιλεγμένη συσκευή και στην προσομοίωσή μας παράγονται 2000 γεγονότα. Η διάρκεια προσομοίωσης υπολογίζεται σύμφωνα με το ρυθμό παραγωγής γεγονότων και είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επιτρέπει σε όλα τα μηνύματα για να παραχθούν. Άλλα 15 δευτερόλεπτα χρόνου προσομοίωσης προστίθενται για να επιτρέψουν την άφιξη τυχών καθυστερημένων μηνυμάτων.

Η διαθέσιμη ενέργεια στα σωματίδια τέθηκε σε χαμηλά επίπεδα, ώστε να μην είναι αρκετή για την διάδοση 2000 γεγονότων. Κάναμε αυτήν την επιλογή προκειμένου να παρατηρήσουμε εάν και για πόσο χρόνο, το πρωτόκολλό μας κατορθώνει να παρατείνει τη διάρκεια ζωής της διαδικασίας διάδοσης.

2.5.2 Μετρικές απόδοσης

Η πειραματική αξιολόγησή μας ερευνά την απόδοση των πρωτοκόλλων **Directed Diffusion** και **PFR**, όταν αυτά συνδυάζονται με το πρωτόκολλο εξοικονόμησης ενέργειας **APCP** που παρουσιάσαμε. Εστιάζουμε στις εξής μετρικές:

- ($\mathbb{P}_s$) ποσοστό επιτυχίας που επιτυγχάνεται από το δίκτυο, ως το ποσοστό των γεγονότων που αναφέρονται στο κέντρο ελέγχου σε σχέση με το συνολικό αριθμό γεγονότων που παράγονται στο δίκτυο,
- (E_{tot}) η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται από τις συσκευές αισθητήρων, ως το ποσοστό της αρχικά διαθέσιμης ενέργειας
- ($\mathcal{D}$) η καθυστέρηση διάδοσης, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζονται τα αναφερόμενα γεγονότα για να φθάσουν στο κέντρο ελέγχου

Μια παραμετροποιήσιμη μετρική για εκτίμηση αντισταθμίσεων

Όπως επισημάναμε υπάρχουν εγγενείς αντισταθμίσεις ανάμεσα στο ποσοστό επιτυχούς παράδοσης, την κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση (κυρίως ανάμεσα στις δύο τελευταίες μετρικές). Επίσης ανάλογα με την εφαρμογή που εκτελείται συνήθως μας ενδιαφέρει να πετύχουμε καλύτερη αντιστάθμιση ως προς μία μετρική. Έτσι προκειμένου να μελετήσουμε την ποιότητα των αντισταθμίσεων που πετυχαίνουμε προτείνουμε μία γενική, παραμετροποιήσιμη μετρική αντισταθμίσεων, η οποία ορίζεται ακολούθως.

$$\text{trade-off} = \frac{\text{success}^\sigma}{\text{energy}^\epsilon \times \text{delay}^\delta}$$

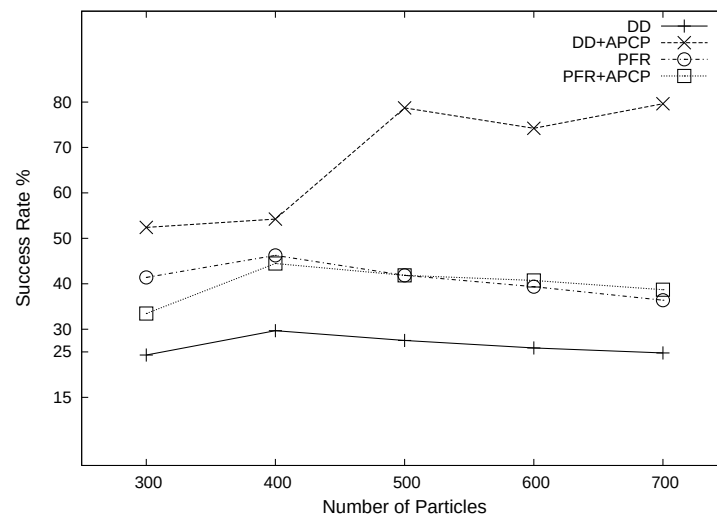
όπου $\sigma > 0, \epsilon > 0, \delta > 0$ σταθερές, $0 < \text{success} \leq 1$ το ποσοστό επιτυχίας, $0 < \text{energy} \leq 1$ η κατανάλωση ενέργειας και $\text{delay} > 0$ η μέση καθυστέρηση διάδοσης. Ανάλογα με την εφαρμογή, δηλαδή της σημασίας που έχει η κάθε μετρική για την εφαρμογή, επιλέγονται διαφορετικές τιμές των σ, ϵ, δ . Δηλαδή οι σταθερές σ, ϵ, δ δηλώνουν την βαρύτητα κάθε μετρικής ως προς

2.5 Πειραματική αξιολόγηση

τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές που είναι πολύ σημαντικό να αναφερθούν όσο το δυνατόν περισσότερα γεγονότα στο κέντρο ελέγχου, η τιμή του σ πρέπει να είναι μεγαλύτερη από των ϵ, δ . Σε εφαρμογές με απαίτηση για άμεση παράδοση, η σταθερά που σχετίζεται με την καθυστέρηση δ πρέπει να λάβει μεγαλύτερη τιμή. Από την άλλη, σε εφαρμογές που είναι πολύ σημαντικό να διατηρήσουμε το δίκτυο λειτουργικό για όσο δυνατόν περισσότερο χρόνο, η σταθερά ϵ πρέπει να έχει τη μεγαλύτερη τιμή από τις τρεις.

Ρυθμίζοντας κατάλληλα τις σταθερές βαρύτητας, μπορούμε να εκτιμήσουμε πόσο επιθυμητή είναι η αντιστάθμιση που πετυχαίνει το πρωτόκολλο για τον τύπο εφαρμογής που εκτελούμε (πχ. περιοδική καταγραφή ή καταγραφή συμβάντων). Για μία κατηγοριοποίηση των εφαρμογών για δίκτυα αισθητήρων δείτε [12]. Στο [45], προτείνεται μία παρόμοια συνάρτηση που αντικατοπτρίζει την αντιστάθμιση ανάμεσα στην ταχύτητα διαμεταγωγής, την κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση, η οποία όμως δεν είναι παραμετροποιήσιμη.

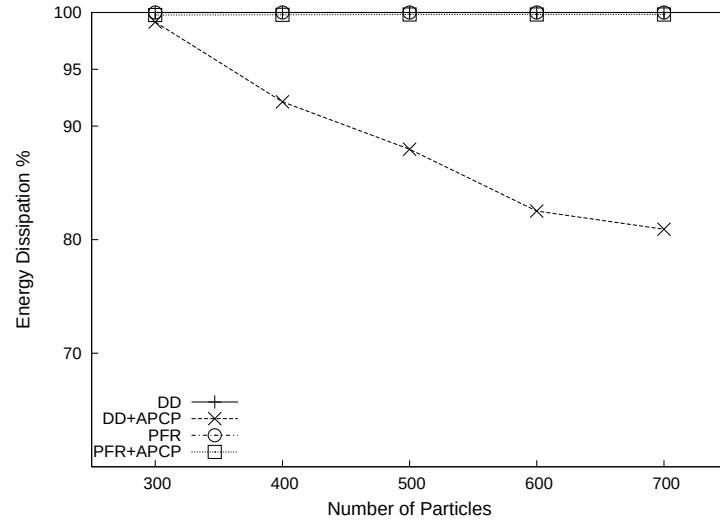
2.5.3 Πειραματικά αποτελέσματα και αξιολόγηση



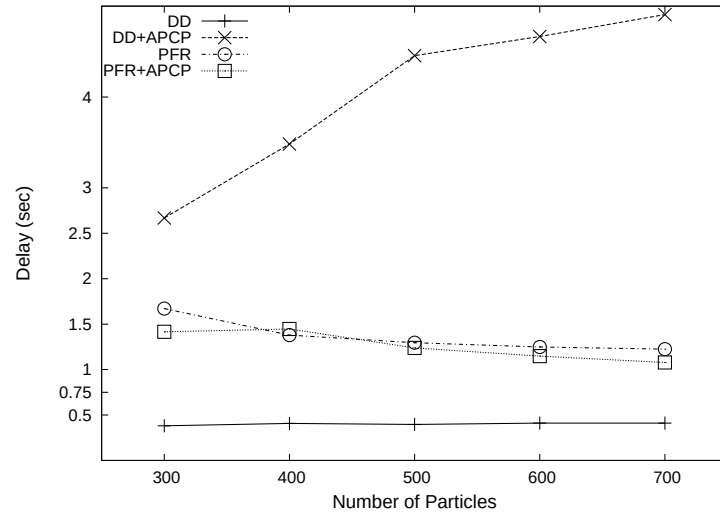
Σχήμα 2.3: Ποσοστό επιτυχίας (P_s) για μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$)

Αρχίζουμε με την αξιολόγηση του αντίκτυπου της σημαντικής παραμέτρου της πυκνότητας των σωματιδίων στην απόδοση του δικτύου στην περίπτωση της διάδοσης 2000 γεγονότων. Στα σχήματα 2.3, 2.4, 2.5, παρατηρούμε ότι η χρήση του **APCP** *υπερδιπλασιάζει* την απόδοση του **Directed Diffusion** ως προς το ποσοστό επιτυχίας. Επιπλέον, το **PFR**, με ή χωρίς **APCP**, υπερσκελίζει σε απόδοση ως προς το ποσοστό επιτυχίας την έκδοση του απλού **DD**, δηλαδή χωρίς **APCP**, ειδικά για υψηλές πυκνότητες. Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, το **DD** με **APCP** πετυχαίνει καλύτερα αποτελέσματα από τα άλλα πρωτόκολλα, με την μεγαλύτερη εξοικονόμηση να επιτυγχάνεται σε δίκτυα μεγάλης πυκνότητας. Αυτό επιβεβαιώνει ότι το **APCP** αναγνωρίζει το πλεόνασμα των κόμβων και ρυθμίζει κατάλληλα την εξοικονόμηση ενέργειας. Τα υπόλοιπα πρωτόκολλα καταναλώνουν πάντα 100% της ενέργειας. Τέλος, η χρήση του **APCP** αυξάνει την καθυστέρηση του **DD** κατά 4.5 sec, σε σχέση με το απλό **DD** που είναι το ταχύτερο

Προσαρμοστικές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας για αποδοτική διάδοση δεδομένων σε ετερογενή δίκτυα αισθητήρων



Σχήμα 2.4: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}) για μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$)



Σχήμα 2.5: Καθυστέρηση παράδοσης ($\mathcal{D}$) για μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$)

πρωτόκολλο. Η αυξημένη καθυστέρηση στα **DD** και **PFR** χωρίς **APCP**, οφείλεται σε συγκρούσεις και επαναμεταδόσεις πακέτων, ενώ με τη χρήση του **APCP** σε πακέτα που παραμένουν στη μνήμη των κόμβων και δεν τα προωθούν επειδή βρίσκονται σε κατάσταση αδράνειας. Παρατηρούμε ότι η απόδοση του **PFR** δεν βελτιώνεται δραστικά από το **APCP**, αυτό μάλλον οφείλεται στην πιθανοτική φύση του πρωτοκόλλου και τις κατευθυντικές μεταδόσεις. Τα υποπρωτόκολλα

2.5 Πειραματική αξιολόγηση

P_{density} και P_{energy} δεν συγκεντρώνουν αρκετή πληροφορία λόγω των μη συμμετρικών μεταδόσεων· σε συνδυασμό και με την καταλληλότητα του **PFR** για πυκνά δίκτυα αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι κόμβοι να μένουν αδρανείς πολύ μικρό χρονικό διάστημα, τέτοιο ώστε να μην επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας. Αυτό το γεγονός αναδεικνύει άλλη μία ιδιότητα του **APCP** που οφείλεται στην απλότητά του: ακόμα και όταν δεν καταφέρνει να βελτιώσει την απόδοση ενός πρωτοκόλλου, δεν την επιβαρύνει με επιπλέον κόστος. Επίσης φαίνεται πώς η απόδοση ως προς τις μετρικές κατανάλωση ενέργειας και καθυστέρησης διάδοσης, συσχετίζεται αφού ο εξαναγκασμός των σωματιδίων στην κατάσταση αδράνειας αναγκάζει τα γεγονότα να ταξιδέψουν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα έως ότου φτάσουν στο κέντρο ελέγχου. Αυτός ο συμβιβασμός μεταξύ της κατανάλωσης και της καθυστέρησης διάδοσης είναι αξιοπρόσεχτος και στα επόμενα πειράματα.

Βασισμένοι στα παραπάνω, εντοπίζουμε τρεις διαφορετικούς τύπους εφαρμογών που δίνουν έμφαση σε μία από τις τρεις βασικές μετρικές. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την παραμετροποιήσιμη μετρική συμβιβασμών στα αποτελέσματα των σχημάτων 2.3-2.5, διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις (δείτε σχήματα 2.6-2.8).

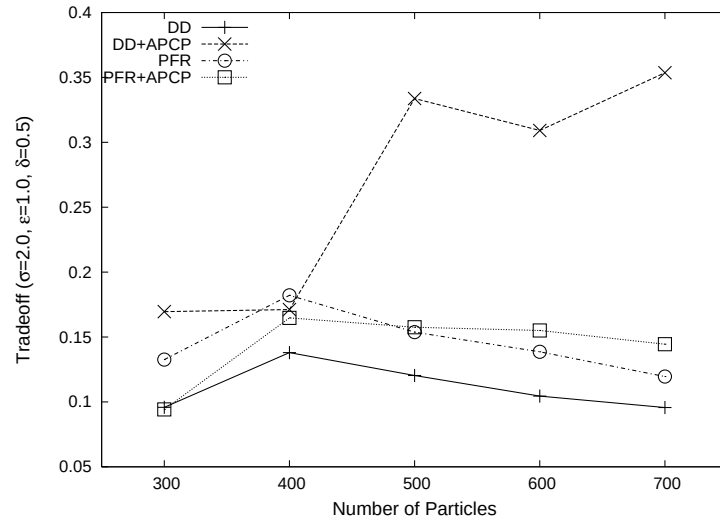
1. Εφαρμογή με απαίτηση για παράδοση όλων των γεγονότων, θέτουμε $\sigma = 2, \epsilon = 1, \delta = 0.5$ για να δώσουμε έμφαση στο ποσοστό επιτυχίας. Στο σχήμα 2.6 παρατηρούμε ότι το **DD** με **APCP** πετυχαίνει τις καλύτερες επιδόσεις, ειδικά σε πυκνά δίκτυα.
2. Σε περιπτώσεις με γεγονότα που εμφανίζονται αραιά είναι πολύ σημαντικό να παρατείνουμε τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Θέτουμε $\sigma = 1, \epsilon = 2, \delta = 0.5$, παρόλο που για μικρές πυκνότητες το απλό **Directed Diffusion** φαίνεται πιο κατάλληλο, συνολικά ο συνδυασμός **DD** με **APCP** είναι πιο αποδοτικός
3. Θέτουμε $\sigma = 1, \epsilon = 0.5, \delta = 2$ για να διερευνήσουμε τη χρονική καθυστέρηση. Το απλό **DD** είναι το καλύτερο πρωτόκολλο, ενώ ο συνδυασμός **DD** με **APCP** το χειρότερο λόγω της αυξημένης καθυστέρησης.

Συνεχίζουμε την αξιολόγηση εξετάζοντας την παραμετροποίηση ως προς την πυκνότητα του δικτύου του **APCP**, θέτοντας διάφορες τιμές στα α και β . Συγκεκριμένα, απενεργοποιούμε την προσαρμογή με βάση την πυκνότητα του **APCP**, θέτοντας $\alpha = 0.0$, απενεργοποιούμε την προσαρμογή με βάση την ενέργεια, θέτοντας $\beta = 0.0$ και εξετάζουμε και μία «ήπια» προσαρμογή θέτοντας $\alpha = 0.5$ και $\beta = 0.5$. Στα σχήματα 2.9-2.11, παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις το **Directed Diffusion** με το **APCP** συμπεριφέρεται καλύτερα όταν η προσαρμογή γίνεται με βάση και τις δύο συνιστώσες ($\alpha = \beta = 1.0$). Η ήπια προσαρμογή (όταν $\alpha = \beta = 0.5$), πετυχαίνει ελαφρά χαμηλότερη απόδοση σε σχέση την πλήρη προσαρμογή. Αυτό το αποτέλεσμα έρχεται ενάντια στην διαίσθησή μας, και υποδεικνύει ότι το σημαντικότερο ρόλο παίζει η συγκέντρωση γνώσης και η ενσωμάτωση με το πρωτόκολλο. Από την άλλη, το **PFR** με **APCP** (δείτε σχήματα 2.12-2.14) εμφανίζει μικρή διαφορά για τις ρυθμίσεις που δοκιμάσαμε, με την περίπτωση $\alpha = 0.0, \beta = 1.0$ να εμφανίζει βελτίωση ως προς το ποσοστό επιτυχίας.

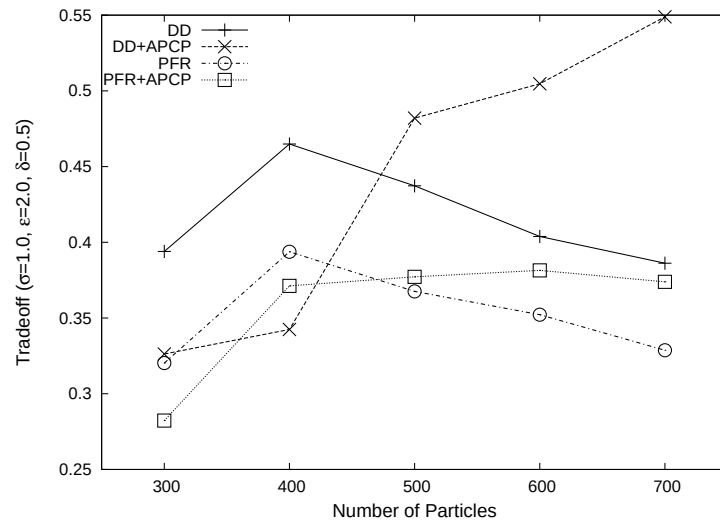
Ετερογένεια

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων μετρούμε την απόδοση του δικτύου υπό την παρουσία ετερογένειας. Τη χρονική στιγμή $t = 0_{\text{sec}}$ αναπτύσσονται στο δίκτυο δύο ομάδες κόμβων: η πρώτη έχει το φυσιολογικό ποσό ενέργειας (δηλαδή ίδιο με το προηγούμενο πείραμα), ενώ η δεύτερη

**Προσαρμοστικές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας
για αποδοτική διάδοση δεδομένων σε ετερογενή δίκτυα αισθητήρων**



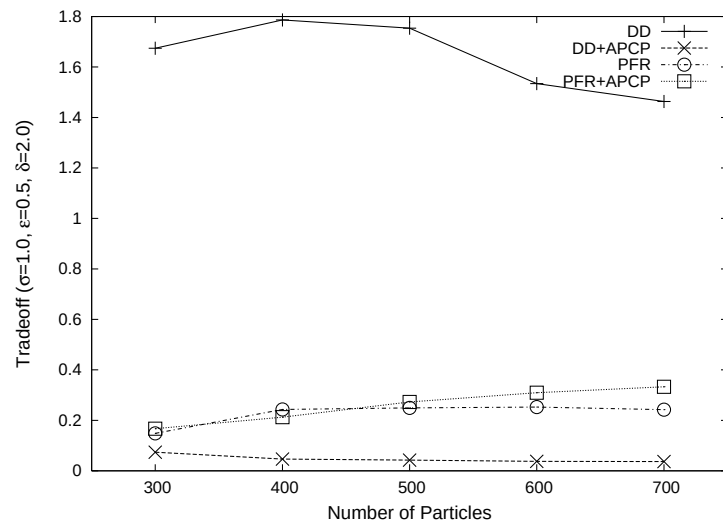
Σχήμα 2.6: Μετρική αντισταθμίσεων για διαφορετικές παραμέτρους βαρύτητας $\sigma = 2, \epsilon = 1, \delta = 0.5$ και μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$)



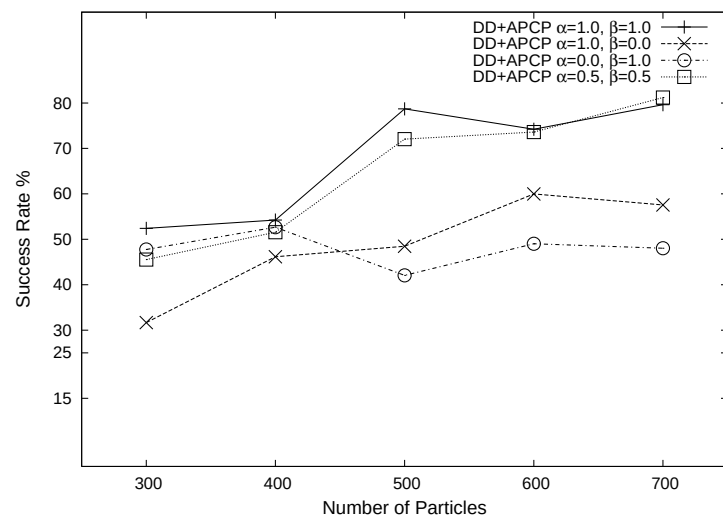
Σχήμα 2.7: Μετρική αντισταθμίσεων για διαφορετικές παραμέτρους βαρύτητας $\sigma = 1, \epsilon = 2, \delta = 0.5$ και μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$)

ομάδα έχει τη *διπλάσια αρχική ενέργεια* (αυτούς τους κόμβους τους αποκαλούμε *ισχυρούς*). Ο συνολικός αριθμός κόμβων υπολογίζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το άθροισμα της αρχικής ενέργειας του συνόλου να είναι ίδιο με αυτό της προηγούμενης σειράς πειραμάτων για την περίπτωση 500 κόμβων, ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Αυτό σημαίνει ότι όσο αυξάνει το ποσοστό ενέργειας σε ισχυρούς κόμβους, αναπτύσσονται δύο φορές λιγότεροι κανονικοί κόμβοι,

2.5 Πειραματική αξιολόγηση



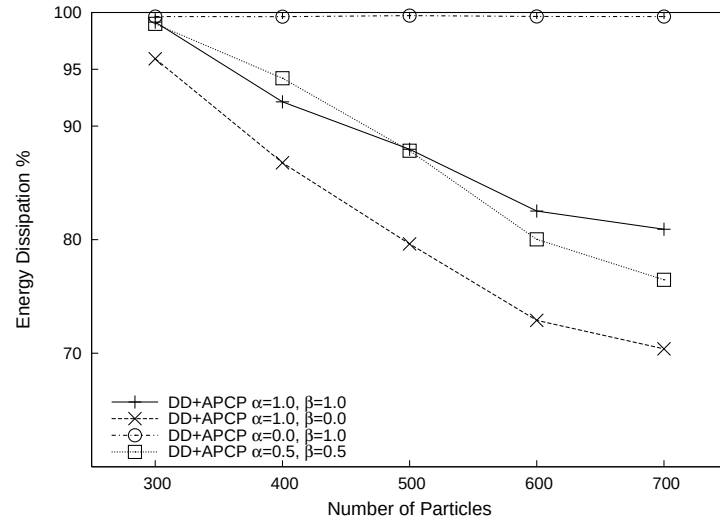
Σχήμα 2.8: Μετρική αντισταθμίσεων για διαφορετικές παραμέτρους βαρύτητας $\sigma = 1, \epsilon = 0.5, \delta = 2$ και μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$)



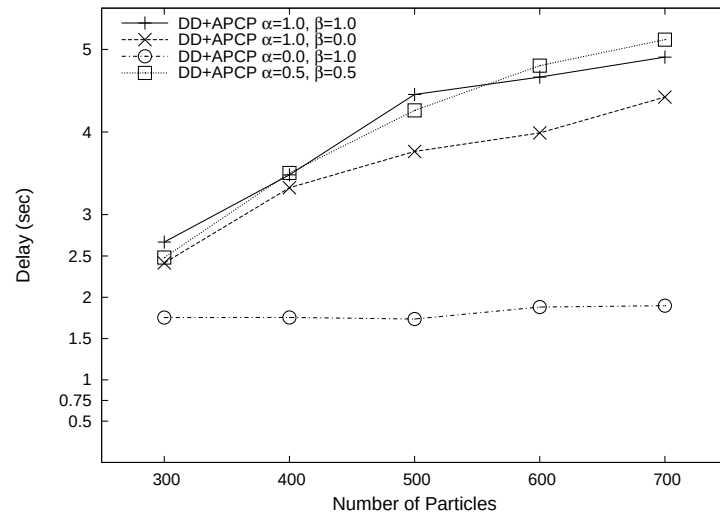
Σχήμα 2.9: Ποσοστό επιτυχίας ($\mathbb{P}_s$) του **Directed Diffusion** με ενσωματωμένο το **APCP** για μεταβλητές τιμές α και β και μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$)

επομένως το δίκτυο είναι αρκετά αραιό όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1. Μεταβάλλουμε το ποσό της ενέργειας που περιέχεται σε ισχυρούς κόμβους σε 20, 40, 60, 80 τοις εκατό. Επίσης σε αυτή τη σειρά πειραμάτων εξετάζουμε και την ανομοιογενή κατανομή κόμβων, σε κάποιες περιπτώσεις οι ισχυροί κόμβοι αναπτύσσονται με μεγαλύτερη πυκνότητα κοντά στο κέντρο ελέγχου $\mathcal{S}$ (δείτε σχήμα 2.1 για ένα παράδειγμα αυτής της κατανομής).

**Προσαρμοστικές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας
για αποδοτική διάδοση δεδομένων σε ετερογενή δίκτυα αισθητήρων**



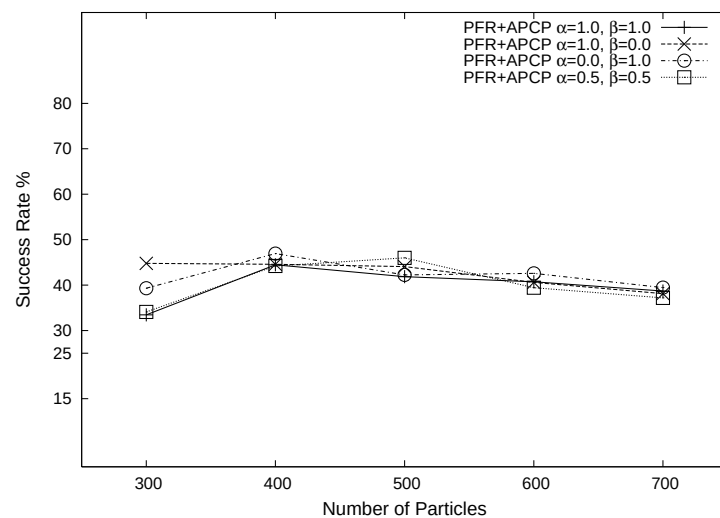
Σχήμα 2.10: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}) του **Directed Diffusion** με ενσωματωμένο το **APCP** για μεταβλητές τιμές α και β και μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$)



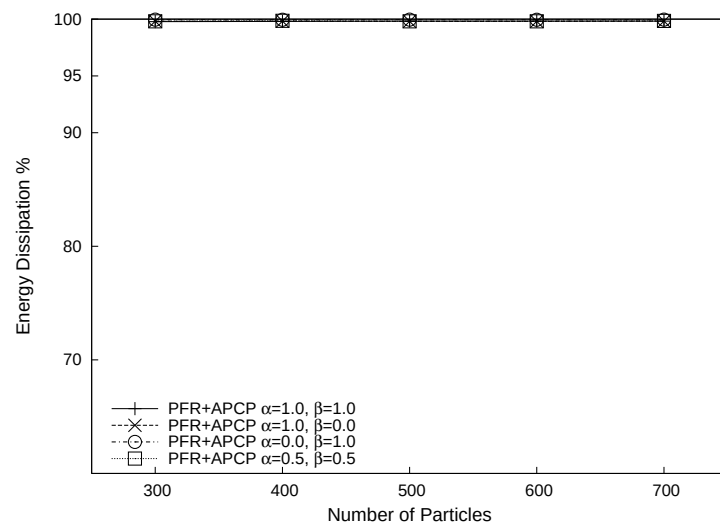
Σχήμα 2.11: Καθυστερήση παράδοσης ($\mathcal{D}$) του **Directed Diffusion** με ενσωματωμένο το **APCP** για μεταβλητές τιμές α και β και μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$)

Στα σχήματα 2.15-2.17, παρατηρούμε ότι για μία ακόμη φορά ο συνδυασμός **Directed Diffusion** με **APCP** υπερσκελίζει σε απόδοση όλα τα υπόλοιπα πρωτόκολλα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το αποτέλεσμα της ανάπτυξης ισχυρών κόμβων καθώς τα πρωτόκολλα αντιδρούν διαφορετικά. Το απλό **PFR** και **Directed Diffusion** επωφελούνται από την ύπαρξη ισχυρών κόμβων. Όμως όταν 80% της ενέργειας βρίσκεται σε ισχυρούς κόμβους, η επιτυχία του **PFR**

2.5 Πειραματική αξιολόγηση



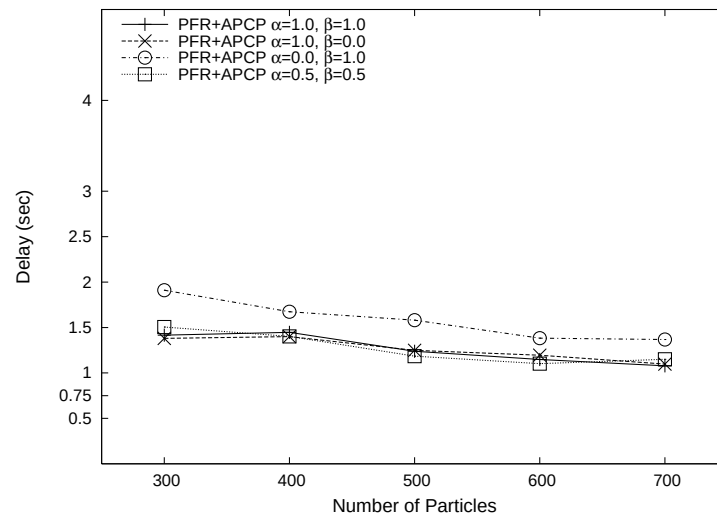
Σχήμα 2.12: Ποσοστό επιτυχίας ($\mathbb{P}_s$) του **PFR** σε συνδυασμό με το **APCP** για μεταβλητές τιμές α και β και μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$)



Σχήμα 2.13: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}) του **PFR** σε συνδυασμό με το **APCP** για μεταβλητές τιμές α και β και μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$)

μειώνεται, αφού τότε έχουμε και την ελάχιστη πυκνότητα κόμβων. Η χρήση του **APCP** έχει σαν αποτέλεσμα ανάμεσα σε ποσοστό ενέργειας που βρίσκεται σε ισχυρούς κόμβους 40% έως 60%, να βλέπουμε μία πτώση της απόδοσης και μια άνοδο σε ποσοστό 80%. Αυτή η συμπεριφορά παρατηρείται επειδή σε εκείνο το σημείο, η προσαρμογή με βάση την πυκνότητα υπερσκελίζει την προσαρμογή με βάση την ενέργεια. Λόγω της ύπαρξης ισχυρών κόμβων το **APCP** με

Προσαρμοστικές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας για αποδοτική διάδοση δεδομένων σε ετερογενή δίκτυα αισθητήρων



Σχήμα 2.14: Καθυστερήση παράδοσης (D) του **PFR** σε συνδυασμό με το **APCP** για μεταβλητές τιμές α και β και μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$)

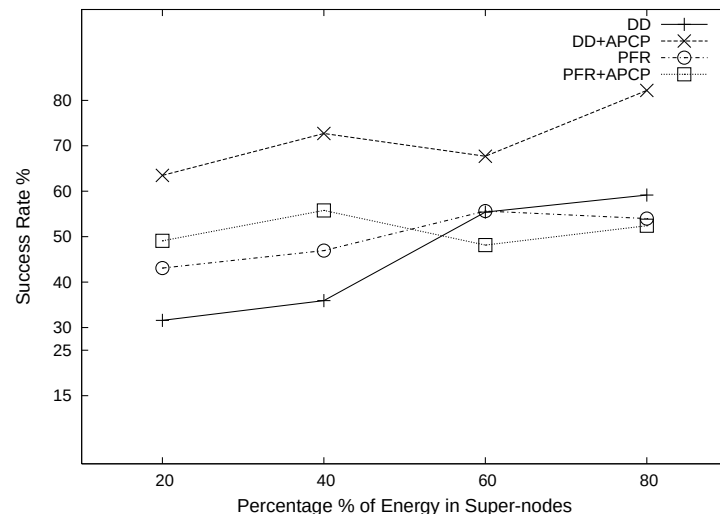
% ενέργειας	Κανονικοί κόμβοι	Ισχυροί κόμβοι
0	500	0
20	400	50
40	300	100
60	200	150
80	100	200

Πίνακας 2.1: Αριθμός κόμβων όταν 20, 40, 60, 80 τοις εκατό της συνολικής αρχικής ενέργειας περιέχεται σε ισχυρούς κόμβους

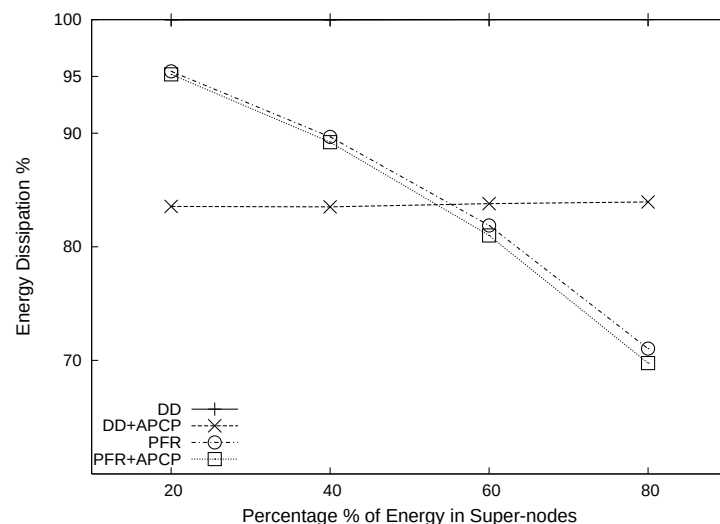
βάση το P_{energy} τείνει να αυξήσει το en , ενώ με βάση το P_{density} να το μειώσει αφού η πυκνότητα είναι χαμηλά. Ακόμα και σε αυτή τη δύσκολη κατάσταση για το **APCP** η συνολική απόδοση παραμένει υψηλή. Στην περίπτωση ανομοιόμορφης κατανομής των ισχυρών κόμβων (σχήματα 2.18-2.20), παρατηρούμε ότι το ποσοστό επιτυχίας για όλα τα πρωτόκολλα *βελτιώνεται σημαντικά*, ιδιαίτερα για το **Directed Diffusion** με **APCP**, το ποσοστό επιτυχίας φτάνει το 92%, ενώ το **PFR** υπερσκελίζει κατά περίπου 30% το απλό **Directed Diffusion**. Αυτό εξηγείται εύκολα αν αναλογιστούμε ότι οι αισθητήρες κοντά στο κέντρο ελέγχου πρέπει να μεταδώσουν περισσότερα μηνύματα, η ανομοιόμορφη κατανομή έτσι όπως την έχουμε ορίσει ενισχύει αυτή την περιοχή.

Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας (σχήματα 2.16 και 2.19), το **Directed Diffusion** με **APCP** καταφέρνει να διατηρήσει την κατανάλωση ενέργειας περίπου σταθερή ως προς τον αριθμό ισχυρών κόμβων, ενώ στη περίπτωση ανομοιόμορφης κατανομής πετυχαίνει επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας. Το **PFR** δεν καταναλώνει όλη την ενέργεια των ισχυρών κόμβων, όπως δείχνει η καμπύλη στο σχήμα 2.16, η κατανάλωση μειώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθ-

2.5 Πειραματική αξιολόγηση



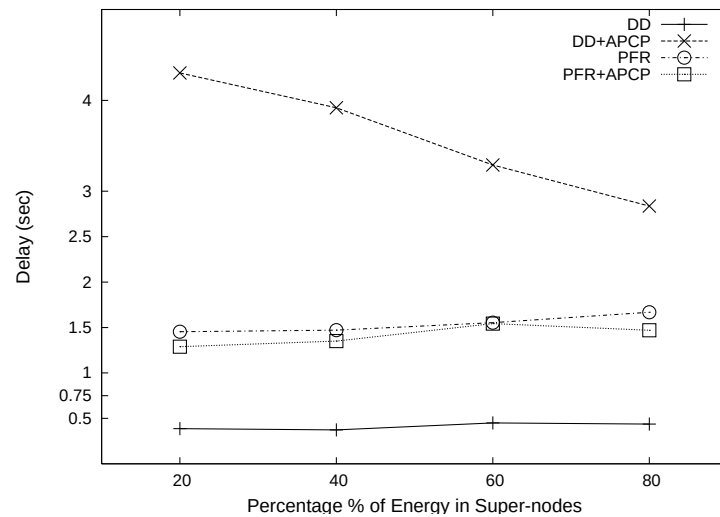
Σχήμα 2.15: Ποσοστό επιτυχίας (P_s) όταν 20, 40, 60, 80 τοις εκατό της συνολικής ενέργειας στο δίκτυο βρίσκεται σε ισχυρούς κόμβους που έχουν κατανεμηθεί ομοιόμορφα στο δίκτυο



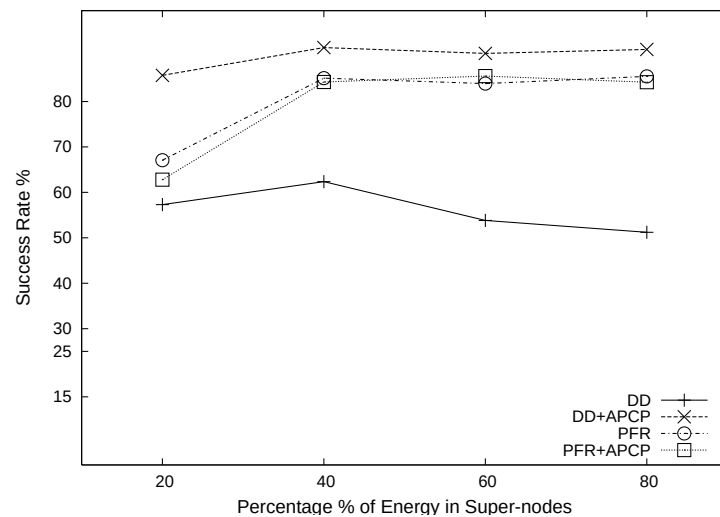
Σχήμα 2.16: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}) όταν 20, 40, 60, 80 τοις εκατό της συνολικής ενέργειας στο δίκτυο βρίσκεται σε ισχυρούς κόμβους που έχουν κατανεμηθεί ομοιόμορφα στο δίκτυο

μός των ισχυρών κόμβων. Προκείμενου να γίνει πιο ξεκάθαρο το τι συμβαίνει στην περίπτωση ανομοιογενούς κατανομής, εμφανίζουμε μία επιπλέον πληροφορία στα σχήματα 2.21-2.23. Καταγράφουμε ένα στιγμιότυπο της ενέργειας των κόμβων σε επιλεγμένες χρονικές στιγμές και παρουσιάζουμε τον ενεργειακό χάρτη του δικτύου. Το δίκτυο χωρίζεται σε υποπεριοχές διαστάσεων $20m \times 20m$ η κάθεμία· φωτεινές περιοχές υποδεικνύουν υψηλή μέση ενέργεια των κόμβων στην περιοχή, ενώ σκούρες περιοχές υποδεικνύουν χαμηλή μέση ενέργεια. Τα στιγ-

Προσαρμοστικές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας για αποδοτική διάδοση δεδομένων σε ετερογενή δίκτυα αισθητήρων



Σχήμα 2.17: Καθυστερήση παράδοσης ($\mathcal{D}$) όταν 20, 40, 60, 80 τοις εκατό της συνολικής ενέργειας στο δίκτυο βρίσκεται σε ισχυρούς κόμβους που έχουν κατανεμηθεί ομοιόμορφα στο δίκτυο

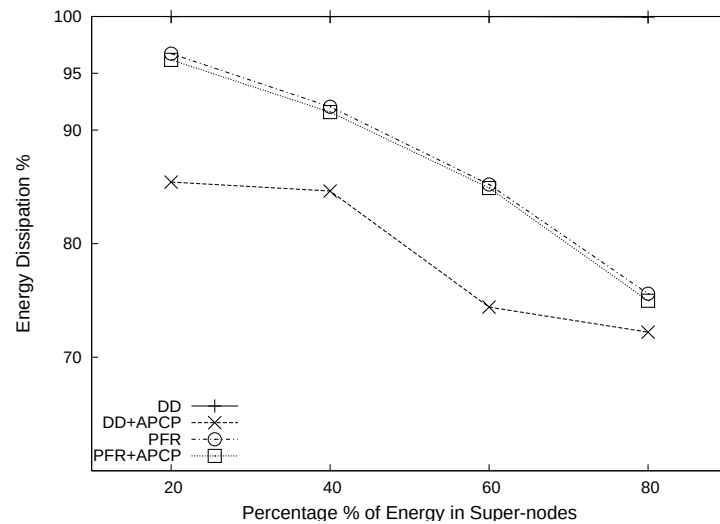


Σχήμα 2.18: Ποσοστό επιτυχίας ($\mathcal{P}_s$) όταν 20, 40, 60, 80 τοις εκατό της συνολικής ενέργειας στο δίκτυο βρίσκεται σε ισχυρούς κόμβους που έχουν κατανεμηθεί ανομοιόμορφα στο δίκτυο

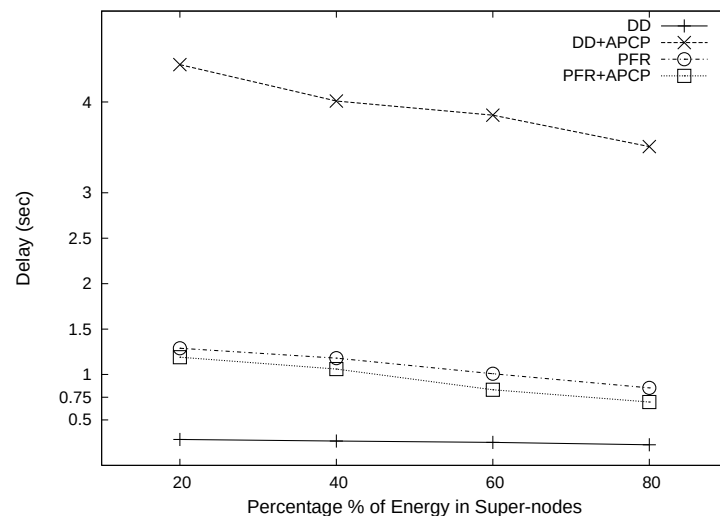
μιότυπα ελήφθησαν από το σενάριο που το 40% της ενέργειας βρίσκεται σε ισχυρούς κόμβους. Παρατηρούμε ότι το απλό **Directed Diffusion** εξαντλεί τα ενεργειακά αποθέματα των συσκευών (σχήμα 2.22), ενώ σε συνδυασμό με το **APCP** (σχήμα 2.23), η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται σημαντικά και αρκετοί κόμβοι παραμένουν ενεργοί μέχρι το τέλος του πειράματος.

Η καθυστέρηση των πρωτοκόλλων είναι αντίστοιχη με αυτή που μετρήσαμε στο προηγούμενο πείραμα, με εξαίρεση την καθυστέρηση του **Directed Diffusion** με το **APCP** που μειώνεται

2.5 Πειραματική αξιολόγηση

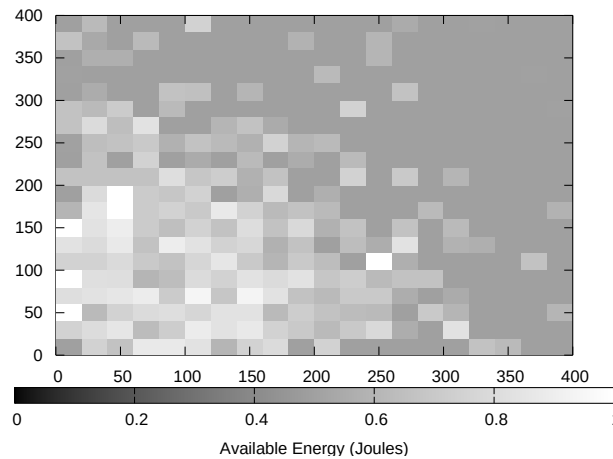


Σχήμα 2.19: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}) όταν 20, 40, 60, 80 τοις εκατό της συνολικής ενέργειας στο δίκτυο βρίσκεται σε ισχυρούς κόμβους που έχουν κατανεμηθεί ανομοιόμορφα στο δίκτυο



Σχήμα 2.20: Καθυστερήση παράδοσης ($\mathcal{D}$) όταν 20, 40, 60, 80 τοις εκατό της συνολικής ενέργειας στο δίκτυο βρίσκεται σε ισχυρούς κόμβους που έχουν κατανεμηθεί ανομοιόμορφα στο δίκτυο

καθώς το ποσοστό της ενέργειας σε ισχυρούς κόμβους αυξάνει. Αυτό συμβαίνει επειδή τα μονοπάτια στα οποία συμμετέχουν ισχυροί κόμβοι μπαίνουν σε κατάσταση αδράνειας λιγότερη ώρα εξαιτίας της υψηλής τους ενέργειας αλλά και της μείωσης στην πυκνότητα του δικτύου.



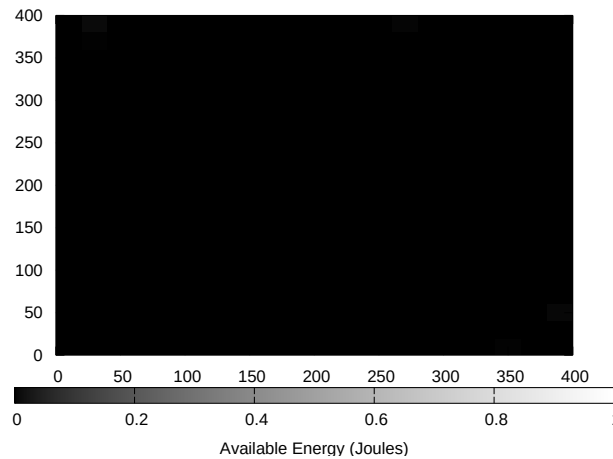
Σχήμα 2.21: Χάρτης διαθέσιμης ενέργειας τη χρονική στιγμή $t = 0$ για το απλό **Directed Diffusion** όταν το 40% της συνολικής ενέργειας στο δίκτυο βρίσκεται σε ισχυρούς κόμβους και έχουμε ανομοιόμορφη ανάπτυξη τους. Τα διαφορετικά τετράγωνα αντιπροσωπεύουν περιοχές του δικτύου διαστάσεων $20m \times 20m$, ο χρωματισμός υποδηλώνει την μέση ενέργεια των αισθητήρων στην περιοχή. Φωτεινές περιοχές υποδεικνύουν υψηλά αποθέματα ενέργειας ενώ σκούρες περιοχές υποδεικνύουν χαμηλά αποθέματα ενέργειας

Σταδιακή ανάπτυξη

Στο επόμενο σύνολο πειραμάτων εξετάζουμε σενάρια σταδιακής ανάπτυξης αισθητήρων, όπου ένας αριθμός συσκευών προστίθεται στο δίκτυο, όταν αυτό είναι σε λειτουργία. Ο συνολικός αριθμός κόμβων που αναπτύσσονται στο δίκτυο είναι $n = 500$, τους διαχωρίζουμε σε g ομάδες $g_0, g_1, \dots$. Η ομάδα g_0 αναπτύσσεται τη χρονική στιγμή $t = 0sec$, δηλαδή στην έναρξη του πειράματος, ενώ κάθε ομάδα g_i (για $0 < i < g$) αναπτύσσεται τη στιγμή $t = i \times 200sec$. δοκιμάσαμε περιπτώσεις με 2, 3 και 4 ομάδες. Εξετάζουμε επίσης και ανομοιόμορφη κατανομή κόμβων για τις ομάδες $g_1, g_2, \dots$, ενώ η ομάδα g_0 αναπτύσσεται πάντα με ομοιόμορφη κατανομή. Στα σχήματα 2.24-2.26, μπορούμε να δούμε ότι η σταδιακή ανάπτυξη κόμβων ωφελεί, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, όλα τα πρωτόκολλα. Ιδιαίτερα ωφελείται το απλό **Directed Diffusion**, το οποίο, όσον αφορά το ποσοστό επιτυχίας, καταφέρνει να πετύχει αντίστοιχη επίδοση με το **Directed Diffusion** σε συνδυασμό με το **APCP** όσο αυξάνει ο αριθμός των ομάδων. Το **PFR** επωφελείται κυρίως στην περίπτωση της ανομοιογενούς κατανομής των ομάδων, όσο αυξάνει ο αριθμός των ομάδων, η απόδοσή του ως προς το ποσοστό επιτυχίας, βελτιώνεται και πλησιάζει αυτή του **DD**. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρούμε και για την κατανάλωση ενέργειας και για την καθυστέρηση. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι το **DD** καταναλώνει γρήγορα ενέργεια και με την προσθήκη νέων κόμβων το δίκτυο ανανεώνεται και το πρωτόκολλο λειτουργεί ομαλότερα, ο συνδυασμός του με το **APCP** λειτουργεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ελαττώνει το ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας και να εξασφαλίζει ομαλότερη λειτουργία στη γενική περίπτωση.

Κλείνοντας, εξετάζουμε και μία επιπλέον σκοπιά της λειτουργίας του **APCP**. Στην υποθε-

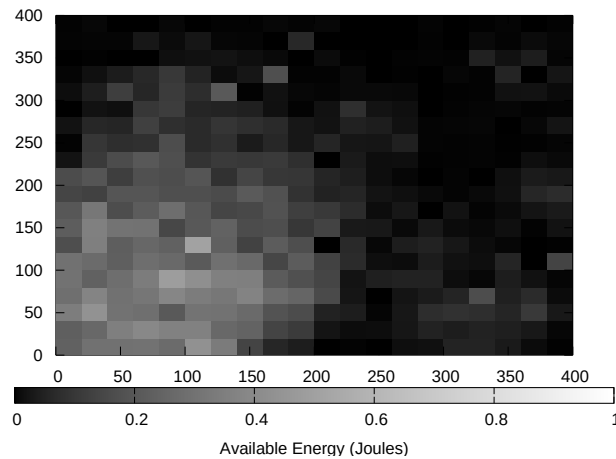
2.5 Πειραματική αξιολόγηση



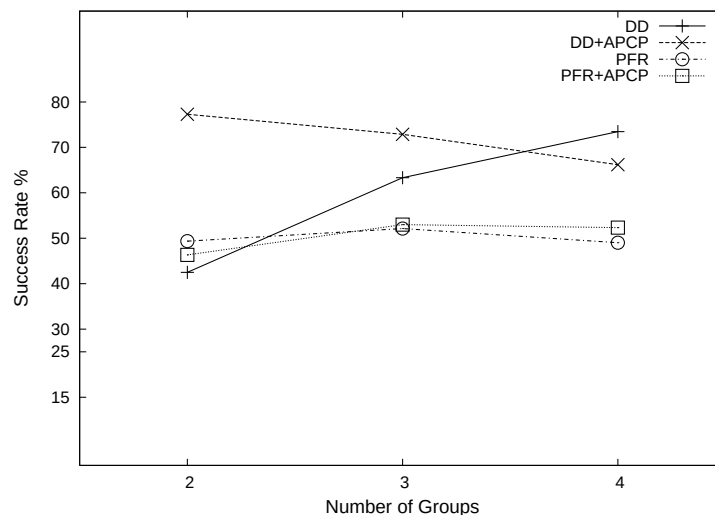
Σχήμα 2.22: Χάρτης διαθέσιμης ενέργειας τη χρονική στιγμή $t = 1000$ για το απλό **Directed Diffusion** όταν το 40% της συνολικής ενέργειας στο δίκτυο βρίσκεται σε ισχυρούς κόμβους και έχουμε ανομοιόμορφη ανάπτυξη τους. Τα διαφορετικά τετράγωνα αντιπροσωπεύουν περιοχές του δικτύου διαστάσεων $20m \times 20m$, ο χρωματισμός υποδηλώνει την μέση ενέργεια των αισθητήρων στην περιοχή. Φωτεινές περιοχές υποδεικνύουν υψηλά αποθέματα ενέργειας ενώ σκούρες περιοχές υποδεικνύουν χαμηλά αποθέματα ενέργειας

τική περίπτωση που το πρωτόκολλο εκτιμά λάθος την πληροφορία του δικτύου ή σε ακραίες περιπτώσεις τοπολογιών, είναι δυνατόν η τιμή en να τεθεί πολύ υψηλά, μπορεί ακόμα να γίνει $en \simeq 1$ με αποτέλεσμα να εξοικονομούμε ενέργεια σε βάρος άλλων μετρικών. Για να εξετάσουμε αν έχοντας προσαρμογή χωρίς ακραίες τιμές εξοικονόμησης μπορεί να βελτιωθεί ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αντιστάθμιση της απόδοσης, επαναλαμβάνουμε την πρώτη σειρά πειραμάτων, αλλά φράζοντας την μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η παράμετρος εξοικονόμησης en . Συγκεκριμένα, η προσαρμογή γίνεται κανονικά με χρήση των εξισώσεων 2.1-2.4 αλλά θέσαμε ένα άνω κατώφλι για την en το οποίο αν πρόκειται να ξεπεραστεί δεν εφαρμόζεται η προσαρμογή αλλά διατηρούνται οι τρέχουσες τιμές T_s, T_w . Στα πειράματά μας θέσαμε το κατώφλι σε τρεις τιμές $en \leq 0.667$, $en \leq 0.75$ και $en \leq 1.0$.

Παρατηρούμε στα σχήματα 2.30-2.32 ότι φράζοντας το en έχει σαν αποτέλεσμα να μειωθεί η απόδοση του **DD** ως προς το ποσοστό επιτυχίας, όχι όμως κατά ανάλογη ποσότητα αφού με φράγμα 1.0 και 0.75 οι διαφορές είναι μικρές. Η κατανάλωση ενέργειας επηρεάζεται σημαντικά αφού μόνο όταν το φράγμα είναι 1.0 εξοικονομούμε αρκετή ενέργεια, στις άλλες περιπτώσεις η κατανάλωση τείνει στο 100%. Όσον αφορά την καθυστέρηση εκεί παρατηρούμε αρκετές διαφορές, αφού φράζοντας το en επιτυγχάνεται χαμηλότερη καθυστέρηση, ειδικά όσο αυξάνει η πυκνότητα του δικτύου. Πάραυτα, οι βασικές αντισταθμίσεις παραμένουν ίδιες που σημαίνει ότι το **APCP** μπορεί να κάνει ορθές επιλογές και στη γενική περίπτωση δεν θέτει τους κόμβους σε αδράνεια χωρίς να χρειάζεται.



Σχήμα 2.23: Χάρτης διαθέσιμης ενέργειας τη χρονική στιγμή $t = 1000$ για το **Directed Diffusion** με ενσωματωμένο το **APCP**, όταν το 40% της συνολικής ενέργειας στο δίκτυο βρίσκεται σε ισχυρούς κόμβους και έχουμε ανομοιόμορφη ανάπτυξη τους. Τα διαφορετικά τετράγωνα αντιπροσωπεύουν περιοχές του δικτύου διαστάσεων $20m \times 20m$, ο χρωματισμός υποδηλώνει την μέση ενέργεια των αισθητήρων στην περιοχή. Φωτεινές περιοχές υποδεικνύουν υψηλά αποθέματα ενέργειας ενώ σκούρες περιοχές υποδεικνύουν χαμηλά αποθέματα ενέργειας

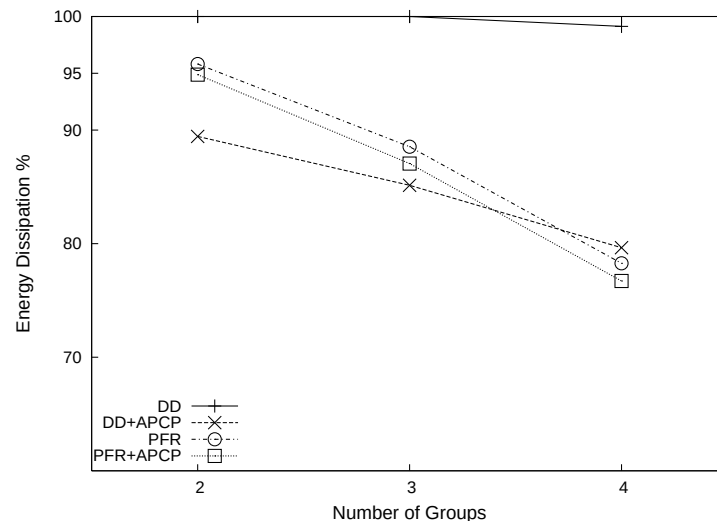


Σχήμα 2.24: Ποσοστό επιτυχίας (P_s) όταν αναπτύσσονται 2,3,4 ομάδες κόμβων, με ομοιόμορφη ανάπτυξη

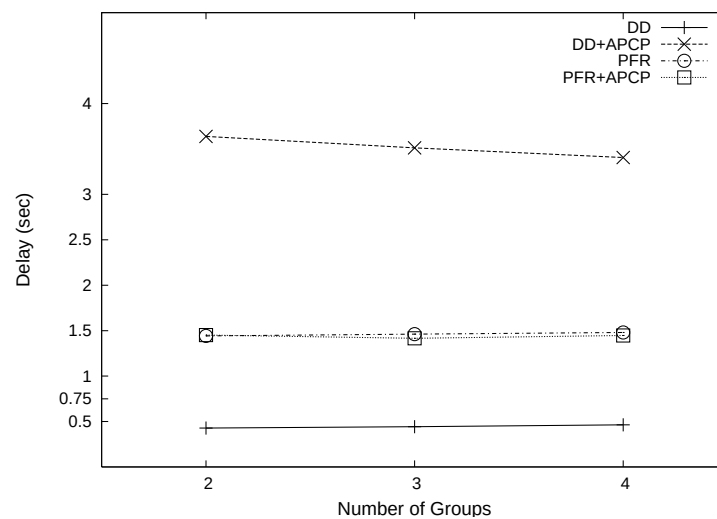
2.6 Συμπεράσματα και επεκτάσεις

Το πρωτόκολλο που προτείνουμε σε αυτό το κεφάλαιο εκμεταλλεύεται την κίνηση των πακέτων ~~34~~ **34** δίκτυο για να αποκτήσει μία γνώση για τις τοπικές συνθήκες πυκνότητας σωματιδίων και

2.6 Συμπεράσματα και επεκτάσεις



Σχήμα 2.25: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}) όταν αναπτύσσονται 2,3,4 ομάδες κόμβων, με ομοιόμορφη ανάπτυξη

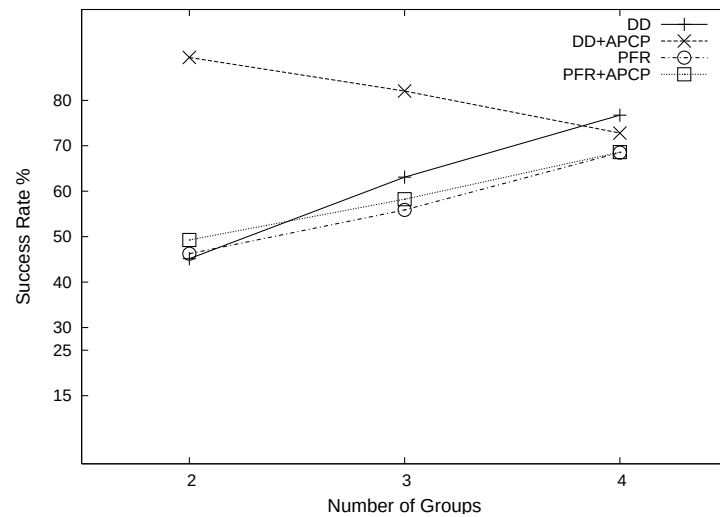


Σχήμα 2.26: Καθυστέρηση παράδοσης ($\mathcal{D}$) όταν αναπτύσσονται 2,3,4 ομάδες κόμβων, με ομοιόμορφη ανάπτυξη

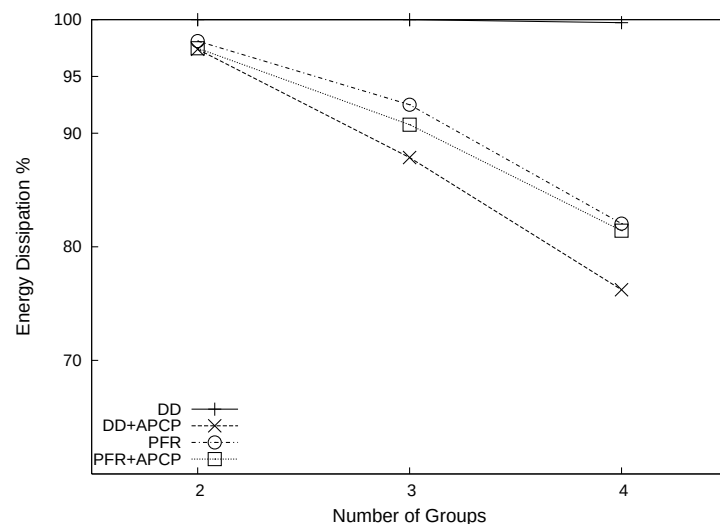
ενεργειακών αποθεμάτων στη γειτονία ενός κόμβου. Το πρωτόκολλό μας επωφελείται από αυτή την πληροφορία για να προσαρμόσει την διαδικασία εξοικονόμησης ενέργειας χωρίς να μειωθεί η αποδοτικότητα του δικτύου, επιτυγχάνοντας πολύ καλούς συμβιβασμούς ανάμεσα στο ποσοστό παράδοσης δεδομένων, την κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση παράδοσης.

Επίσης εξετάσαμε και το ενδεχόμενο αναδιανομής πρόσθετων κόμβων καθώς και την ανάπτυξη ετερογενών δικτύων, δηλαδή την ύπαρξη κόμβων υψηλότερων προδιαγραφών, σαν

Προσαρμοστικές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας για αποδοτική διάδοση δεδομένων σε ετερογενή δίκτυα αισθητήρων



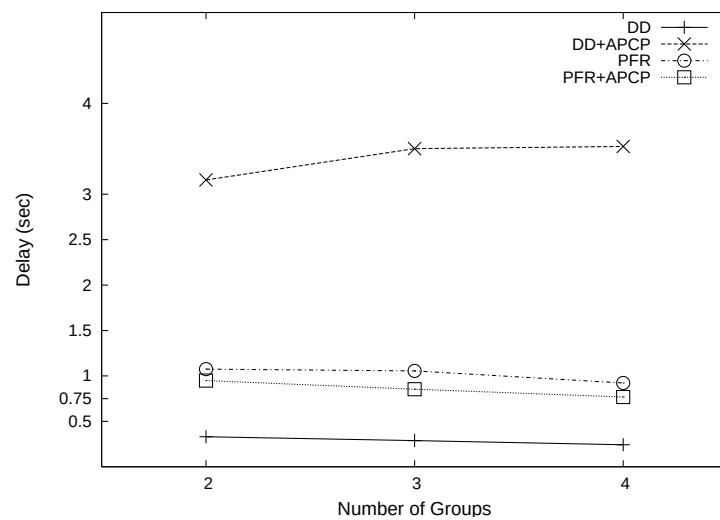
Σχήμα 2.27: Ποσοστό επιτυχίας (P_s) όταν αναπτύσσονται 2, 3, 4 ομάδες κόμβων, με ανομοιομορφη ανάπτυξη.



Σχήμα 2.28: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}) όταν αναπτύσσονται 2, 3, 4 ομάδες κόμβων, με ανομοιομορφη ανάπτυξη.

πρόσθετες σχεδιαστικές επιλογές στην ανάπτυξη δικτύων μικροαισθητήρων. Οι δύο αυτές τεχνικές φάνηκαν να βοηθούν όλα τα πρωτόκολλα να αποδώσουν καλύτερα αλλά τη μεγαλύτερη αύξηση επιδόσεων σημείωσαν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης όταν συνδυάστηκαν με το προσαρμοστικό μας πρωτόκολλο. Σημειώνουμε ότι, απ' ό,τι γνωρίζουμε, αυτή είναι η πρώτη εργασία που αξιολογεί τέτοιες σχεδιαστικές επιλογές. Τα αποτελέσματα που παρουσιάσαμε σε αυτό το κεφάλαιο αναδεικνύουν την αξία της προσαρμοστικότητας, ειδικά όταν αυτή εξετάζεται

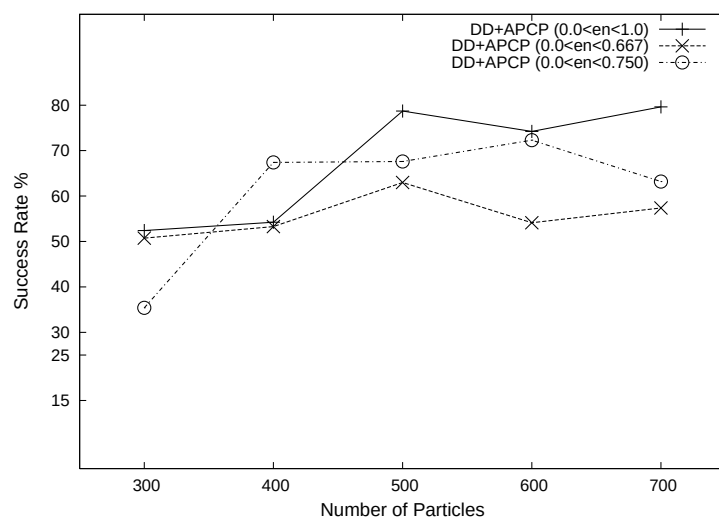
2.6 Συμπεράσματα και επεκτάσεις



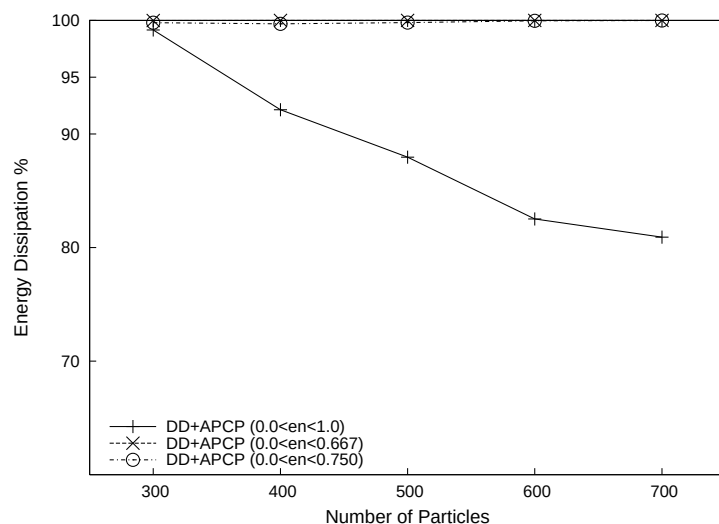
Σχήμα 2.29: Καθυστέρηση παράδοσης ($\mathcal{D}$) όταν αναπτύσσονται 2, 3, 4 ομάδες κόμβων, με ανομοιόμορφη ανάπτυξη.

σε συνδυασμό με τις τεχνικές σταδιακής ανάπτυξης κόμβων και ετερογένειας στο σχεδιασμό των δικτύων. Στοιχείο μελλοντικής έρευνας θα αποτελέσει η διερεύνηση σε βάθος των συμβιβασμών και η επιβολή διαφορετικών ορίων στην προσαρμογή προκειμένου να επιτευχθούν συγκεκριμένες εγγυήσεις στην καθυστέρηση παράδοσης και το ποσοστό επιτυχίας.

**Προσαρμοστικές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας
για αποδοτική διάδοση δεδομένων σε ετερογενή δίκτυα αισθητήρων**

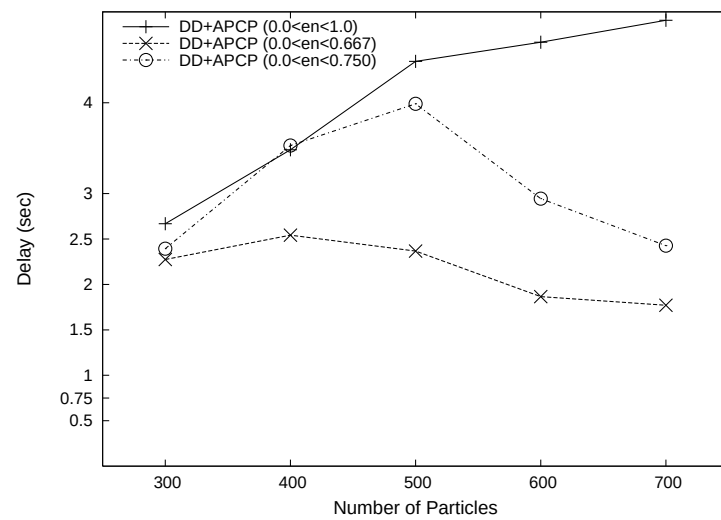


Σχήμα 2.30: Ποσοστό επιτυχίας (P_s) για το **Directed Diffusion** με **ACCP** με μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$) όταν η μέγιστη τιμή του en φράσσεται θέτοντας άνω όριο $\{0.667, 0.75, 1.0\}$



Σχήμα 2.31: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}) για το **Directed Diffusion** με **ACCP** με μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$) όταν η μέγιστη τιμή του en φράσσεται θέτοντας άνω όριο $\{0.667, 0.75, 1.0\}$

2.6 Συμπεράσματα και επεκτάσεις



Σχήμα 2.32: Καθυστερήση παράδοσης ($\mathcal{D}$) για το **Directed Diffusion** με **APCP** με μεταβλητό αριθμό κόμβων ($n \in \{300, 400, 500, 600, 700\}$) όταν η μέγιστη τιμή του en φράσσεται θέτοντας άνω όριο $\{0.667, 0.75, 1.0\}$

Κεφάλαιο 3

Τεχνικές χρήσης περιορισμένης γνώσης για αποδοτική και ανθεκτική σε σφάλματα δρομολόγηση δεδομένων

3.1 Εισαγωγή

Οι κυριότερες απαιτήσεις για ένα αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης για δίκτυα μικροαισθητήρων εντοπίζονται στην σωστή, έγκυρη και οικονομική μεταφορά της πληροφορίας στο κέντρο ελέγχου. Η ορθότητα εγγυάται την σωστή μετάδοση των δεδομένων στον προορισμό τους, ενώ για πολλές εφαρμογές είναι πολύ σημαντική και η αναφορά της συλλεγμένης πληροφορίας σε σύντομο, περιορισμένο από τις απαιτήσεις της εφαρμογής χρονικό διάστημα. Η τρίτη απαίτηση είναι η οικονομία, δηλαδή η αποτελεσματική χρήση των πόρων, ειδικά της ενέργειας, των συσκευών του δικτύου. Στην έρευνά μας επικεντρώνουμε στην αποδοτικότητα ως συνάρτηση της ενέργειας που πρέπει να ξοδέψει το δίκτυο προκειμένου να παραδοθούν ορθά και έγκαιρα τα δεδομένα που συλλέγονται από τις συσκευές στο κέντρο ελέγχου. Ένας ενεργειακά αποδοτικός αλγόριθμος δρομολόγησης έχει σαν σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας στις συσκευές μικροαισθητήρων σε καθολικό επίπεδο. Ο απώτερος στόχος είναι η καλύτερη λειτουργία του δικτύου καθώς και η συνολική παράταση της ωφέλιμης ζωής του.

3.1.1 Η προσέγγισή μας

Μελετούμε το πρόβλημα διάδοσης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Προτείνουμε ένα νέο πρωτόκολλο το οποίο είναι απλό, ενεργεί τοπικά σε κάθε κόμβο και χρησιμοποιεί *περιορισμένη τοπική γνώση του δικτύου που συγκεντρώνεται με κατανεμημένο τρόπο*. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί τοπική πληροφορία σχετική με τις τρέχουσες συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο στην άμεση περιβάλλουσα γειτονιά κάθε κόμβου. Η γνώση αυτή ανακτάται μεταβάλλοντας κατάλληλα την ακτίνα ασύρματης επικοινωνίας του κόμβου. Έπειτα, σχεδιάζεται ένα μονοπάτι που αποτελείται από ανά δύο γειτονικούς κόμβους, το μονοπάτι χρησιμοποιείται στην

διάδοση πληροφορίας προς το κέντρο ελέγχου. Οι γειτονικές συσκευές αποφασίζουν ατομικά η καθεμία αν θα συμμετέχουν ή όχι στη διαδικασία διάδοσης της πληροφορίας. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου εναλλάσσεται ανάμεσα σε φάσεις *σχεδιασμού μονοπατιού* και *διάδοσης πληροφορίας*, η όλη διαδικασία και η συχνότητα εναλλαγών εξαρτάται από την τρέχουσα ανάγκη για μετάδοση πληροφορίας. Κατά αυτόν τον τρόπο στοχεύουμε σε βελτίωση της απόδοσης σε σχέση με πρωτόκολλα που βασίζονται σε σταθερή ακτίνα διάδοσης, κυρίως σε ειδικές περιπτώσεις που όμως εμφανίζονται συχνά, όπως δίκτυα με χαμηλή πυκνότητα κόμβων ή δίκτυα με υψηλό ρυθμό αποτυχίας των αισθητήρων. Υπό τέτοιες συνθήκες τα παραδοσιακά πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας μπορεί να ξοδέψουν σημαντικά ποσά ενέργειας προκειμένου να παρακάμψουν τις προβληματικές περιοχές ή ακόμα και να αποτύχουν τελείως, αντίθετα το προτεινόμενο πρωτόκολλο αυξάνοντας την ακτίνα διάδοσης μπορεί να υπερπηδήσει τις προβληματικές περιοχές και να βρει ένα κατάλληλο γείτονα για να προωθήσει την πληροφορία.

Η προσέγγιση που ακολουθούμε αναθέτει διαφορετικούς ρόλους στις συσκευές, ένας μικρός αριθμός αισθητήρων αναλαμβάνει τις ενέργειες υψηλού κόστους, τη συγκέντρωση της πληροφορίας και το σχεδιασμό του μονοπατιού, ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι λειτουργούν με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, απλά μεταφέροντας τα δεδομένα. Οι ρόλοι μπορούν να εναλλάσσονται ώστε να εξισορροπείται το φορτίο ανάμεσα σε πολλούς κόμβους. Αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε συστήματα με αυξημένη ανοχή σε σφάλματα και συνολικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, αφού η επιπλέον πληροφορία που συγκεντρώνεται χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση των μονοπατιών διάδοσης αλλά και την αποφυγή δύσκολων καταστάσεων. Δείχνουμε ότι το κόστος της σχεδίασης μονοπατιού αντισταθμίζεται από την βελτίωση των κατασκευασμένων μονοπατιών και την βελτιστοποίηση των μεταδόσεων μικρής εμβέλειας από κόμβο σε κόμβο. Αυτή η επιλεκτική χρήση της ενέργειας των κόμβων βελτιώνει τη συνολική απόδοση του δικτύου, η διάρκεια ζωής του αυξάνεται και το ποσοστό παράδοσης δεδομένων στο κέντρο ελέγχου βελτιώνεται.

Η βασική ιδέα της προσέγγισής μας είναι να αντισταθμίσουμε το κόστος, της συγκέντρωσης περιορισμένης γνώσης για την τοπολογία του δικτύου, με βελτίωση της απόδοσης στη διάδοση δεδομένων που επιτυγχάνεται με χρήση αυτής της γνώσης. Η πληροφορία που συγκεντρώνεται αφορά μεγέθη όπως η διαθέσιμη ενέργεια των γειτονικών κόμβων και η απόστασή τους από το κέντρο ελέγχου σε μία διευρυμένη (δηλαδή λίγο μεγαλύτερη από την συνήθη ακτίνα διάδοσης) περιοχή γύρω από τον κόμβο που σχεδιάζει το μονοπάτι, με αυτή τη γνώση σημαντικές μετρικές απόδοσης μπορούν να βελτιωθούν όπως η κατανάλωση ενέργειας, η καθυστέρηση διάδοσης και η ανοχή σε σφάλματα.

3.1.2 Σχετική βιβλιογραφία και συζήτηση

Πρωτόκολλα που βασίζονται σε τοπική γνώση για βελτιστοποίηση, όπως το LTP [24], εξελίσσονται με άπληστο τρόπο προσπαθώντας να κάνουν βέλτιστες επιλογές βασισμένα στην καθαρά τοπική γνώση που έχει συγκεντρώσει ο κόμβος που διαδίδει τα δεδομένα. Τέτοια πρωτόκολλα αποδίδουν καλύτερα σε δίκτυα όπου η κατανομή των κόμβων είναι περίπου ομοιόμορφη και επομένως η τοπική πληροφορία μπορεί να είναι ενδεικτική για τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο σαν όλο. Το πρωτόκολλό μας, βελτιστοποιεί τη λειτουργία του σε μία διευρυμένη περιοχή αλλά ταυτόχρονα περιορισμένης έκτασης σε σχέση με το μέγεθος του δικτύου, εκμεταλλευόμενο την επιπλέον γνώση που συγκεντρώνεται.

Πολλά πρωτόκολλα δρομολόγησης που συναντούμε στη βιβλιογραφία, με χαρακτηριστικό

3.2 Μοντέλο

παράδειγμα το Directed Diffusion [37], προσπαθούν να κατασκευάσουν και να διατηρήσουν επίκαιρη μία δομή που επεκτείνεται σε ολόκληρο το δίκτυο, όπως για παράδειγμα, ένα δένδρο δρομολόγησης προς το κέντρο ελέγχου για τη μεταφορά των δεδομένων. Τέτοια πρωτόκολλα αποδίδουν καλά σε περιπτώσεις όπου η τοπολογία του δικτύου παραμένει αμετάβλητη ή μεταβάλλεται με αργούς ρυθμούς. Όμως σε δίκτυα με δυναμικό χαρακτήρα (πχ σύνδεση νέων κόμβων, αποτυχίες κόμβων, κινητικότητα κόμβων) όπου έχουμε συχνές αλλαγές τοπολογίας, η διατήρηση μίας καθολικής δομής επιβαρύνει σημαντικά τους πόρους του δικτύου και η απόδοση μειώνεται. Το πρωτόκολλό μας, ενημερώνεται για τις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου και μεταβάλλει τη λειτουργία του ανάλογα. Η ενημέρωση αυτή όμως γίνεται σε τοπικό επίπεδο και ανάλογα με την ανάγκη για δρομολόγηση πακέτων ώστε να αποφύγουμε την συλλογή γνώσης που θα ακυρωθεί σύντομα σε περίπτωση που το δίκτυο παρουσιάζει συχνές αλλαγές. Επιπλέον η δρομολόγηση γίνεται από κόμβο σε κόμβο και το μονοπάτι σχηματίζεται μόλις συγκεντρωθεί αρκετή πληροφορία.

Το πρωτόκολλό μας διαφέρει και από μία άλλη σημαντική κατηγορία πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούν ομαδοποίηση των κόμβων (clustering), χαρακτηριστικό παράδειγμα τα πρωτόκολλα LEACH [35]. Σε τέτοια πρωτόκολλα οι αισθητήρες αυτοοργανώνονται σε ομάδες, τα δεδομένα αποστέλλονται προς τον κόμβο επικεφαλής κάθε ομάδας και από εκεί στο κέντρο ελέγχου. Αυτή η κατηγορία πρωτοκόλλων αποδίδει καλά σε δίκτυα με περιορισμένη γεωγραφική εξάπλωση και με χαμηλό όγκο δεδομένων να κυκλοφορούν στο δίκτυο. Όμως σε δίκτυα που καλύπτουν μεγάλη γεωγραφική περιοχή ή με μεγάλο όγκο δεδομένων, η μετάδοση γίνεται σε μεγάλες αποστάσεις και οι επικεφαλείς δέχονται μεγάλο φόρτο, ξοδεύοντας πολύ ενέργεια.

Επίσης πρωτόκολλα που εξελίσσονται πιθανοτικά όπως το PFR [18] όπου η δρομολόγηση μηνυμάτων γίνεται με αποστολή πλεονάζοντων μηνυμάτων σε πολλούς κόμβους ταυτόχρονα με την πιθανότητα μετάδοσης ενός μηνύματος από ένα κόμβο να εξαρτάται από την εγγύτητα του κόμβου προς το βέλτιστο μονοπάτι διάδοσης. Κατά αυτό τον τρόπο συνδυάζουν την αποδοτικότητα με την ανοχή σε σφάλματα, αποδίδοντας πολύ καλά σε αραιά δίκτυα αλλά τείνουν να ξοδεύουν πολύ ενέργεια σε δίκτυα με μεγάλη πυκνότητα κόμβων εξαιτίας των πολλών πλεονάζοντων μεταδόσεων.

Στο [4] η υπολογιστική πολυπλοκότητα της απόδοσης συντεταγμένων σε όλους τους κόμβους του δικτύου διερευνάται, αποδεικνύοντας ότι το πρόβλημα είναι NP-Hard σε αραιά δίκτυα. Ως εκ τούτου δεν προσπαθούμε να διερευνήσουμε μία διαδικασία απόδοσης συντεταγμένων, αφού το δίκτυο στο οποίο εκτελείται το πρωτόκολλό μας μπορεί να είναι αραιό. Απεναντίας, η πληροφορία που χρησιμοποιούμε αφορά κυρίως τον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα σε δύο κόμβους αλλά σε τοπικό επίπεδο.

3.2 Μοντέλο

Προκειμένου να εξετάσουμε το πρόβλημα, αφαιρετικοποιούμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων λαμβάνοντας υπόψη τις τρέχουσες εξελίξεις στον τομέα του υλικού [17,24]. Στο μοντέλο που προτείνουμε εδώ, κάθε κόμβος του δικτύου είναι μία ολοκληρωμένη, αυτόνομη υπολογιστική συσκευή με δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας και καταγραφής περιβαλλοντικών συνθηκών. Διαθέτει επεξεργαστή με περιορισμένη υπολογιστική ισχύ και μικρής χωρητικότητας μνήμη, σε σύγκριση με τους σημερινούς γενικής χρήσης υπολογιστές. Διαθέτει ένα κύκλωμα ασύρματης επικοινωνίας το οποίο είναι συνήθως μονοκάναλο,

αν και η συχνότητα που χρησιμοποιεί μπορεί να μεταβληθεί. Η εμβέλεια κυμαίνεται από μερικά μέτρα μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα ανάλογα με τον τύπο του κυκλώματος και την διαθέσιμη κεραία, ενώ μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με την ισχύ που καταναλώνεται από το κύκλωμα κατά την εκπομπή. Η αυτονομία εξασφαλίζεται αφού κάθε συσκευή τροφοδοτείται από μία ενσωματωμένη πηγή ενέργειας η οποία κατά κανόνα είναι περιορισμένης διάρκειας. Επιπλέον κάθε αισθητήρας διαθέτει εξειδικευμένα κυκλώματα για την καταγραφή διαφόρων μεγεθών, όπως των περιβαλλοντικών συνθηκών (πχ θερμοκρασία, φωτεινότητα, ένταση μαγνητικού πεδίου), ανίχνευση γεγονότων (πχ κίνηση, παρουσία χημικών ενώσεων) ακόμα και επιτήρησης του χώρου (λήψη εικόνων και καταγραφή θορύβων).

Οι συσκευές αισθητήρων μπορούν να επικοινωνήσουν ασύρματα μεταξύ τους σε απόσταση που εξαρτάται από το κύκλωμα και την κεραία του πομποδέκτη τους, το μοντέλο εξασθένισης του σήματος (περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω) και την ενέργειά τους. Θεωρούμε ότι αρχικά η απόσταση επικοινωνίας είναι ίδια σε όλες τις συσκευές και παίρνει μία προκαθορισμένη τιμή $\mathcal{R}$. Επιπλέον θεωρούμε ότι η απόσταση επικοινωνίας μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με την ισχύ εκπομπής, η οποία είναι ρυθμιζόμενη από το λογισμικό της συσκευής. Αυτή είναι μία δυνατότητα που παρέχεται από τις υπάρχουσες συσκευές όπως τα **Mica notes** [1].

Ακολουθώντας το μοντέλο που παρουσιάζεται στα [35, 3, 51, 25] θεωρούμε ότι για την περίπτωση μετάδοσης ενός μηνύματος, το κύκλωμα του πομποδέκτη καταναλώνει ένα ποσό ενέργειας για τη λειτουργία του E_{elec} , ενώ ο ενισχυτής του σήματος καταναλώνει ενέργεια ϵ_{amp} . Επίσης, υποθέτουμε ένα απλό και ομοιόμορφο μοντέλο εξασθένησης κατά τη διάδοση του σήματος τέτοιο ώστε η ισχύς του σήματος σε απόσταση r από την πηγή να είναι αντιστρόφως ανάλογη του r^2 . Επομένως, για να μεταδώσει ένα μήνυμα μήκους k bit σε απόσταση r , ο πομπός χρησιμοποιεί ενέργεια

$$\begin{aligned} E_T(k, r) &= E_{T-elec}(k) + E_{T-amp}(k, r) \\ E_T(k, r) &= E_{elec} \cdot k + \epsilon_{amp} \cdot k \cdot r^2 \end{aligned}$$

ενώ για τη λήψη ενός μηνύματος η ενέργεια που καταναλώνεται στο δέκτη είναι:

$$\begin{aligned} E_R(k) &= E_{R-elec}(k) \\ E_R(k, r) &= E_{elec} \cdot k \end{aligned}$$

Όπου οι ποσότητες E_{T-elec} , E_{R-elec} αντιστοιχούν στην ενέργεια που ξοδεύει το κύκλωμα του πομπού και του δέκτη.

Συνοψίζοντας, θεωρούμε ότι η κατανάλωση ενέργειας οφείλεται σε τρεις κύριες αιτίες και βρίσκεται σε τρεις διαφορετικές στάθμες:

- E_T : Κατανάλωση για τη μετάδοση πληροφορίας.
- E_R : Κατανάλωση για τη λήψη πληροφορίας.
- E_{idle} : Κατανάλωση στην κατάσταση αναμονής, δηλαδή όταν το κύκλωμα ασύρματης επικοινωνίας περιμένει την αποστολή ή λήψη δεδομένων.

Στην κατάσταση αναμονής, υποθέτουμε ότι η ενέργεια που καταναλώνεται στο κύκλωμα είναι σταθερή στη μονάδα του χρόνου και είναι ίση με E_{elec} (η χρονική μονάδα είναι 1 δευτερόλεπτο).

Τα δίκτυα που εξετάζουμε εδώ, θεωρούμε ότι είναι ευάλωτα σε αποτυχίες για τους ακόλουθους λόγους: (α) τα κυκλώματα που απαρτίζουν μια συσκευή είναι χαμηλού κόστους και συνάμα χαμηλής αξιοπιστίας, (β) η περιοχή του δικτύου μπορεί να είναι μη φιλική προς τους αισθητήρες, πχ το έδαφος έχει πολλές λίμνες με νερό, ζώα που πατάνε και καταστρέφουν τις συσκευές,

3.3 Το πρωτόκολλο CKN

επομένως οι ελάχιστες λειτουργικές απαιτήσεις ως προς την πυκνότητα κόμβων μπορεί να μην ικανοποιηθούν. Εδώ μοντελοποιούμε σφάλματα σταματήματος εισάγοντας το *ρυθμό εμφάνισης αποτυχιών* $\mathcal{F}$, ο οποίος ορίζεται σαν ο μέσος αριθμός αισθητήρων που σταματούν να λειτουργούν στη μονάδα του χρόνου. Για κάθε μονάδα χρόνου, $\mathcal{F}$ αποτυχίες εμφανίζονται σε τυχαίους κόμβους, οι οποίοι αποτυγχάνουν ακαριαία, μετά την αποτυχία κάθε επικοινωνία με αυτούς τους κόμβους διακόπτεται.

Τέλος, υποθέτουμε ότι μια συγκεκριμένη, υψηλού επιπέδου, εφαρμογή εκτελείται από τα σωματίδια που απαρτίζουν το δίκτυο. Τα γεγονότα για τα οποία «ενδιαφέρεται» η εφαρμογή, πραγματοποιούνται σε όλη τη περιοχή του δικτύου, ενώ κάθε γεγονός «συλλαμβάνεται» από ένα μόνο αισθητήρα, που δημιουργεί ένα μήνυμα προκειμένου να διαδοθεί η πληροφορία στο κέντρο ελέγχου. Η εφαρμογή χαρακτηρίζεται από την ποσότητα λ , που εκφράζει τον ολικό ρυθμό παραγωγής μηνυμάτων του δικτύου αισθητήρων, που μετριέται σε αριθμό μηνυμάτων ανά χρονικό διάστημα.

3.3 Το πρωτόκολλο CKN

Η βασική ιδέα του πρωτοκόλλου μας είναι η συλλογή τοπικά σε κάθε κόμβο επιπλέον γνώσης, όσον αφορά την τοπολογία του δικτύου σε μικρή απόσταση $\beta \cdot \mathcal{R}$ από κάποιο κόμβο, και η εκμετάλλευσή της προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το μονοπάτι που ακολουθείται για τη δρομολόγηση δεδομένων στο δίκτυο, σε επιμέρους διαδρομές μήκους β hops η κάθεμία. Το β αποτελεί παράμετρο του πρωτοκόλλου και τίθεται από τον διαχειριστή του δικτύου αισθητήρων. Η μετάδοση δεδομένων προς το κέντρο ελέγχου γίνεται σε τρεις διακριτές φάσεις:

1. Φάση αναμονής: ο αισθητήρας εκτελεί μία εφαρμογή καταγραφής δεδομένων, δημιουργεί μηνύματα προκειμένου να αναφέρει τις καταγεγραμμένες τιμές ενώ παράλληλα αναμένει επικοινωνία από άλλους κόμβους που δρομολογούν μηνύματα.
2. Φάση σχεδίασης μονοπατιού: το πρωτόκολλο προσπαθεί να υπολογίσει ένα μονοπάτι, βελτιστοποιημένο με βάση την περιορισμένη πληροφορία που έχει συλλέξει, προκειμένου να μεταδώσει δεδομένα.
3. Φάση μετάδοσης δεδομένων: το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί το μονοπάτι που υπολόγισε για να μεταδώσει τα δεδομένα, λαμβάνοντας υπόψη αποτυχίες και φαινόμενα στο επίπεδο προσπέλασης του μέσου (MAC).

Πιο αναλυτικά, δεδομένης μίας εργασίας καταγραφής δεδομένων T , που τίθεται από το κέντρο ελέγχου $\mathcal{S}$ και η οποία εκτελείται σε μία συσκευή p , και ενός περιβαλλοντικού ερεθίσματος που ικανοποιεί τις συνθήκες καταγραφής της T , η συσκευή δημιουργεί ένα νέο μήνυμα M που περιέχει την καταγεγραμμένη πληροφορία και το οποίο πρέπει να δρομολογηθεί στο $\mathcal{S}$. Σκοπός του πρωτοκόλλου είναι να κατασκευαστεί ένα μονοπάτι μήκους β μέσο του οποίου θα διαδοθεί η πληροφορία όσο πιο κοντά στο κέντρο ελέγχου γίνεται. Προκειμένου να κατασκευαστεί αυτό το μονοπάτι, το πρωτόκολλο συγκεντρώνει πληροφορία για τους διαθέσιμους γειτονικούς κόμβους που βρίσκονται σε απόσταση β hops μακριά και με κατεύθυνση προς το κέντρο ελέγχου $\mathcal{S}$. Χρησιμοποιώντας αυτή τη γνώση, το μονοπάτι που κατασκευάζεται βελτιστοποιείται ως προς κάποια μετρική ενδιαφέροντος (πχ ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, ελάττωση της καθυστέρησης κλπ.). Κατά αυτό τον τρόπο, κατασκευάζεται τμηματικά ένα μονοπάτι μέχρι το

κέντρο ελέγχου του οποίου τα επιμέρους τμήματα είναι βελτιστοποιημένα. Αυτή η εναλλαγή ανάμεσα στις φάσεις σχεδίασης μονοπατιού και διάδοσης δεδομένων προσδίδει τα εξής πλεονεκτήματα στο πρωτόκολλό μας.

- Ανοχή σε σφάλματα, μέσω της συγκέντρωσης πληροφορίας για την ευρύτερη περιοχή του δικτύου διαμέσου της οποίας θα μεταδοθεί το μήνυμα, μπορούν να αναγνωριστούν εμπόδια ή περιοχές κενές από κόμβους και επομένως να σχεδιαστεί ένα μονοπάτι που παρακάμπτει αυτές τις προβληματικές περιοχές.
- Αυξημένη αποδοτικότητα όσον αφορά την ενέργεια, αφού η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται σε μία διευρυμένη περιοχή, ενώ το ίδιο το μονοπάτι αποτελείται από μικρού μήκους μεταδόσεις από κόμβο σε κόμβο.
- Αυξημένη ασφάλεια, αφού η φάση σχεδιασμού μπορεί να συμπεριλάβει πληροφορία και για το επίπεδο εμπιστοσύνης των γειτονικών κόμβων.

Εσωτερικά για τη λειτουργία του, το πρωτόκολλό μας χρησιμοποιεί δύο δομές δεδομένων σε κάθε συσκευή οι οποίες είναι μικρού μεγέθους για να μην επιβαρύνεται η περιορισμένη μνήμη των συσκευών.

1. Στη *δομή γειτόνων*, ένας κόμβος i αποθηκεύει την πληροφορία που έχει συλλέξει για τους ενεργούς γείτονές του σε μία περιοχή.
2. Στη *δομή μονοπατιού* $\mathcal{P}$, αποθηκεύεται το μονοπάτι που χρησιμοποιήθηκε για την τελευταία αποστολή μηνύματος.

Η δομή γειτόνων είναι ένα σύνολο κάθε στοιχείο του οποίου περιέχει πληροφορία για την ταυτότητα μίας «γειτονικής» συσκευής, την θέση της κλπ. Η δομή μονοπατιού περιέχει μία διατεταγμένη λίστα με μέχρι β γείτονες, δηλαδή το μονοπάτι που θα ακολουθηθεί όταν χρειάζεται να μεταδοθεί ένα μήνυμα. Ξεκάθαρα, το μέγεθος που καταλαμβάνει η δομή γειτόνων είναι ανάλογο της πυκνότητας του δικτύου, της παραμέτρου β και της ακτίνας μετάδοσης. Έτσι αν d_{max} η μέγιστη πυκνότητα κόμβων στο δίκτυο, τότε η μνήμη που χρειάζεται για την αποθήκευση της δομής γειτόνων είναι της τάξης:

$$O(d_{max} \cdot \pi(\mathcal{R} \cdot \beta)^2) = O((\mathcal{R} \cdot \beta)^2)$$

Η δομή μονοπατιού απαιτεί το πολύ $O(\beta)$ μνήμη, αφού το μήκος των μονοπατιών που κατασκευάζονται φράσσεται από την παράμετρο β . Στη συνέχεια θα δούμε πιο αναλυτικά τι πληροφορία αποθηκεύεται στις δομές και πως χρησιμοποιείται σε κάθε φάση εκτέλεσης του πρωτοκόλλου.

3.3.1 Αρχικοποίηση πρωτοκόλλου

Υποθέτουμε ότι κατά την ανάπτυξη του δικτύου, πριν αρχίσει η εκτέλεση του πρωτοκόλλου μας, εκτελείται μία φάση αρχικοποίησης. Σε αυτή τη φάση οι συσκευές αρχικοποιούν τις δομές που συζητήσαμε στην προηγούμενη ενότητα, ενώ παράλληλα εκτελούν ένα πρωτόκολλο l , εντοπισμού της θέσης τους (localization). Αφού έχουμε υποθέσει στο μοντέλο μας ότι οι συσκευές παραμένουν ακίνητες, αυτή η φάση χρειάζεται να εκτελεστεί μόνο μία φορά, και έπειτα δεν επιβαρύνει τη λειτουργία του δικτύου. Με τη χρήση του πρωτοκόλλου l οι συσκευές αποκτούν

3.3 Το πρωτόκολλο CKN

ένα μέσο υπολογισμού των αποστάσεων, τόσο μεταξύ τους όσο και από το κέντρο ελέγχου, μέσα σε κάποια αποδεκτά επίπεδα ακρίβειας που εξαρτώνται από το πρωτόκολλο και τις τεχνολογικές εξελίξεις. Έστω $d(i, j)$ η Ευκλείδεια απόσταση των συσκευών αισθητήρων i, j και $d_{es}(i, j)$ η εκτίμηση της απόστασης αυτής, όπως υπολογίζεται από τις συσκευές αισθητήρων με τη χρήση των πληροφοριών που αποκτήθηκαν από το πρωτόκολλο l . Προσέξτε ότι η απόσταση d_{es} δεν είναι απαραίτητα μία ακριβής τιμή αλλά μάλλον μία προσέγγιση της πραγματικής απόστασης d . Υποθέτουμε όμως ότι οι εκτιμήσεις αποστάσεων είναι ανάλογες με την πραγματική απόσταση, δηλαδή αν $d_1 < d_2$ τότε και $d_{es1} < d_{es2}$.

Το πρωτόκολλο I μπορεί να λειτουργεί χωρίς κάποιο κοινό σύστημα προσανατολισμού ή άλλων δυνατοτήτων εντοπισμού θέσης στις συσκευές αισθητήρων. Φυσικά υποθέτοντας την ύπαρξη εξειδικευμένου υλικού (πχ «έξυπνες» κεραιές ή GPS) μπορούμε να απλοποιήσουμε τον εντοπισμό θέσης και να πετύχουμε καλύτερη ακρίβεια. Ένα τέτοιο πρωτόκολλο, το οποίο αναθέτει *εικονικές συντεταγμένες* σε όλες τις συσκευές αισθητήρων που απαρτίζουν το δίκτυο, προτείνεται στο [52] και είναι συμβατό με το μοντέλο μας (δείτε 3.2).

3.3.2 Η φάση αναμονής

Στη φάση αναμονής, οι συσκευές παρακολουθούν το περιβάλλον καταγράφοντας δεδομένα ανάλογα με την εργασία καταγραφής που εκτελούν. Όσον αφορά την επικοινωνία παραμένουν αδρανείς (εφόσον δεν χρειάζεται να αποστείλουν δεδομένα) και περιμένουν τη λήψη μηνυμάτων από τις γειτονικές τους συσκευές που μεταδίδουν *ανακοινώσεις* ή που απαντούν σε μία προηγούμενη ανακοίνωση. Η χρησιμότητα των μηνυμάτων ανακοινώσεων είναι να συλλέγουν πληροφορίες για κόμβους που μπορούν να συμμετέχουν σε ένα μονοπάτι δρομολόγησης και περιγράφονται στην επόμενη ενότητα (δείτε *φάση σχεδίασης μονοπατιού*). Οι αισθητήρες παραμένουν στη φάση αναμονής μέχρι (α) να καταγράψουν πληροφορία για ένα νέο γεγονός που αφορά την εργασία καταγραφής οπότε και πρέπει να την προωθήσουν στο κέντρο ελέγχου, S ή (β) να λάβουν ένα μήνυμα M από μία άλλη συσκευή αισθητήρων.

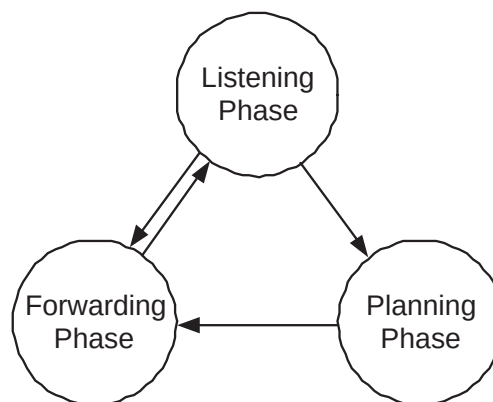
Όταν μία συσκευή p' λάβει ένα μήνυμα-ανακοίνωση από μία άλλη συσκευή p , πρώτα ελέγχει εάν $d_{es}(p', p) \leq \mathcal{R}_{close}$, όπου $\mathcal{R}_{close}$ μία παράμετρος που τίθεται από τον διαχειριστή του δικτύου (δείτε σχήμα 3.4). Ο σκοπός της παραμέτρου $\mathcal{R}_{close}$ είναι να ξεχωρίσει κοντινούς γείτονες που μπορεί να έχουν σχεδιάσει ένα νέο μονοπάτι. Εάν ο έλεγχος πετύχει και η δομή μονοπατιού είναι κενή, τότε δημιουργεί ένα νέο μονοπάτι $\mathcal{P} = \{p\}$ το οποίο ανατίθεται στη δομή μονοπατιού. Έτσι ο κόμβος εξασφαλίζει ότι όταν χρειαστεί να μεταδώσει πληροφορία, θα αποστέλλεται σε κάποιο κοντινό κόμβο που έχει σχηματίσει ένα μονοπάτι. Έπειτα, ο κόμβος p' αποφασίζει βασισμένος σε *τοπικά κριτήρια* εάν θα απαντήσει στην ανακοίνωση ή όχι. Ο στόχος μας εδώ είναι να επιτρέψουμε σε κάθε συσκευή να ελέγξει την κατανάλωση ενέργειας αγνοώντας κάποιες αιτήσεις για συμμετοχή σε μονοπάτι. Αυτή η απόφαση μπορεί να βασιστεί σε ένα μηχανισμό που λαμβάνει υπόψη διάφορα τοπικά κριτήρια για την κατάσταση της συσκευής (πχ διαθέσιμη ενέργεια, φόρτος στη συσκευή κ.α.), την τοπική κατάσταση του δικτύου (πχ μέση ενέργεια γειτόνων, τοπική πυκνότητα κ.α.) ή ακόμα και καθολικά κριτήρια που έχουν τεθεί από το διαχειριστή του δικτύου όπως η υποχρεωτική συμμετοχή για αύξηση του ποσοστού επιτυχίας. Έτσι, εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί για παράδειγμα όταν το δίκτυο είναι αρκετά πυκνό και πολλές άλλες συσκευές έχουν ήδη απαντήσει σε μία ανακοίνωση οπότε δεν χρειάζονται άλλες ενώ αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει και την εφαρμογή τεχνικών διασφάλισης ποιότητας της υπηρεσίας (QoS), π.χ. αγνοώντας τα μηνύματα που αναφέρονται σε εργασίες καταγραφής

χαμηλής προτεραιότητας, στην παρούσα εργασία δεν εξετάζουμε τέτοιες τεχνικές.

Στο [26], συζητούμε ένα μηχανισμό που επιτρέπει στις συσκευές να αντιδρούν τοπικά σε περιβαλλοντικές αλλαγές καθώς και σε αλλαγές στις συνθήκες της εφαρμογής, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από κανόνες που βασίζονται σε καθορισμό κατωφλίων για να σταλεί απάντηση σε μία ανακοίνωση. Τα κατώφλια συσχετίζουν την ευελιξία σε τοπικό επίπεδο με την ανθεκτικότητα σε επίπεδο δικτύου, χρησιμοποιώντας τεχνικές κατανομής φορτίου εμπνευσμένες από φυσικές συμπεριφορές, μεταφέροντας την κοινωνική συμπεριφορά των εντόμων για επίλυση προβλημάτων (μία τεχνική που μελετάται και στο [7]). Εδώ δεν εξετάζουμε αυτή τη δυνατότητα και οι συσκευές απαντούν πάντα (με εξαιρέσεις που περιγράφουμε παρακάτω) σε ανακοινώσεις.

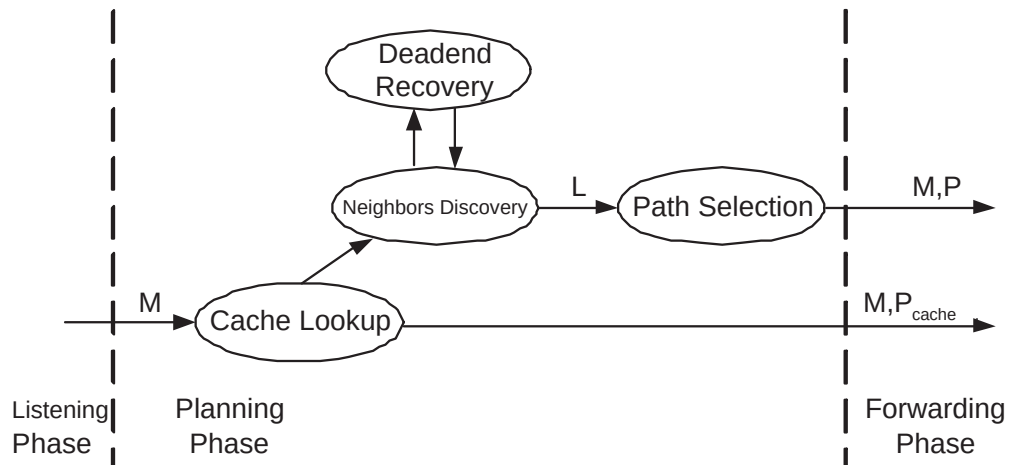
Η συσκευή p' συνεχίζει να λαμβάνει παθητικά τυχόν μηνύματα-απαντήσεις που αποστέλλονται από κάποια άλλη συσκευή p'' που απαντά στην ανακοίνωση της p . Εάν ισχύει $d_{es}(p'', S) < d_{es}(p', S)$, δηλαδή η p'' βρίσκεται πιο κοντά στο S από την p' , τότε η p' προσθέτει την p'' στη *δομή γειτόνων*, επειδή είναι ένας υποψήφιος γείτονας για αποστολή μηνυμάτων στο μέλλον. Αυτή η παθητική παρακολούθηση του καναλιού επικοινωνίας επιτρέπει στις συσκευές να ανανεώσουν την δομή γειτόνων με πρόσθετη πληροφορία για την τοπολογία του δικτύου. Έτσι, εκμεταλλεύονται τις μεταδόσεις ανακοινώσεων σε *μεγάλη απόσταση* από συσκευές που βρίσκονται στην *διευρυμένη γειτονία* τους και εκτελούν τη *φάση σχεδιασμού μονοπατιού*, προκειμένου να ανιχνεύσουν την κατάσταση του δικτύου και να μειώσουν την ανάγκη αποστολής ανακοινώσεων από τις ίδιες στο μέλλον.

Θέλουμε να επισημάνουμε ότι δεν είναι απαραίτητο όλες οι συσκευές να αφουγκράζονται το κανάλι διαρκώς, αφού έτσι ξοδεύεται αρκετή ενέργεια. Αυτό το πρωτόκολλο μπορεί να συνδυαστεί με κάποια μέθοδο εξοικονόμησης ενέργειας όπως το πρωτόκολλο APCP που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εναλλακτικά, μπορεί και το ίδιο να επεκταθεί για να συμπεριλάβει τεχνικές ύπνου/αφύπνισης (sleep/awake) στην φάση αναμονής, όπως προτείνεται στο [51], όπου εξετάζεται η δυνατότητα επέκτασης υπάρχοντων πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Ο ισχυρισμός μας αυτός βασίζεται στην πειραματική αξιολόγηση που παρουσιάζουμε στη συνέχεια (δείτε 3.4), όπου φαίνεται ότι το πρωτόκολλό μας λειτουργεί ικανοποιητικά σε αραιά και δυναμικά δίκτυα, συνθήκες που εμφανίζονται κατά την εκτέλεση τεχνικών ύπνου/αφύπνισης.



Σχήμα 3.1: Οι φάσεις του πρωτοκόλλου

3.3 Το πρωτόκολλο CKN



Σχήμα 3.2: Η ροή κατά τη φάση σχεδιασμού μονοπατιού

3.3.3 Η φάση σχεδίασης μονοπατιού

Ένας αισθητήρας περνά στη φάση σχεδιασμού μονοπατιού όταν πρέπει να προωθήσει δεδομένα, έστω ότι η συσκευή p πρέπει να προωθήσει το μήνυμα M . Σε αυτή τη φάση, η p πρώτα εξετάζει τα περιεχόμενα της *δομής μονοπατιού*. Εάν αυτή περιέχει ένα έγκυρο μονοπάτι P_{cache} που απαριθμεί τις ενδιάμεσες συσκευές, η φάση τερματίζει και η συσκευή προχωρά στη φάση *δρομολόγησης δεδομένων*. Εάν δεν υπάρχει κάποιο μονοπάτι αποθηκευμένο, τότε η p εξετάζει τα περιεχόμενα της *δομής γειτόνων* προκειμένου να κατασκευάσει ένα νέο μονοπάτι P που θα χρησιμοποιηθεί για να προωθηθεί το M προς το S .

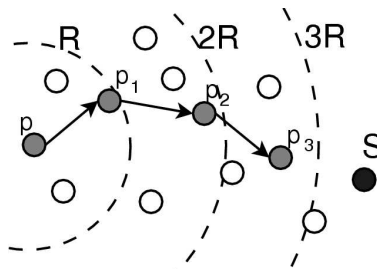
Συλλογή Περιορισμένης Γνώσης

Εάν η *δομή γειτόνων* είναι άδεια, περιέχει απαρχαιωμένα δεδομένα ή δεν υπάρχει αρκετή πληροφορία για να κατασκευαστεί ένα μονοπάτι, τότε η p προσπαθεί να ανακαλύψει τους γείτονές της, σε μία *διευρυμένη γειτονία* όπως αυτή ορίζεται με βάση το β .

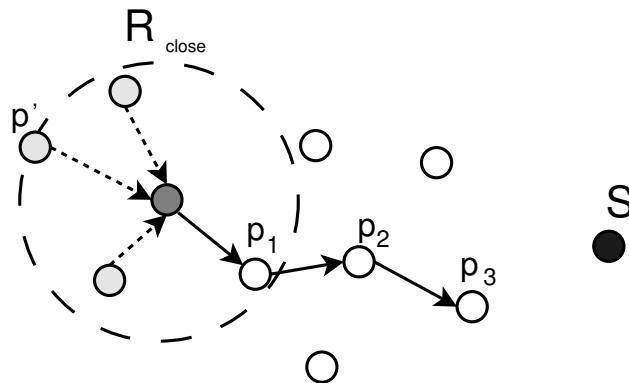
Με δεδομένη την αρχική ακτίνα μετάδοσης $\mathcal{R}$, η p εκτελεί μία μετάδοση *υψηλής ισχύος* τέτοια ώστε η ακτίνα διάδοσης να γίνει $\beta \cdot \mathcal{R}$ προκειμένου να εκπέμψει ένα μήνυμα-ανακοίνωση για την ανάγκη να ανακαλύψει γείτονες που θα προωθήσουν τα δεδομένα.

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι είναι πιθανό να μην ανακαλυφθούν όλοι οι γείτονες αφού μπορεί να προκύψουν συγκρούσεις μηνυμάτων, παρεμβολές δηλαδή ανάμεσα στις συσκευές που θα προσπαθήσουν να απαντήσουν λίγο πολύ ταυτόχρονα. Αυτό το πρόβλημα αναφέρεται στη βιβλιογραφία σαν «καταιγισμός μεταδόσεων» (broadcast storm) και είναι δύσκολο να αντιμετωπιστεί από το επίπεδο διαχείρισης του μέσου ενώ έχουν προταθεί αρκετά πρωτόκολλα που επικεντρώνουν σε αυτό. Εδώ προτείνουμε μία απλή λύση που ταιριάζει στις ανάγκες μας, ενώ όπως θα δούμε στη συνέχεια δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, μία συσκευή p αφού μεταδώσει μία ανακοίνωση, περιμένει για ένα *προκαθορισμένο χρονικό διάστημα* t_s να λάβει απαντήσεις. Οι γειτονικές συσκευές που αποφάσισαν να απαντήσουν στην ανακοίνωση, χρησιμοποιούν ένα μηχανισμό τυχαίας καθυστέρησης κατά τον οποίο καθυστερούν την απο-

στολή απάντησης για ένα χρονικό διάστημα t_r , που επιλέγεται τυχαία και ανεξάρτητα σε κάθε συσκευή, στο διάστημα $(0, t_s]$. Φυσικά ένας τέτοιος μηχανισμός προσθέτει μία επιπλέον καθυστέρηση στην κατασκευή μονοπατιού αλλά τα πειραματικά μας αποτελέσματα δείχνουν ότι δεν επηρεάζει σημαντικά την συνολική καθυστέρηση. Στην περίπτωση που διαθέτουμε ένα επίπεδο διαχείρισης μέσου που είναι ικανό να διαχειριστεί τέτοιες περιπτώσεις, μπορούμε να απενεργοποιήσουμε το μηχανισμό χρονοκαθυστέρησης (θέτοντας μικρό t_s). Για παράδειγμα στο [14] προτείνεται ένα κατανεμημένο, ανθεκτικό στη συμφόρηση και αυτοοργανούμενο πρωτόκολλο διαχείρισης του μέσου, το οποίο λειτουργεί χωρίς να υποθέτει την ύπαρξη κοινού ρολογιού στις συσκευές. Επομένως θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι ένα τέτοιο πρωτόκολλο εκτελείται στα χαμηλότερα επίπεδα της στοίβας δικτύωσης της συσκευής και επιλύει τις συγκρούσεις. Πάραυτα, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, η περίοδος αναζήτησης t_s παίζει σημαντικό ρόλο· *είναι απαραίτητη έστω και μία σύντομη αναμονή*, αφού δεν γνωρίζουμε εκ των προτέρων πόσες συσκευές θα προσπαθήσουν να απαντήσουν και πόσος χρόνος θα χρειαστεί για να συλλεχθούν όλες οι απαντήσεις.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα μετάδοσης



Σχήμα 3.4: Κοντινές συσκευές απαντούν σε *ανακοίνωση*

Πάραυτα, είναι πιθανό η συσκευή να μην μπορεί να ανιχνεύσει γείτονες πχ επειδή η πυκνότητα του δικτύου είναι πολύ μικρή, λόγω υψηλού ποσοστού αποτυχίας στην παράδοση μηνυμάτων, λόγω αστοχίας υλικού πολλών συσκευών ή λόγω εμφάνισης εμποδίων στην επικοινωνία. Σε αυτή την περίπτωση το πρωτόκολλο φτάνει σε μία κατάσταση *αδιεξόδου* [52].

3.3 Το πρωτόκολλο CKN

Ένας πιθανός τρόπος να αντιμετωπιστεί μια τέτοια κατάσταση είναι να επαναληφθεί η ανακοίνωση μετά από σύντομο χρονικό διάστημα, σε περίπτωση που κάποιες ανενεργές συσκευές επανέλθουν ή ελπίζοντας πως κάποιες συσκευές που αποφάσισαν να μην συμμετέχουν προηγουμένως απαντήσουν. Αυτή η λύση μπορεί να είναι πιο αποδοτική εάν συνδυαστεί με κάποιο πρωτόκολλο μεταβολής της ακτίνας μετάδοσης. Τότε η νέα ανακοίνωση θα μεταδοθεί σε ακτίνα $(\beta + i) \cdot \mathcal{R}$, όπου i είναι ένας μετρητής των προσπαθειών επαναμετάδοσης. Φυσικά, μία συσκευή δεν μπορεί να επεκτείνει την ακτίνα της πέρα από το μέγιστο όριο ισχύς εκπομπής που υποστηρίζει το υλικό του πομποδέκτη, επομένως σε ακραίες περιπτώσεις η προώθηση του μηνύματος $\mathcal{M}$ είναι αδύνατη. Αυτό το ενδεχόμενο εξετάζεται στο [3] όπου οι συσκευές μεταβάλλουν την ακτίνα μετάδοσης με βάση διάφορες συναρτήσεις. Μία άλλη πιθανή λύση είναι η χρήση ενός μηχανισμού οπισθοδρόμησης, παρόμοιου με αυτόν που παρουσιάζεται στο [24]. Τότε το μήνυμα αποστέλλεται σε μία συσκευή που μπορεί να κατασκευάσει ένα μονοπάτι που παρακάμπτει την συσκευή στην οποία προέκυψε το πρόβλημα του αδιεξόδου. Εδώ εφαρμόζουμε μόνο την τεχνική της επαναμετάδοσης χωρίς να αυξάνουμε περαιτέρω την ακτίνα μετάδοσης.

Υπολογισμός και βελτιστοποίηση μονοπατιού

Δεδομένου ότι η p συγκέντρωσε επαρκή πληροφορία για την περιβάλλουσα τοπολογία στην περιοχή του δικτύου που βρίσκεται, μπορεί να επιλέξει ένα μονοπάτι $\mathcal{P}$ τέτοιο ώστε το $\mathcal{M}$ να παραδοθεί σε μία άλλη συσκευή p''' που βρίσκεται πιο κοντά στο $\mathcal{S}$ από την p . Η επιλογή του τελικού αποδέκτη p''' , μπορεί να βελτιστοποιηθεί με διάφορους τρόπους και ανάλογα με την πληροφορία που διαθέτουμε, πχ. επιλέγοντας τη συσκευή με τα μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα, τη συσκευή που έχει το χαμηλότερο φόρτο μηνυμάτων ή την συσκευή που διαθέτει την πιο έγκυρη πληροφορία.

Μόλις επιλεγεί ο τελικός αποδέκτης p''' , η p διαχωρίζει σε β υπολίστες την πληροφορία για τους γείτονές της που περιέχεται στη δομή γειτόνων. Ο διαχωρισμός γίνεται με βάση την απόστασή τους από την p , έστω $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_\beta$ λίστες, τότε ισχύει $\forall p_j \in \mathcal{L}_i : (i-1) \cdot \mathcal{R} < d_{es}(p, p_j) \leq i \cdot \mathcal{R}$, δηλαδή κάθε υπολίστα περιέχει πληροφορία από ένα μόνο κυκλικό δακτύλιο (δείτε Σχήμα 3.3) και οι συσκευές τις οποίες περιέχει απέχουν από την p $[0, \mathcal{R}), [\mathcal{R}, 2\mathcal{R}), \dots, [(\beta-1)\mathcal{R}, \beta\mathcal{R}]$ αντίστοιχα. Έπειτα η p επιλέγει μία συσκευή από κάθε υπολίστα $\mathcal{L}_i$ ($i \in \{1, \beta-1\}$) καθορίζοντας έτσι το μονοπάτι $\mathcal{P} = p_1, p_2, \dots, p_{\beta-1}, p'''$. Για την επιλογή των ενδιάμεσων συσκευών εφαρμόζουμε ένα κριτήριο που ελαχιστοποιεί τις σχετικές αποστάσεις ανάμεσα στους κόμβους του μονοπατιού.

Πιο συγκεκριμένα, η συσκευή εκτελεί μία προπαρασκευαστική διαδικασία στην οποία σχηματίζει ένα διμερές γράφημα πολλαπλών επιπέδων, με β επίπεδα. Κάθε επίπεδο i του γραφήματος $G(V, E)$ περιέχει κορυφές που αντιστοιχούν στις συσκευές που περιέχονται στην λίστα $\mathcal{L}_i$, ενώ μία ακμή (u, v) υπάρχει αν και μόνο αν $u \in \mathcal{L}_i, v \in \mathcal{L}_{i+1}$, δηλαδή οι ακμές είναι ανάμεσα σε κορυφές διαδοχικών επιπέδων. Τα βάρη που ανατίθενται στις ακμές του G αντιστοιχούν στην φυσική απόσταση d_{es} των συσκευών που αντιστοιχούν στους κόμβους του γραφήματος. Έπειτα στο γράφημα που κατασκευάστηκε το πρωτόκολλο εκτελεί έναν αλγόριθμο εύρεσης συντομότερου μονοπατιού ανάμεσα στην p και p''' . Η διαίσθηση του να χρησιμοποιήσουμε ένα πολυεπίεδο διμερές γράφημα βασίζεται στο ότι έτσι μειώνεται ο συνολικός αριθμός ακμών $m = |V|$ και επομένως μειώνεται ο χρόνος που χρειάζεται για την εύρεση συντομότερου μονοπατιού, ο οποίος παρά το σχετικά μικρό πλήθος κόμβων στη δομή γειτόνων μπορεί να μην είναι αμελητέος λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων των συσκευών.

Προσέξτε ότι ο διαχωρισμός των γειτόνων σε β υπολίστες $(\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_\beta)$ μπορεί να δημιουρ-

Συσκευή	Δομή Μονοπατιού
p	$\{p_1, p_2, p_3\}$
p_1	$\{p_2, p_3\}$
p_2	$\{p_3\}$
p_3	κενή
p'	$\{p\}$

Πίνακας 3.1: Τα περιεχόμενα της δομής μονοπατιού για το παράδειγμα που παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.3 και 3.4

γήσει και κενές υπολίστες, πιθανώς λόγω χαμηλής πυκνότητα κόμβων. Σε αυτή την περίπτωση το πρωτόκολλο θα υπολογίσει ένα μονοπάτι $\mathcal{P}$ μήκους $l < \beta$. Για να το πετύχουμε αυτό, οι άδειες υπολίστες παρακάμπτονται κατά τη δημιουργία του διμερούς γραφήματος οπότε το μονοπάτι θα περιέχει ένα κόμβο από κάθε μη κενή υπολίστα ενώ ο τελικός κόμβος προορισμός θα βρίσκεται πάντα στη κοντινότερη στο $\mathcal{L}_\beta$ μη κενή υπολίστα ή στο $\mathcal{L}_\beta$ όταν $\mathcal{L}_\beta \neq \emptyset$. Αυτό το γεγονός θα εξαναγκάσει το πρωτόκολλο να μεταδώσει δεδομένα σε μεγαλύτερη απόσταση από την δεδομένη ακτίνα μετάδοσης R . Προφανώς υπάρχουν και άλλες τεχνικές για τον υπολογισμό του μονοπατιού $\mathcal{P}$, που επικεντρώνουν σε διαφορετικά κριτήρια όπως η διαθέσιμη ενέργεια στους κόμβους, η απόσταση από το $\mathcal{S}$ ενώ μπορεί να περιλαμβάνουν και τεχνικές τυχαιότητας.

Μόλις υπολογιστεί ένα μονοπάτι $\mathcal{P}$, το πρωτόκολλο περνά στη *φάση διάδοσης δεδομένων*, μία σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων σταδίων από τα οποία διέρχεται η φάση σχεδίασης μονοπατιού μπορεί να βρεθεί στο Σχήμα 3.2. Στη φάση διάδοσης δεδομένων ένα μήνυμα που περιέχει τα δεδομένα που θέλουμε να στείλουμε και το υπολογισμένο μονοπάτι $(\mathcal{M}, \mathcal{P})$, μεταδίδεται στην πρώτη συσκευή που υπάρχει στο $\mathcal{P}$, (στο παράδειγμα που φαίνεται στο Σχήμα 3.3 η p_1). Τότε κάθε συσκευή p_j που λαμβάνει ένα μήνυμα $(\mathcal{M}, \mathcal{P})$ προωθεί το μήνυμα $(\mathcal{M}, \mathcal{P} - \{p_j\})$ στον επόμενο κόμβο του μονοπατιού p_{j+1} . Όταν η συσκευή p''' (στο παράδειγμα που φαίνεται στο Σχήμα 3.3 η p_3) λάβει το $(\mathcal{M}, \{\cdot\})$, η φάση διάδοσης δεδομένων ολοκληρώνεται. Τώρα η p''' είναι υπεύθυνη για την περαιτέρω προώθηση του $\mathcal{M}$ στο $\mathcal{S}$. Το περιεχόμενο της δομής μονοπατιών ανά συσκευή για το παράδειγμα που φαίνεται στο Σχήμα 3.4 παρατίθεται στον Πίνακα 3.1.

3.3.4 Η φάση διάδοσης δεδομένων

Μία συσκευή p που λαμβάνει ένα μήνυμα τύπου $(\mathcal{M}, \mathcal{P})$, εισέρχεται στη φάση διάδοσης δεδομένων και εκτελεί τις εξής ενέργειες:

$\mathcal{P}$ μη κενό. Το μήνυμα περιέχει πληροφορία για ένα μονοπάτι από ενδιάμεσες συσκευές. Εάν το μονοπάτι $\mathcal{P}' = \mathcal{P} - \{p\}$ είναι μη κενό (δηλαδή η συσκευή δεν είναι ο τελευταίος κόμβος στο μονοπάτι), τότε το $\mathcal{P}'$ αποθηκεύεται στη δομή δεδομένων και αντικαθιστά την πληροφορία που μπορεί να βρίσκεται εκεί (ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1). Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι επειδή υποθέτουμε ότι το μονοπάτι $\mathcal{P}'$ είναι το προϊόν ενός πρόσφατου υπολογισμού και έτσι προτιμάται. Έπειτα η συσκευή προωθεί το μήνυμα $(\mathcal{M}, \mathcal{P}')$ στο p_1 και επιβεβαιώνει την λήψη του μηνύματος στέλνοντας ένα μήνυμα *επιτυχίας* στον αποστολέα του μηνύματος. Στην περίπτωση που η ίδια συσκευή κατέγραψε το

3.3 Το πρωτόκολλο CKN

γεγονός και προετοίμασε το μήνυμα, φυσικά δεν αποστέλλεται μήνυμα *επιβεβαίωσης* πουθενά. Αλλιώς, εάν το $\mathcal{P}'$ είναι κενό, τότε το πρωτόκολλο περνά στην φάση σχεδιασμού μονοπατιού.

$\mathcal{P}$ **είναι κενό**. Το μήνυμα δεν περιέχει πληροφορία για την δρομολόγησή του προς το $\mathcal{S}$. Τότε το πρωτόκολλο εισέρχεται στη φάση σχεδιασμού μονοπατιού.

Αφού μεταδώσει ένα πακέτο στον επόμενο προορισμό p_1 , όπως ορίζεται από το υπολογισμένο μονοπάτι, η συσκευή p θα περιμένει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης από τον p_1 . Το μήνυμα επιβεβαιώνει ότι το $\mathcal{M}$ λήφθηκε επιτυχώς και η διάδοση ολοκληρώθηκε όπως είχε σχεδιαστεί. Εάν η συσκευή p_1 δεν απαντήσει μέσα σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, η p υποθέτει ότι η μετάδοση απέτυχε και δοκιμάζει ξανά να μεταδώσει την πληροφορία στην p_1 . Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι είτε η p_1 να απαντήσει με ένα μήνυμα επιτυχίας ή να ξεπεραστεί ο μέγιστος αριθμός επιτρεπόμενων επαναμεταδόσεων (ο οποίος είναι παράμετρος που δίνεται στο πρωτόκολλο). Σε αυτή την περίπτωση, η p διαπιστώνει ότι η p_1 πλέον είναι ανενεργή, επομένως ανανεώνει τη δομή γειτόνων αφαιρώντας την p_1 , σβήνει τη δομή μονοπατιού (αφού το $\mathcal{P}$ περιέχει την p_1) και εισέρχεται στη φάση σχεδίασης μονοπατιού.

Επίσης, από τη στιγμή που η p μπορεί να εκτιμήσει την απόστασή της από την p_1 , κατά τη διάδοση η ακτίνα μετάδοσης μπορεί να αυξηθεί ή μειωθεί κατάλληλα σε σχέση με την $\mathcal{R}$, ώστε να ληφθεί το μήνυμα από την p_1 . Αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει στο πρωτόκολλό μας να πραγματοποιεί «μεγάλων» αποστάσεων μεταδόσεις, όταν αυτό απαιτείται από το υπολογισμένο μονοπάτι, προκειμένου να παρακάμψει αραιές περιοχές του δικτύου. Ενώ όταν ο επόμενος προορισμός βρίσκεται κοντά, η μείωση της ακτίνας μετάδοσης εξοικονομεί ενέργεια.

3.3.5 Σχεδιαστικά θέματα του πρωτοκόλλου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζουμε αρκετά θέματα που επηρεάζουν την αποδοτικότητα των πρωτοκόλλων δρομολόγησης και εξηγούμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τις επιλογές που κάναμε κατά τον σχεδιασμό του πρωτοκόλλου μας (το οποίο εφεξής θα αποκαλούμε **CKN**), για να αντιμετωπίσουμε αυτά τα θέματα, καθώς και τη σχέση με άλλες λύσεις που παρουσιάζονται σε σχετικές εργασίες.

Ο πρωταρχικός στόχος του πρωτοκόλλου μας είναι να κατασκευάσει χαμηλού κόστους, όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας κυρίως, και χαμηλής καθυστέρησης μονοπάτια διάδοσης δεδομένων, ενώ παράλληλα σέβεται τους περιορισμούς και τις αδυναμίες των συσκευών αισθητήρων. Ο τρόπος που πετυχαίνουμε αυτούς τους στόχους, αρχικά μπορεί να φανεί αντικρουόμενος με το αποτέλεσμα που επιδιώκουμε. Το **CKN** χρησιμοποιεί αρκετές μεταδόσεις μεγάλης εμβέλειας, επομένως και υψηλού ενεργειακού κόστους, προκειμένου να συλλέξει την πληροφορία για την τοπολογία του δικτύου γύρω από κάποια συσκευή. Όμως αυτό το κόστος εξισορροπείται από τρεις παράγοντες:

- (α) Το κατασκευασμένο μονοπάτι είναι βελτιστοποιημένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιεί το μήκος του μονοπατιού ενώ παράλληλα μεγιστοποιεί την απόσταση που καλύπτει το μήνυμα προς τον προορισμό του $\mathcal{S}$. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι συσκευές μπορούν να μειώσουν την ακτίνα μετάδοσης στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο (αφήνοντας και ένα περιθώριο ώστε να σιγουρέψουν την παράδοση) ώστε να γίνει αντιληπτό το μήνυμα από τον παραλήπτη· η τελική κατανάλωση ενέργειας είναι αρκετά μικρή αφού εξοικονομείται ενέργεια στις μικρού μήκους μεταδόσεις.

- (β) Το κατασκευασμένο μονοπάτι μεταδίδεται σαν τμήμα του μηνύματος. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι αποθηκεύουν το μονοπάτι στη δομή μονοπατιού και το χρησιμοποιούν όχι μόνο για το συγκεκριμένο μήνυμα, αλλά και για τα μηνύματα που ακολουθούν. Με αυτό τον τρόπο τα μονοπάτια συγχωνεύονται και επαναχρησιμοποιούνται για να δρομολογήσουν πολλά μηνύματα, έτσι η ενέργεια που ξοδεύτηκε στη φάση σχεδίασης μονοπατιού εξισορροπείται.
- (γ) Οι συσκευές αφουγκράζονται απαντήσεις σε ανακοινώσεις άλλων κόμβων και ανανεώνουν την δομή γειτόνων τους. Επίσης, συσκευές με άδεια δομή γειτόνων μπορούν να επιλέξουν σαν μονοπάτι τον αποστολέα της ανακοίνωσης όπως περιγράψαμε στη φάση αναμονής (δείτε 3.3.2). Έτσι η συλλογή πληροφορίας για την τοπολογία του δικτύου και η κατασκευή μονοπατιού μπορούν να γίνουν παθητικά χωρίς επιπλέον κόστος για την εκπομπή ανακοινώσεων. Αρχικά, οι συσκευές μπορεί να έχουν μόνο μερική γνώση του δικτύου και τα κατασκευασμένα μονοπάτια θα είναι κακής ποιότητας. Στη συνέχεια όμως καθώς θα ανακαλύπτονται περισσότεροι γείτονες και θα συγκεντρώνεται περισσότερη πληροφορία, τα μονοπάτια θα βελτιώνονται και θα πετυχαίνουν τους στόχους που έχουμε θέσει.

Επίσης προσέξτε ότι εισάγουμε ένα μικρό επιπλέον κόστος στο μέγεθος του μεταδιδόμενου μηνύματος αφού επισυνάπτουμε το μονοπάτι σε κάθε μήνυμα. Ο απαιτούμενος αποθηκευτικός χώρος στο μήνυμα σε bit είναι της τάξης $O(\beta)$, το οποίο είναι αρκετά μικρό ώστε να μπορούν να το διαχειριστούν οι συσκευές. Το ίδιο ισχύει και για το μέγεθος της δομής μονοπατιού, υποθέτοντας ότι έχουμε μόνο ένα κέντρο ελέγχου $\mathcal{S}$ ενώ για περισσότερα το μέγεθος αυξάνει γραμμικά ως προς τον αριθμό των κέντρων ελέγχου. Όμως για τη δομή γειτόνων, ο αποθηκευτικός χώρος που απαιτείται είναι της τάξης $O((\mathcal{R} \cdot \beta)^2)$. Είναι πιθανό υπό ορισμένες συνθήκες, οι συσκευές να μην μπορούν να χειριστούν ένα τέτοιο αριθμό καταχωρήσεων στη δομή γειτόνων. Σε αυτές τις περιπτώσεις το πρωτόκολλο μπορεί να χρησιμοποιήσει κάποιο μηχανισμό για να διατηρεί στη δομή μόνο αρκετές καταχωρήσεις ώστε να μπορεί να κατασκευάζει μονοπάτια. Ένας μηχανισμός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η αφαίρεση των λιγότερων χρησιμοποιούμενων καταχωρήσεων (LRU). Αφού το πρόβλημα αυτό είναι πιο πιθανό να εμφανιστεί σε δίκτυα με μεγάλη πυκνότητα ακόμα και ένα μικρό υποσύνολο των συνολικών γειτόνων αρκεί να διατηρηθεί στη μνήμη ώστε να έχουμε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα της τοπολογίας και τα κατασκευασμένα μονοπάτια θα είναι καλής ποιότητας.

Επομένως το πρωτόκολλό μας έχει σχεδιαστεί ώστε να πετυχαίνει υψηλή απόδοση με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μικρή καθυστέρηση χρησιμοποιώντας επιπλέον γνώση η οποία όμως αποκτάται τοπικά σε κάθε κόμβο, με κατάλληλο τρόπο ώστε να αντιμετωπίζονται οι αδυναμίες των συσκευών αισθητήρων. Αυτή η προσέγγιση διαφοροποιεί το **CKN** από άλλα πρωτόκολλα που εφαρμόζουν τεχνικές βελτιστοποίησης τοπικά (όπως το [24]), όπου περιορισμένη σε ακτίνα μίας μετάδοσης, γνώση του δικτύου χρησιμοποιείται για να δρομολογηθούν τα δεδομένα με άπληστο (greedy) τρόπο. Στο [57], εξετάζονται τρεις «άπληστοι» αλγόριθμοι για ασύρματα δίκτυα που επιτυγχάνουν την κατασκευή μονοπατιών χωρίς κύκλους. Οι αλγόριθμοι είναι οι GEDIR, MFR και DIR. Ο GEDIR πάντα μεταδίδει πακέτα στον γείτονα που η απόστασή του από τον προορισμό είναι η μικρότερη. Ο αλγόριθμος MFR διαλέγει τον επόμενο προορισμό ώστε να καλύπτεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόσταση προς το κέντρο ελέγχου, αυτή η προσέγγιση είναι ισοδύναμη με το GEDIR. Στον αλγόριθμο DIR, ο επόμενος προορισμός επιλέγεται ώστε να έχει τη μικρότερη γωνιακή απόσταση από τη νοητή γραμμή που συνδέει τον τρέχον κόμβο και τον προορισμό. Οι συγγραφείς προτείνουν τροποποιήσεις αυτών των αλγορίθμων που επιλέγουν τον επόμενο προορισμό με τον ίδιο τρόπο αλλά αυτή τη φορά χρησιμοποιώντας πληρο-

3.3 Το πρωτόκολλο CKN

φορία από μία διευρυμένη περιοχή, με ακτίνα δύο φορές την ακτίνα μετάδοσης. Σε περίπτωση που αυτά τα πρωτόκολλα βρεθούν σε κατάσταση αδιεξόδου, ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζουν όλα τα άπληστα πρωτόκολλα, οι συγγραφείς προτείνουν να πλημμυρίσουν το μήνυμα στο δίκτυο, μια λύση με σημαντικό ενεργειακό κόστος. Παρομοίως, το **CKN** χρησιμοποιεί πληροφορία σε μία διευρυμένη περιοχή αλλά αντίθετα με την εργασία [57] προτείνουμε μεθόδους για να αποκτήσουμε αυτή την πληροφορία με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο. Επιπλέον, αντί να επιλέγουμε απλά τον πιο κατάλληλο τελικό προορισμό, βελτιστοποιούμε όλο το ενδιάμεσο μονοπάτι προς αυτό τον κόμβο. Επίσης, αφού το πρωτόκολλό μας επιλέγει πάντα κόμβους που βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο ελέγχου από τον κόμβο που κάνει την επιλογή, πετυχαίνουμε και εμείς κατασκευή μονοπατιών χωρίς βρόγχους. Στην παράγραφο 3.3.3 συζητήσαμε ήδη την περίπτωση να φτάσουμε σε μία αδιέξοδο κατάσταση όπου το μήνυμα δεν μπορεί να προωθηθεί περαιτέρω προς το κέντρο ελέγχου, επειδή ο τρέχων κόμβος είναι πιο κοντά στο κέντρο ελέγχου από τους γείτονές του. Δεν χρησιμοποιούμε τη μέθοδο πλημμυρίδας του μηνύματος, η οποία είναι προβληματική λόγω του ότι εμφανίζονται φαινόμενα όπως καταιγισμός μεταδόσεων και συγκρούσεις στο επίπεδο ελέγχου του μέσου που οδηγούν σε υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Αντίθετα, προτείνουμε ένα μηχανισμό μεταβλητής ακτίνας μετάδοσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για να ξεπεράσουμε καταστάσεις που υπάρχουν κενά δρομολόγησης στο δίκτυο ακόμα και στην χειρίστη περίπτωση που αυτά βρίσκονται γύρω από το κέντρο ελέγχου πχ όταν οι συσκευές εκεί εξαντλούν την ενέργειά τους. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το **CKN** μπορεί να εντοπίσει τους λίγους κόμβους που απομένουν ζωντανοί σε απόσταση $(\beta + i) \cdot \mathcal{R}$ και να πραγματοποιήσει μεταδόσεις σε μεγαλύτερη απόσταση από τη συνήθη ακτίνα μετάδοσης $\mathcal{R}$, προκειμένου να φτάσει αυτούς τους κόμβους.

Βελτιστοποίηση του τοπικού μονοπατιού αλλά με μη άπληστο τρόπο, εφαρμόζεται και στο [37], όπου προτείνεται το δημοφιλές πρωτόκολλο **Directed Diffusion**. Κατά την αρχικοποίηση του δικτύου ένα σύνολο από μονοπάτια από κάθε κόμβο προς το κέντρο ελέγχου σχηματίζεται, δημιουργώντας μία καθολική δομή δρομολόγησης. Έπειτα αυτά τα μονοπάτια συντηρούνται, ανανεώνονται και βελτιστοποιούνται από το **DD** που βασίζεται σε τοπικά κριτήρια (όπως η αξιοπιστία του γειτονικού κόμβου, η καθυστέρηση του μονοπατιού). Αντίθετα, το **CKN** κατασκευάζει και συντηρεί τα μονοπάτια όταν χρειάζεται, όταν δηλαδή υπάρχουν δεδομένα προς δρομολόγηση· όμως αυτό γίνεται σε σχετικά τοπικό επίπεδο ώστε η συγκεντρωμένη γνώση να μην ακυρώνεται γρήγορα σε περίπτωση που υπάρχουν δυναμικές αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου με υψηλή συχνότητα. Επίσης, σε σχέση με ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, όπως το **LEACH** που παρουσιάζεται στο [35], το **CKN** δεν διατηρεί κάποια συγκεκριμένη δομή ή ιεραρχία· όταν αποκτάται η γνώση για το δίκτυο και υπολογιστούν τα βελτιστοποιημένα μονοπάτια η μεταγωγή δεδομένων γίνεται με μεταδόσεις από κόμβο σε κόμβο.

Στην ενότητα 3.4 θα δούμε ότι το πρωτόκολλό μας είναι επίσης και ανθεκτικό σε σφάλματα. Κατά την μεταγωγή δεδομένων ο μηχανισμός επιβεβαίωσης που περιγράψαμε στην παράγραφο 3.3.4 μπορεί να ανιχνεύσει μη αποκρίσιμες συσκευές, οι οποίες μπορεί να τεθούν εκτός λειτουργίας λόγω αστοχίας του υλικού, εξάντλησης των ενεργειακών αποθεμάτων τους, αντίξων περιβαλλοντικών συνθηκών κλπ. Αυτός ο μηχανισμός είναι πολύ απλός, χρησιμοποιεί μόνο τοπικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στις συσκευές και επιφέρει χαμηλό κόστος. Αντίθετα, στη βιβλιογραφία βρίσκουμε πρωτόκολλα, δείτε [49, 29], που οι κόμβοι μπορεί να μεταδώσουν δοκιμαστικές προκλήσεις στους γείτονές τους προκειμένου να ανιχνεύσουν ελαττωματικούς κόμβους, ενώ έπειτα μεταδίδουν τα αποτελέσματα στο δίκτυο κατασκευάζοντας έτσι μία καθολική λίστα με ελαττωματικούς κόμβους. Όταν το **CKN** ανιχνεύσει μία αποτυχία, απλά εισέρχεται στη φάση

σχεδίασης μονοπατιού και επιλέγει ένα νέο μονοπάτι. Στη σχετική βιβλιογραφία, η ανθεκτικότητα σε σφάλματα επιτυγχάνεται με την προληπτική κατασκευή και ανανέωση επιπλέον μονοπατιών, κατά προτίμηση μη συνδεδεμένων, ανάμεσα στην πηγή και τον προορισμό έτσι ώστε οποιοδήποτε σύνολο k αποτυχιών κόμβων να μην μπορεί να καταστρέψει όλα τα μονοπάτια. Μία τέτοια προσέγγιση ακολουθείται στις εργασίες [30, 34]. Από την άλλη στο [18], προτείνεται μία λύση βασισμένη στην τυχαιότητα που χρησιμοποιεί μεταδόσεις σε πολλαπλά μονοπάτια ταυτόχρονα, επιτυγχάνοντας έτσι ανοχή σε σφάλματα. Ενώ αυτές οι λύσεις επιτυγχάνουν υψηλή ανοχή σε σφάλματα, εισάγουν το επιπλέον κόστος της δημιουργίας, συντήρησης ή και χρήσης πολλών μονοπατιών. Το **CKN** ακολουθεί διαφορετική προσέγγιση, αντί να δημιουργεί προληπτικά εναλλακτικές διαδρομές, αντιμετωπίζει τις αποτυχίες τη στιγμή που εμφανίζονται. Η ανθεκτικότητα βασίζεται στην ικανότητα του πρωτοκόλλου να ανακαλύπτει γρήγορα νέους γείτονες και μονοπάτια όταν χρειάζεται. Έτσι επιβάλουμε πολύ μικρό κόστος στο δίκτυο αλλά με τον περιορισμό ότι δεν μπορούμε να ανιχνεύσουμε Βυζαντινά σφάλματα, ούτε μπορούμε να εγγυηθούμε ανθεκτικότητα σε k σφάλματα.

Επιπρόσθετα του χαμηλού ενεργειακού κόστους και της καλής αποδοτικότητας, πιστεύουμε ότι το **CKN** αποτελεί ένα ευέλικτο και παραμετροποιήσιμο πρωτόκολλο, αφού η συμπεριφορά του καθορίζεται από πολλές παραμέτρους ενώ ήδη αναφέραμε αρκετές σχεδιαστικές επιλογές που μπορούν να αλλάξουν. Όπως συζητήσαμε νωρίτερα, υπάρχουν αρκετές στρατηγικές που μπορούμε να ακολουθήσουμε προκειμένου να επιλέξουμε το μονοπάτι $\mathcal{P}$, οι οποίες μπορούν να εστιάσουν σε άλλες πτυχές και να εφαρμόσουν διαφορετικές βελτιστοποιήσεις. Παρακάτω παραθέτουμε μερικούς τρόπους για να επεκτείνουμε το πρωτόκολλό μας χρησιμοποιώντας διαφορετική ποσότητα τοπικής γνώσης.

- (α) *Βελτιστοποίηση με βάση την ενέργεια.* Σε αυτή την περίπτωση, οι ενδιάμεσες συσκευές p_i επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ανάμεσα σε όλες τις συσκευές που καταχωρούνται σε μία υπολίστα $\mathcal{L}_i$, να έχουν τα υψηλότερα ποσά διαθέσιμης ενέργειας. Προκειμένου να χρησιμοποιήσουμε αυτό το κριτήριο, οι συσκευές όταν απαντούν στις ανακοινώσεις του p πρέπει μαζί με τα υπόλοιπα στοιχεία να αποστέλλουν και μία ένδειξη των επιπέδων της μπαταρίας τους (δηλαδή την τιμή E_i). Κατά αυτό τον τρόπο μπορούμε να εξισορροπήσουμε την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο.
- (β) *Επιλογή με τυχαιότητα.* Προσπαθώντας να επιτύχουμε καλή απόδοση στη μέση περίπτωση, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τυχαιότητα στην επιλογή των ενδιάμεσων κόμβων προκειμένου να αποφύγουμε καταστάσεις όπου οι τοπολογίες είναι αντίξοες για τις άλλες μεθόδους επιλογής. Τέτοιες τοπολογίες για την επιλογή με βάση την απόσταση, μπορεί να είναι κόμβοι τοποθετημένοι σε μία γραμμή προς το κέντρο ελέγχου αλλά με πολύ χαμηλή ενέργεια, ενώ για την επιλογή με βάση την ενέργεια κόμβοι υψηλής ενέργειας τοποθετημένοι σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Έτσι, σε αυτή την παραλλαγή, κάθε συσκευή p_i επιλέγεται τυχαία και ισοπίθανα από την υπολίστα $\mathcal{L}_i$.
- (γ) *Επιλογή με βάση την καθυστέρηση.* Σε αυτή την περίπτωση, η διαδικασία βελτιστοποίησης λαμβάνει υπόψη χαρακτηριστικά του δικτύου που επηρεάζουν το ρυθμό διαμεταγωγής μηνυμάτων των μονοπατιών και επιλέγονται τα μονοπάτια με τη χαμηλότερη συμφόρηση. Πιο συγκεκριμένα, οι κόμβοι που απαντούν σε ανακοινώσεις περιλαμβάνουν μία εκτίμηση της συμφόρησης μετρούμενη ως ο αριθμός μηνυμάτων εν αναμονή δρομολόγησης σε κάθε κόμβο, καθώς και τον αριθμό των γειτονικών κόμβων που έχουν ανακαλύψει. Έτσι

3.4 Πειραματική αξιολόγηση

από κάθε υπολίστα επιλέγεται η συσκευή με τη χαμηλότερη συμφόρηση και τον μεγαλύτερο αριθμό γειτόνων. Με αυτό τον τρόπο, πιο αξιόπιστα και με μικρότερη καθυστέρηση μονοπάτια κατασκευάζονται αφού οι πιο συμφορημένοι κόμβοι, που είναι πιο πιθανό να απορρίψουν μηνύματα, αποφεύγονται ενώ οι ενδιάμεσοι κόμβοι θα έχουν μεγαλύτερο αριθμό εναλλακτικών επιλογών σε περίπτωση που σημειωθεί μία αποτυχία στη μετάδοση.

3.4 Πειραματική αξιολόγηση

3.4.1 Μετρικές απόδοσης

Σε αυτή την ενότητα αξιολογούμε την απόδοση του πρωτοκόλλου μας βασισμένοι στις τρεις ακόλουθες στοιχειώδεις μετρικές: το *ποσοστό επιτυχούς παράδοσης*, την *κατανάλωση ενέργειας* και την *καθυστέρηση παράδοσης*. Αυτές οι μετρικές σκιαγραφούν την ικανότητα του πρωτοκόλλου να συντονίσει τις συσκευές αισθητήρων, ώστε όλα τα μηνύματα που αφορούν μία εργασία καταγραφής μεταφέρονται στο κέντρο ελέγχου $\mathcal{S}$, με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο και με όσο το δυνατόν μικρότερη καθυστέρηση. Η σημασία κάθεμιας εκ των παραπάνω μετρικών εξαρτάται από την εφαρμογή που εκτελείται καθώς υπάρχουν εγγενείς αντισταθμίσεις ανάμεσα στο ποσοστό επιτυχίας, την κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση.

Στις προηγούμενες ενότητες περιγράψαμε βασικές σχεδιαστικές επιλογές του πρωτοκόλλου μας λαμβάνοντας υπόψη την εκτέλεση μίας μοναδικής εργασίας καταγραφής και την διάχυση των μηνυμάτων στο δίκτυο που σχετίζονται με αυτή την εργασία. Στην πράξη όμως, το δίκτυο θα εξυπηρετεί πολλές εργασίες καταγραφής παράλληλα, ενώ μπορεί να υπάρχουν και πολλαπλά κέντρα ελέγχου. Έτσι η αναφορά όλων των δεδομένων θα απαιτεί την ανταλλαγή ενός μεγάλου αριθμού μηνυμάτων.

Έστω K ο συνολικός αριθμός γεγονότων $(\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_K)$ που καταγράφονται από τις συσκευές, που για το καθένα δημιουργείται ένα μήνυμα που πρέπει να προωθηθεί σε ένα συγκεκριμένο κέντρο ελέγχου $\mathcal{S}$. Ας υποθέσουμε ότι το πρωτόκολλο καταφέρνει να παραδώσει k από αυτά τα μηνύματα.

Ορισμός 2 (Ποσοστό επιτυχούς παράδοσης) $\mathbf{P}_s$, είναι το ποσοστό του αριθμού γεγονότων που αναφέρθηκαν *επιτυχώς* στο κέντρο ελέγχου ως προς το *συνολικό αριθμό μηνυμάτων*, δηλαδή $\mathbf{P}_s = \frac{k}{K}$.

Ορισμός 3 (Συνολική κατανάλωση ενέργειας) $E_{tot} = \sum_{i=1}^n (E_i^{init} - E_i)$, όπου E_i^{init} είναι η αρχική ενέργεια της συσκευής i και E_i η διαθέσιμη ενέργεια της συσκευής i στο τέλος της λειτουργίας του δικτύου.

Ορισμός 4 (Καθυστέρηση παράδοσης) Έστω $\mathcal{D}$ το *συνολικό χρονικό διάστημα* που πέρασε από την ανίχνευση ενός γεγονότος $\mathcal{E}$ μέχρι την παράδοση του μηνύματος που περιέχει την πληροφορία για το γεγονός στο $\mathcal{S}$.

Επιπλέον, μετρούμε τρεις μετρικές σχεδιασμένες για να αναδείξουν τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου μας. Οι μετρικές είναι οι εξής: (α) ο **συνολικός αριθμός ανακοινώσεων**, (β) το **μέσο μήκος μονοπατιού** και (γ) ο **αριθμός συγκρούσεων** στη χρήση του μέσου ως ο αριθμός ακυρωμένων πακέτων. Αυτές οι μετρικές χαρακτηρίζουν το κόστος, κυρίως όσον αφορά

την ενέργεια, που επιβάλλει η δικτύωση δηλαδή ο συνδυασμός του πρωτοκόλλου μας με το πρωτόκολλο διαχείρισης του μέσου. Αποτελούν ένα σημαντικό συμπλήρωμα στο να σχηματίσουμε σφαιρική άποψη για την λειτουργία του πρωτοκόλλου μας.

Βασισμένοι στο μοντέλο που παρουσιάσαμε στην παράγραφο 3.2, η κατανάλωση ενέργειας για την μετάδοση ενός μηνύματος εξαρτάται από την απόσταση και το μέγεθος. Τα μηνύματα-ανακοινώσεις είναι μικρά μηνύματα σταθερού μεγέθους, έστω k_a , επομένως η επιπλέον ενέργεια που ξοδεύουμε από την αύξηση της ακτίνας μετάδοσης δεν αυξάνεται σημαντικά. Εξάλλου όπως θα δούμε στη συνέχεια, η επιπλέον γνώση που συλλέγουμε επιτρέπει πολύ καλύτερες επιλογές δρομολόγησης και το αποτελέσμα δικαιολογεί αυτή την αύξηση αφού φαίνεται ότι το κόστος είναι μικρότερο από τα οφέλη. Επιπλέον, η ενεργεία που ξοδεύεται για τη διάδοση των δεδομένων που είναι μηνύματα μεγαλύτερου μεγέθους, έστω k_i , δεν αυξάνεται αφού όποτε είναι δυνατό μεταδίδονται από κόμβο σε κόμβο σε απόσταση $\mathcal{R}$. Συμφέρει όμως να εφαρμόσουμε πάντα τη συλλογή γνώσης; Εάν όχι πάντα τότε μπορούμε να εξισορροπήσουμε το κόστος;

Βασισμένοι στο μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας, μπορούμε να λάβουμε κάποιες εκτιμήσεις για το συνολικό κόστος, που απαντούν στις πιο πάνω ερωτήσεις. Αρχικά μπορούμε να εκτιμήσουμε το κόστος ενέργειας για κάθε κύκλο φάσεων σχεδίασης μονοπατιού και δρομολόγησης δεδομένων:

$$k_a \cdot (\beta \cdot \mathcal{R})^2 + \beta \cdot k_i \cdot \mathcal{R}^2$$

Εάν $\beta < \frac{k_i}{k_a}$ τότε η ενέργεια που ξοδεύεται σε μία ανακοίνωση είναι μικρότερη από το κόστος μετάδοσης των μηνυμάτων. Όμως στον παραπάνω συλλογισμό δεν συμπεριλάβαμε τις απαντήσεις στην ανακοίνωση που μπορούν να αυξήσουν σημαντικά το συνολικό κόστος, κάθε απάντηση έχει κόστος το πολύ ίσο με το κόστος της ανακοίνωσης αφού έχει ανάλογο μέγεθος ενώ μεταδίδεται σε απόσταση συνήθως μικρότερη από $\beta\mathcal{R}$. Το πρόβλημα είναι ότι δεν γνωρίζουμε τον αριθμό απαντήσεων εκ των προτέρων, αφού εξαρτάται από τον αριθμό των γειτόνων, τον οποίο όμως μπορούμε να εκτιμήσουμε αφού είναι ανάλογος της πυκνότητας των κόμβων στην περιοχή. Σύμφωνα με το [13], έχουμε:

$$\mu(\mathcal{R}) = \frac{(n\pi\mathcal{R}^2)}{\mathcal{A}}$$

δηλαδή, το $\mu(\mathcal{R})$ δίνει τον αναμενόμενο αριθμό γειτόνων σε ακτίνα $\mathcal{R}$ γύρω από κάθε συσκευή. Θέτοντας $R = \beta\mathcal{R}$, η πυκνότητα ($\mu(\mathcal{R})$) των συσκευών γίνεται κατά β^2 φορές μεγαλύτερη, το οποίο οδηγεί σε πολύ περισσότερες συσκευές να απαντήσουν στην ανακοίνωση. Από την άλλη όμως για να συλλεχθεί η ίδια πληροφορία με κοντινές μεταδόσεις στην ίδια περιοχή θα χρειαζόταν πολύ μεγαλύτερος αριθμός μεταδόσεων. Επιπλέον ο μεγάλος αριθμός μεταδόσεων θα οδηγήσει και σε αύξηση συγκρούσεων. Όμως η μεγάλη ακτίνα σημαίνει ότι πολλοί κόμβοι θα αφουγκρασθούν την ανταλλαγή ανακοίνωσης και απαντήσεων επομένως θα συλλέξουν την ίδια πληροφορία *δωρεάν*. Συμπεραίνουμε ότι συμφέρει να χρησιμοποιούμε το πρωτόκολλό μας με σχετικά μικρές τιμές του β , όταν τα δεδομένα που θέλουμε να στείλουμε είναι ογκώδη, ενώ σε πολύ πυκνά δίκτυα ενδέχεται να έχουμε κάποια σπατάλη ενέργειας.

3.4.2 Οργάνωση των πειραμάτων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζουμε μία συγκριτική αξιολόγηση του πρωτοκόλλου μας σε σχέση με το καταξιωμένο πρότυπο για την διάχυση πληροφορίας σε δίκτυα μικροισθητήρων,

3.4 Πειραματική αξιολόγηση

Directed Diffusion που παρουσιάζεται στο [37] (το οποίο για συντομία θα γράφουμε και σαν **DD**) Η αξιολόγηση γίνεται με την προσομοίωση των δύο πρωτοκόλλων σε διάφορα σενάρια αλλά υπό τις ίδιες συνθήκες. Η πλατφόρμα προσομοίωσης είναι ο ευρέως χρησιμοποιούμενος προσομοιωτής **ns-2** έκδοση 2.26. Ο **ns-2** παρέχει λεπτομερή προσομοίωση του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου διαχείρισης του μέσου (MAC), ενώ επιτρέπει την μέτρηση πολλών μεταβλητών (όπως η κατανάλωση ενέργειας) σε προσομοιώσεις δικτύων αισθητήρων.

Υλοποιήσαμε το πρωτόκολλό μας στο επίπεδο δρομολόγησης του **ns-2**, υποθέτουμε ότι οι συσκευές, είτε εκτελούν το **CKN** είτε το **DD**, εκτελούν μία εφαρμογή καταγραφής που παράγει γεγονότα κατανεμημένα με τυχαίο και ομοιόμορφο τρόπο στους αισθητήρες του δικτύου. Η κατανομή των συσκευών είναι επίσης τυχαία σε κάθε πείραμα, επομένως επαναλαμβάνουμε κάθε πείραμα αρκετές φορές με τις ίδιες παραμέτρους ώστε να πάρουμε ένα δείγμα της συμπεριφοράς των πρωτοκόλλων στα πλαίσια διαφόρων κατανομών αισθητήρων και γεγονότων και να εξαγάγουμε στατιστικά.

Στον Πίνακα 3.2, παρουσιάζουμε τις παραμέτρους της προσομοίωσης για την πρώτη σειρά πειραμάτων. Με αυτές τις παραμέτρους, η τοπική πυκνότητα κυμαίνεται από 6.28 μέχρι 12.57. Στο [37], οι συγγραφείς εξετάζουν σενάρια με ανάπτυξη διαφορετικού αριθμού κόμβων αλλά ταυτόχρονα με αλλαγή των διαστάσεων του δικτύου οπότε η σχετική πυκνότητα μένει περίπου σταθερή, $\mu(\mathcal{R}) \approx 9.817$. Επίσης η διαθέσιμη ενέργεια των αισθητήρων τέθηκε σε υψηλά επίπεδα ($E_i^{init} = 20J$), ώστε να αποκλείσουμε την εμφάνιση αποτυχιών λόγω εξαντλήσεως των ενεργειακών αποθεμάτων των αισθητήρων, κάτι που θα επηρέαζε τα αποτελέσματα και θα δυσκόλευε την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Επίσης η εφαρμογή καταγραφής που εκτελούν οι συσκευές, καταγράφει γεγονότα κατά μέσο όρο με ρυθμό λ γεγονότα το δευτερόλεπτο, ενώ κάθε γεγονός γίνεται αντιληπτό από ένα ομοιόμορφα τυχαία επιλεγμένο κόμβο του δικτύου. Ο συνολικός αριθμός των γεγονότων που καταγράφονται είναι 1000. Η διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης υπολογίζεται σύμφωνα με το ρυθμό καταγραφής γεγονότων, διαρκεί αρκετά ώστε να δημιουργηθούν όλα τα γεγονότα ενώ προστίθενται και επιπλέον 15 δευτερόλεπτα για να βεβαιωθούμε ότι θα παραδοθούν και τυχόν καθυστερημένα πακέτα.

3.4.3 Αποτελέσματα πειραμάτων

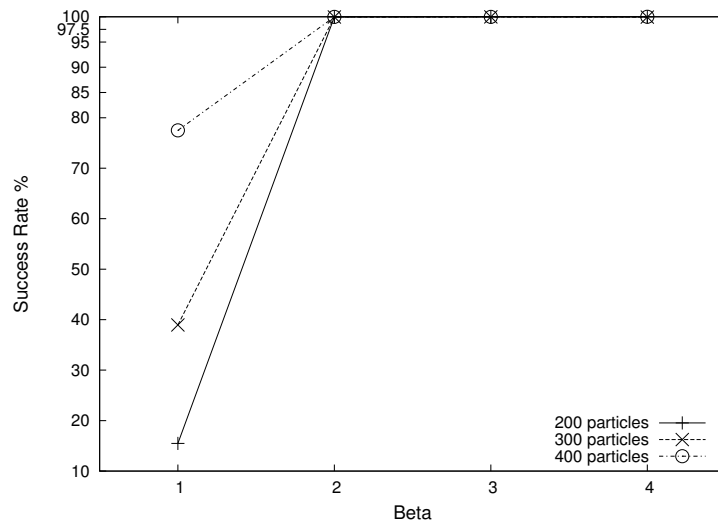
Αρχικά διερευνούμε την συμπεριφορά του πρωτοκόλλου εξετάζοντας την επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην απόδοση του δικτύου. Στην πρώτη σειρά πειραμάτων, μεταβάλλουμε την παράμετρο β , (την παράμετρο που ελέγχει την ακτίνα μετάδοσης ανακοινώσεων και κατ'επέκταση το μήκος μονοπατιού), ενώ μεταβάλλουμε και το πλήθος των συσκευών για να ελέγξουμε την ικανότητα κλιμάκωσης του πρωτοκόλλου. Στα σχήματα 3.5-3.7 φαίνονται οι τρεις βασικές μετρικές της απόδοσης του δικτύου, ενώ στα σχήματα 3.8-3.10 οι τρεις μετρικές για τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου όπως τις περιγράψαμε στη παράγραφο 3.4.1. Θέτουμε το χρόνο αναζήτησης σε σταθερή τιμή $t_s = 75ms$ για να μειώσουμε τον αριθμό των παραμέτρων που πρέπει να λάβουμε υπόψη κατά την ανάλυση.

Τα αποτελέσματα στα Σχήματα 3.5 και 3.8 επιβεβαιώνουν την ικανότητα του πρωτοκόλλου να χειρίζεται και περιπτώσεις αραιών, πιθανώς μη συνεκτικών δικτύων, για κατάλληλες τιμές του β . Σε κάθε πυκνότητα που δοκιμάσαμε, θέτοντας $\beta = 2$ είναι αρκετό για να πετύχουμε σχεδόν 100% ποσοστό επιτυχίας. Απεναντίας, όταν $\beta = 1$, το πρωτόκολλο λειτουργεί καθαρά σαν «άπληστο», πολλές ανακοινώσεις χρειάζονται ενώ εμφανίζονται συχνά και καταστάσεις αδιεξόδου. Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, φαίνεται ότι πραγματικά το κόστος μετάδοσης

**Τεχνικές χρήσης περιορισμένης γνώσης για αποδοτική και ανθεκτική
σε σφάλματα δρομολόγηση δεδομένων**

Παράμετρος Προσομοίωσης	Τιμή (Σχμ. 3.5-3.7)
Περιοχή δικτύου $\mathcal{A}$	Τετράγωνη $500m \times 500m$
Θέση κέντρου ελέγχου $\mathcal{S}$	Κάτω αριστερή γωνία $(0,0)$
Αριθμός συσκευών n	200, 300, 400
Αρχική ακτίνα μετάδοσης $\mathcal{R}$	50m
Ακτίνα προεπιλογής επόμενου κόμβου $\mathcal{R}_{close}$	50m
Ενέργεια συσκευών E_i^{init}	20J
Παράμετρος β	$\{1, 2, 3, 4\}$
Χρόνος αναζήτησης t_s	75 msec
Συνολικός αριθμός γεγονότων	1000
Ρυθμός εμφάνισης γεγονότων λ	2 events/sec
Χρόνος προσομοίωσης	515 sec
Μετρικές	Ποσοστό επιτυχούς παράδοσης, Κατανάλωση ενέργειας, Καθυστέρηση παράδοσης, Αριθμός ανακοινώσεων, Μήκος μονοπατιού, Απορριπτέα μηνύματα

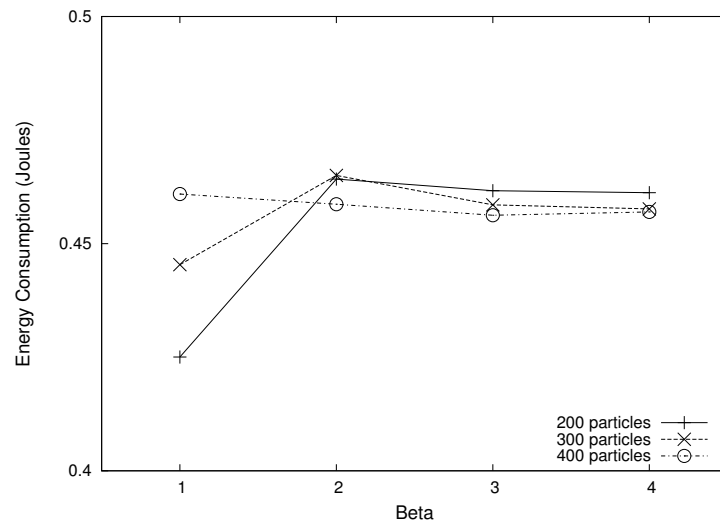
Πίνακας 3.2: Παράμετροι προσομοίωσης για τα αποτελέσματα που φαίνονται στα Σχήματα 3.5-3.7 & 3.8-3.10



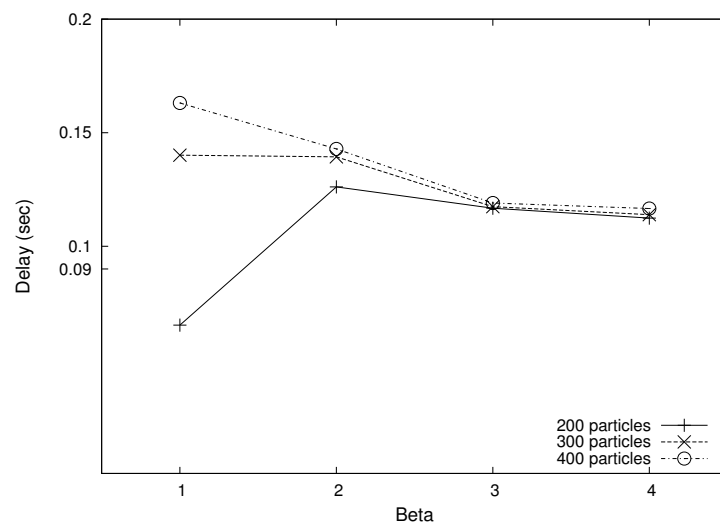
Σχήμα 3.5: Ποσοστό επιτυχίας ($\mathbb{P}_s$) για μεταβλητές τιμές $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, μεταβλητό αριθμό συσκευών ($n \in \{200, 300, 400\}$) και σταθερό χρόνο αναμονής ($t_s = 75ms$)

ανακοινώσεων σε μεγάλη εμβέλεια εξισορροπείται από τα βελτιστοποιημένα μονοπάτια και την

3.4 Πειραματική αξιολόγηση

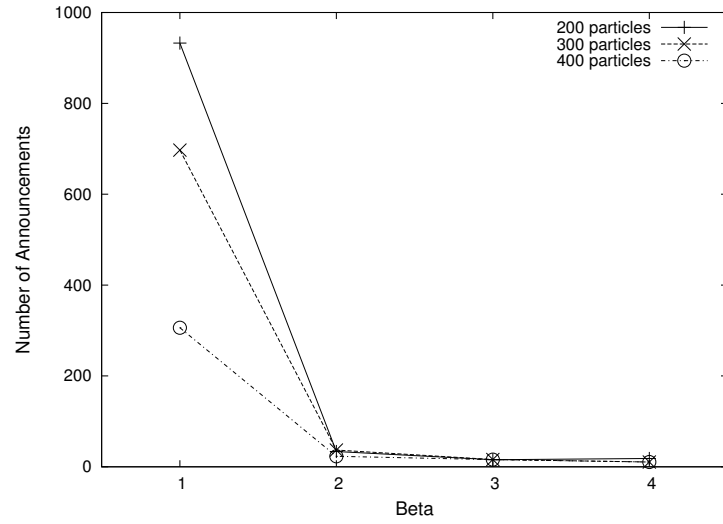


Σχήμα 3.6: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}) για μεταβλητές τιμές $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, μεταβλητό αριθμό συσκευών ($n \in \{200, 300, 400\}$) και σταθερό χρόνο αναμονής ($t_s = 75ms$)

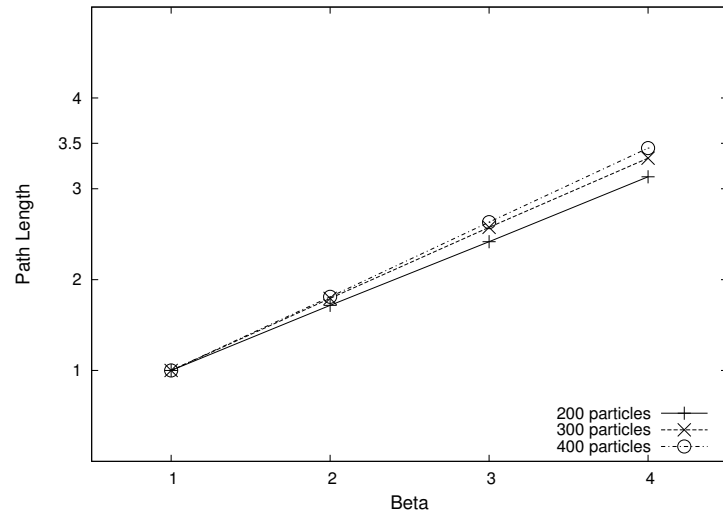


Σχήμα 3.7: Καθυστέρηση παράδοσης ($\mathcal{D}$) για μεταβλητές τιμές $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, μεταβλητό αριθμό συσκευών ($n \in \{200, 300, 400\}$) και σταθερό χρόνο αναμονής ($t_s = 75ms$)

αποτελεσματική χρήση της δομής γειτόνων και μονοπατιού, ανεξάρτητα από την πυκνότητα του δικτύου και την τιμή β . Επιπλέον, παρατηρούμε ότι αυξάνοντας το β , η καθυστέρηση παράδοσης ελαττώνεται. Αυτό εξηγείται σε συνδυασμό με το ότι ο αριθμός ανακοινώσεων μειώνεται, αφού τα μονοπάτια που κατασκευάζονται έχουν μεγαλύτερο μήκος, περισσότεροι κόμβοι ακούν τις ανακοινώσεις και τις απαντήσεις και ανανεώνουν τη δομή γειτόνων μειώνοντας έτσι την



Σχήμα 3.8: Αριθμός ανακοινώσεων για μεταβλητές τιμές $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, μεταβλητό αριθμό συσκευών ($n \in \{200, 300, 400\}$) και σταθερό χρόνο αναμονής ($t_s = 75ms$)

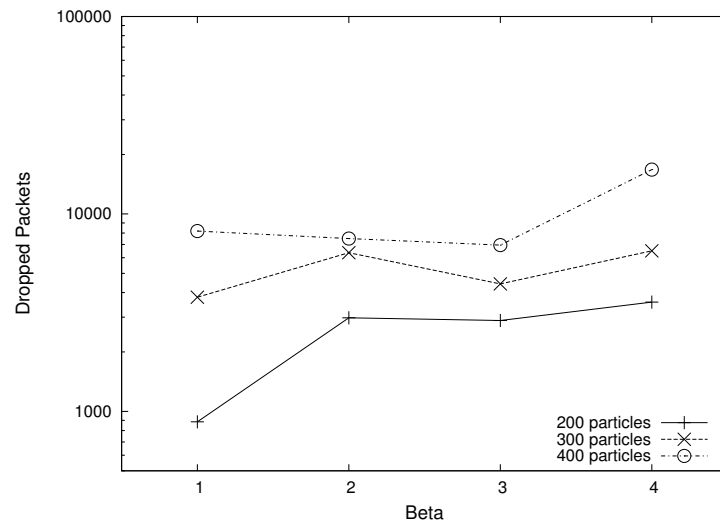


Σχήμα 3.9: Μήκος μονοπατιού για μεταβλητές τιμές $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, μεταβλητό αριθμό συσκευών ($n \in \{200, 300, 400\}$) και σταθερό χρόνο αναμονής ($t_s = 75ms$)

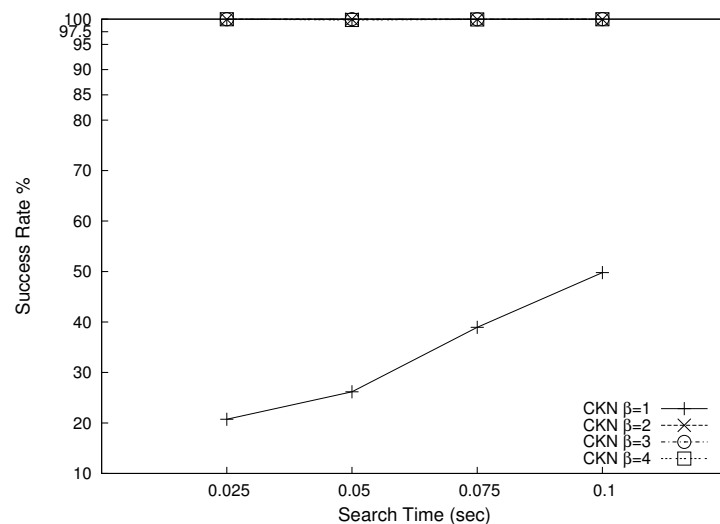
ανάγκη για ανίχνευση του δικτύου και συνεπώς το συνολικό χρόνο αναζήτησης. Ενώ ο αριθμός απορριφθέντων πακέτων αυξάνεται με την αύξηση του β , αυτό δεν επηρεάζει σημαντικά το πρωτόκολλό μας που καταφέρνει να αποδίδει καλά.

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων (δείτε Πίνακα 3.3 και σχήματα 3.11-3.13 και 3.14-3.16), εξετάζουμε την επίδραση του χρόνου αναζήτησης t_s , δηλαδή την περίοδο που περιμένουν α-

3.4 Πειραματική αξιολόγηση



Σχήμα 3.10: Αριθμός απορριφθέντων πακέτων για μεταβλητές τιμές $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, μεταβλητό αριθμό συσκευών ($n \in \{200, 300, 400\}$) και σταθερό χρόνο αναμονής ($t_s = 75ms$)



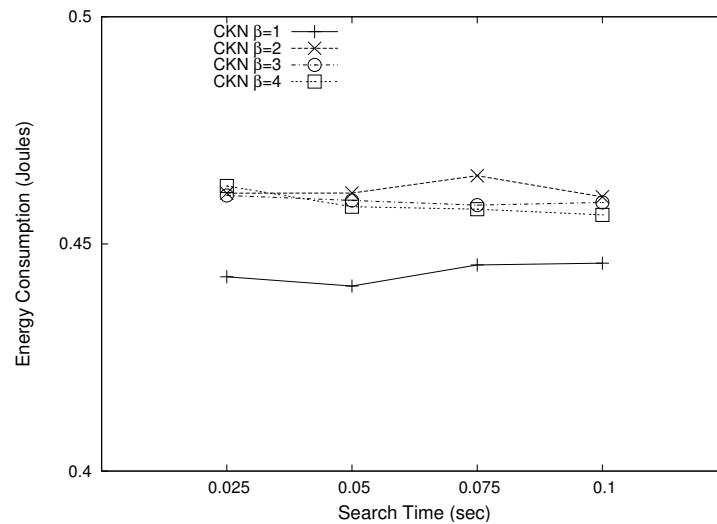
Σχήμα 3.11: Ποσοστό επιτυχίας ($\mathbb{P}_s$) για μεταβλητές τιμές $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, μεταβλητό χρόνο αναζήτησης $t_s \in \{25, 50, 75, 100\}ms$ και σταθερό αριθμό συσκευών ($n = 300$)

παντήσεις στις ανακοινώσεις τους οι συσκευές. Η ρύθμιση του t_s έχει στόχο να επιτρέπει στις μεταδόσεις απαντήσεων να απέχουν χρονικά ώστε να διευκολυνθεί το έργο του πρωτοκόλλου επίλυσης συγκρούσεων αλλά και να επιτρέψει σε συμφορημένες συσκευές να αποσυμφορηθούν και να προλάβουν να απαντήσουν. Επομένως αυξάνοντας το t_s , αναμένουμε λιγότερες συγκρούσεις αλλά παράλληλα αύξηση της καθυστέρησης παράδοσης. Όμως όπως φαίνεται στο

**Τεχνικές χρήσης περιορισμένης γνώσης για αποδοτική και ανθεκτική
σε σφάλματα δρομολόγηση δεδομένων**

Παράμετρος Προσομοίωσης	Τιμή 3.11-3.13 & 3.14-3.16
Περιοχή δικτύου $\mathcal{A}$	Τετράγωνη $500m \times 500m$
Θέση κέντρου ελέγχου $\mathcal{S}$	Κάτω αριστερή γωνία $(0,0)$
Αριθμός συσκευών n	300
Αρχική ακτίνα μετάδοσης $\mathcal{R}$	50m
Ακτίνα προεπιλογής επόμενου κόμβου $\mathcal{R}_{close}$	50m
Ενέργεια συσκευών E_i^{init}	20J
Παράμετρος β	$\{1, 2, 3, 4\}$
Χρόνος αναζήτησης t_s	$\{25, 50, 75, 100\}$ msec
Συνολικός αριθμός γεγονότων	1000
Ρυθμός εμφάνισης γεγονότων λ	2 events/sec
Χρόνος προσομοίωσης	515 sec
Μετρικές	Ποσοστό επιτυχούς παράδοσης, Κατανάλωση ενέργειας, Καθυστέρηση παράδοσης, Αριθμός ανακοινώσεων, Μήκος μονοπατιού, Απορριπτά μηνύματα

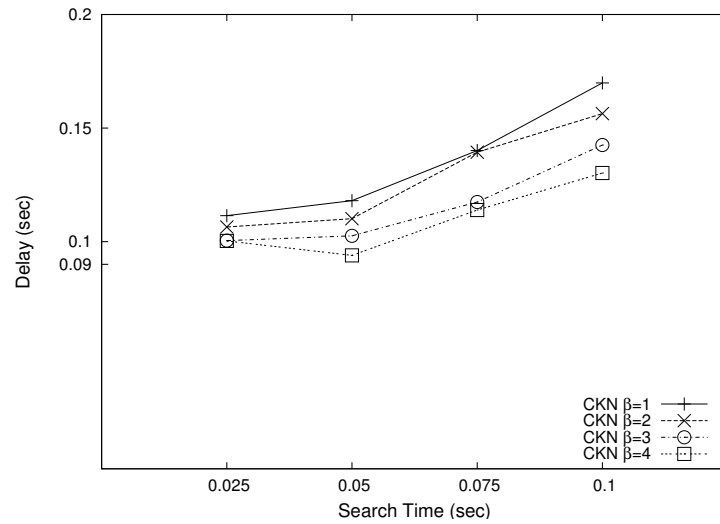
Πίνακας 3.3: Παράμετροι προσομοίωσης για τα αποτελέσματα που φαίνονται στα Σχήματα 3.11-3.13 & 3.14-3.16



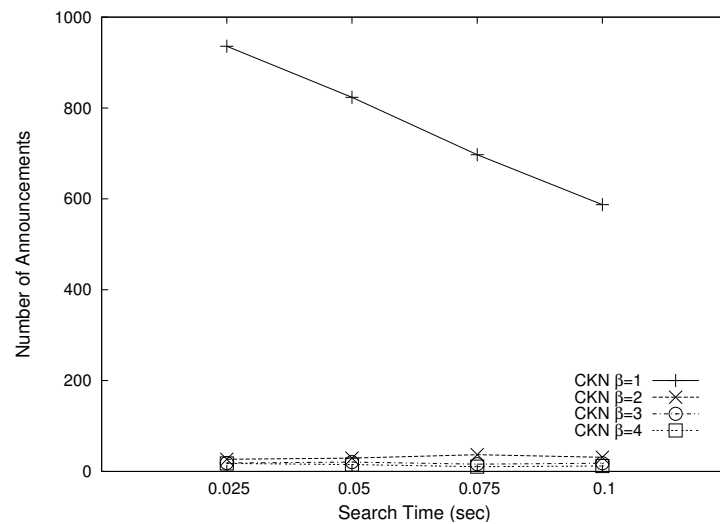
Σχήμα 3.12: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}), για μεταβλητές τιμές $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, μεταβλητό χρόνο αναζήτησης $t_s \in \{25, 50, 75, 100\}ms$ και σταθερό αριθμό συσκευών ($n = 300$)

σχήμα 3.13, η αύξηση της καθυστέρησης είναι περιορισμένη ενώ ο αριθμός των απορριφθέν-

3.4 Πειραματική αξιολόγηση

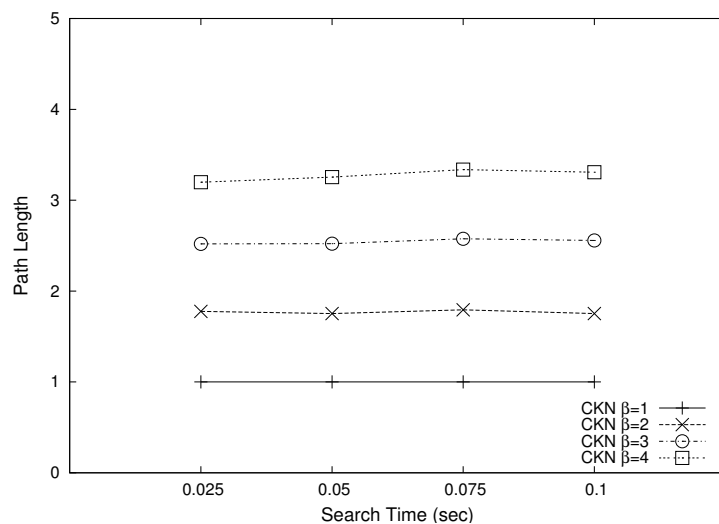


Σχήμα 3.13: Καθυστερήση παράδοσης ($\mathcal{D}$) για μεταβλητές τιμές $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, μεταβλητό χρόνο αναζήτησης $t_s \in \{25, 50, 75, 100\}ms$ και σταθερό αριθμό συσκευών ($n = 300$)

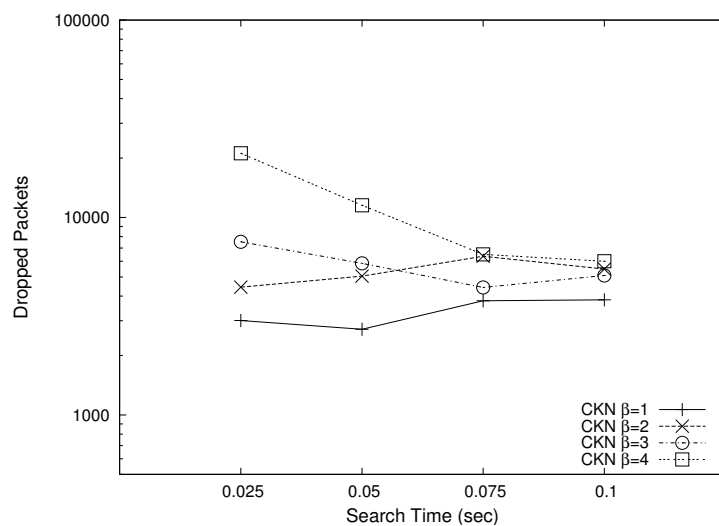


Σχήμα 3.14: Αριθμός ανακοινώσεων για μεταβλητές τιμές $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, μεταβλητό χρόνο αναζήτησης $t_s \in \{25, 50, 75, 100\}ms$ και σταθερό αριθμό συσκευών ($n = 300$)

των πακέτων μειώνεται δραστικά (προσέξτε στο σχήμα 3.16 ότι ο αριθμός των απορριφθέντων πακέτων παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Έτσι οι συσκευές συλλέγουν περισσότερη πληροφορία και κατασκευάζουν καλύτερα μονοπάτια. Ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι παρά την αύξηση του t_s , που έχει σαν αποτέλεσμα καλύτερη λειτουργία της ανίχνευσης του δικτύου, η συνολική κατανάλωση ενέργειας δεν επηρεάζεται σημαντικά. Έτσι συμπεραίνουμε ότι η συ-



Σχήμα 3.15: Μήκος μονοπατιού για μεταβλητές τιμές $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, μεταβλητό χρόνο αναζήτησης $t_s \in \{25, 50, 75, 100\}ms$ και σταθερό αριθμό συσκευών ($n = 300$)



Σχήμα 3.16: Αριθμός απορριφθέντων πακέτων για μεταβλητές τιμές $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, μεταβλητό χρόνο αναζήτησης $t_s \in \{25, 50, 75, 100\}ms$ και σταθερό αριθμό συσκευών ($n = 300$)

νολική κατανάλωση ενέργειας επηρεάζεται περισσότερο από τις μικρής εμβέλειας μεταδόσεις δεδομένων παρά από τις μεγάλης εμβέλειας μεταδόσεις για την απόκτηση γνώσης.

Στη συνέχεια εξετάζουμε συγκριτικά το πρωτόκολλό μας σε σχέση με το **DD**. Για να επισημάνουμε τις διαφορές ανάμεσα στα δύο πρωτόκολλα, πρώτα τα αξιολογούμε σε «ελεγχόμενες» συνθήκες με πειράματα που έχουν στόχο να αναδείξουν τη συμπεριφορά τους. Επίσης αφού

3.4 Πειραματική αξιολόγηση

το πρωτόκολλό μας μεταβάλλει την ακτίνα μετάδοσης (με βάση το β), για να κάνουμε τη σύγκριση πιο δίκαιη όταν εκτελείται το **DD** θέτουμε την ακτίνα διάδοσης των συσκευών σε $\beta \cdot \mathcal{R}$. Έτσι δίνουμε στο **DD** την ευκαιρία να ανακαλύψει μονοπάτια που θα μπορούσε να βρει μόνο το δικό μας πρωτόκολλο. Όμως το **DD** δεν σχεδιάστηκε ώστε να αυξομειώνει την ακτίνα διάδοσης οπότε σε κάθε μετάδοση η ακτίνα παραμένει σταθερή. Για αυτή τη σειρά πειραμάτων εξετάζουμε μόνο τις τρεις βασικές μετρικές απόδοσης του δικτύου (δείτε 3.4.1).

Στην πρώτη σειρά συγκριτικών πειραμάτων (δείτε σχήματα 3.17-3.19), μετρούμε την απόδοση των πρωτοκόλλων όταν μόνο ένα μήνυμα πρέπει να μεταδοθεί στο κέντρο ελέγχου $\mathcal{S}$. Αυτό το μήνυμα παράγεται από την πιο απομακρυσμένη από το $\mathcal{S}$ συσκευή που έχουμε τοποθετήσει στο σημείο (500, 500), έτσι το μήνυμα πρέπει να διανύσει όλο το δίκτυο μέχρι να παραδοθεί στο $\mathcal{S}$.

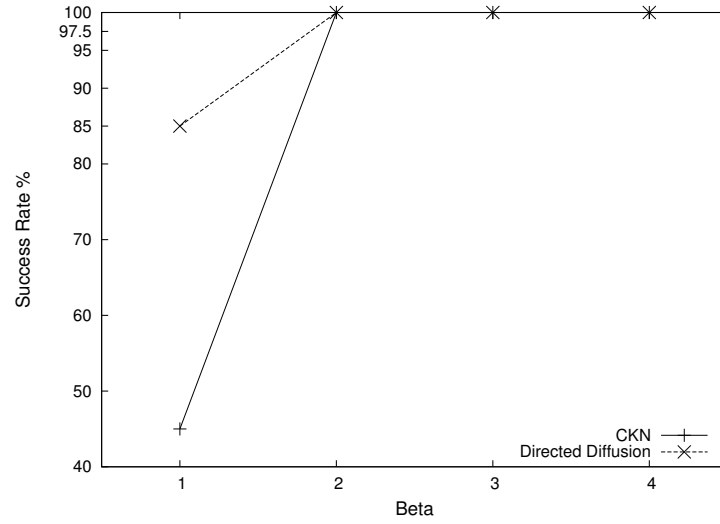
Στη δεύτερη σειρά συγκριτικών πειραμάτων (σχήματα 3.20-3.22), μετρούμε την απόδοση των δύο πρωτοκόλλων για την ειδική περίπτωση όπου κάθε συσκευή παράγει ένα μήνυμα που πρέπει να παραδοθεί στο $\mathcal{S}$, δηλαδή τα δύο πρωτόκολλα πρέπει να παραδώσουν n μηνύματα. Αυτά τα δύο σενάρια μας επιτρέπουν να εξετάσουμε τη συμπεριφορά των πρωτοκόλλων στις ακραίες περιπτώσεις όπου μηνύματα δημιουργούνται μακριά από το κέντρο ελέγχου και στην περίπτωση όπου τα μηνύματα έρχονται απ'όλες τις πιθανές κατευθύνσεις.

Παράμετρος Προσομοίωσης	Τιμή (Σχμ. 3.17-3.17)
Περιοχή δικτύου $\mathcal{A}$	Τετράγωνη $500m \times 500m$
Θέση κέντρου ελέγχου $\mathcal{S}$	Κάτω αριστερή γωνία (0, 0)
Αριθμός συσκευών n	300
Αρχική ακτίνα μετάδοσης $\mathcal{R}$	50m, {50, 100, 150, 200} για DD
Ακτίνα προεπιλογής επόμενου κόμβου $\mathcal{R}_{close}$	50m
Ενέργεια συσκευών E_i^{init}	20J
Παράμετρος β	{1, 2, 3, 4}
Χρόνος αναζήτησης t_s	75 msec
Συνολικός αριθμός γεγονότων	1 στη πάνω δεξιά γωνία (500, 500)
Χρόνος προσομοίωσης	15 sec
Μετρικές	Ποσοστό επιτυχούς παράδοσης, Κατανάλωση ενέργειας, Καθυστέρηση παράδοσης

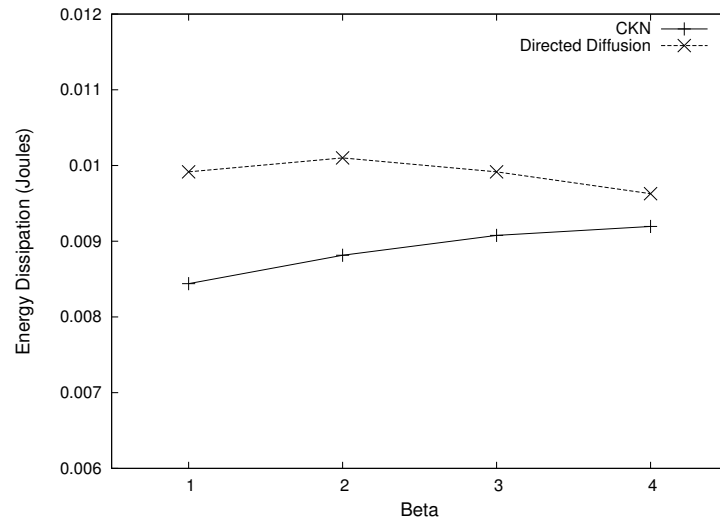
Πίνακας 3.4: Παράμετροι προσομοίωσης για τα αποτελέσματα που φαίνονται στα Σχήματα 3.17-3.19

Αυτές οι δύο σειρές πειραμάτων δείχνουν ότι στη χειρίστη περίπτωση που το μήνυμα πρέπει να διανύσει όλο το δίκτυο, το **DD** επιτυγχάνει μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας όταν $\beta = 1$, ενώ για $\beta > 1$, και τα δύο πρωτόκολλα πετυχαίνουν πάντα. Επιπλέον, στο σχήμα 3.19, για όλες τις τιμές β που εξετάσαμε, το **DD** καταφέρνει να παραδώσει τα μηνύματα σε συντομότερο χρόνο αλλά με υψηλότερο κόστος ενέργειας. Αυτό είναι αναμενόμενο σε κάποιο βαθμό, το **Directed Diffusion** υπολογίζει τα διαθέσιμα μονοπάτια κατά την αρχικοποίηση του δικτύου ενώ το **CKN** κατασκευάζει τα μονοπάτια όταν χρειάζεται.

Για την μέση περίπτωση που τα μηνύματα προέρχονται από όλες τις περιοχές του δικτύου,



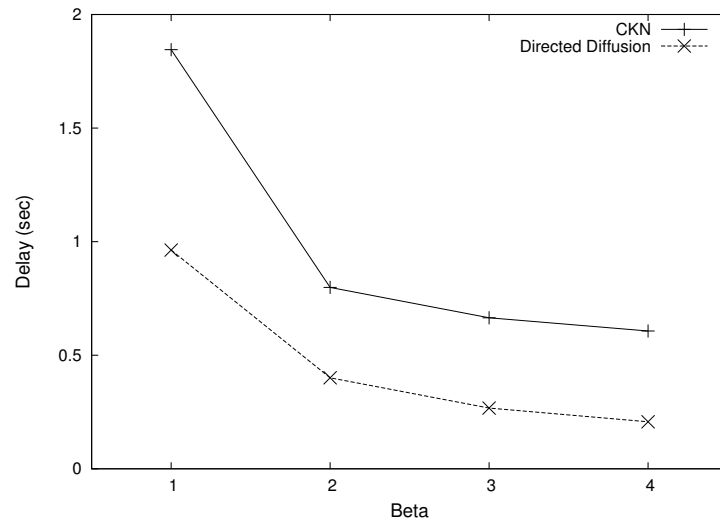
Σχήμα 3.17: Ποσοστό επιτυχίας (P_s) του **CKN** και **DD** στην περίπτωση ενός μηνύματος (που προέρχεται από το σημείο (500,500)), για μεταβλητό $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, σταθερό αριθμό κόμβων $n = 300$ και σταθερό χρόνο αναμονής $t_s = 75ms$



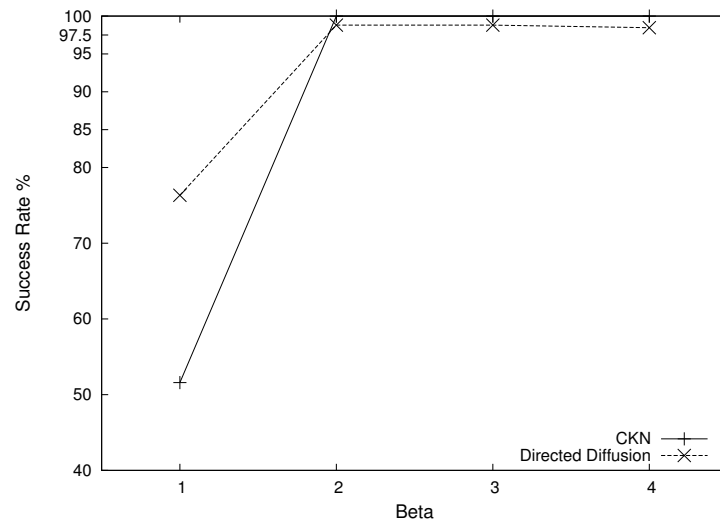
Σχήμα 3.18: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}), του **CKN** και **DD** στην περίπτωση ενός μηνύματος (που προέρχεται από το σημείο (500,500)), για μεταβλητό $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, σταθερό αριθμό κόμβων $n = 300$ και σταθερό χρόνο αναμονής $t_s = 75ms$

(δείτε σχήμα 3.20), το **DD** πάλι έχει υψηλότερο ποσοστό παράδοσης για $\beta = 1$, όμως όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση παράδοσης είναι ξεκάθαρο ότι το πρωτόκολλό μας υπερέρχει σημαντικά του **DD**. Σε αυτό το σενάριο όλοι οι κόμβοι πρέπει να κατασκευάσουν

3.4 Πειραματική αξιολόγηση



Σχήμα 3.19: Καυστέρηση παράδοσης ($\mathcal{D}$) του **CKN** και **DD** στην περίπτωση ενός μηνύματος (που προέρχεται από το σημείο (500,500)), για μεταβλητό $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, σταθερό αριθμό κόμβων $n = 300$ και σταθερό χρόνο αναμονής $t_s = 75ms$



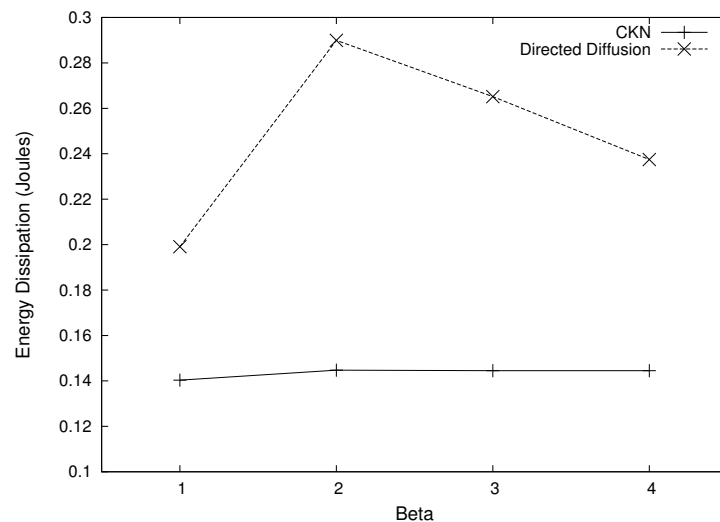
Σχήμα 3.20: Ποσοστό επιτυχίας ($\mathbb{P}_s$) του **CKN** και **DD** στην περίπτωση τριακοσίων μηνυμάτων (ένα ανά συσκευή), για μεταβλητό $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, σταθερό αριθμό κόμβων $n = 300$ και σταθερό χρόνο αναμονής $t_s = 75ms$

μονοπάτι, θα περίμενε κανείς ότι το **Directed Diffusion** πλεονεκτεί αφού έχει ήδη υπολογίσει τα μονοπάτια. Όμως, το **CKN** υπερσκελίζει το **DD** χάρη στις δομές γειτόνων και μονοπατιού που ανανεώνονται με παθητικό τρόπο. Έτσι τα μονοπάτια επαναχρησιμοποιούνται ενώ και ο

**Τεχνικές χρήσης περιορισμένης γνώσης για αποδοτική και ανθεκτική
σε σφάλματα δρομολόγηση δεδομένων**

Παράμετρος Προσομοίωσης	Τιμή (Σχμ. 3.20-3.22)
Περιοχή δικτύου $\mathcal{A}$	Τετράγωνη $500m \times 500m$
Θέση κέντρου ελέγχου $\mathcal{S}$	Κάτω αριστερή γωνία $(0,0)$
Αριθμός συσκευών n	300
Αρχική ακτίνα μετάδοσης $\mathcal{R}$	50m, $\{50, 100, 150, 200\}$ για DD
Ακτίνα προεπιλογής επόμενου κόμβου $\mathcal{R}_{close}$	50m
Ενέργεια συσκευών E_i^{init}	20J
Παράμετρος β	$\{1, 2, 3, 4\}$
Χρόνος αναζήτησης t_s	75 msec
Συνολικός αριθμός γεγονότων	300 ένα σε κάθε συσκευή
Ρυθμός εμφάνισης γεγονότων λ	2 events/sec
Χρόνος προσομοίωσης	165 sec
Μετρικές	Ποσοστό επιτυχούς παράδοσης, Κατανάλωση ενέργειας, Καθυστέρηση παράδοσης

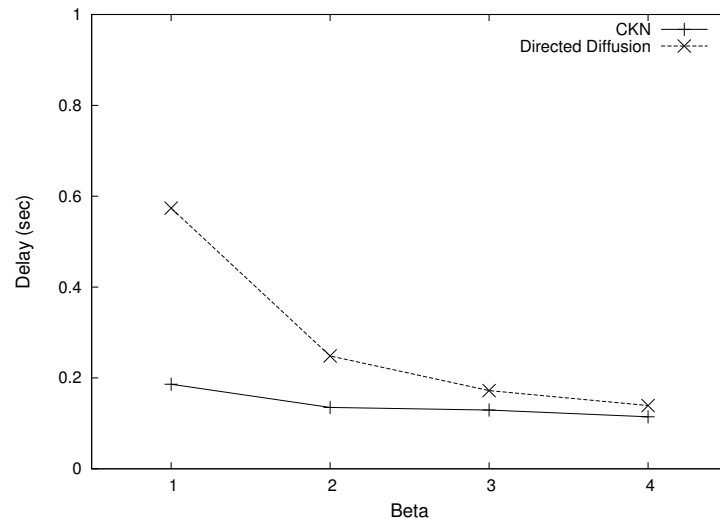
Πίνακας 3.5: Παράμετροι προσομοίωσης για τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 3.20-3.22



Σχήμα 3.21: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}), του **CKN** και **DD** στην περίπτωση τριακοσίων μηνυμάτων (ένα ανά συσκευή), για μεταβλητό $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, σταθερό αριθμό κόμβων $n = 300$ και σταθερό χρόνο αναμονής $t_s = 75ms$

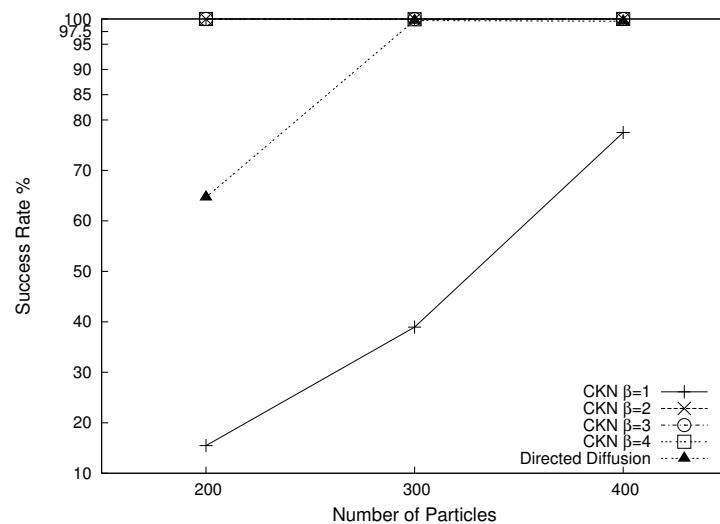
σχηματισμός νέων μπορεί να γίνει και χωρίς την αποστολή ανακοινώσεων, έτσι εξισορροπείται η καθυστέρηση στη φάση σχεδίασης μονοπατιού. Αυτά τα πειράματα επιβεβαιώνουν τα προηγούμενα ευρήματα για την επίδραση του β στο ποσοστό παράδοσης και την καθυστέρηση, ενώ

3.4 Πειραματική αξιολόγηση



Σχήμα 3.22: Καυστέρηση παράδοσης ($\mathcal{D}$) του **CKN** και **DD** στην περίπτωση τριακοσίων μηνυμάτων (ένα ανά συσκευή), για μεταβλητό $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$, σταθερό αριθμό κόμβων $n = 300$ και σταθερό χρόνο αναμονής $t_s = 75ms$

η κατανάλωση ενέργειας παραμένει πάλι σχεδόν σταθερή που υποδεικνύει ότι είναι ανεξάρτητη από το β .



Σχήμα 3.23: Ποσοστό επιτυχίας ($\mathbb{P}_s$) του **CKN** και **DD** για 1000 γεγονότα για $n \in \{200, 300, 400\}$, $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$ και σταθερό $t_s = 75ms$.

Στη σειρά πειραμάτων που παρουσιάζεται στα σχήματα 3.23, 3.24 και 3.25, αξιολογούμε τα δύο πρωτόκολλα στη γενική περίπτωση, σε σενάρια αντίστοιχα με τις δύο πρώτες σειρές πειρα-

**Τεχνικές χρήσης περιορισμένης γνώσης για αποδοτική και ανθεκτική
σε σφάλματα δρομολόγηση δεδομένων**

Παράμετρος Προσομοίωσης	Τιμή 3.23-3.25	Τιμή 3.26-3.28
Περιοχή δικτύου $\mathcal{A}$	Τετράγωνη $500m \times 500m$	Τετράγωνη $500m \times 500m$
Θέση κέντρου ελέγχου $\mathcal{S}$	Κάτω αριστερά γωνία $(0,0)$	Κάτω αριστερά $(0,0)$
Αριθμός συσκευών n	300	300
Ακτίνα μετάδοσης $\mathcal{R}$	50m	50m
Ακτίνα προεπιλογής επόμενου κόμβου $\mathcal{R}_{close}$	50m	50m
Ενέργεια συσκευών E_i^{init}	20J	20J
Παράμετρος β	$\{1, 2, 3, 4\}$	-
Χρόνος αναζήτησης t_s	75 msec	-
Αριθμός γεγονότων	1000	1000
Ρυθμός εμφάνισης γεγονότων λ	2 events/sec	2 events/sec
Χρόνος προσομοίωσης	515 sec	515 sec
Ποσοστό σφαλμάτων $\mathcal{F}$	0.0	$\{0.0, 0.6, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30, 0.36\}$
Μετρικές	Ποσοστό επιτυχούς παράδοσης, Κατανάλωση ενέργειας, Καθυστέρηση παράδοσης, Αριθμός ανακοινώσεων	Ποσοστό επιτυχούς παράδοσης, Κατανάλωση ενέργειας, Καθυστέρηση παράδοσης

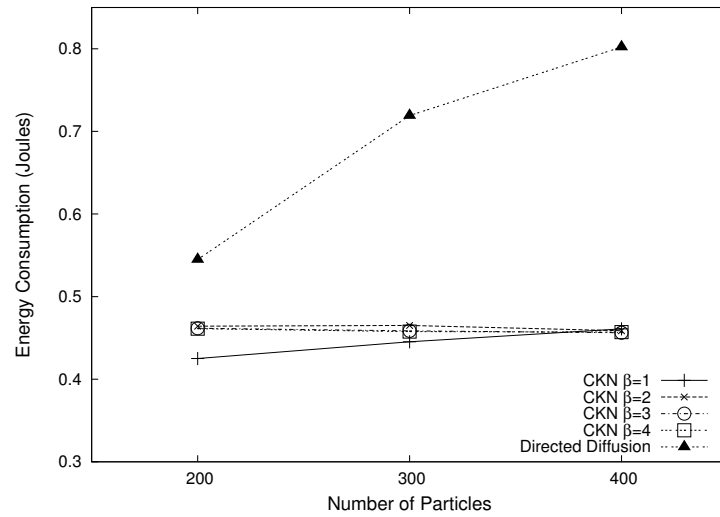
Πίνακας 3.6: Παράμετροι προσομοίωσης για τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 3.23-3.25

μάτων για το **CKN** (δείτε Πίνακα 3.6 για λεπτομέρειες). Σε αντίθεση με τις δύο πρώτες σειρές συγκριτικών πειραμάτων, εδώ αξιολογούμε αμετάβλητο το **DD**, δηλαδή η ακτίνα διάδοσης είναι πάντα $\mathcal{R}$.

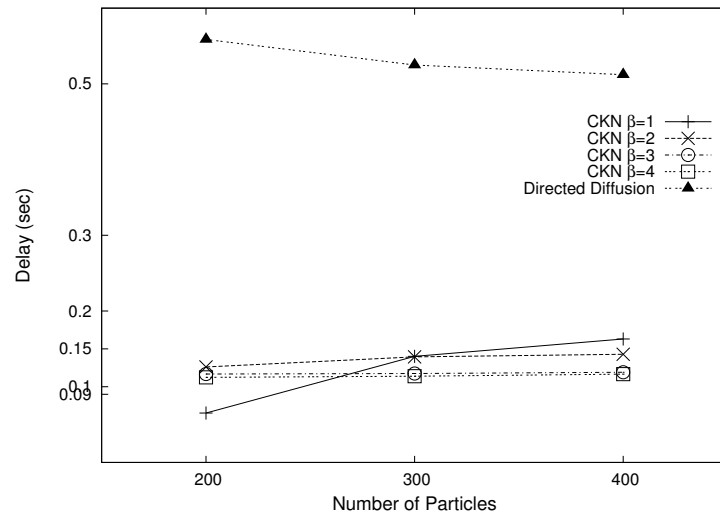
Αυτά τα πειράματα επιβεβαιώνουν την ανωτερότητα του **CKN** σε όλες τις μετρικές απόδοσης που εξετάζουμε εδώ. Για $\beta = 2$, το πρωτόκολλό μας πετυχαίνει 100% ποσοστό επιτυχίας, ενώ η καθυστέρηση παράδοσης μηνυμάτων στο $\mathcal{S}$ είναι σαφώς χαμηλότερη απ'ότι στο **DD**, ενώ το ίδιο ισχύει και για την κατανάλωση ενέργειας.

Στην τελευταία σειρά πειραμάτων εξετάζουμε το πιο ρεαλιστικό σενάριο που σφάλματα σταματήματος παρουσιάζονται στις συσκευές, δηλαδή οι συσκευές παύουν να συμμετέχουν στο δίκτυο. Χρησιμοποιούμε το ρυθμό αποτυχιών $\mathcal{F}$, (δείτε παράγραφο 3.2) ώστε να ρυθμίσουμε την εμφάνιση αποτυχιών και να αξιολογήσουμε την ανθεκτικότητα σε σφάλματα των πρωτοκόλλων. Το ποσοστό των κόμβων που αποτυγχάνουν καθορίζεται από μία παράμετρο $\alpha \in \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6\}$. Οι τιμές αυτές σημαίνουν ότι 10...60% των συσκευών του δικτύου θα αποτύχουν μέσα στα $T_{sim} = 500sec$ δευτερόλεπτα του χρόνου προσομοίωσης. Βασισμένοι στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα σχήματα 3.26-3.28, παρατηρούμε ότι ο ρυθμός αποτυχίας συσκευών επηρεάζει αρνητικά κυρίως το ποσοστό επιτυχούς παράδοσης μηνυμάτων ενώ η κατανάλωση ενέργειας και η καθυστέρηση δεν επηρεάζονται σημαντικά. Επίσης προσέχουμε ότι όταν $\alpha \simeq 0.3$, ο αριθμός των ενεργών κόμβων στο τέλος της προσομοίωσης είναι αντίστοιχος

3.4 Πειραματική αξιολόγηση



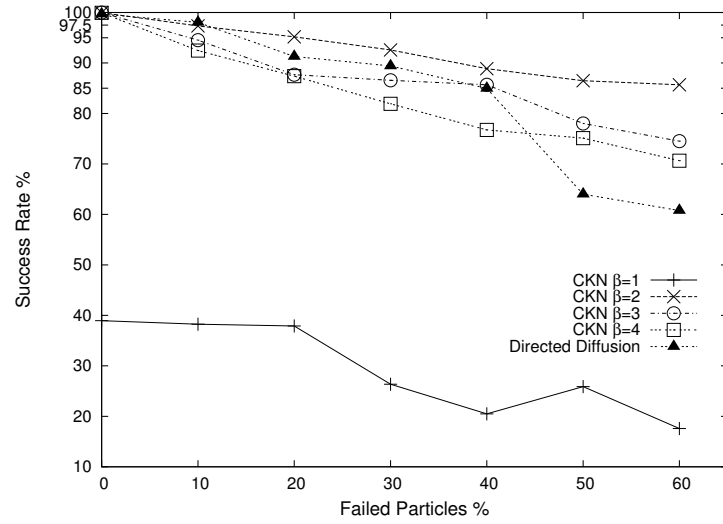
Σχήμα 3.24: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}), του **CKN** και **DD** για 1000 γεγονότα για $n \in \{200, 300, 400\}$, $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$ και σταθερό $t_s = 75ms$.



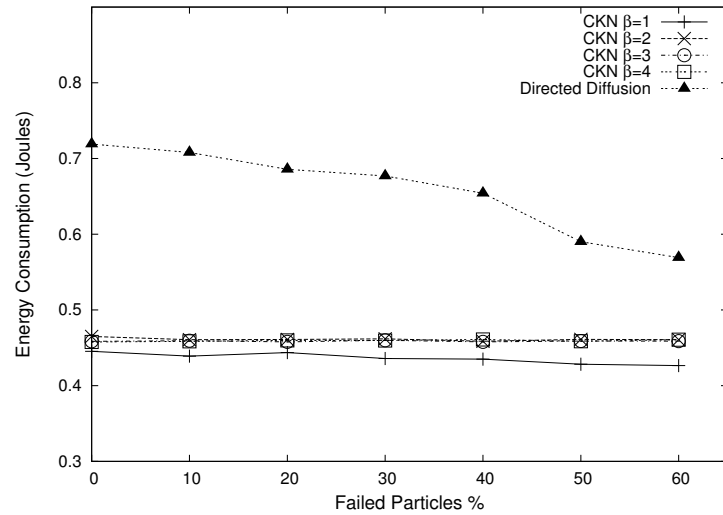
Σχήμα 3.25: Καυστήρηση παράδοσης ($\mathcal{D}$) του **CKN** και **DD** για 1000 γεγονότα για $n \in \{200, 300, 400\}$, $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$ και σταθερό $t_s = 75ms$.

με το πείραμα όπου αναπτύξαμε $n = 200$ κόμβους χωρίς αποτυχίες (δείτε σχήμα 3.5). Όμως σε αντίθεση με την περίπτωση χαμηλής πυκνότητας, το β δεν ελέγχει τόσο την απόδοση του **CKN** αφού για $\beta = 2$ η απόδοση βελτιώνεται αλλά περαιτέρω αύξηση του β έχει αρνητική επίπτωση κυρίως στο ποσοστό επιτυχούς παράδοσης. Αυτό εξηγείται αν σκεφτούμε ότι υψηλότερες τιμές του β οδηγούν στη δημιουργία μεγαλύτερων μονοπατιών και οι κόμβοι αποτυγχάνουν ισοπί-

Τεχνικές χρήσης περιορισμένης γνώσης για αποδοτική και ανθεκτική σε σφάλματα δρομολόγηση δεδομένων



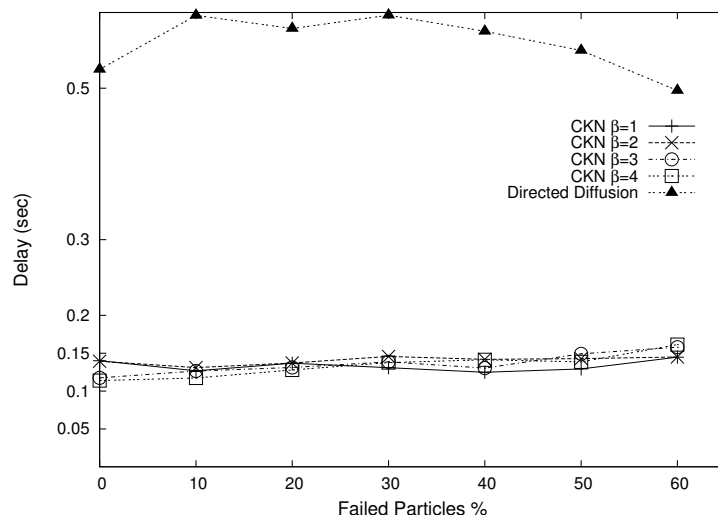
Σχήμα 3.26: Ποσοστό επιτυχίας (P_s) του **CKN** και **DD** για 1000 γεγονότα όταν 0...60% από τους $n = 300$ κόμβους αποτυγχάνουν ($\mathcal{F} \in \{0.0, 0.6, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30, 0.36\}$ αποτυχίες/sec), $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$ και $t_s = 75ms$



Σχήμα 3.27: Κατανάλωση ενέργειας (E_{tot}) του **CKN** και **DD** για 1000 γεγονότα όταν 0...60% από τους $n = 300$ κόμβους αποτυγχάνουν ($\mathcal{F} \in \{0.0, 0.6, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30, 0.36\}$ αποτυχίες/sec), $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$ και $t_s = 75ms$

θανά· επομένως ένα μεγάλο μονοπάτι έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να καταστραφεί από μια αποτυχία. Όταν συμβεί αυτό, το πρωτόκολλο πρέπει να κατασκευάσει νέο μονοπάτι που έχει υψηλότερο κόστος σε ενέργεια και επιφέρει επιπλέον καθυστέρηση. Επίσης το **DD** φαίνεται να

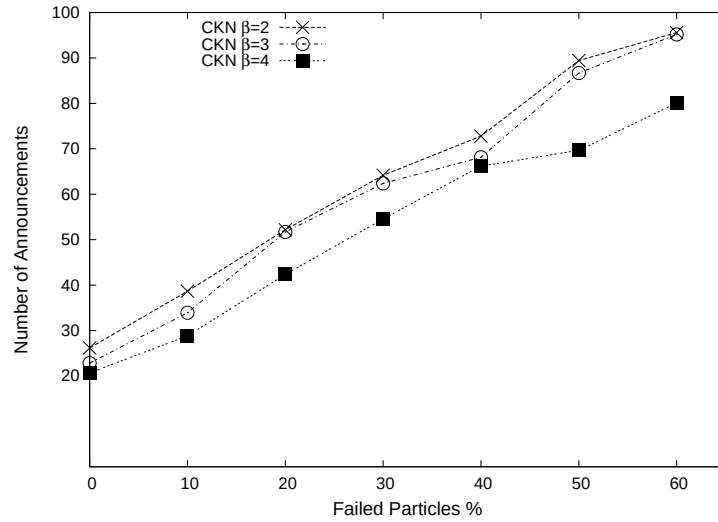
3.4 Πειραματική αξιολόγηση



Σχήμα 3.28: Καθυστέρηση παράδοσης ($\mathcal{D}$) του **CKN** και **DD** για 1000 γεγονότα όταν 0...60% από τους $n = 300$ κόμβους αποτυγχάνουν ($\mathcal{F} \in \{0.0, 0.6, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30, 0.36\}$ αποτυχίες/sec), $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$ και $t_s = 75ms$

ακολουθεί παρόμοια συμπεριφορά, πάραυτα το **CKN** πετυχαίνει καλύτερα αποτελέσματα και υψηλότερη ανθεκτικότητα για κατάλληλες τιμές του β , σε κάθε περίπτωση που εξετάσαμε.

Προκειμένου να εξετάσουμε περαιτέρω τη συμπεριφορά του **CKN** στο σχήμα 3.29 παρουσιάζουμε τον αριθμό των ανακοινώσεων που μεταδόθηκαν στο ίδιο σενάριο με τις αποτυχίες κόμβων. Παραλείψαμε την περίπτωση που $\beta = 1$ για να επικεντρωθούμε σε τιμές που παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Παρατηρούμε πως για $\beta = 2$, το πρωτόκολλο εκτελεί τον υψηλότερο αριθμό μεταδόσεων ανακοινώσεων, αυτή η συμπεριφορά παρατηρήθηκε και σε προηγούμενα σενάρια (δείτε σχήματα 3.8 και 3.14). Όμως καθώς αυξάνει το ποσοστό αποτυχίας, για $\beta = 3$ παρατηρούμε ότι αυξάνει ο αριθμός ανακοινώσεων και φτάνει τα ίδια επίπεδα όταν $\beta = 2$. Αντίθετα, όταν $\beta = 4$ έχουμε πάλι το μικρότερο αριθμό ανακοινώσεων. Εξηγούμε αυτό το γεγονός σε συνάφεια με την χρήση των δομών γειτόνων και μονοπατιού. Θυμηθείτε ότι η ανακοινώσεις δεν είναι απαραίτητες σε περίπτωση που υπάρχουν αρκετά δεδομένα στη δομή γειτόνων ώστε να σχηματιστούν νέα μονοπάτια. Παρόλο που στις περιπτώσεις $\beta = 3$ και $\beta = 4$, τα μονοπάτια είναι πιο πιθανό να καταστραφούν, οι κόμβοι έχουν συγκεντρώσει περισσότερη πληροφορία για το δίκτυο ώστε να κατασκευάζουν αμέσως ένα νέο μονοπάτι. Όμως καθώς αυξάνεται το ποσοστό αποτυχίας, η πληροφορία για την τοπολογία του δικτύου δεν είναι ενημερωμένη πλέον, οπότε και τα νέα μονοπάτια μπορεί να περιέχουν ανενεργούς κόμβους. Αυτό το γεγονός ίσως εξηγεί και το χαμηλότερο ποσοστό παράδοσης που παρατηρούμε όταν $\beta = 3$ και $\beta = 4$. Συμπερασματικά, βλέπουμε ότι παρά τα προβλήματα με την ανανέωση της πληροφορίας για το δίκτυο και την αποτυχία μονοπατιών, συνολικά το **CKN** επιτυγχάνει πολύ καλή ανοχή σε σφάλματα.



Σχήμα 3.29: Αριθμός ανακοινώσεων, του **CKN** για 1000 γεγονότα όταν 0...60% από τους $n = 300$ κόμβους αποτυγχάνουν ($\mathcal{F} \in \{0.0, 0.6, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30, 0.36\}$ αποτυχίες/sec), μέσα στα πρώτα $T_{sim} = 500sec$ προσομοίωσης. $\beta \in \{1, 2, 3, 4\}$ και $t_s = 75ms$

3.5 Συμπεράσματα και επεκτάσεις

Παρουσιάσαμε και αξιολογήσαμε ένα νέο πρωτόκολλο για ενεργειακά αποδοτική, ανθεκτική σε σφάλματα και εύκολα κλιμακούμενη διάδοση δεδομένων. Το πρωτόκολλο βασίζεται στην τεχνική απόκτησης περιορισμένης τοπικά γνώσης για την τοπολογία του δικτύου στην περιβάλλουσα περιοχή ενός κόμβου, η οποία αποκτιέται με μεταβολή της ακτίνας μετάδοσης του κόμβου όταν χρειάζεται. Η γνώση χρησιμοποιείται προκειμένου να σχηματιστεί ένα τοπικά βελτιστοποιημένο μονοπάτι διάδοσης προς το κέντρο ελέγχου. Η διαδρομή μέχρι τον τελικό προορισμό κατασκευάζεται από τη συνένωση αυτών των τμηματικά βελτιστοποιημένων μονοπατιών. Κατά αυτό τον τρόπο πετυχαίνουμε αξιόπιστη επικοινωνία με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και χαμηλότερη καθυστέρηση σε σχέση με καθιερωμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Το πρωτόκολλό μας μπορεί να επεκταθεί με πολλούς τρόπους, μια πιθανή κατεύθυνση είναι να το συνδυάσουμε με προσαρμοστικές τεχνικές, αντίστοιχες με αυτές που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έτσι ώστε να αυτορρυθμίζονται οι διάφοροι παράμετροι λειτουργίας του (β , t_s) που επηρεάζουν την απόδοση. Επιπλέον, είδαμε στην παράγραφο 3.3.5 διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης που μπορούν να αντικαταστήσουν τη συγκεκριμένη μέθοδο που χρησιμοποιούμε τώρα ή ακόμα και να λειτουργήσουν παράλληλα με αυτή. Αυτή η ευελιξία του πρωτοκόλλου μας αναδεικνύει και τη δύναμη της τεχνικής συλλογής τοπικά περιορισμένης γνώσης, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλούς τρόπους.

Κεφάλαιο 4

Τεχνικές διαχείρισης κινητικότητας κέντρων ελέγχου για εξοικονόμηση ενέργειας

4.1 Εισαγωγή

Πρόσφατα μία νέα κατηγορία εφαρμογών για ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων έκανε την εμφάνισή της, στην οποία χαρακτηριστικό του υπό εξέταση συστήματος είναι η *κινητικότητα*. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές οι συσκευές βρίσκονται προσκολλημένες σε οντότητες όπως ζώα, ανθρώπους και οχήματα που κινούνται σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα σε τέτοιες κινούμενες συσκευές και τους κόμβους σταθερής υποδομής θα δώσει ώθηση σε εφαρμογές όπως η παρακολούθηση αγρίων ζώων, παρακολούθηση κίνησης οχημάτων, έξυπνες κατοικίες και έλεγχο περιβαλλοντικής μόλυνσης. Σε τέτοιες περιπτώσεις δικτύων η συνήθης προσέγγιση, όπου τα κέντρα ελέγχου παραμένουν ακίνητα σε κάποια περιοχή του δικτύου δεν είναι αποδοτική.

Μία νέα προσέγγιση αναπτύχθηκε εμπνευσμένη από τέτοιες εφαρμογές, προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα και να αναπτυχθούν νέες αποδοτικότερες τεχνικές διαχείρισης της κινητικότητας. Πλέον ο φόρτος της διάδοσης πληροφορίας μεταφέρεται από τις συσκευές αισθητήρων στο κέντρο ελέγχου. Η βασική ιδέα είναι ότι *το κέντρο ελέγχου διαθέτει σημαντικά αποθέματα ενέργειας* τα οποία μπορούν να αναπληρωθούν εύκολα, και *μπορεί να κινηθεί αυτόνομα* μέσα στη περιοχή που καλύπτει το δίκτυο. Κατά την περιήγησή του στο δίκτυο, το κέντρο ελέγχου βρίσκεται συνεχώς σε κοντινή απόσταση από ένα (συνήθως μικρό) υποσύνολο κόμβων. Επομένως, η πληροφορία μπορεί να μεταδοθεί στο κέντρο ελέγχου από τους κοντινούς του κόμβους, με χαμηλό κόστος ενέργειας αφού η μετάδοση γίνεται σε μικρή απόσταση. Με την περιήγησή του σε ολόκληρη την περιοχή που εκτείνεται το δίκτυο, το κέντρο ελέγχου μπορεί να συλλέξει όλη τη διαθέσιμη πληροφορία.

Νέες προκλήσεις προκύπτουν όταν τίθεται σε εφαρμογή αυτή η ιδέα όπως είδαμε και στην παράγραφο 1.2.3. Όταν μία περιοχή του δικτύου βρίσκεται μέσα στην ακτίνα μετάδοσης δεδομένων του κέντρου ελέγχου θεωρούμε ότι αυτή καλύφθηκε, δηλαδή τα δεδομένα συλλέχθηκαν. Προφανώς, για να λειτουργήσει αποτελεσματικά ένα δίκτυο με κινητό κέντρο ελέγχου, πρέπει η

κίνηση να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε σε σύντομο χρονικό διάστημα να καλύπτεται ολόκληρη η περιοχή που εκτείνεται το δίκτυο. Η κίνησή του κέντρου ελέγχου πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μειώνεται ο χρόνος κάλυψης του δικτύου ώστε να μην παρατηρούνται σημαντικές καθυστερήσεις στην συλλογή των δεδομένων. Επιπρόσθετα, υπάρχουσες και εφαρμοσμένες τεχνικές και πρωτόκολλα για στατικά δίκτυα, δεν μπορούν να αποδώσουν στο δυναμικό περιβάλλον ενός δικτύου με κινητικότητα και θα πρέπει να τροποποιηθούν.

Παρόλο που τα προβλήματα που προκύπτουν είναι πολλά, η ιδέα αυτή δίνει σημαντικές νέες δυνατότητες (δείτε [41]). Συγκεκριμένα, το κυριότερο πλεονέκτημα ύπαρξης ενός ή περισσότερων κινητών κέντρων ελέγχου είναι η αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου. Ένα κινητό κέντρο ελέγχου μπορεί να μειώσει την απόστασή του από τις συσκευές απαιτώντας έτσι λιγότερες μεταδόσεις για την αναφορά των δεδομένων. Συνεπώς, εξοικονομούνται σημαντικά ποσά ενέργειας στις συσκευές. Από την άλλη, για τη μετακίνηση του κέντρου ελέγχου ξοδεύεται ενέργεια, όμως θεωρείται ότι η λειτουργικότητα του δικτύου δεν επηρεάζεται, αφού το κέντρο ελέγχου μπορεί να είναι κάποιο όχημα που κατευθύνεται από ανθρώπους ή κάποιο αυτόματο ρομπότ που περιοδικά επιστρέφει σε σταθμούς υποστήριξης για ανεφοδιασμό.

Επίσης ένα σημαντικό όφελος των κινητών κέντρων ελέγχου είναι και η δυνατότητα για καλύτερο χειρισμό δικτύων με χαμηλό αριθμό κόμβων που μπορεί να μην συνδέονται μεταξύ τους. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πρέπει να μπορούν να ανακαλύπτουν μονοπάτια από διαδοχικούς κόμβους γείτονες. Σε αραιά δίκτυα είναι πολύ πιθανόν να μην υπάρχει τέτοιο μονοπάτι προς κάποιους κόμβους. Το κινητό κέντρο ελέγχου μπορεί να γεφυρώσει τέτοια κενά, αυτό συνεπάγεται ότι μπορεί να μειωθεί ο αριθμός των κόμβων που πρέπει να απλωθούν σε μία περιοχή μειώνοντας έτσι το λειτουργικό κόστος του δικτύου. Επιπλέον οι κόμβοι μπορούν να μειώσουν και την ισχύ εκπομπής τους στα αναγκαία επίπεδα για την επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου, μειώνοντας έτσι ακόμα περισσότερο την κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, το κινητό κέντρο ελέγχου μπορεί να παρακάμψει προβληματικές περιοχές που βρίσκονται μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος, όπως είναι μικρές λίμνες, περιοχές με πυκνή βλάστηση ή ανώμαλο έδαφος που εμποδίζουν την επικοινωνία. Στην περίπτωση των στατικών δικτύων εξειδικευμένα πρωτόκολλα απαιτούνται που ξοδεύουν πολύ ενέργεια για να παρακάμψουν προβληματικές περιοχές, επομένως η παρακολούθηση πιο τραχών περιοχών γίνεται ευκολότερη.

Επιπλέον η επικοινωνία γίνεται πιο αξιόπιστη, η μετάδοση κόμβο προς κόμβο εμπεριέχει μία πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος σε κάθε μετάδοση. Η συνολική πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος στην επικοινωνία ανάμεσα σε δύο απομακρυσμένους κόμβους, αυξάνεται αθροιστικά με κάθε μετάδοση. Στην περίπτωση εμφάνισής σφάλματος είτε ξαναμεταδίδονται τα δεδομένα σπαταλώντας ενέργεια είτε χάνονται. Η μείωση του αριθμού μεταδόσεων που απαιτούνται στην περίπτωση του κινητού κέντρου ελέγχου βοηθά στην αποφυγή τέτοιων προβλημάτων. Επίσης, σε στρατιωτικές εφαρμογές και γενικότερα εφαρμογές που υπάρχουν θέματα εμπιστευτικών δεδομένων, γίνεται πιο δύσκολη η υποκλοπή τους. Στην περίπτωση του στατικού δικτύου, ο αντίπαλος μπορεί να υποκλέψει μεγάλο μέρος της πληροφορίας χρησιμοποιώντας συσκευές παρακολούθησης ή καταλαμβάνοντας κόμβους σε στρατηγικά σημεία. Με την μείωση του αριθμού μεταδόσεων και τη μείωση της απόστασης που διανύει η πληροφορία μόνο ένα πολύ μικρό μέρος της πληροφορίας γίνεται διαθέσιμο σε όλο το δίκτυο και επομένως μειώνεται η ποσότητα των διαρροών πληροφορίας. Μία εκτενή συζήτηση σε θέματα και εφαρμογές κινητικότητας παρουσιάζεται στο [53].

4.1 Εισαγωγή

4.1.1 Η προσέγγισή μας

Προτείνουμε την *κινητικότητα του κέντρου ελέγχου*, σαν μία μέθοδο για αποδοτική και ανθεκτική συγκέντρωση πληροφορίας από ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων. Προκειμένου να εκμεταλλευτούμε την κίνηση του κέντρου ελέγχου προτείνουμε *τεχνικές διαχείρισης της κινητικότητας*. Οι τεχνικές μας επικεντρώνονται στην επίλυση των δύο σημαντικών προβλημάτων που προκύπτουν: την *αποτελεσματική διάσχιση του δικτύου* και την *αποδοτική συλλογή πληροφορίας*.

Προς αυτό το σκοπό, προτείνουμε *τέσσερις τεχνικές ελέγχου της κίνησης* του κινητού κέντρου ελέγχου. Οι τεχνικές βασίζονται κυρίως σε πιθανοτικά, αλλά και σε ντετερμινιστικά, μοντέλα κίνησης. Η καινοτομία των μοντέλων μας έγκειται κυρίως στο ότι εισάγουμε *ευνοιοκρατικά πιθανοτικά μοντέλα* που προσαρμόζουν την κίνηση ανάλογα με διάφορα κριτήρια που εξαρτώνται από την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Οι τεχνικές εκμεταλλεύονται διαφορετικούς βαθμούς ελευθερίας στην κίνηση και διαφορετικά επίπεδα γνώσης του δικτύου, παραμένοντας αρκετά απλές ώστε να μην επιβαρύνουν τους αισθητήρες αλλά αντίθετα να αναλαμβάνει το κέντρο ελέγχου το μεγαλύτερο φορτίο.

Επιπλέον, συνδυάζουμε τις τεχνικές κίνησης και κάλυψης του δικτύου, με 3 στρατηγικές συλλογής δεδομένων από τις συσκευές αισθητήρων. Οι στρατηγικές αυτές συνδυάζονται κατάλληλα με τις τεχνικές κίνησης ώστε από το συνδυασμό τους να πετυχαίνουμε σημαντικά οφέλη. Οι στρατηγικές περιλαμβάνουν μεθόδους *παθητικής συλλογής δεδομένων*, *σχηματισμό περιορισμένου βάθους μονοπατιών* διάδοσης ή και *σχηματισμό επικαλυπτικών δένδρων* διάδοσης πληροφορίας. Οι στρατηγικές υποθέτουν ασθενείς συσκευές και επιφέρουν όσο το δυνατό μικρότερο κόστος στις συσκευές ώστε να παραμένουν στα πλαίσια των δυνατοτήτων των σημερινών συσκευών αισθητήρων. Δείχνουμε ότι κάθε προσέγγιση έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ενώ πετυχαίνει και διαφορετικές αντισταθμίσεις στην απόδοση του δικτύου, κυρίως ανάμεσα στην κατανάλωση ενέργειας και την χρονική καθυστέρηση.

4.1.2 Σχετική βιβλιογραφία και συζήτηση

Τα τελευταία χρόνια αρκετές εργασίες έχουν εμφανιστεί που εξετάζουν συστήματα που έχουν εγγενή κινητικότητα. Στο [40] παρουσιάζεται μία μελέτη εφαρμογών δικτύων ομοτίμων σε κινητά ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων. Στόχος είναι η παρακολούθηση των κινήσεων ενός κοπαδιού από ζέβρες, μια πιλοτική εφαρμογή με σημαντικές προεκτάσεις για την έρευνα στη βιολογία. Στο [16] παρουσιάζεται μία ακόμα πιλοτική εφαρμογή όπου ένα κέντρο ελέγχου προσκολλήθηκε σε ένα λεωφορείο των μέσων μαζικής μεταφοράς της πόλης. Συσκευές αισθητήρων τοποθετήθηκαν σε διάφορα σημεία της διαδρομής και έμαθαν να υπολογίζουν την ώρα που θα διέρχεται το λεωφορείο.

Επιπλέον αρκετές δημοσιεύσεις έχουν αρχίσει να υποθέτουν κινητικότητα τόσο σε καθολικό επίπεδο όσο και μεμονωμένων κόμβων σε ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων. Στο [55] παρουσιάζεται μία αρχιτεκτονική τριών επιπέδων. Οι συγγραφείς υποθέτουν ότι ισχυροί, δηλαδή με περισσότερα αποθέματα ενέργειας και υπολογιστικούς πόρους, κόμβοι βρίσκονται προσκολλημένοι σε άτομα και οχήματα που διέρχονται από την περιοχή που έχει αναπτυχθεί το δίκτυο μικροαισθητήρων. Οι ισχυροί κόμβοι συγκεντρώνουν την πληροφορία από το δίκτυο και όταν διέρχονται κοντά στο κέντρο ελέγχου την παραδίδουν.

Μία ενδιαφέρουσα θεωρητική μελέτη των ιδιοτήτων της κινητικότητας παρουσιάζεται στο

[5]. Οι συγγραφείς προτείνουν και μελετούν μία παραλλαγή του τυχαίου περιπάτου σε γράφημα. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος επιλέγει τυχαία δύο γειτονικούς κόμβους που είναι υποψήφιος θέσεις για μετακίνηση. Έπειτα επιλέγει ντετερμινιστικά από τους δύο, αυτόν που έχει επισκεφθεί λιγότερες φορές. Μέσω προσομοίωσης δείχνεται ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιτυγχάνει κάλυψη ολόκληρου του γραφήματος σε χρόνο ασυμπτωτικά μία τάξη μεγέθους μικρότερο σε σχέση με τον απλό τυχαίο περίπατο. Εμείς στη συνέχεια, προτείνουμε επίσης τεχνικές που βελτιώνουν το χρόνο κάλυψης με επιλογή της επόμενης περιοχής που θα επισκεφτεί, βάσει κριτηρίων όπως η συχνότητα επισκέψεων. Οι τεχνικές μας όμως βασίζονται εξολοκλήρου σε πιθανοτικές επιλογές και αναπτύχθηκαν παράλληλα και ανεξάρτητα (δείτε [20]). Στο [47] διερευνάται το ζήτημα της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη την τροχιά του κέντρου ελέγχου και τη διάδοση πληροφορίας συσκευή προς συσκευή. Οι συγγραφείς υποθέτουν ένα δίκτυο απλωμένο στην επιφάνεια ενός κυκλικού δίσκου και ομοιόμορφο ρυθμό παραγωγής δεδομένων. Μέσα από μία εκτενή ανάλυση, υπολογίζουν ότι σχήμα της βέλτιστης τροχιάς που πρέπει να ακολουθεί το κέντρο ελέγχου ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο, είναι ένας κύκλος του οποίου υπολογίζουν την ακτίνα και θέση. Στο [31] κάτω από την ισχυρή υπόθεση ότι όλες οι συσκευές κινούνται αυτόβουλα, παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος που ελαχιστοποιεί την ενέργεια που καταναλώνεται για την επικοινωνία ανάμεσα σε δύο κόμβους. Ο αλγόριθμος επανατοποθετεί σταδιακά τις συσκευές που συμμετέχουν στο μονοπάτι διάδοσης, ώστε σιγά-σιγά να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος επικοινωνίας. Δείχνεται ότι η βέλτιστη τοποθέτηση είναι πάνω στην ευθεία που ενώνει τους κόμβους πηγής και προορισμού με τους ενδιάμεσους κόμβους να ισαπέχουν μεταξύ τους.

Στο [41], παρουσιάζεται μία εκτενή συζήτηση θεμάτων που αφορούν την κινητικότητα. Επίσης, γίνεται μια πειραματική διερεύνηση σε ένα δίκτυο μικρής κλίμακας που αποτελείται από πέντε συσκευές και ένα ρομποτικό όχημα που λειτουργεί σαν κέντρο ελέγχου. Το όχημα κινείται μπρος-πίσω σε μία ευθεία ενώ οι συσκευές μεταδίδουν δεδομένα συνεχώς. Διερευνώνται θέματα όπως πώς επηρεάζει η ταχύτητα του κέντρου ελέγχου και ο τρόπος επικοινωνίας των συσκευών, την αποδοτικότητα της συλλογής δεδομένων. Επίσης προτείνουν έναν αλγόριθμο κίνησης που λαμβάνει υπόψη τα δεδομένα που έχει να παραδώσει κάθε συσκευή και ανάλογα καθορίζει το χρόνο που παραμένει το κέντρο ελέγχου στην εμβέλειά της. Στο [39] ακολουθείται ένα αντίστοιχο μοντέλο. Πολλά κινητά κέντρα ελέγχου κινούνται σε παράλληλες ευθύγραμμες τροχιές που ισαπέχουν μεταξύ τους. Κάτω από την υπόθεση ότι υπάρχουν αρκετά κέντρα ελέγχου ώστε κάθε κόμβος να βρίσκεται στην εμβέλεια ενός ή δύο κέντρων ελέγχου, προτείνουν έναν αλγόριθμο που εξισορροπεί το φόρτο ανάμεσα στα κέντρα ελέγχου. Ο αλγόριθμος μοιράζει τους κόμβους που βρίσκονται στην εμβέλεια δύο κέντρων ελέγχου, ώστε τελικά κάθε κέντρο ελέγχου να εξυπηρετεί περίπου τον ίδιο αριθμό κόμβων. Στην πειραματική αξιολόγηση που διεξάγεται φαίνεται ότι τέτοιες ίσες αναθέσεις πετυχαίνουν και το μεγαλύτερο ρυθμό παράδοσης δεδομένων. Παρόλο τα ενδιαφέροντα αποτελέσματα, η υπόθεση ότι υπάρχουν αρκετά κέντρα ελέγχου, περιορίζει την εφαρμογή τέτοιων τεχνικών σε μικρά δίκτυα, ενώ ο αλγόριθμος εξισορρόπησης υποθέτει ότι τα δεδομένα παράγονται με τον ίδιο ρυθμό σε κάθε συσκευή, κάτι που δεν ισχύει συνήθως. Αντίθετα εμείς εστιάζουμε κυρίως σε τροχιές που δημιουργούνται πιθανοτικά, ενώ εξετάζουμε και το ενδεχόμενο ντετερμινιστικών τροχιών τόσο σε ευθεία όσο και σε κυκλική πορεία.

Ένας αλγόριθμος κατάλληλος για δίκτυα με ένα κινητό κέντρο ελέγχου προτείνεται στο [46]. Το κέντρο ελέγχου επισκέπτεται διαδοχικά προκαθορισμένα σημεία ελέγχου και παραμένει για κάποιο χρονικό διάστημα στο καθένα συλλέγοντας πληροφορία απ' όλο το δίκτυο με διάδοση

4.2 Μοντελοποίηση δικτύων αισθητήρων με κινητό κέντρο ελέγχου

από συσκευή σε συσκευή. Όση ώρα βρίσκεται σε κάποιο σημείο ελέγχου, το κέντρο ελέγχου συγκεντρώνει στατιστικά στοιχεία για την ολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Έπειτα από την πρώτη διάβαση απ' όλα τα σημεία ελέγχου υπολογίζεται νέος χρόνος παραμονής στο καθένα ή και παράληψη μερικών, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί και εξισορροπηθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Παρόλο που σε κάθε πέρασμα ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται και το αποτέλεσμα βελτιώνεται, η ποιότητα της τελικής λύσης εξαρτάται από την αρχική επιλογή σημείων ελέγχου. Αντίστοιχο αποτέλεσμα επιχειρούν να πετύχουν οι συγγραφείς στο [48]. Αρχικά το κέντρο ελέγχου κινείται πάνω σε μία ευθεία που διατρέχει το δίκτυο. Μονοπάτια διάδοσης σχηματίζονται προς αυτή την ευθεία και το κέντρο ελέγχου υπολογίζει το κόστος σε ενέργεια κάθε μονοπατιού. Μετά το πρώτο πέρασμα το κέντρο ελέγχου αποφασίζει να «σπάνει» την ευθεία σε δύο συνεχή ευθύγραμμα τμήματα, που το κοινό τους σημείο απέχει κάποια απόσταση από την αρχική ευθεία. Έτσι δημιουργείται μία νέα τροχιά που δεν συμπίπτει με την προηγούμενη και διέρχεται πιο κοντά από κάποιους κόμβους και πιο μακριά από κάποιους άλλους. Η απόκλιση από την αρχική τροχιά υπολογίζεται με βάση την αναμενόμενη εξοικονόμηση ενέργειας. Σε διαδοχικά περάσματα τα ευθύγραμμα τμήματα «σπάνε» σε νέα κομμάτια ώστε διαρκώς να μειώνεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας. Οι συγγραφείς δείχνουν ότι μετά από σχετικά μικρό αριθμό περασμάτων ο αλγόριθμος παράγει μία τροχιά που εξοικονομεί σημαντικά ποσά ενέργειας, ενώ δουλεύει αποτελεσματικά και στην περίπτωση που υπάρχουν περιοχές του δικτύου χωρίς σωματίδια. Όμως για να είναι αποτελεσματικό το πρωτόκολλο, υποτίθεται ότι οι συσκευές γνωρίζουν την ακριβή θέση τους στο δίκτυο και τη μεταδίδουν μαζί με άλλα στοιχεία για να υπολογίσει το κέντρο ελέγχου το κόστος των μονοπατιών. Αντίθετα, στη δική μας προσέγγιση εξετάζουμε τόσο περιπτώσεις όπου η επικοινωνία γίνεται απευθείας, όσο και περιπτώσεις όπου σχηματίζονται δένδρα διάδοσης, ενώ βελτιστοποιούμε την τροχιά σε σχέση με άλλα κριτήρια που έχουν σαν στόχο κυρίως τη μείωση του χρόνου κάλυψης του δικτύου.

Επίσης θέλουμε να επισημάνουμε ότι θέματα κινητικότητας για βελτίωση της απόδοσης έχουν διερευνηθεί και στο πλαίσιο των κινητών δικτύων επικοινωνιών (Mobile Ad-Hoc Networks). Στο [23], διερευνάτε η έννοια της διαχείρισης της κίνησης μίας ομάδας ειδικών κόμβων αφοσιωμένων στην βελτίωση της απόδοσης του δικτύου.

4.2 Μοντελοποίηση δικτύων αισθητήρων με κινητό κέντρο ελέγχου

Προκειμένου να μοντελοποιήσουμε κίνηση σε δίκτυα αισθητήρων χρειάζεται να κάνουμε νέες υποθέσεις, ορισμούς και επεκτάσεις στα μοντέλα που χρησιμοποιήσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, εδώ παραθέτουμε ολόκληρο το μοντέλο για χάρη πληρότητας. Υποθέτουμε πως κάθε κόμβος του δικτύου είναι μία ολοκληρωμένη, αυτόνομη υπολογιστική συσκευή με δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας και καταγραφής περιβαλλοντικών συνθηκών. Διαθέτει επεξεργαστή με περιορισμένη υπολογιστική ισχύ, ένα κύκλωμα ασύρματης επικοινωνίας που χαρακτηρίζεται από την εμβέλειά του $\mathcal{R}$ και μία αυτόνομη, ενσωματωμένη στις συσκευές πηγή ενέργειας η οποία κατά κανόνα είναι περιορισμένης διάρκειας. Επιπλέον κάθε αισθητήρας διαθέτει εξειδικευμένα κυκλώματα για την καταγραφή διάφορων μεγεθών όπως των περιβαλλοντικών συνθηκών (πχ θερμοκρασία, φωτεινότητα, ένταση μαγνητικού πεδίου), ανίχνευση γεγονότων (πχ κίνηση, παρουσία χημικών ενώσεων) ακόμα και επιτήρησης του χώρου (λήψη εικόνων και καταγραφή θορύβων).

Η περιοχή στην οποία αναπτύσσεται το δίκτυο $\mathcal{A}$, θεωρείται επίπεδη και τετράγωνη μεγέθους $D \times D$: αυτή η υπόθεση μπορεί να γίνει πιο ασθενής για να συμπεριλάβει περιοχές διαφόρων σχημάτων.

Οι θέσεις των συσκευών στην περιοχή του δικτύου στην γενική περίπτωση κατανέμονται τυχαία και ομοιόμορφα, στα δίκτυα που εξετάζουμε εδώ *οι συσκευές δεν κινούνται*. Έστω n ο αριθμός συσκευών που αναπτύσσονται στην περιοχή του δικτύου και έστω d η πυκνότητά τους σε αυτή την περιοχή (συνήθως μετριέται σε αριθμό κόμβων/ m^2). Όμως σε πολλές περιπτώσεις ανάπτυξης δικτύων, οι διαχειριστές αναμένεται να αναπτύξουν περισσότερους αισθητήρες σε συγκεκριμένες περιοχές του δικτύου, όπου υπάρχει ανάγκη για λεπτομερή καταγραφή πληροφορίας. Μοντελοποιούμε τέτοιες περιπτώσεις υποθέτοντας την ύπαρξη P_n *θυλάκων*, δηλαδή περιοχών του δικτύου με υψηλότερη μέση πυκνότητα συσκευών. Για να απλοποιήσουμε τα πράγματα, υποθέτουμε ότι κάθε θύλακας είναι μία κυκλική περιοχή ακτίνας r_P , οι θύλακες δεν αλληλοκαλύπτονται και έχουν όλοι την ίδια πυκνότητα d_P . Στην υπόλοιπη περιοχή του δικτύου, η πυκνότητα είναι d_n . Συμβολίζουμε με $A_P = \pi r_P^2 P_n$ την έκταση που καταλαμβάνουν οι θύλακες. Έστω n_P ο συνολικός αριθμός κόμβων που περιέχονται στους θύλακες, τότε ισχύει $n_P = d_P \cdot A_P$. Ομοίως, ο αριθμός αισθητήρων στο υπόλοιπο δίκτυο είναι $n_n = d_n(\mathcal{A} - A_P)$. Τότε ο συνολικός αριθμός αισθητήρων δίνεται ως $n = n_P + n_n$.

Ακολουθώντας το μοντέλο που παρουσιάζεται στα [35, 3, 51, 25] θεωρούμε ότι για την περίπτωση μετάδοσης ενός μηνύματος, το κύκλωμα του πομποδέκτη καταναλώνει ένα ποσό ενέργειας για τη λειτουργία του E_{elec} , ενώ ο ενισχυτής του σήματος καταναλώνει ενέργεια ϵ_{amp} . Επίσης, υποθέτουμε ένα απλό και ομοιόμορφο μοντέλο εξασθένησης κατά τη διάδοση του σήματος τέτοιο ώστε η ισχύς του σήματος σε απόσταση r από την πηγή να είναι αντιστρόφως ανάλογη του r^2 . Επομένως, για να μεταδώσει ένα μήνυμα μήκους k bit σε απόσταση r , ο πομπός χρησιμοποιεί ενέργεια

$$\begin{aligned} E_T(k, r) &= E_{T-elec}(k) + E_{T-amp}(k, r) \\ E_T(k, r) &= E_{elec} \cdot k + \epsilon_{amp} \cdot k \cdot r^2 \end{aligned}$$

ενώ για τη λήψη ενός μηνύματος η ενέργεια που καταναλώνεται στο δέκτη είναι:

$$\begin{aligned} E_R(k) &= E_{R-elec}(k) \\ E_R(k, r) &= E_{elec} \cdot k \end{aligned}$$

Όπου οι ποσότητες E_{T-elec}, E_{R-elec} αντιστοιχούν στην ενέργεια που ξοδεύει το κύκλωμα του πομπού και του δέκτη.

Υπάρχει μία ειδική συσκευή στο δίκτυο που συμβολίζουμε με $\mathcal{S}$, η οποία αντιπροσωπεύει το κέντρο ελέγχου στο οποίο πρέπει να παραδοθούν τα δεδομένα που συλλέγουν οι αισθητήρες. Μία σημαντική υπόθεση που διαφοροποιεί το μοντέλο μας σε σχέση με τις περισσότερες προσεγγίσεις που συναντούμε στη διεθνή βιβλιογραφία είναι *η κινητικότητα του $\mathcal{S}$* . Το $\mathcal{S}$ δεν έχει περιορισμούς, υποθέτουμε ότι διαθέτει σημαντικές υπολογιστικές και αποθηκευτικές δυνατότητες και πρακτικά ανεξάντλητη (για τα σενάρια που παρουσιάζουμε εδώ) πηγή ενέργειας. Μπορεί να υπολογίσει με ακρίβεια τη θέση του (πχ. χρησιμοποιώντας εξοπλισμό πλοήγησης, όπως GPS) και είναι ενήμερο για τα όρια της περιοχής που αναπτύσσεται το δίκτυο.

Η κίνηση του $\mathcal{S}$ ορίζεται από μία υψηλού επιπέδου *συνάρτηση κίνησης*, την οποία συμβολίζουμε με $\mathcal{M}$. Έστω p_t η θέση του $\mathcal{S}$ μια δεδομένη χρονική στιγμή t , τότε $\mathcal{M}(p_t)$ επιστρέφει μία νέα θέση p_{t+1} προς την οποία πρέπει να κινηθεί το $\mathcal{S}$. Έτσι ορίζεται μία τροχιά σαν μια ακολουθία από σημεία $p_0, p_1 = \mathcal{M}(p_0), p_2 = \mathcal{M}(p_1), \dots, p_t = \mathcal{M}(p_{t-1})$. Επιπλέον, η συνάρτηση κίνησης $\mathcal{M}$ καθορίζει

4.3 Τεχνικές για συλλογή δεδομένων με κινητό κέντρο ελέγχου

την ταχύτητα $s_t = \mathcal{M}(s_{t-1})$ με την οποία κινείται το $\mathcal{S}$ από τη θέση p_{t-1} στη θέση p_t . Η ταχύτητα περιορίζεται από μία συγκεκριμένη τιμή που εξαρτάται από το σενάριο και συμβολίζει τα όρια της ικανότητας κίνησης του $\mathcal{S}$, έστω s_{max} το όριο αυτό. Ένας έγκυρος ορισμός της $\mathcal{M}$ επιστρέφει θέσεις εντός της περιοχής του δικτύου και ταχύτητες $0 \leq s \leq s_{max}$. Η συνάρτηση κίνησης μπορεί να κληθεί οποιαδήποτε στιγμή ακόμα και στο ενδιάμεσο της διαδρομής ανάμεσα σε δύο σημεία. Ο πραγματικός μηχανισμός που υλοποιεί την κίνηση από τη θέση p_{t-1} στη θέση p_t , δεν αφορά την παρούσα εργασία, θα μπορούσε να είναι ένας άνθρωπος οδηγός ή ένα αυτόματο σύστημα πλοήγησης. Επιπλέον, απλοποιούμε ακόμα περισσότερο το μοντέλο μας, υποθέτοντας ότι όλες οι αλλαγές σε διεύθυνση και ταχύτητα γίνονται στιγμιαία.

Τέλος, υποθέτουμε ότι μια συγκεκριμένη, υψηλού επιπέδου, εφαρμογή εκτελείται από τα σωματίδια που απαρτίζουν το δίκτυο. Τα γεγονότα για τα οποία «ενδιαφέρεται» η εφαρμογή, πραγματοποιούνται σε όλη τη περιοχή του δικτύου, ενώ κάθε γεγονός «συλλαμβάνεται» από ένα μόνο αισθητήρα, που δημιουργεί ένα μήνυμα προκειμένου να διαδοθεί η πληροφορία στο κέντρο ελέγχου. Η εφαρμογή χαρακτηρίζεται από την ποσότητα λ_i , που εκφράζει τον ρυθμό παραγωγής μηνυμάτων σε κάθε αισθητήρα i του δικτύου αισθητήρων, που μετριέται σε αριθμό μηνυμάτων ανά χρονικό διάστημα.

4.3 Τεχνικές για συλλογή δεδομένων με κινητό κέντρο ελέγχου

Αναφέραμε ότι σημαντικό ρόλο παίζει ο τρόπος που κινείται το κέντρο ελέγχου. Στη διεθνή βιβλιογραφία προτείνονται πολλά μοντέλα για την περιγραφή της κίνησης. Ανάλογα με την εφαρμογή, το μέγεθος του δικτύου και τις συνθήκες που επικρατούν σε αυτό, διαφορετικοί τύποι κίνησης μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τις επιδόσεις του δικτύου. Μια κατηγοριοποίηση των μορφών κίνησης μπορεί να γίνει εξετάζοντας τις δυνατότητες που παρέχονται για την συλλογή δεδομένων (δείτε και [53]):

Τυχαία κίνηση: Η κίνηση του κέντρου ελέγχου γίνεται με τυχαίο τρόπο τόσο όσον αφορά τη θέση όσο και όσον αφορά την ταχύτητά του. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της κίνησης είναι η απλότητα στην υλοποίηση και η αδυναμία πρόβλεψης των μελλοντικών θέσεων του κέντρου ελέγχου. Παραλλαγές αυτού του τρόπου κίνησης καθορίζουν διαφορετικούς βαθμούς ελευθερίας της κίνησης, όπως είναι για παράδειγμα η τυχαία επιλογή μετακίνησης σε προκαθορισμένα σημεία ή η κίνηση σε ορισμένες κατευθύνσεις (πχ αριστερά, δεξιά).

Προβλέψιμη κίνηση: Σε αυτή τη μορφή κίνησης το κέντρο ελέγχου ακολουθεί μία τροχιά που εμφανίζει κανονικότητες που επιτρέπουν τον υπολογισμό των μελλοντικών θέσεων ή της χρονικής στιγμής που διέρχεται από κάποιο σημείο. Παραδείγματα τέτοιας κινητικότητας είναι η κίνηση με σταθερή ταχύτητα πάνω σε προκαθορισμένη τροχιά. Σε αυτή την περίπτωση οι συσκευές που απαρτίζουν το δίκτυο μπορούν να «μάθουν» τη χρονική στιγμή που θα μπορούν να επικοινωνήσουν με το κέντρο ελέγχου και να βελτιστοποιήσουν την διαδικασία συλλογής και αναφοράς δεδομένων.

Ελεγχόμενη κίνηση: Το κινητό κέντρο ελέγχου μπορεί να κινείται αυτόβουλα λαμβάνοντας τοπικά αποφάσεις για τις μελλοντικές του κινήσεις, προκειμένου να επιτύχει καλύτερη

απόδοση ή να φέρει εις πέρας κάποιο συγκεκριμένο καθήκον. Παρόλο που κάποιος εξωτερικός παρατηρητής δεν μπορεί να προβλέψει ή να επηρεάσει την κίνηση, τα τοπικά κριτήρια που ακολουθεί το κέντρο ελέγχου μπορούν να εξασφαλίσουν κάποιες συνθήκες, όπως για παράδειγμα την επίσκεψη ενός συγκεκριμένου αριθμού κόμβων ανά μονάδα χρόνου.

Οι σημαντικές διαφορές στους τύπους κίνησης υποδεικνύουν ότι διαφορετικές στρατηγικές για τη συλλογή δεδομένων μπορεί να αποδειχθούν πιο κατάλληλες ανά περίπτωση. Βέβαια, υπάρχει μία πληθώρα επιλογών για τη σχεδίαση ενός πρωτοκόλλου ανάλογα με τον τύπο κίνησης και ποιος μηχανισμός συλλογής δεδομένων επιλέγεται. Στη συνέχεια εξερευνούμε ένα μικρό αλλά ταυτόχρονα χαρακτηριστικό υποσύνολο αυτών των επιλογών, προτείνοντας και εξετάζοντας διάφορους συνδυασμούς τεχνικών κίνησης σε συνάφεια με μεθόδους συλλογής δεδομένων.

4.3.1 P1: Τυχαίος περίπατος με παθητική συλλογή δεδομένων

Η απλούστερη μορφή κίνησης είναι ο *τυχαίος περίπατος*, το κινητό κέντρο ελέγχου μπορεί να κινηθεί με άτακτο τρόπο προς οποιαδήποτε κατεύθυνση και με τυχαία μεταβαλλόμενη ταχύτητα. Ορίζουμε την συνάρτηση $\mathcal{M}_{random}$ που υλοποιεί τυχαίους περιπάτους, ακολουθεί η συγκεκριμένη παραλλαγή του γενικού μοντέλου του τυχαίου περιπάτου που υλοποιούμε εδώ.

Σε κάθε κλήση της, η $\mathcal{M}_{random}$ επιλέγει μία γωνία αλλαγής της κατεύθυνσης στο διάστημα $[-\pi, \pi]$ ακτίνια. Αυτή η γωνία καθορίζει την απόκλιση από την τρέχουσα διεύθυνση του κέντρου ελέγχου. Στην εκδοχή μας, η ταχύτητα του τυχαίου περιπάτου s_{random} , είναι σταθερή και ορίζεται από το διαχειριστή κατά την έναρξη του δικτύου. Έτσι, για να υπολογιστεί η νέα θέση, η $\mathcal{M}_{random}$ επιλέγει τυχαία και ομοιόμορφα μία μετατόπιση d στο διάστημα $d \in (0, d_{max}]$, όπου d_{max} είναι μία παράμετρος του δικτύου που συμβολίζει τη μέγιστη επιτρεπτή μετατόπιση. Το d είναι η απόσταση που θα διανύσει το $\mathcal{S}$ κινούμενο προς την καινούργια κατεύθυνση. Εάν η τελική θέση βρίσκεται εκτός του δικτύου, τότε η τροχιά περικρίνεται ώστε να βρεθεί στο όριο του δικτύου και να επιλέξει μία νέα θέση όταν φτάσει εκεί.

Αυτή είναι η απλούστερη μορφή κίνησης, δεν υποθέτει καμία μορφή γνώσης του δικτύου (εκτός από τα όρια). Επιπλέον είναι πολύ ανθεκτική αφού εγγυάται ότι θα επισκεφτεί όλο το δίκτυο, ανεξαρτήτων συνθηκών αρκεί να υπάρχει μονοπάτι. Έτσι μπορεί να συλλέξει όλα τα δεδομένα ακόμα και από περιοχές με λίγους κόμβους ή και υπό την παρουσία εμποδίων. Πάραυτα μπορεί να εμφανίσει μεγάλη καθυστέρηση.

Η συλλογή δεδομένων γίνεται με παθητικό τρόπο εκ μέρους των συσκευών. Όταν καταγράφεται ένα γεγονός και δημιουργείται ένα μήνυμα που περιγράφει το γεγονός οι συσκευές απλά αποθηκεύουν το μήνυμα σε μια ουρά μηνυμάτων. Περιοδικά το $\mathcal{S}$ εκπέμπει ένα μήνυμα παρουσίας. Οι κόμβοι που λαμβάνουν ένα τέτοιο μήνυμα καταλαβαίνουν ότι το $\mathcal{S}$ βρίσκεται στην εμβέλειά τους και προσπαθούν να μεταδώσουν τα δεδομένα που έχουν στις ουρές μηνυμάτων τους. Επειδή αυτό ενδέχεται να δημιουργήσει καταιγισμό μεταδόσεων όταν το $\mathcal{S}$ εισέλθει σε μία νέα περιοχή, ένα καλό πρωτόκολλο MAC είναι απαραίτητο. Ξεκάθαρα αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας αφού γίνεται μόνο μία μετάδοση ανά μήνυμα. Από την άλλη λόγω του αγνωστικού τρόπου με τον οποίο κινείται το $\mathcal{S}$, δημιουργείται μεγάλη καθυστέρηση στην παράδοση αφού η επίσκεψη κάποιων περιοχών μπορεί να πάρει μεγάλο χρονικό διάστημα.

4.3 Τεχνικές για συλλογή δεδομένων με κινητό κέντρο ελέγχου

4.3.2 P2: Μερικός τυχαίος περίπατος με περιορισμένα μονοπάτια διάδοσης

Στην στρατηγική που παρουσιάζουμε εδώ, μία άλλη μορφή τυχαίου περιπάτου προτείνεται. Ο σκοπός είναι να μειωθεί ο χώρος των επιλογών θέσης που μπορεί να κάνει το $\mathcal{S}$, για το σκοπό αυτό ο περίπατος πραγματοποιείται σε ένα σύνολο προκαθορισμένων περιοχών ενώ οι μεταβάσεις γίνονται τυχαία ανάμεσα σε γειτονικές περιοχές. Συγκεκριμένα, προτείνουμε τη συνάρτηση κίνησης $\mathcal{M}_{graph}$ που παίρνει το όνομά της από το γράφημα μεταβάσεων που χρησιμοποιεί. Το γράφημα κατασκευάζεται τοπικά στο $\mathcal{S}$ κατά την αρχικοποίηση του δικτύου. Το δίκτυο διαμερίζεται, νοητά, σε $j \times j$ τετράγωνα περιοχές ίσου μεγέθους. Έπειτα κατασκευάζεται ένα γράφημα στη μνήμη του $\mathcal{S}$, το κέντρο κάθε περιοχής αντιπροσωπεύεται από μία κορυφή, οι ακμές του γραφήματος είναι μη-κατευθυντικές και συνδέουν κάθε κορυφή με τις τέσσερις γειτονικές της. Έτσι, ένα γράφημα πλέγμα G_o κατασκευάζεται, που επικαλύπτει την περιοχή του δικτύου όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.

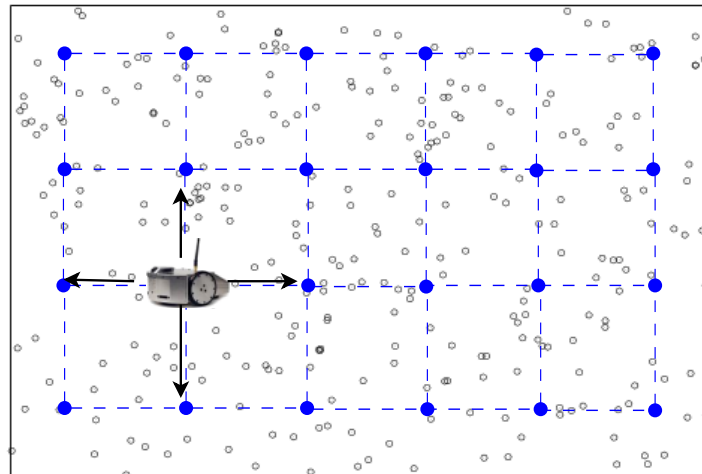
Αρχικά το κινητό κέντρο ελέγχου $\mathcal{S}$, τοποθετείται σε σημείο που αντιπροσωπεύει μία από τις κορυφές του G_o , δηλαδή στο κέντρο μιας από τις υποπεριοχές. Η συνάρτηση κίνησης $\mathcal{M}_{graph}$ υπολογίζει την επόμενη θέση επιλέγοντας τυχαία και ισοπίθανα μια από τις γειτονικές κορυφές στο G_o , τότε το $\mathcal{S}$ κινείται προς το κέντρο αυτής της περιοχής. Η ταχύτητα κίνησης είναι σταθερή και προκαθορισμένη από τον διαχειριστή του δικτύου. Με αυτή την τεχνική, η κίνηση του $\mathcal{S}$ πάνω στο επικαλυπτικό γράφημα ισοδυναμεί με κίνηση στην περιοχή του δικτύου, οι βαθμοί ελευθερίας της κίνησης έχουν περιοριστεί σημαντικά επομένως αναμένουμε ταχύτερη διάσχιση του δικτύου, ενώ όταν το $\mathcal{S}$ επισκεφτεί όλο το επικαλυπτικό γράφημα τότε έχει καλυφθεί, υπό συνθήκες, το δίκτυο. Η συνθήκη για να επιτευχθεί πλήρη και άμεση κάλυψη εξαρτάται από το πλήθος των περιοχών και την ακτίνα μετάδοσης των συσκευών, δηλαδή όταν

$$j = \lceil \frac{D}{\sqrt{2}R} \rceil$$

αφού τότε κάθε υποπεριοχή έχει διαστάσεις $D/j \times D/j$, δηλαδή ίση ή μικρότερη από $\frac{R}{\sqrt{2}} \times \frac{R}{\sqrt{2}}$ και κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει με το κέντρο της περιοχής και επομένως με το $\mathcal{S}$.

Σε αυτή την περίπτωση όπου έχουμε μερικό περίπατο στο δίκτυο, μπορεί να χρειαστεί να εκτελέσουμε ένα πιο πολύπλοκο πρωτόκολλο συλλογής δεδομένων στους αισθητήρες. Σε περίπτωση που θέσουμε το j μικρότερο από $\lceil \frac{D}{\sqrt{2}R} \rceil$ (για να επιταχύνουμε τη διάσχιση του επικαλυπτικού γραφήματος), οι αισθητήρες πλέον δεν μπορούν να επικοινωνήσουν απ'ευθείας με το $\mathcal{S}$. Το πρωτόκολλο που προτείνουμε εδώ σχηματίζει δένδρα διάδοσης περιορισμένου βάθους με ρίζα το $\mathcal{S}$ προκειμένου να αποκαταστήσει την επικοινωνία ανάμεσα στους απομακρυσμένους κόμβους και το $\mathcal{S}$.

Όπως και πριν το $\mathcal{S}$ μεταδίδει περιοδικά μηνύματα παρούσας, τα οποία όμως τώρα μεταφέρουν ένα μετρητή h_c αναμεταδόσεων (αρχικά $h_c = 0$) και ένα μετρητή διάρκειας ζωής t_{tl} ξεχωριστούς για το κάθε μήνυμα. Κάθε αισθητήρας διατηρεί μία μεταβλητή h_d με την απόστασή του από το $\mathcal{S}$ (αρχικά $h_d = \infty$), η απόσταση μετριέται σε αριθμούς μεταδόσεων από κόμβο σε κόμβο (hops) που χρειάζεται ένα μήνυμα για να φτάσει στο $\mathcal{S}$. Επίσης διατηρεί μία χρονοσφραγίδα t_u που σημειώνει την τελευταία χρονική στιγμή που ανανεώθηκε η μεταβλητή h_d . Τέλος διατηρεί και την διεύθυνση ή ταυτότητα (αρχικά `null`) ενός γειτονικού κόμβου (θα τον ονομάζουμε και γονέα), στον οποίο πρέπει να στείλει τα μηνύματα που προορίζονται για το



Σχήμα 4.1: Παράδειγμα του επικαλυπτικού γραφήματος G_o και πιθανή κίνηση του κινητού κέντρου ελέγχου

$\mathcal{S}$. Αυτές οι τρεις μεταβλητές αρκούν για να λειτουργήσει ένα απλό πρωτόκολλο σχηματισμού μονοπατιών στο δίκτυο, η διαδικασία του σχηματισμού περιγράφεται παρακάτω.

Όταν κάποιος κόμβος λάβει ένα μήνυμα παρουσίας, έστω σε χρονική στιγμή t_b , αποφασίζει αν πρέπει να αλλάξει τον γονέα του με βάση τους παρακάτω κανόνες:

- (1) Εάν $h_c < h_d$, δηλαδή υπάρχει μια συντομότερη διαδρομή προς το $\mathcal{S}$, ο κόμβος θέτει τον αποστολέα του μηνύματος ως τον γονέα του. Επίσης θέτει $h_d = h_c$ και $t_u = t_b$. Τότε ο κόμβος αποφασίζει αν χρειάζεται να προωθήσει το μήνυμα παρουσίας στους δικούς του γείτονες ή όχι. Πρώτα αυξάνει τον μετρητή αναμεταδόσεων του μηνύματος $h_c = h_c + 1$, έπειτα μειώνει το μετρητή διάρκειας ζωής $t_{tl} = t_{tl} - 1$ και αν $t_{tl} > 0$ τότε μεταδίδει το μήνυμα στους γείτονές του.
- (2) Εάν $h_c \geq h_d$ και $t_b > t_u + t_{thres}$, δηλαδή το μήνυμα υποδεικνύει ένα μεγαλύτερου μήκους μονοπάτι προς το $\mathcal{S}$, αλλά το μονοπάτι που χρησιμοποιεί ο κόμβος έχει σχηματιστεί πριν από κάποιο χρονικό κατώφλι, τότε αλλάζει το γονέα του. Ο κόμβος θέτει τον αποστολέα του μηνύματος ως τον γονέα του και θέτει $h_d = h_c$ και $t_u = t_b$. Το χρονικό κατώφλι t_{thres} τίθεται από το διαχειριστή του δικτύου και εκφράζει το χρόνο που ένα μονοπάτι θεωρείται έγκυρο. Έπειτα ο κόμβος εκτελεί τις ενέργειες που περιγράψαμε πριν για να αποφασίσει εάν θα προωθήσει το μήνυμα στους γείτονές του.
- (3) Εάν $h_c \geq h_d$ και $t_b \leq t_u + t_{thres}$, ο κόμβος απλά απορρίπτει το μήνυμα.

Αυτή η διαδικασία δημιουργεί έναν αριθμό από δένδρα διάδοσης στο δίκτυο με τις ρίζες αυτών των δένδρων να είναι οι κόμβοι που είναι μία μετάδοση μακριά από το $\mathcal{S}$, δηλαδή βρίσκονται στην εμβέλειά του. Οι κόμβοι που ανήκουν σε κάποιο δένδρο μπορούν αμέσως να αρχίσουν να μεταδίδουν μηνύματα στο γονέα τους και συνεπώς προς το $\mathcal{S}$. Το βάθος των δένδρων και συνεπώς και του μέγιστου μονοπατιού που μπορεί να ακολουθηθεί ένα μήνυμα, καθορίζεται από

4.3 Τεχνικές για συλλογή δεδομένων με κινητό κέντρο ελέγχου

την τιμή t_{tl} που είναι μία λειτουργική παράμετρος του κινητού κέντρου ελέγχου. Αυξάνοντας το βάθος του δένδρου αυξάνει τον αριθμό μεταδόσεων μηνυμάτων που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας. Από την άλλη όμως η διάδοση δεδομένων στα μονοπάτια που σχηματίζονται χρειάζεται πολύ λίγο χρόνο σε σχέση με την διάσχιση του δικτύου οπότε αναμένουμε χαμηλότερη καθυστέρηση.

Με αυτό τον τρόπο ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να αυξήσει την κατανάλωση ενέργειας και να αντισταθμίσει την καθυστέρηση μειώνοντας την και πετυχαίνοντας έτσι ένα καλύτερο συμβιβασμό. Η τιμή t_{tl} πρέπει να τίθεται σε συμφωνία με την επιλεγμένη τιμή j . Όταν το κινητό κέντρο ελέγχου φτάνει στο κέντρο μιας περιοχής, η μέγιστη απόσταση σε μεταδόσεις (hops) ενός αισθητήρα που ανήκει στην ίδια περιοχή είναι $\lceil \frac{D/j\sqrt{2}}{R} \rceil$. Προσέξτε ότι όταν $t_{tl} = 1$ αυτή η τεχνική είναι ισοδύναμη με την παθητική συλλογή δεδομένων που είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο.

Καθώς κινείται το κέντρο ελέγχου, ολόκληρα δένδρα διάδοσης μπορεί να αποσυνδεθούν. Όταν ένας κόμβος με $h_d = 0$ δεν μπορεί πλέον να επικοινωνήσει με το S , απλά αποθηκεύει στη μνήμη του όλα τα δεδομένα, και αυτά που καταγράφει και αυτά που στέλνουν οι υπόλοιποι κόμβοι. Έπειτα περιμένει να λάβει ένα ακόμα μήνυμα παρουσίας με $h_c = 0$ για να ξεκινήσει ξανά τη μετάδοση δεδομένων στο S , ενώ μετά από χρόνο t_{thres} θα συμμετέχει πάλι σε ένα καινούργιο δένδρο.

Αυτό το πρωτόκολλο υποθέτει και χρησιμοποιεί περισσότερη γνώσης για το δίκτυο, μπορεί έτσι να επιταχύνει το χρόνο που χρειάζεται για την κάλυψη του δικτύου, να μειώσει την απόσταση που διανύει το κέντρο ελέγχου και να βελτιώσει την απόδοση σε σχέση με το P1. Από την άλλη είναι πιο ακριβό τόσο σε υπολογισμούς αλλά κυρίως σε επικοινωνία ανάμεσα στις συσκευές.

4.3.3 P3: Ευνοιοκρατικός τυχαίος περίπατος με παθητική συλλογή δεδομένων

Η ιδέα χρήσης ενός ιδεατού γραφήματος μπορεί να επεκταθεί με ένα τρόπο που συγκεκριμένες περιοχές του δικτύου ευνοούνται, δηλαδή δέχονται πιο πολλές επισκέψεις από το κέντρο ελέγχου, με απώτερο στόχο την βελτίωση της απόδοσης ή για να ξεπεραστούν προβληματικές τοπολογίες στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, προτείνουμε τη στρατηγική κίνησης $\mathcal{M}_{bias}$. Αυτή σχηματίζει ένα επικαλυπτικό γράφημα (όπως περιγράψαμε στην παράγραφο 4.3.2, δείτε και σχήμα 4.2) $G_o = G(V, E)$ with $j = \lceil D/\sqrt{2}R \rceil$. Επιπλέον, για κάθε κορυφή του γραφήματος v , διατηρεί δύο μετρητές, τους c_v και d_v , αρχικά έχουμε $c_v = d_v = 0 \ \forall v \in V$. Οι μετρητές αυτοί αποθηκεύουν δεδομένα για τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο για κάθε μία από τις περιοχές που επισκέπτεται το κέντρο ελέγχου. Η ανανέωσή τους είναι απλή, όταν το S εισέρχεται σε μία περιοχή που αντιστοιχεί στην κορυφή u , αυξάνει κατά ένα τον σχετικό μετρητή c_u . Επίσης, ενώ παραμένει σε περιοχή αυξάνει τον μετρητή d_u σύμφωνα με τον αριθμό των νέων κόμβων, δηλαδή των συσκευών από τις οποίες δεν έλαβε μήνυμα σε προηγούμενη επίσκεψη. Προσέξτε ότι τα μηνύματα είναι αυτά που μεταδίδουν δεδομένα δεν χρησιμοποιούνται επιπλέον μηνύματα ελέγχου για να συγκεντρωθεί αυτή η πληροφορία. Επομένως στους δύο αυτούς μετρητές αποθηκεύεται πληροφορία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η πυκνότητα και η συχνότητα επισκέψεων μίας περιοχής. Χρησιμοποιώντας την πληροφορία, το κέντρο ελέγχου μπορεί να επιλέξει την επόμενη περιοχή που θα επισκεφτεί ευνοιοκρατικά όπως θα δούμε στη

συνέχεια.

Πιθανότητα μετάβασης ευνοϊκή ως προς την συχνότητα

Εάν το κινητό κέντρο ελέγχου βρίσκεται σε μία κορυφή u του επικαλυπτικού γραφήματος $G_o(V, E)$, βαθμού deg_u , τότε ορίζουμε $c_{neigh}(u) = \sum_v c_v$ για κάθε $v : (u, v) \in E$. Τότε η πιθανότητα $p(c)_v$ μετάβασης σε μία γειτονική κορυφή v , δίνεται από τον τύπο:

$$p(c)_v = \frac{1 - c_v/c_{neigh}(u)}{deg_u - 1}$$

όταν $c_{neigh} \neq 0$. Στην περίπτωση $c_{neigh} = 0$, δηλαδή στην αρχή λειτουργίας του δικτύου όταν το κέντρο ελέγχου δεν έχει συγκεντρώσει πληροφορία, έχουμε $p(c)_v = 1/deg_u$, δηλαδή η μετάβαση σε οποιαδήποτε γειτονική περιοχή είναι ισοπίθανη. Με αυτό το τρόπο οι περιοχές που έχουν τον μικρότερο αριθμό επισκέψεων ευνοούνται. Όταν το κινητό κέντρο ελέγχου βρίσκεται σε γειτονική περιοχή, η πιθανότητα μετάβασης του σε αυτές μεγαλώνει όσο λιγοστεύουν οι επισκέψεις που έχουν δεχθεί σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές.

Πιθανότητα μετάβασης ευνοϊκή ως προς την πυκνότητα.

Εάν το κινητό κέντρο ελέγχου βρίσκεται σε μία κορυφή u του επικαλυπτικού γραφήματος $G_o(V, E)$, βαθμού deg_u , τότε ορίζουμε $d_{neigh}(u) = \sum_v d_v$ για κάθε $v : (u, v) \in E$. Τότε η πιθανότητα μετάβασης $p(d)_v$ σε μία γειτονική κορυφή v , δίνεται από τον τύπο:

$$p(d)_v = \frac{1 + d_v/d_{neigh}(u)}{deg_u + 1}$$

όταν $d_{neigh} \neq 0$. Στην περίπτωση $d_{neigh} = 0$, δηλαδή στην αρχή λειτουργίας του δικτύου όταν το κέντρο ελέγχου δεν έχει συγκεντρώσει πληροφορία, έχουμε $p(d)_v = 1/deg_u$, δηλαδή η μετάβαση σε οποιαδήποτε γειτονική περιοχή είναι ισοπίθανη. Με αυτό το τρόπο οι περιοχές που έχουν τον μεγαλύτερο αριθμό αισθητήρων ευνοούνται. Όταν το κινητό κέντρο ελέγχου βρίσκεται σε γειτονική περιοχή, η πιθανότητα μετάβασης του σε αυτές μεγαλώνει όσο μεγαλύτερη πυκνότητα έχουν σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές.

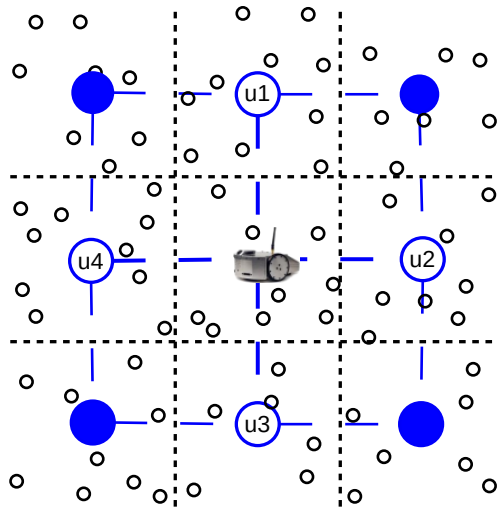
Κόμβος	c_v	d_v	$p(c)_v$	$p(d)_v$	p_v
u_1	3	10	0.25	0.2588	0.2544
u_2	5	8	0.1944	0.2472	0.2208
u_3	2	6	0.2778	0.2352	0.2565
u_4	2	10	0.2778	0.2588	0.2683

Πίνακας 4.1: Παράδειγμα υπολογισμού της πιθανότητας μετάβασης στις γειτονικές περιοχές, όταν $\alpha = \beta = 0.5$

Αφού ολοκληρωθεί ο υπολογισμός των πιθανοτήτων $p(c)_v$, $p(d)_v$ η τελική πιθανότητα μετάβασης στην περιοχή που αντιστοιχεί στην κορυφή v του επικαλυπτικού γραφήματος $G_o(V, E)$, υπολογίζεται ως εξής:

$$p_v = \alpha \cdot p(c)_v + \beta \cdot p(d)_v$$

4.3 Τεχνικές για συλλογή δεδομένων με κινητό κέντρο ελέγχου



Σχήμα 4.2: Παράδειγμα του επικαλυπτικού γραφήματος G_o και της λογικής διαμέρισης του δικτύου σε υποπεριοχές. Οι διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν τα λογικά όρια των υποπεριοχών

όπου α και β δύο μη αρνητικοί πραγματικοί αριθμοί τέτοιοι ώστε να ισχύει $\alpha + \beta = 1$. Αυτός ο περιορισμός για τα α και β εξασφαλίζει ότι και το αποτέλεσμα p_v θα είναι πιθανότητα, δηλαδή $0 \leq p_v \leq 1$. Οι παράμετροι α και β τίθενται από το διαχειριστή του δικτύου, ο σκοπός που εξυπηρετούν είναι να ρυθμίζουν την ισχύ της κάθε συνιστώσας πιθανότητας στην τελική πιθανότητα. Κατά αυτό το τρόπο η τεχνική μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα για ειδικές περιπτώσεις δικτύων. Για παράδειγμα, αν σε κάποιες περιοχές αναπτύξουμε περισσότερους αισθητήρες γιατί έχουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την εφαρμογή μας, τότε μας συμφέρει να αυξήσουμε το β σε σχέση με το α , ώστε να εννοήσουμε αυτές τις πυκνότερες περιοχές. Ένα παράδειγμα για τον υπολογισμό της πιθανότητας μετάβασης παρουσιάζεται στον πίνακα 4.1. Αυτή η τεχνική συνδυάζεται με την παθητική συλλογή δεδομένων όπως την περιγράψαμε στην παράγραφο 4.3.1.

Αυτό το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί γνώση που συλλέγεται τοπικά στο κέντρο ελέγχου καθώς αυτό διασχίζει το δίκτυο και συλλέγει δεδομένα. Πέρα από την αποστολή των καταγεγραμμένων δεδομένων, οι αισθητήρες δεν επιβαρύνονται καθόλου για να συγκεντρωθεί αυτή η γνώση. Η γνώση χρησιμοποιείται για να επιταχυνθεί η διάσχιση του δικτύου (όταν $\alpha > \beta$) ή για να αυξηθεί η παράδοση δεδομένων σε περιοχές με πολλούς αισθητήρες (όταν $\alpha < \beta$). Συνολικά για το P3, σε σύγκριση με το P1, περιμένουμε ταχύτερη κάλυψη του δικτύου, υψηλότερο ποσοστό επιτυχούς παράδοσης και μικρότερη καθυστέρηση με μόνο κόστος μια αύξηση του υπολογιστικού φόρτου στο κέντρο ελέγχου.

4.3.4 P4: Ντετερμινιστικός περίπατος με μονοπάτια διάδοσης μεγάλου βάθους

Εδώ, σε αντιδιαστολή με τις πιθανοτικές τεχνικές που είδαμε ως τώρα, εξετάζουμε μία ντετερμινιστική τεχνική για την διάσχιση του δικτύου που ανήκει στην κατηγορία ελεγχόμενης κίνη-

σης. Το κέντρο ελέγχου κινείται σε μία *προκαθορισμένη τροχιά*. Εξετάζουμε περιπτώσεις που η τροχιά είναι ένα ευθύγραμμο τμήμα (ορίζοντας την συνάρτηση κίνησης $\mathcal{M}_{line}$) ή ένας κύκλος (ορίζοντας την συνάρτηση κίνησης $\mathcal{M}_{circle}$), ενώ και στις δύο περιπτώσεις η τροχιά περιέχεται πλήρως στην περιοχή του δικτύου. Η τροχιά χαρακτηρίζεται από το μήκος της l . Συγκεκριμένα, η γραμμική τροχιά αποτελείται από οριζόντια ή κάθετα ευθύγραμμα τμήματα που διέρχονται από το κέντρο του δικτύου. Το $\mathcal{S}$ κινείται από τη μία άκρη της τροχιάς στην άλλη και επιστρέφει επίσης κινούμενο στην τροχιά. Στην περίπτωση της κυκλικής τροχιάς, το κέντρο του κύκλου συμπίπτει με αυτό του δικτύου και η ακτίνα του είναι $r = \frac{l}{2\pi}$ (ώστε έχει νόημα η σύγκριση με την ευθύγραμμη τροχιά). Αρχικά ο κύκλος τοποθετείται στην περιφέρεια του δικτύου και κινείται στην περιφέρεια χωρίς να αλλάζει κατεύθυνση.

Με αυτές τις τεχνικές το κινητό κέντρο ελέγχου καλύπτει μόνο μια μικρή περιοχή του δικτύου οπότε είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένα πρωτόκολλο διάδοσης πληροφορίας που να σχηματίζει μονοπάτια που εκτείνονται σε όλο το δίκτυο. Χρησιμοποιούμε ένα πρωτόκολλο παρόμοιο με αυτό που είδαμε στην παράγραφο 4.3.2, χωρίς όμως να έχουμε τον μετρητή ζωής για τα μηνύματα παρουσίας ούτε και την χρονοσφραγίδα ακύρωσης των μονοπατιών. Έτσι, μονοπάτια δημιουργούνται σύμφωνα με την μικρότερη απόσταση μεταδόσεων από την τροχιά του κέντρου ελέγχου. Προσέξτε ότι η χρονοσφραγίδα ακύρωσης των μονοπατιών δεν είναι πλέον αναγκαία γιατί το $\mathcal{S}$ εκτελεί περιοδική κίνηση.

Όταν η ρίζα ενός εκ των δένδρων διάδοσης που έχουν σχηματιστεί στο δίκτυο διαπιστώσει ότι το κέντρο ελέγχου δεν βρίσκεται πλέον στην εμβέλειά της, αποθηκεύει όλα τα δεδομένα και περιμένει να ακούσει ένα νέο μήνυμα παρουσίας με $h_c = 0$ για να συνεχίσει την παράδοση δεδομένων. Δηλαδή η κόμβοι που ήρθαν μία φορά σε άμεση επαφή με το $\mathcal{S}$ περιμένουν μέχρι να μπορέσουν να επικοινωνήσουν πάλι απ'ευθείας μαζί του.

Προσέξτε ότι εδώ υποθέτουμε ότι οι κόμβοι που λαμβάνουν μηνύματα παρουσίας με $h_c = 0$, βρίσκονται μέσα στην εμβέλεια του $\mathcal{S}$, σε απόσταση το πολύ $\mathcal{R}$ από την τροχιά του. Εφόσον η κίνηση του κέντρου ελέγχου είναι ντετερμινιστική και περιοδική και οι ιδιότητες του ραδιοφωνικού καναλιού δεν αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου, αυτοί οι κόμβοι θα επικοινωνούν απ'ευθείας με το $\mathcal{S}$ κάθε φορά που αυτό θα διέρχεται από κοντά τους. Μία άλλη προσέγγιση θα ήταν να ακυρώσουμε το δένδρο διάδοσης και να αφήσουμε τους κόμβους που συμμετέχουν σε αυτό να ενταχθούν σε άλλα δένδρα. Αυτή η προοπτική δουλεύει ικανοποιητικά σε συνδεδεμένα δίκτυα αλλά έχει πολύ μεγαλύτερο κόστος αφού τα δένδρα θα αναδιατάσσονται συνεχώς ακολουθώντας την κίνηση του $\mathcal{S}$, ενώ και το μέγιστο μήκος δένδρου είναι της ίδιας τάξης με την περίπτωση που το κέντρο ελέγχου είναι στατικό.

Αυτή τεχνική κίνησης που παρουσιάζουμε εδώ μοντελοποιεί καταστάσεις που το $\mathcal{S}$ δεν μπορεί να κινηθεί σε ολόκληρο το δίκτυο λόγω της μορφολογίας του εδάφους, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα εκτέλεσης των απαραίτητων χειρισμών για πιο πολύπλοκες κινήσεις ή επειδή πρέπει να τροφοδοτείται συνεχώς όσο βρίσκεται στην τροχιά του. Όμως λόγω του μεγάλου βάθους μονοπατιών η ενέργεια που καταναλώνεται στις συσκευές είναι πολύ μεγάλη, αλλά από την άλλη η καθυστέρηση είναι μικρότερη από τα προηγούμενα πρωτόκολλα. Επιπλέον εισάγεται μία νέα παράμετρος που μπορεί να επηρεάσει τους συμβιβασμούς που πετυχαίνει το πρωτόκολλο, το μήκος της τροχιάς l , αφού μεγαλύτερο l σημαίνει ότι το $\mathcal{S}$ καλύπτει μεγαλύτερη περιοχή του δικτύου, ενώ μικρότερο l σημαίνει ότι θα σχηματιστούν μεγαλύτερα μονοπάτια αυξάνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας στους αισθητήρες. Επιπλέον έχει ενδιαφέρον να δούμε αν η διαφορά στο σχήμα τις τροχιάς επηρεάζει το κόστος και την απόδοση του πρωτοκόλλου (για τροχιές ίδιου μήκους).

4.4 Πειραματική αξιολόγηση

4.4.1 Οργάνωση των πειραμάτων

Υλοποιούμε και αξιολογούμε τα παραπάνω πρωτόκολλα στο δημοφιλή προσομοιωτή **ns-2**. Για να συγκρίνουμε την απόδοση των τεχνικών μας ως προς την περίπτωση δικτύων με στατικό κέντρο ελέγχου χρησιμοποιούμε το γνωστό πρωτόκολλο **Directed Diffusion** (δείτε [37]). Εξετάζουμε διαφορετικές περιπτώσεις δικτύων με διαφορετικές τοπολογίες και μεταβάλλοντας τις παραμέτρους των τεχνικών διάσχισης του δικτύου.

Υποθέτουμε ότι μία εφαρμογή περιοδικής παρακολούθησης περιβαλλοντικών συνθηκών εκτελείται και «ανακαλύπτει» (παράγει) $\lambda_i = 0.1$ γεγονότα ανά δευτερόλεπτο. Στην προσομοίωση μας παράγονται 500 γεγονότα από κάθε συσκευή. Η διάρκεια προσομοίωσης υπολογίζεται σύμφωνα με το ρυθμό παραγωγής γεγονότων και είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επιτρέπει σε όλα τα μηνύματα να παραχθούν. Άλλα 4000 δευτερόλεπτα χρόνου προσομοίωσης προστίθενται για να επιτρέψουν την άφιξη καθυστερημένων μηνυμάτων και να δώσουν χρόνο στο $\mathcal{S}$ να καλύψει το δίκτυο.

Το μέγεθος της περιοχής του δικτύου είναι $200m \times 200m$ και 300 αισθητήρες αναπτύσσονται. Εξετάζουμε διαφορετικές κατανομές αισθητήρων στο δίκτυο, συγκεκριμένα υποθέτουμε την περίπτωση μίας τυχαίας και ομοιόμορφης κατανομής και κατανομές με θύλακες, με $P_n \in \{2, 4\}$. Κάθε θύλακας έχει ακτίνα δύο φορές την ακτίνα μετάδοσης ενός κόμβου $r_P = 2R$, οι θέσεις των θυλάκων είναι διαμετρικά αντίθετες όσο γίνεται, και ακολουθούν τις πλευρές ενός ζαριού. Ο λόγος της πυκνότητας των θυλάκων και συνεπώς ο αριθμός των κόμβων στους θύλακες ως προς τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου, τίθεται ως εξής $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$. Η ακτίνα μετάδοσης τόσο των αισθητήρων όσο και του $\mathcal{S}$ τίθεται $R = 15m$, η ταχύτητα κίνησης του $\mathcal{S}$ παίρνει τις τιμές $4m/s$ και $8m/s$. Επίσης η διαθέσιμη ενέργεια των αισθητήρων τέθηκε σε υψηλά επίπεδα ($E_i^{init} = 20J$), ώστε να αποκλείσουμε την εμφάνιση αποτυχιών λόγω εξαντλήσεως των ενεργειακών αποθεμάτων των αισθητήρων, κάτι που θα επηρέαζε τα αποτελέσματα και θα δυσκόλευε την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Για τα πρωτόκολλά μας επιλέγουμε διαφορετικές παραμέτρους, για τη $\mathcal{M}_{random}$ του P1, θέτουμε μέγιστη μετατόπιση $d_{max} = 50m$. Για το P2 εξετάζουμε δύο διαφορετικές διαμέρισης του δικτύου θέτοντας $j = 10$, $t_{tl} = 2$, $t_{thres} = 10sec$ και $j = 5$, $t_{tl} = 4$, $t_{thres} = 10sec$. Για την παραμετροποίηση του P3, θέτουμε $j = 20$ και διερευνούμε την επίπτωση διαφορετικών α και β , θέτοντας $\alpha = 1$ και $\beta = 0$, $\alpha = 0.5$ και $\beta = 0.5$ και $\alpha = 0$ και $\beta = 1$. Για το P4 δοκιμάζουμε διάφορα μήκη τροχιάς, θέτουμε $l \in \{D, D/2, D/3\}$. Για τα πρωτόκολλα P2, P3 η αρχική θέση του κινητού κέντρου ελέγχου, είναι το σημείο $(D/2, 0)$, ενώ για το P4 το κέντρο ελέγχου τοποθετείται εξ αρχής πάνω σε κάποιο σημείο της τροχιάς. Για κάθε περίπτωση και για όλα τα πρωτόκολλα το κέντρο ελέγχου εκπέμπει ένα μήνυμα παρούσας κάθε $0.5sec$.

4.4.2 Μετρικές απόδοσης

Εστιάζουμε στις εξής μετρικές απόδοσης οι οποίες είναι γνωστές από τα προηγούμενα κεφάλαια αλλά τις επαναλαμβάνουμε εδώ για λόγους πληρότητας:

($\mathcal{P}_s$) ποσοστό επιτυχίας που επιτυγχάνεται από το δίκτυο, ως το ποσοστό των γεγονότων που

Τεχνικές διαχείρισης κινητικότητας κέντρων ελέγχου για εξοικονόμηση ενέργειας

αναφέρονται στο κέντρο ελέγχου σε σχέση με το συνολικό αριθμό γεγονότων που παράγονται στο δίκτυο,

(E_{tot}) η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται από τις συσκευές αισθητήρων, χωρίς να λάβουμε υπόψη την ενέργεια που καταναλώνει το κέντρο ελέγχου για την κίνησή του

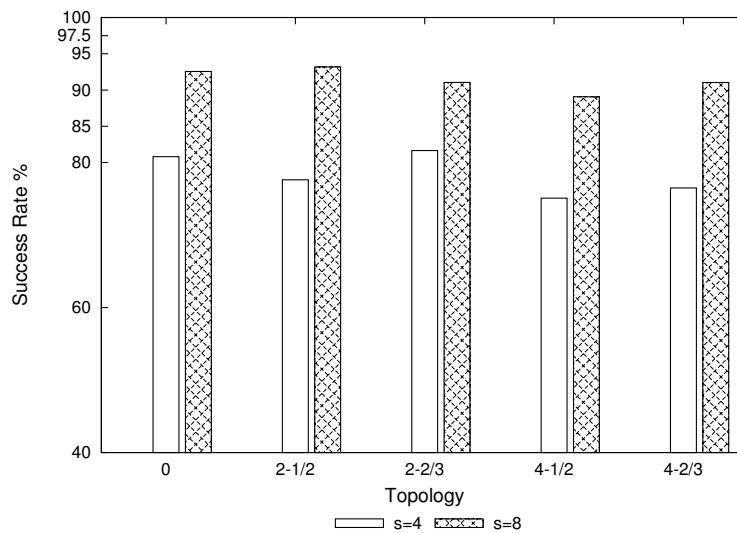
($\mathcal{D}$) η καθυστέρηση παράδοσης, δηλαδή ο μέσος χρόνος που χρειάζεται ένα μήνυμα για να παραδοθεί στο κέντρο ελέγχου

Πέρα από αυτές τις μετρικές, εξετάζουμε και κάποιες ακόμα που εμφανίζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των περιπάτων στο δίκτυο

($\mathcal{C}_s$) το *καλυπτόμενο υποσύνολο*, που ορίζεται σαν το ποσοστό των κόμβων που έχει επισκεφθεί το $\mathcal{S}$, δηλαδή των κόμβων που κατάφεραν να ανταλλάξουν μηνύματα με το $\mathcal{S}$, είτε με απ'ευθείας επικοινωνία είτε μέσω πολλών μεταδόσεων

($\mathcal{V}_d$) για τους κόμβους που δεν καλύφθηκαν μετρούμε την *απόσταση για κάλυψη*, η οποία είναι η απόσταση σε ακτίνες μετάδοσης (δηλαδή σε μεταδόσεις hops) από τον κοντινότερο κόμβο που καλύφθηκε από το $\mathcal{S}$, μας δίνει μία εκτίμηση της προσπάθειας που θα χρειαζόταν για να καλυφθούν όλοι οι κόμβοι

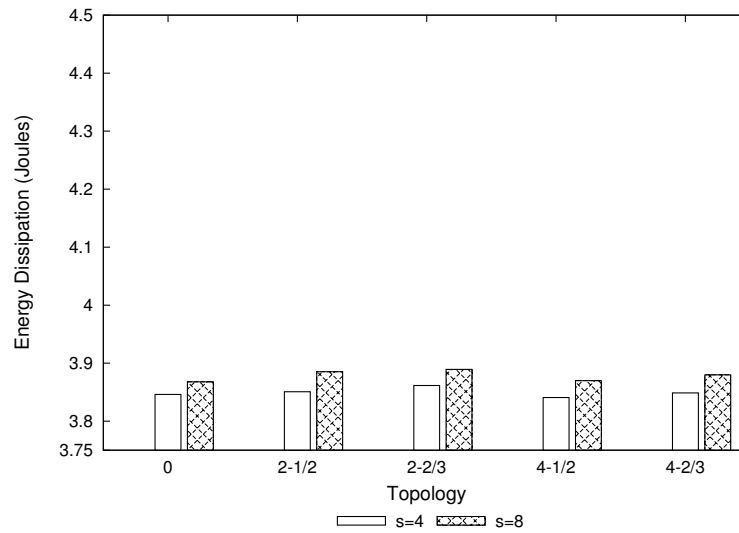
4.4.3 Αποτελέσματα πειραμάτων



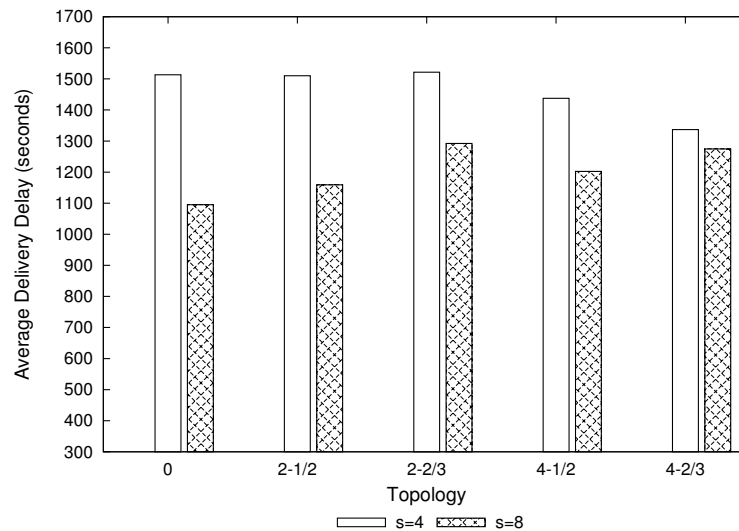
Σχήμα 4.3: Ποσοστό επιτυχίας του πρωτοκόλλου P1 για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

Τα σχήματα 4.3--4.7 δείχνουν τις επιδόσεις του πρωτοκόλλου P1, παρατηρούμε ότι η αυξημένη ταχύτητα κίνησης s επηρεάζει θετικά την απόδοση του P1, αφού για $s = 8m/s$ πετυχαίνει ποσοστό επιτυχίας κοντά στο 95%, μόνο ελάχιστη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, χαμηλή

4.4 Πειραματική αξιολόγηση

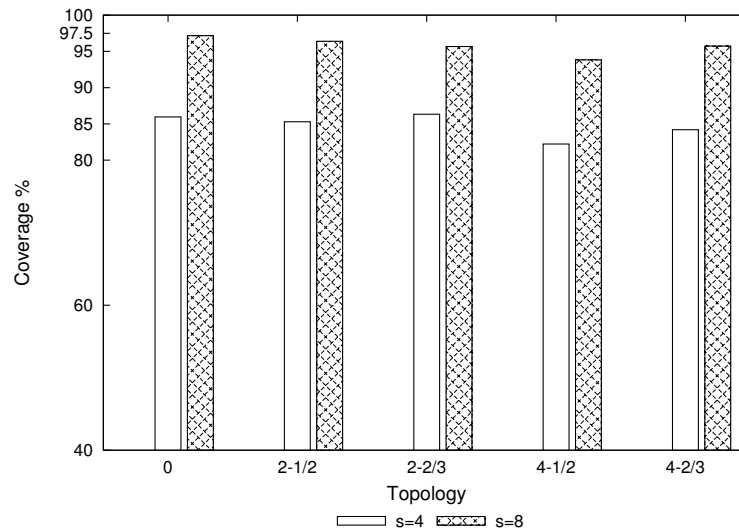


Σχήμα 4.4: Κατανάλωση ενέργειας του πρωτοκόλλου P1 για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

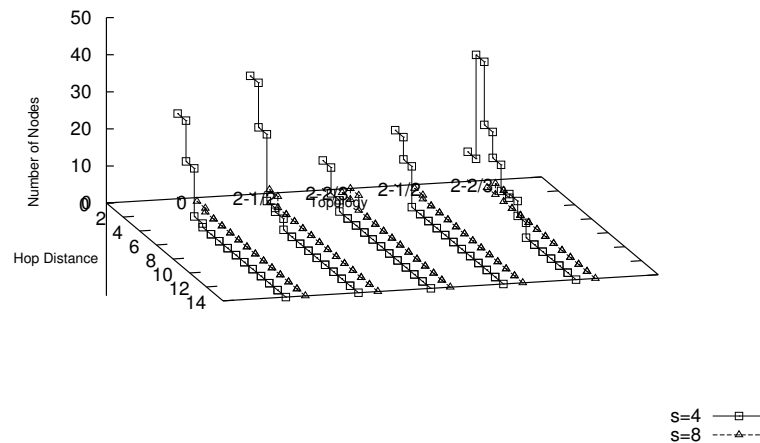


Σχήμα 4.5: Μέση καθυστέρηση του πρωτοκόλλου P1 για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

καθυστέρηση και σχεδόν πλήρη κάλυψη του δικτύου (95%--97%). Όταν $s = 4m/s$ η κάλυψη είναι περίπου 85%, δηλαδή περίπου 15% των κόμβων δεν έχουν την ευκαιρία να παραδώσουν τα δεδομένα τους στο $\mathcal{S}$, ενώ η απόσταση κάλυψης είναι σχετικά μικρή. Έτσι εξηγείται το χαμηλότερο ποσοστό επιτυχίας· είναι προφανές ότι το P1 χρειάζεται πολύ χρόνο για να καλύψει



Σχήμα 4.6: Καλυπτόμενο υποσύνολο του πρωτοκόλλου P1 για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

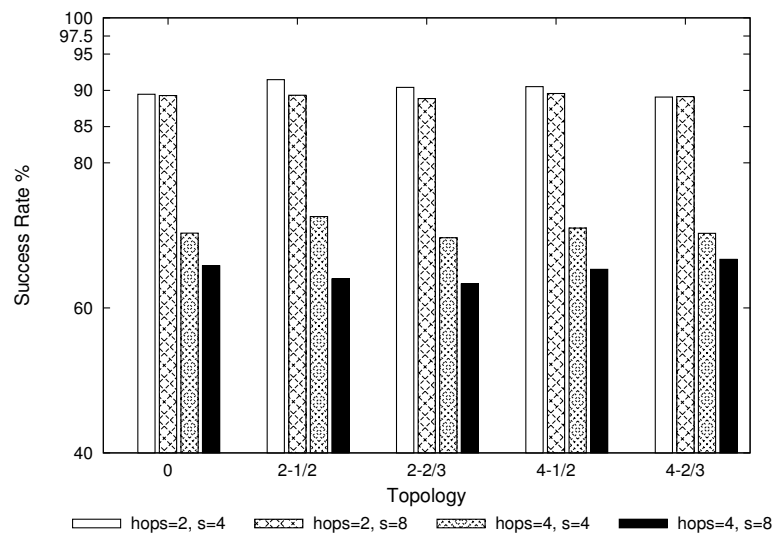


Σχήμα 4.7: Απόσταση κάλυψης του πρωτοκόλλου P1 για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

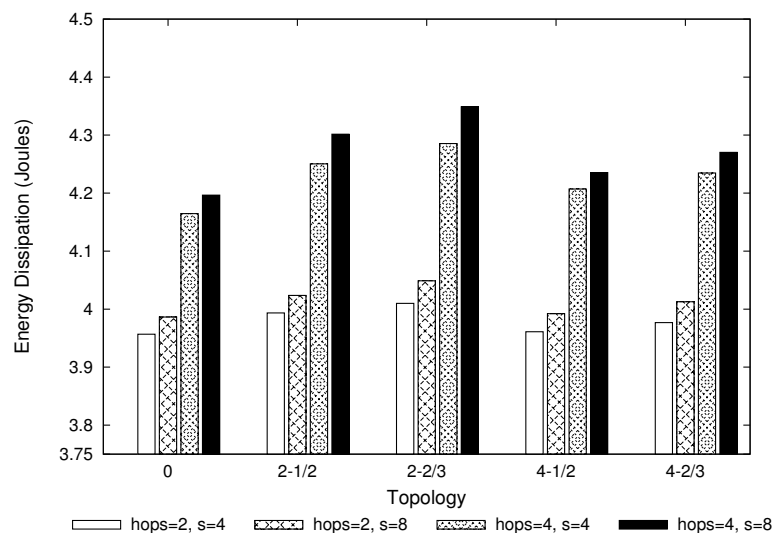
όλο το δίκτυο ο οποίος εξαρτάται και από την ταχύτητα κίνησης. Όμως η κάλυψη είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη συλλογή όλων των δεδομένων, ενώ η αργή κάλυψη έχει σημαντικό αντίκτυπο στην αύξηση της καθυστέρησης παράδοσης. Το πρωτόκολλο φαίνεται κυρίως ανεπη-

4.4 Πειραματική αξιολόγηση

ρέαστο από διαφορετικές τοπολογίες, το οποίο είναι αναμενόμενο αφού ο τυχαίος περίπατος είναι αγνωστικός όσον αφορά τις συνθήκες του δικτύου.

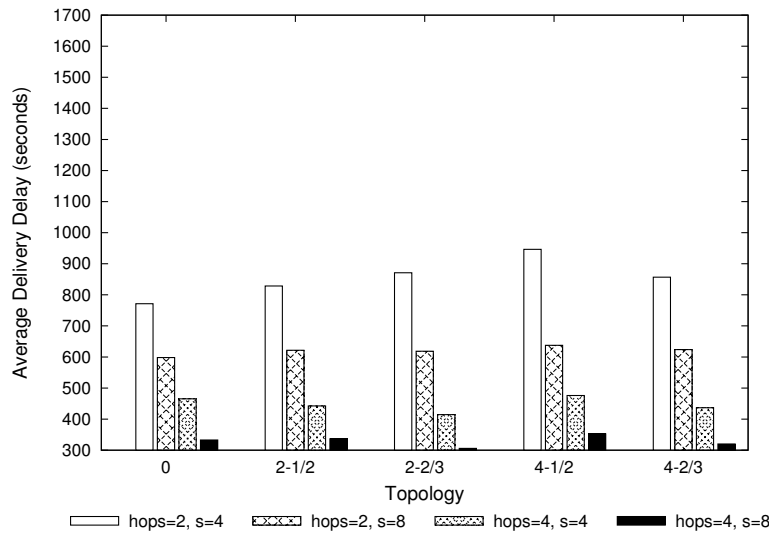


Σχήμα 4.8: Ποσοστό επιτυχίας του πρωτοκόλλου P2 για μεταβλητή διαμέριση του δικτύου και όριο μήκους μονοπατιού για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

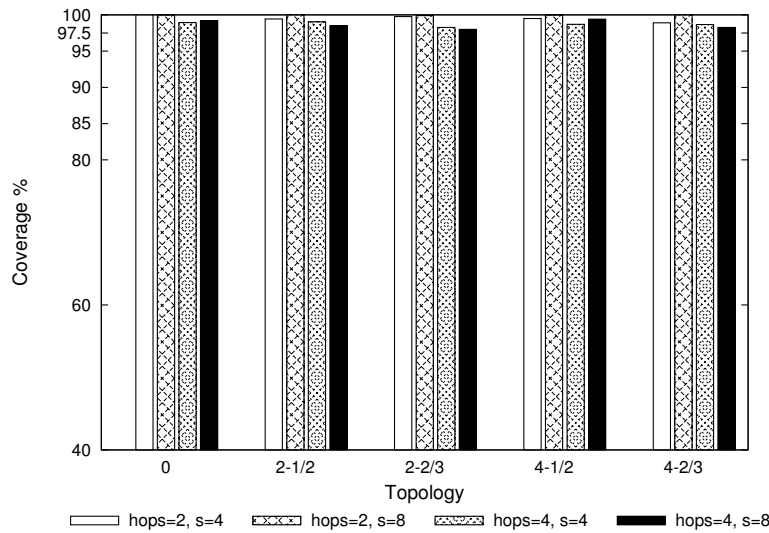


Σχήμα 4.9: Κατανάλωση ενέργειας του πρωτοκόλλου P2 για μεταβλητή διαμέριση του δικτύου και όριο μήκους μονοπατιού για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

Τα σχήματα 4.3--4.7 δείχνουν τις επιδόσεις του πρωτοκόλλου P2, εξ αρχής παρατηρούμε ότι για μεγάλο μήκος μονοπατιού (όταν $tll = 4$), η απόδοση πέφτει σημαντικά ως προς το ποσοστό παράδοσης ενώ αυξάνει και η κατανάλωση ενέργειας. Για μήκος μονοπατιού 2, το P2



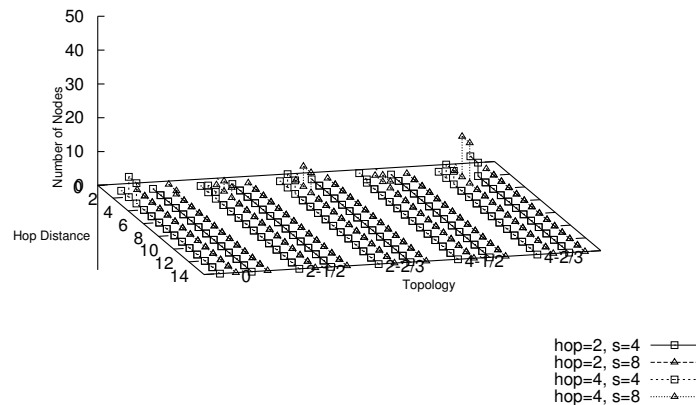
Σχήμα 4.10: Μέση καθυστέρηση του πρωτοκόλλου P2 για μεταβλητή διαμέριση του δικτύου και όριο μήκους μονοπατιού για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$



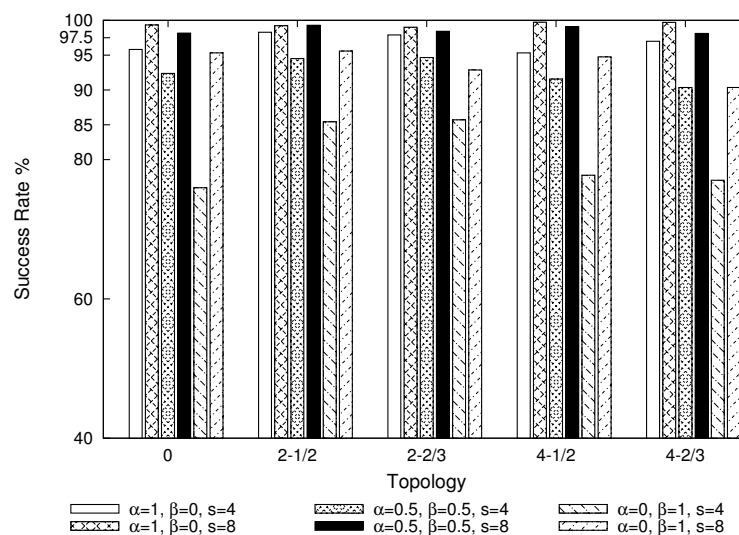
Σχήμα 4.11: Καλυπτόμενο υποσύνολο του πρωτοκόλλου P2 για μεταβλητή διαμέριση του δικτύου και όριο μήκους μονοπατιού για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

πετυχαίνει υψηλό ποσοστό παράδοσης (90%), σε σύγκριση με το 60%--70% που πετυχαίνει για μήκος 4 και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, γύρω στα 4 Joules σε σχέση με 4.2--4.3 Joules όταν το μήκος μονοπατιού είναι 4. Η καθυστέρηση και στις δύο περιπτώσεις είναι πολύ χαμηλή, ειδικά όταν $t_{tl} = 4$ το οποίο είναι μια βελτίωση της τάξης του 45% γρηγορότερα σε σχέση με την περίπτωση $t_{tl} = 2$. Αυτό εξηγείται από τα μεγαλύτερα μονοπάτια που κατασκευάζονται σε

4.4 Πειραματική αξιολόγηση

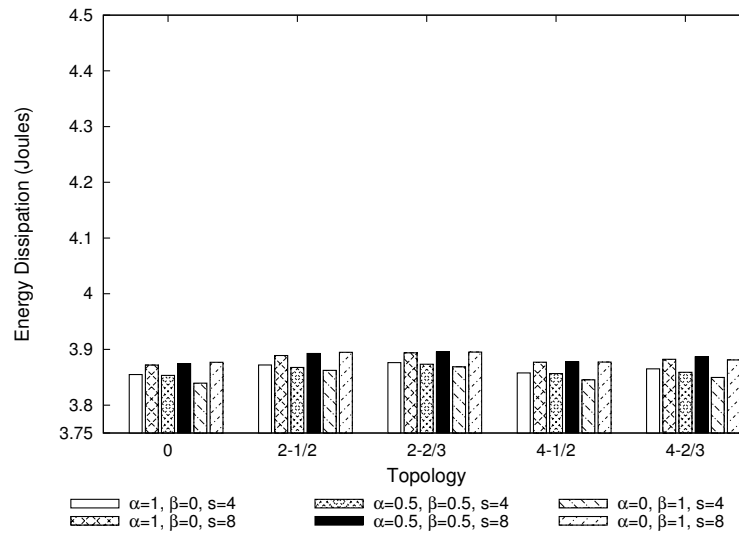


Σχήμα 4.12: Απόσταση κάλυψης του πρωτοκόλλου P2 για μεταβλητή διαμέριση του δικτύου και όριο μήκους μονοπατιού για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

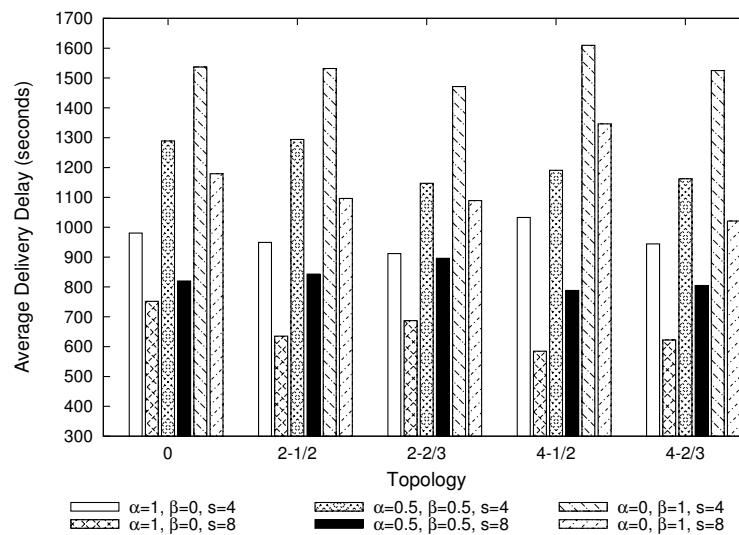


Σχήμα 4.13: Ποσοστό επιτυχίας του πρωτοκόλλου P3 για διάφορα α, β για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

αυτή την περίπτωση με αποτέλεσμα το S να συλλέγει δεδομένα από μεγαλύτερη περιοχή και καλύπτει το δίκτυο γρηγορότερα. Και στις δύο περιπτώσεις που εξετάζουμε, το P2 πετυχαίνει πρακτικά πλήρη κάλυψη ($> 97\%$) του δικτύου, δηλαδή όλοι οι κόμβοι είχαν την ευκαιρία να επικοινωνήσουν με το κέντρο ελέγχου. Όταν η ταχύτητα s αυξάνει, το ποσοστό παράδοσης μειώνεται και αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας, ειδικά όταν $t_{tl} = 4$. Αυτό οφείλεται στο ότι οι κόμβοι που απέχουν απόσταση 1 από το κέντρο ελέγχου πρέπει να δρομολογήσουν τα πακέτα



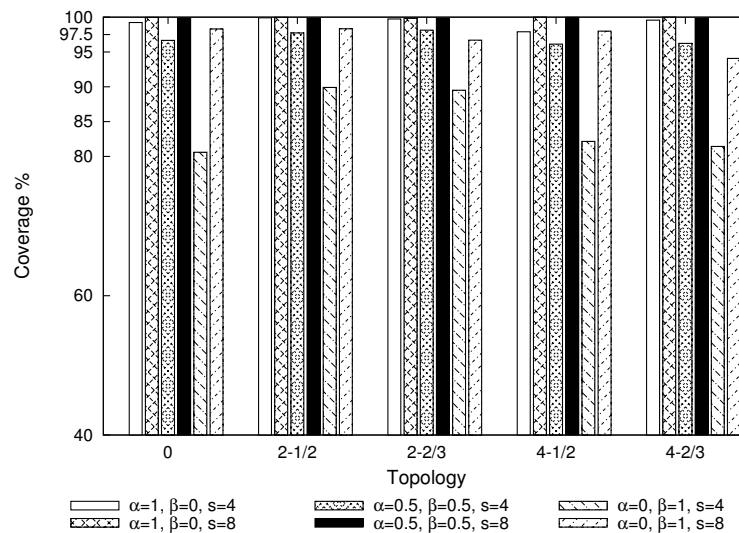
Σχήμα 4.14: Κατανάλωση ενέργειας του πρωτοκόλλου P3 για διάφορα α, β για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$



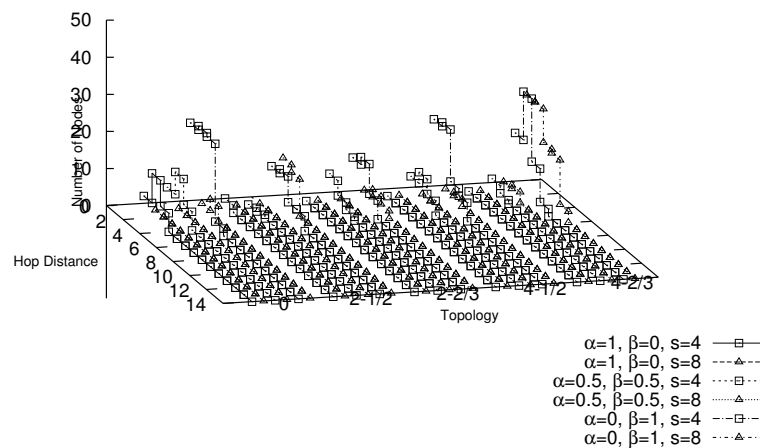
Σχήμα 4.15: Μέση καθυστέρηση του πρωτοκόλλου P3 για διάφορα α, β για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

όλων των υπόλοιπων. Όταν το $\mathcal{S}$ κινείται γρήγορα δεν έχουν αρκετό χρόνο και έτσι υπάρχουν επαναμεταδόσεις πακέτων και μερικές απώλειες. Λόγω αυτών των φαινομένων, παρόλο που όλοι οι κόμβοι είχαν ευκαιρία να επικοινωνήσουν με το κέντρο ελέγχου (κάλυψη $> 97\%$), πολλά μηνύματα δεν παραδόθηκαν. Το να ανανεωθούν τα μονοπάτια έγκαιρα είναι δύσκολο στην περίπτωση του κινητού κέντρου ελέγχου, έτσι μέχρι να βρεθεί εναλλακτικό μονοπάτι τα μηνύματα ακολουθούν άκυρα μονοπάτια, γεγονός που οδηγεί σε μείωση του ποσοστού παράδοσης.

4.4 Πειραματική αξιολόγηση



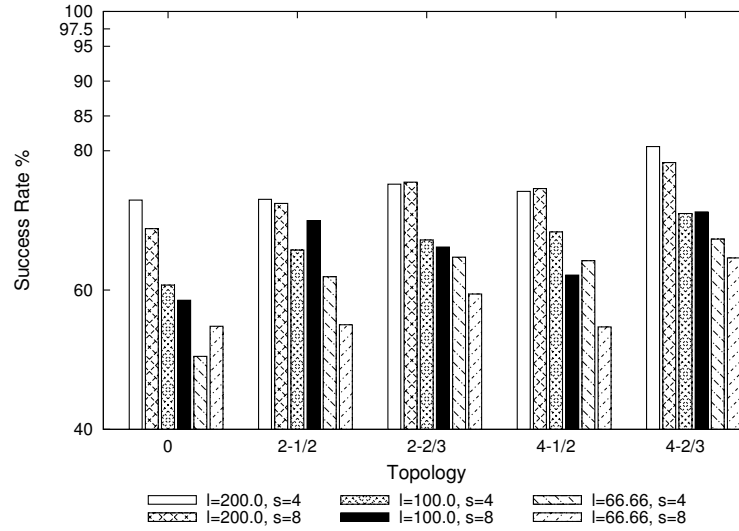
Σχήμα 4.16: Καλυπτόμενο υποσύνολο του πρωτοκόλλου P3 για διάφορα α, β για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$



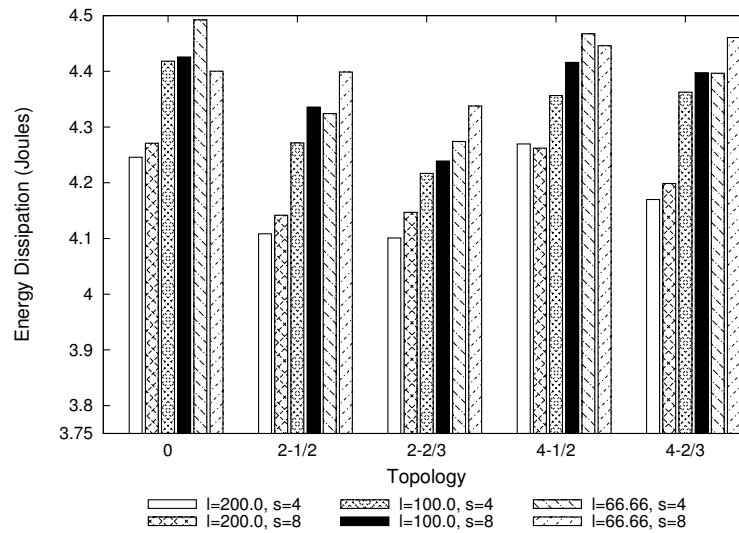
Σχήμα 4.17: Απόσταση κάλυψης του πρωτοκόλλου P3 για διάφορα α, β για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για ορθή επιλογή των tll, j και s , καλοί συμβιβασμοί μπορούν να επιτευχθούν ανάμεσα στο ποσοστό επιτυχούς παράδοσης, την κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση παράδοσης. Όταν εξετάζουμε διαφορετικές τοπολογίες με θύλακες προσέχουμε ότι η κατανάλωση ενέργειας και η καθυστέρηση αυξάνονται ειδικά στην περίπτωση που

έχουμε μόνο δύο θύλακες και όταν $\frac{n_P}{n_n} = 2/3$. Σε περιοχές υψηλής πυκνότητας τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν πολλές μεταδόσεις αντιμετωπίζουν πρόβλημα με συγκρούσεις στο επίπεδο διαχείρισης του μέσου



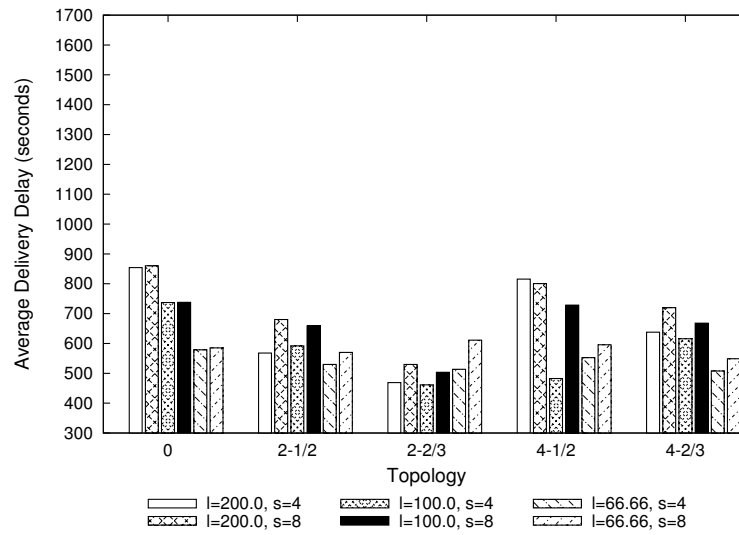
Σχήμα 4.18: Ποσοστό επιτυχίας του πρωτοκόλλου P4 με κυκλική τροχιά μεταβλητού μήκους l για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$



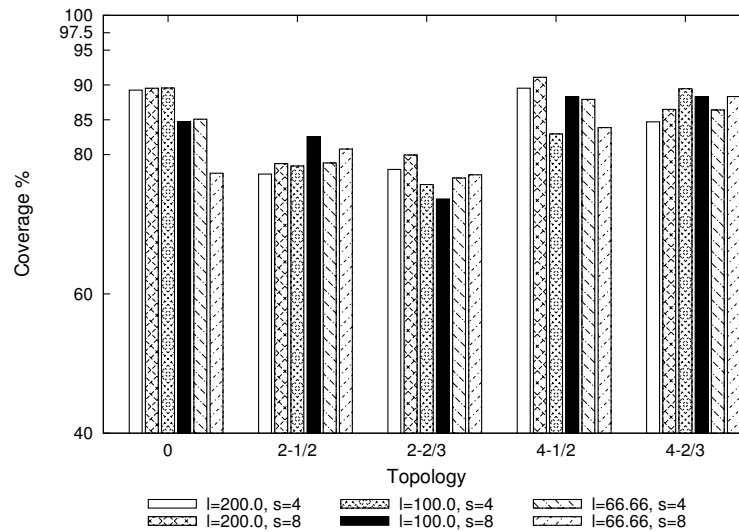
Σχήμα 4.19: Κατανάλωση ενέργειας του πρωτοκόλλου P4 με κυκλική τροχιά μεταβλητού μήκους l για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

Στα σχήματα 4.13--4.17 εξετάζουμε την απόδοση του ευνοιοκρατικού πιθανοτικού πρωτοκόλλου μας P3. Πρώτα παρατηρούμε ότι όταν το πρωτόκολλο ευνοεί τις περιοχές με λιγότερες

4.4 Πειραματική αξιολόγηση

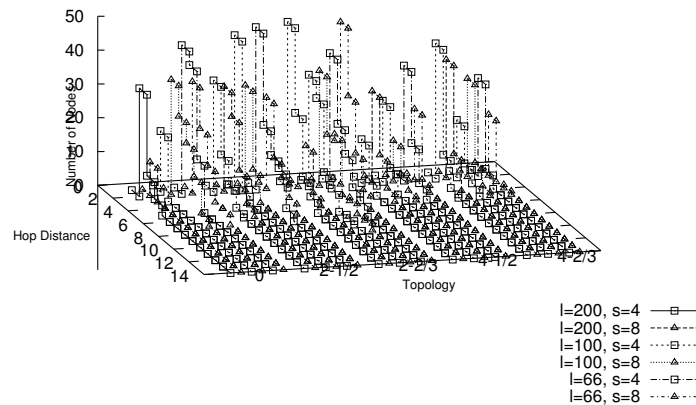


Σχήμα 4.20: Μέση καθυστέρηση του πρωτοκόλλου P4 με κυκλική τροχιά μεταβλητού μήκους l για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$



Σχήμα 4.21: Καλυπτόμενο υποσύνολο του πρωτοκόλλου P4 με κυκλική τροχιά μεταβλητού μήκους l για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

επισκέψεις ($\alpha = 1.0, \beta = 0.0$), έχουμε πολύ καλή απόδοση. Το ποσοστό επιτυχίας φτάνει το 99.7%, η κατανάλωση ενέργειας και η καθυστέρηση είναι σε χαμηλά επίπεδα, ενώ καλύπτονται όλοι οι κόμβοι. Όταν το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί και τις δύο συνιστώσες, ως προς τη συχνότητα και την πυκνότητα ($\alpha = 0.5, \beta = 0.5$), πετυχαίνει καλό ποσοστό παράδοσης (92%--98%), αλλά λίγο χαμηλότερο σε σχέση με την εύνοια με βάση την συχνότητα επισκέψεων. Η κατανάλωση ενέργειας μένει ίδια αλλά η καθυστέρηση αυξάνει. Όταν ευνοούνται οι περιοχές

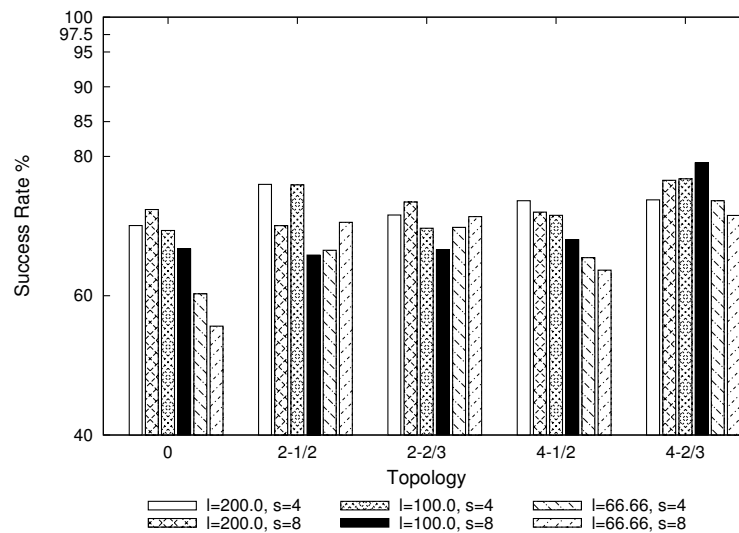


Σχήμα 4.22: Απόσταση κάλυψης του πρωτοκόλλου P4 με κυκλική τροχιά μεταβλητού μήκους l για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

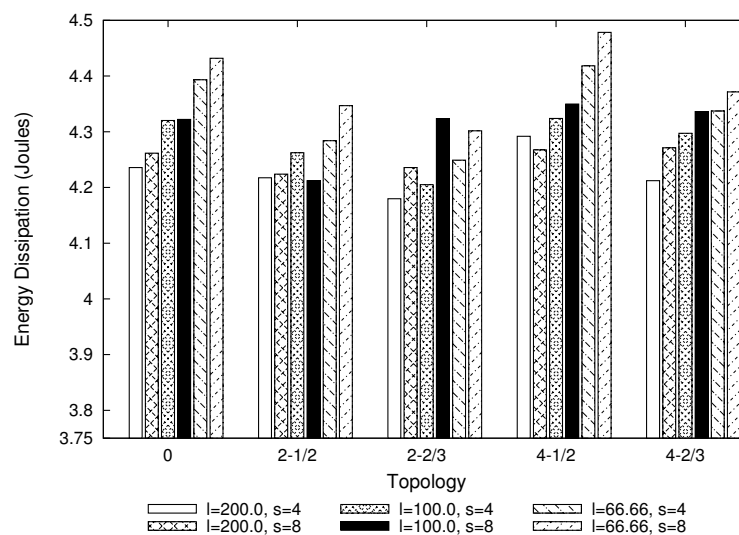
με μεγάλη πυκνότητα, ($\alpha = 0.0, \beta = 1.0$), το πρωτόκολλο πετυχαίνει ποσοστό επιτυχίας από 75% μέχρι 95%, σχεδόν ίδια κατανάλωση ενέργειας, αλλά υψηλότερη καθυστέρηση και χαμηλότερη κάλυψη από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Σε κάθε περίπτωση, αύξηση της ταχύτητας s επιφέρει βελτίωση στο ποσοστό επιτυχίας και την καθυστέρηση, ειδικά όταν $\alpha = 0.0, \beta = 1.0$. Αυτό το αποτέλεσμα έρχεται να επιβεβαιώσει τα υπόλοιπα αποτελέσματα που έχουμε ως τώρα. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι στην περίπτωση που $\alpha = 1.0, \beta = 0.0$, το $\mathcal{S}$ καλύπτει το δίκτυο γρήγορα. Το πρωτόκολλο προσπαθεί να επισκεφτεί με την ίδια συχνότητα τις διάφορες περιοχές του δικτύου, περνώντας πολλές φορές από την κάθε μία και συνεπώς συλλέγοντας όλα τα δεδομένα. Αντίθετα, όταν $\alpha = 0.0, \beta = 1.0$ το $\mathcal{S}$ παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα στις περιοχές με την μεγαλύτερη πυκνότητα και χρειάζεται αρκετό χρόνο για να επισκεφθεί νέες περιοχές. Όταν $\alpha = 0.0, \beta = 1.0$, η κάλυψη είναι γύρω στο 80-90% για $s = 4$ και περίπου 95% για $s = 8$, δηλαδή το κινητό κέντρο ελέγχου δεν επισκέπτεται όλες τις περιοχές. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται και όταν έχουμε δύο θύλακες και ταχύτητα $s = 4$: το $\mathcal{S}$ μένει κυρίως στις δύο πυκνές περιοχές. Αφού οι θύλακες περιέχουν πολλούς κόμβους, συλλέγει περισσότερα δεδομένα από την περίπτωση μηδέν ή τεσσάρων θυλάκων, επομένως η ισχυρή εύνοια που δείχνει σε αυτές τις περιοχές, αποδίδει μόνο όταν είναι πολύ πυκνές. Όταν $\alpha = 0.5, \beta = 0.5$ μία ενδιάμεση συμπεριφορά παρατηρείτε αλλά η επίδραση της κίνησης με βάση την συχνότητα φαίνεται να υπερνικά την εύνοια της πυκνότητας, αφού τα αποτελέσματα είναι πιο κοντά στην περίπτωση των $\alpha = 1.0, \beta = 0.0$.

Εξετάζουμε την επίδραση της ντετερμινιστικής κίνησης στα σχήματα 4.18--4.22 και 4.23--4.27 για κυκλικές και ευθύγραμμες τροχιές αντίστοιχα. Προσέχουμε ότι το μήκος της τροχιάς επηρεάζει σημαντικά τις επιδόσεις του P4. Και οι κυκλικές και οι ευθύγραμμες τροχιές όταν μειώνεται το l μειώνεται το ποσοστό παράδοσης και αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι σχηματίζονται μεγαλύτερα μονοπάτια και τα πακέτα διανύουν μεγάλη απόσταση σε σύγκριση με τις υπόλοιπες λύσεις. Επίσης, η καθυστέρηση μειώνεται όταν το l μειώνεται, που

4.4 Πειραματική αξιολόγηση

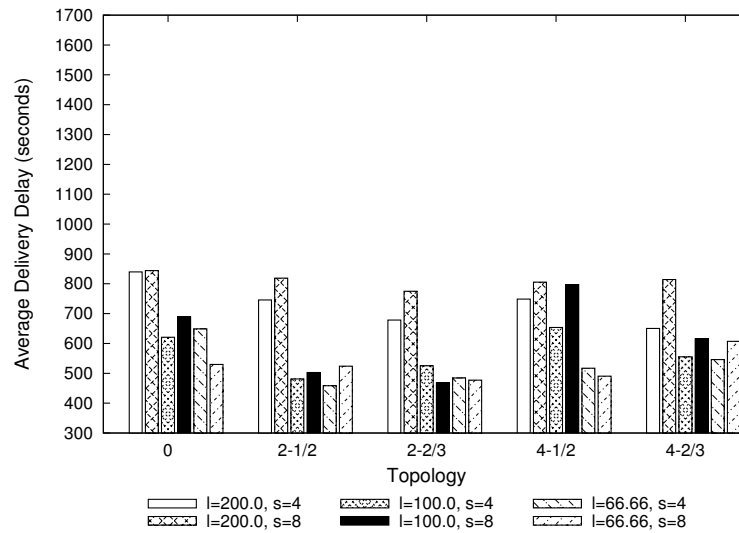


Σχήμα 4.23: Ποσοστό επιτυχίας του πρωτοκόλλου P4 με γραμμική τροχιά μεταβλητού μήκους l για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

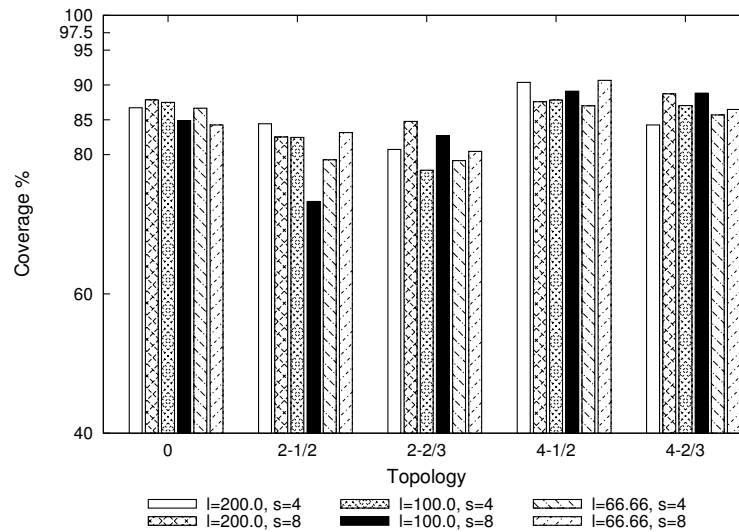


Σχήμα 4.24: Κατανάλωση ενέργειας του πρωτοκόλλου P4 με γραμμική τροχιά μεταβλητού μήκους l για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

είναι αναμενόμενο αφού η περίοδος κατά την οποία το S διέρχεται από το ίδιο σημείο μειώνεται. Η κάλυψη κυμαίνεται από 75% σε 90%, όπως βλέπουμε στο σχήμα 4.21, ενώ στο σχήμα 4.27 βλέπουμε ότι οι περισσότεροι με καλυπτόμενοι κόμβοι βρίσκονται 2 με 6 μεταδόσεις μακριά από τον κοντινότερο καλυπτόμενο κόμβο κάτι που υποδεικνύει ότι κάποιες περιοχές του δικτύου είναι αποκομμένες από το υπόλοιπο. Η επίδραση της αύξησης της ταχύτητας είναι κυρίως αρνητική αφού στις περισσότερες περιπτώσεις το ποσοστό επιτυχίας μειώνεται, ενώ η κατανάλωση και η



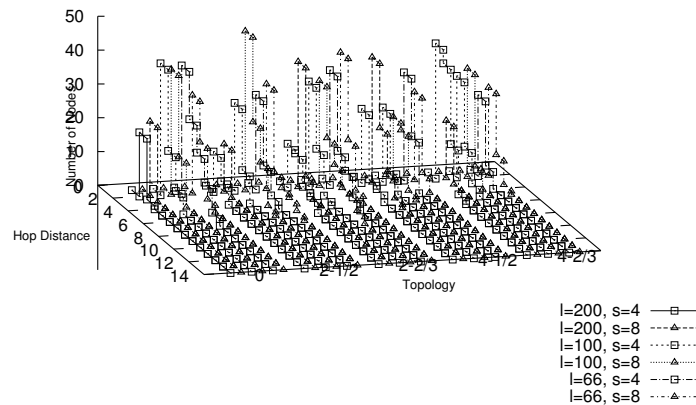
Σχήμα 4.25: Μέση καθυστέρηση του πρωτοκόλλου P4 με γραμμική τροχιά μεταβλητού μήκους l για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$



Σχήμα 4.26: Καλυπτόμενο υποσύνολο του πρωτοκόλλου P4 με γραμμική τροχιά μεταβλητού μήκους l για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

καθυστέρηση αυξάνονται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός που παρατηρήσαμε και όταν εξετάζαμε το P2, οι κόμβοι που βρίσκονται σε άμεση επικοινωνία με το S , έχουν λιγότερο χρόνο να αποστείλουν τα μηνύματα που έχουν συγκεντρώσει, οι συγκρούσεις αυξάνονται λόγω των πολλών μεταδόσεων ενώ μέρη του δικτύου είναι αποκομμένα ειδικά όταν μεγάλο ποσοστό των κόμβων βρίσκεται σε θύλακες οπότε και η πυκνότητα στο υπόλοιπο δίκτυο μειώνεται. όταν εξετάζουμε διαφορετικές τοπολογίες, παρατηρούμε ότι η κυκλικές τροχιές εμφανίζουν λίγο καλύτερη

4.4 Πειραματική αξιολόγηση

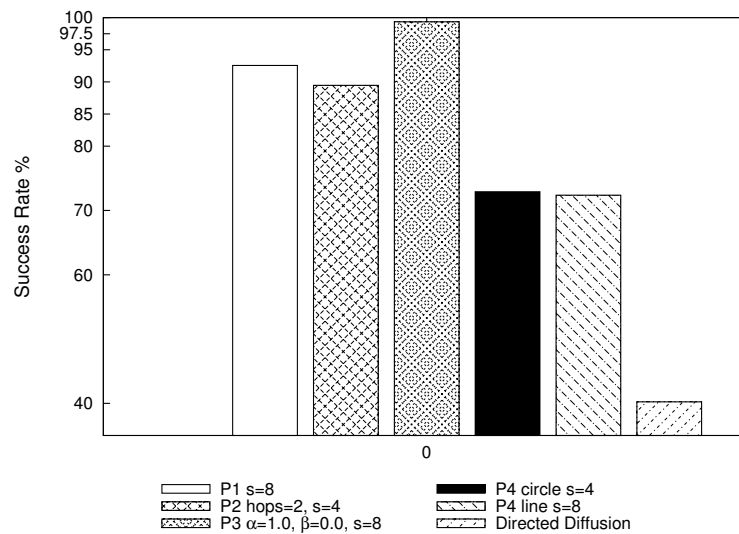


Σχήμα 4.27: Απόσταση κάλυψης του πρωτοκόλλου P4 με γραμμική τροχιά μεταβλητού μήκους l για τοπολογίες με 0, 2 και 4 θύλακες με πυκνότητα $\frac{n_P}{n_n} \in \{1/2, 2/3\}$

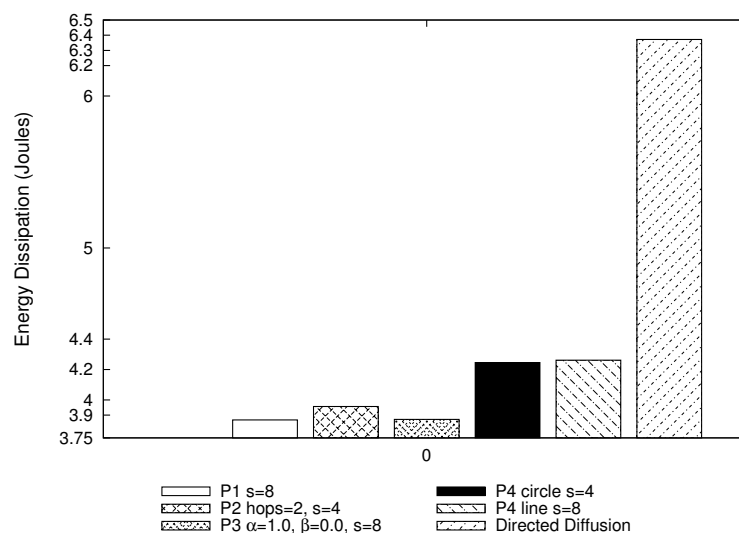
απόδοση (ως προς το ποσοστό παράδοσης και την κατανάλωση ενέργειας), όταν υπάρχουν θύλακες και ειδικά όταν $l = 200$. Αυτό οφείλεται στο ότι η κυκλική τροχιά είναι πιο «απλωμένη» στο δίκτυο οπότε η μέση απόσταση του S από τους κόμβους μειώνεται, ενώ περνάει και πιο κοντά από τους θύλακες. Γενικά, παρατηρούμε ότι το P4 με κυκλική τροχιά είναι καλύτερο όταν $l = 200$ αλλά καθώς το μήκος l μειώνεται, το P4 με ευθύγραμμη τροχιά αποδίδει καλύτερα.

Κλείνοντας, στην τελευταία σειρά πειραμάτων αξιολογούμε συνολικά την απόδοση των πρωτοκόλλων μας σε σχέση με το καθιερωμένο μοντέλο του ακίνητου κέντρου ελέγχου. Επιλέγουμε πέντε διαφορετικές ρυθμίσεις για τα πρωτόκολλά μας, αυτές που εμφανίζουν την καλύτερη απόδοση για το κάθε ένα, και τα συγκρίνουμε με ένα καθιερωμένο πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί μονοπάτια διάδοσης, το **Directed Diffusion** [37]. Σε αυτό το πείραμα εξετάζουμε μόνο την περίπτωση τυχαίας ομοιόμορφης κατανομής των κόμβων στο δίκτυο. Το κέντρο ελέγχου τοποθετείται στο σημείο $(D/2, 0)$ στατικά στην περίπτωση του **Directed Diffusion**. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4.28, τα πρωτόκολλά μας επιτυγχάνουν πολύ καλύτερο ποσοστό επιτυχούς παράδοσης δεδομένων (μέχρι και 140% περισσότερη) και πολύ χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, περίπου 40% λιγότερη από αυτή του **Directed Diffusion**, (δείτε σχήμα 4.29). Αυτό είναι αναμενόμενο αφού το **Directed Diffusion** πρέπει να κατασκευάσει μονοπάτια για δρομολόγηση σε όλο το δίκτυο αυξάνοντας την κατανάλωση ενέργειας. Απ' την άλλη, μπορεί να μην είναι εφικτό να σχηματιστεί μία καθολική δομή δρομολόγησης σε δίκτυα μέτριας πυκνότητας όπως αυτά που δοκιμάζουμε εδώ, επομένως μειώνεται το ποσοστό παράδοσης. Έτσι φαίνεται πως με τη χρήση ενός κινητού κέντρου ελέγχου και σε συνδυασμό με μία κατάλληλη στρατηγική, μπορούμε να χειριστούμε αραιές και ανομοιογενείς τοπολογίες και να παρατείνουμε το χρόνο ζωής του δικτύου. Το μεγαλύτερο πρόβλημα με την προσέγγισή μας είναι η σημαντική καθυστέρηση στην παράδοση, αφού το **Directed Diffusion** πετυχαίνει καθυστέρηση της τάξης ενός δευτερολέπτου ενώ τα πρωτόκολλά μας αρκετές εκατοντάδες δευτερόλεπτα. Αυτό καθιστά ακατάλληλη την προσέγγισή μας για περιπτώσεις εφαρμογών που χρειάζεται άμεση αντίδραση

στα δεδομένα που καταγράφει το δίκτυο.

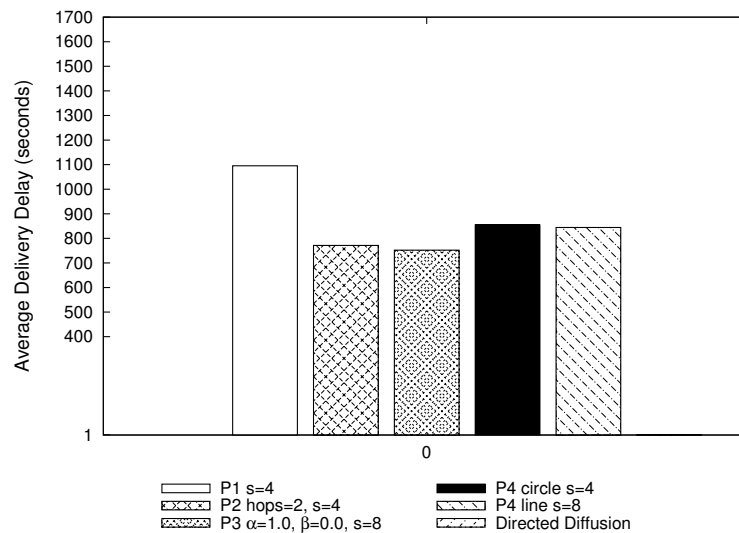


Σχήμα 4.28: Ποσοστό επιτυχίας των πρωτοκόλλων P1, P2, P3, P4 και του Directed Diffusion για ομοιόμορφη τοπολογία



Σχήμα 4.29: Κατανάλωση ενέργειας των πρωτοκόλλων P1, P2, P3, P4 και του Directed Diffusion για ομοιόμορφη τοπολογία

4.5 Συμπεράσματα και συζήτηση



Σχήμα 4.30: Μέση καθυστέρηση των πρωτοκόλλων P1, P2, P3, P4 και του Directed Diffusion για ομοιόμορφη τοπολογία

4.5 Συμπεράσματα και συζήτηση

Σε αυτό το κεφάλαιο διερευνήσαμε τον αντίκτυπο που έχει η ύπαρξη ενός *κινητού κέντρου ελέγχου που σαρώνει την περιοχή του δικτύου και συλλέγει δεδομένα*. Αυτή η κατηγορία δικτύων αποτελεί μια νέα προσέγγιση που έχει σημαντικές εφαρμογές και πλεονεκτήματα αλλά παράλληλα απαιτεί την δημιουργία νέων αποδοτικών πρωτοκόλλων. Προτείνουμε μια συλλογή από τεχνικές διάσχισης του δικτύου όπου καθεμία συνδυάζεται με μια κατάλληλη μέθοδο συλλογής δεδομένων. Η τεχνικές διάσχισης βασίζονται κυρίως σε τυχαίους ή πιθανοτικούς αλγορίθμους που καλύπτουν πλήρως ή και μερικώς το δίκτυο, ενώ εξετάσαμε και ντετερμινιστικές τεχνικές. Από τις τεχνικές διάσχισης ξεχωρίζει λόγω των πολύ θετικών αποτελεσμάτων, η πιθανοτική διάσχιση με ευνοιοκρατικά κριτήρια, που ευνοεί περιοχές με μεγάλη πυκνότητα ή με μικρή επισκεψιμότητα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί πλήρη συλλογή των δεδομένων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, αλλά με σημαντικό αντίκτυπο στην καθυστέρηση.

Η εργασία αυτή μπορεί να επεκταθεί με τρόπους που θα δούμε πιο αναλυτικά σε επόμενες παραγράφους, ενδεικτικά αναφέρουμε την διερεύνηση νέων μεθόδων για να επηρεάσουμε την κίνηση των κόμβων πιθανότητα αλλάζοντας εκτός από την τροχιά και την ταχύτητά τους. Μια ακόμα συναρπαστική δυνατότητα είναι ύπαρξη πολλών κινητών κέντρων ελέγχου, σενάριο που εξετάζουμε συνοπτικά στις επόμενες ενότητες.

4.6 Τεχνικές καταναμεμένου συντονισμού κινητών κέντρων ελέγχου

Συνεχίζουμε την ενασχόλησή μας με το πρόβλημα της διαχείρισης της κινητικότητας. Είδαμε ότι υποθέτοντας μόνο ένα κινητό κέντρο ελέγχου μπορούμε να συλλέξουμε αποτελεσματικά την πληροφορία από ένα δίκτυο μικροαισθητήρων και παράλληλα να μειώσουμε σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας. Ταυτόχρονα όμως διαπιστώσαμε ότι αυξάνεται σημαντικά η καθυστέρηση στη συλλογή της πληροφορίας, αφού το κέντρο ελέγχου πρέπει να επισκεφθεί πρακτικά όλη την περιοχή που καλύπτει το δίκτυο. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για αυτή την επίσκεψη εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία κινείται το κέντρο ελέγχου, αλλά και από την ποσότητα των δεδομένων αφού ο ρυθμός μεταγωγής δεδομένων από τις συσκευές στο κέντρο ελέγχου είναι περιορισμένος. Επομένως, υπάρχουν αξιόπιστα φυσικά όρια στην απόδοση που μπορούμε να πετύχουμε με ένα κινητό κέντρο ελέγχου. Επεκτείνουμε την έρευνά μας υποθέτοντας την ύπαρξη πολλών κινητών κέντρων ελέγχου. Τα προβλήματα που προκύπτουν παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον αφού οι αλγόριθμοι που αναπτύξαμε στις προηγούμενες παραγράφους δεν είναι προφανές ότι θα αποδίδουν το ίδιο καλά κάτω από αυτή την υπόθεση. Επιπλέον η προσθήκη πολλών κέντρων ελέγχου προσθέτει σημαντικό κόστος στη λειτουργία του δικτύου καθώς αυξάνεται ο αριθμός μηνυμάτων που ανταλλάσσονται με τους κόμβους του δικτύου. Επιπλέον προκύπτουν και θέματα συνεργασίας των κέντρων ελέγχου, καθώς είναι πιθανό να συναγωνίζονται το ένα το άλλο για την εξυπηρέτηση του δικτύου με αποτέλεσμα να μην πετυχαίνουμε αύξηση της απόδοσης όσο αυξάνεται ο αριθμός των κέντρων ελέγχου.

4.6.1 Μοντελοποίηση δικτύων αισθητήρων με κινητά στοιχεία

Η μοντελοποίηση του δικτύου ακολουθεί τις παραδοχές που έχουμε δει ως τώρα σε προηγούμενη παράγραφο. Διαφοροποιούμαστε στο ότι πλέον μπορεί να υπάρχουν περισσότερα από ένα σημεία στο δίκτυο όπου μπορεί να αναφερθεί πληροφορία. Έστω ότι έχουμε k στοιχεία στο δίκτυο που ενεργούν σαν συλλογείς δεδομένων από τις συσκευές αισθητήρων και $\mathcal{S}$ το σύνολο αυτών $\mathcal{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$. Υποθέτουμε ότι κάθε στοιχείο μπορεί να μένει σταθερό σε μια θέση ή να κινείται όπως ορίζει κάποια συνάρτηση κίνησης. Υποθέτουμε ότι τα κέντρα ελέγχου γνωρίζουν τη θέση τους στο δίκτυο και ότι είναι ισοδύναμα στην συλλογή πληροφορίας, δηλαδή ένα μήνυμα χρειάζεται να παραδοθεί σε ένα οποιοδήποτε κέντρο ελέγχου για να θεωρήσουμε την παράδοση επιτυχή.

4.6.2 Πρωτόκολλα κίνησης και συλλογής πληροφορίας για πολλά κινητά κέντρα ελέγχου

Μελετάμε διαφορετικές περιπτώσεις δικτύων και προτείνουμε τρία πρωτόκολλα που συνδυάζουν διαφορετικές στρατηγικές κίνησης με τεχνικές συλλογής δεδομένων.

Τυχαία κίνηση χωρίς συντονισμό

Στην πρώτη περίπτωση εξετάζουμε δίκτυα όπου όλα τα κέντρα ελέγχου μπορούν να κινούνται το ένα ανεξάρτητα από το άλλο. Το πρώτο πρωτόκολλο που προτείνουμε χρησιμοποιεί τη

4.6 Τεχνικές καταναμεμημένου συντονισμού κινητών κέντρων ελέγχου

στρατηγική κίνησης τυχαίου περιπάτου. Η συλλογή δεδομένων γίνεται παθητικά, τα κέντρα ελέγχου περιοδικά ανακοινώνουν την παρουσία τους μεταδίδοντας ένα μήνυμα. Όσες συσκευές λαμβάνουν ένα τέτοιο μήνυμα-ανακοίνωση μεταδίδουν τα δεδομένα τους στο κέντρο ελέγχου που το έστειλε.

Μεικτά δίκτυα με κινητά και ακίνητα κέντρα ελέγχου

Η δεύτερη περίπτωση δικτύου υποθέτει ότι κάποια κέντρα ελέγχου παραμένουν ακίνητα, είτε επειδή θέλουμε να μειώσουμε το κόστος είτε επειδή απλά δεν έχουν αυτή τη δυνατότητα. Τα κινητά κέντρα ελέγχου χρησιμοποιούν τη στρατηγική κίνησης τυχαίου περιπάτου. Το πρωτόκολλο που προτείνουμε εδώ ορίζει ότι η συλλογή δεδομένων γίνεται με χρήση δένδρων διάδοσης περιορισμένου βάθους. Κάθε κέντρο ελέγχου είναι η ρίζα ενός τέτοιου δέντρου και εκπέμπει περιοδικά μηνύματα τα οποία κατασκευάζουν ή επισκευάζουν τα δένδρα.

Τυχαία κίνηση και απώθηση κινητών κέντρων ελέγχου

Στη συνέχεια υποθέτοντας μειωμένη κινητικότητα των κέντρων ελέγχου προτείνουμε ένα πρωτόκολλο που διαφοροποιείται στο ότι συντονίζει με ασύνδετο τρόπο τα κέντρα ελέγχου, προσπαθώντας να τα απομακρύνει το ένα από το άλλο. Η συλλογή δεδομένων γίνεται με χρήση δένδρων διάδοσης περιορισμένου βάθους, όμως το πρωτόκολλο που προτείνουμε εδώ μεταδίδει επιπλέον πληροφορία που αφορά την τρέχουσα θέση του κάθε κέντρου ελέγχου, πακεταρισμένη στα μηνύματα που χρησιμεύουν για την κατασκευή των δένδρων. Η κίνηση των κέντρων ελέγχου γίνεται ακολουθώντας τη στρατηγική τυχαίου περιπάτου, με μία σημαντική διαφοροποίηση. Όταν ένα κέντρο ελέγχου λάβει ένα μήνυμα κατασκευής δέντρου που προέρχεται από κάποιο άλλο κέντρο ελέγχου, τότε το πρωτόκολλο *αλλάζει με ντετερμινιστικό τρόπο την πορεία* και των δύο κέντρων ελέγχου. Συγκεκριμένα, κάθε κινητό στοιχείο χρησιμοποιώντας την πληροφορία για τη θέση του άλλου κέντρου ελέγχου που περιέχεται στο μήνυμα, αλλάζει το διάνυσμα της ταχύτητάς του ώστε να απωθηθεί από αυτή την περιοχή. Η δύναμη της απώθησης εξαρτάται από την απόσταση των δύο κέντρων ελέγχου, όσο πιο κοντά βρίσκονται τόσο μεγαλύτερη είναι και η αλλαγή στην κατεύθυνση κίνησης.

Πιο αναλυτικά, ένα κινητό κέντρο ελέγχου S_i που ανιχνεύει ένα άλλο κέντρο ελέγχου S_j , υπολογίζει το διάνυσμα $\vec{r}$ με φορέα διεύθυνσης τη γραμμή που ενώνει τα S_i , S_j και με διεύθυνση αντίθετη προς το S_j . Επίσης, $|\vec{r}| = \gamma \cdot |S_i|$ όπου γ μία τιμή που εξαρτάται από την απόσταση ανάμεσα στα δύο κέντρα ελέγχου:

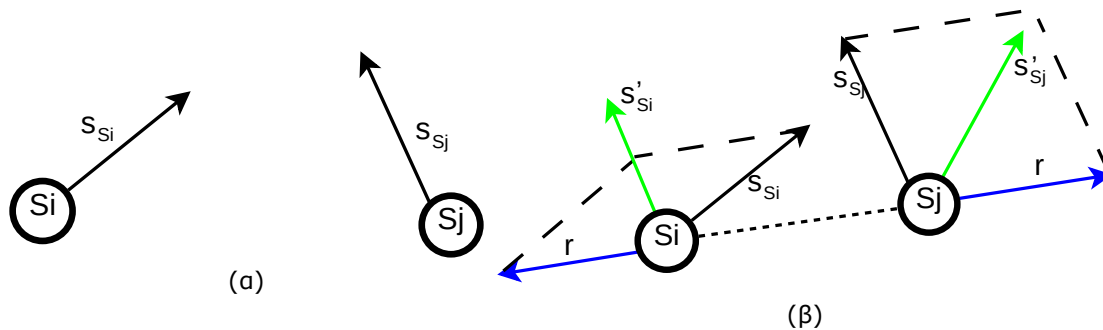
$$\gamma = \begin{cases} \frac{R}{d} & \text{εάν } [\frac{d}{R}] \leq \beta \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου d η απόσταση ανάμεσα σε S_i και S_j και R η ακτίνα διάδοσής τους. Το β είναι μία παράμετρος του πρωτοκόλλου που τίθεται από το διαχειριστή και ελέγχει την απόσταση (υπολογισμένη από $[\frac{d}{R}]$) μέσα στην οποία επηρεάζουν το ένα το άλλο.

Τότε, S_i υπολογίζει μια νέα κατεύθυνση ως εξής:

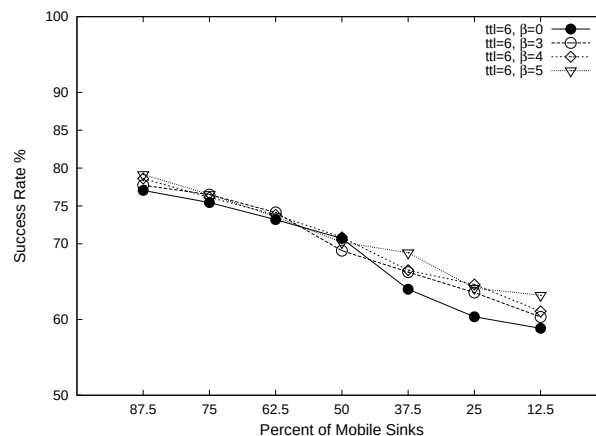
$$s'_{S_i} = \vec{r} + s_{S_i}$$

ενώ διατηρεί το μέτρο της ταχύτητας σταθερό $|\vec{s}'_{S_i}| = |\vec{s}_{S_i}|$. Η απώθηση είναι συμμετρική και για το S_j , στη συνήθη περίπτωση που και το S_j ανιχνεύσει το S_i . Ένα παράδειγμα μπορείτε να δείτε στο σχήμα 4.31.



Σχήμα 4.31: Το αποτέλεσμα της απώθησης α) αρχικά διανύσματα ταχύτητας β) διασταύρωση και νέα διανύσματα ταχύτητας (προσέξτε πως $|\vec{s}'_{S_i}| = |\vec{s}_{S_i}|$ και $|\vec{s}'_{S_j}| = |\vec{s}_{S_j}|$)

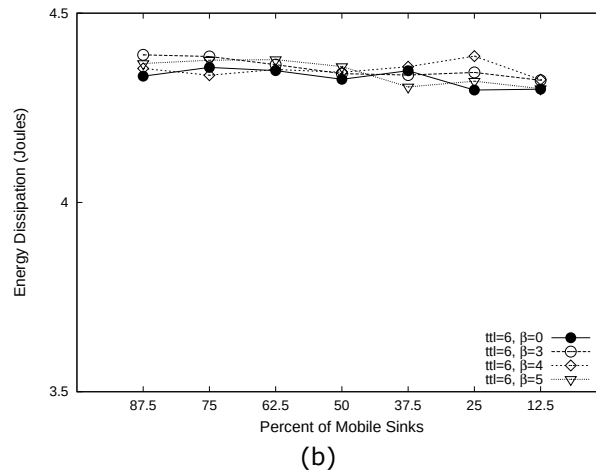
4.6.3 Αποτελέσματα και συμπεράσματα



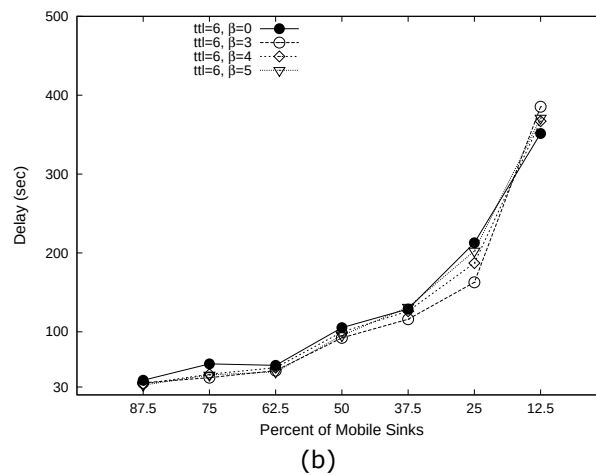
Σχήμα 4.32: Ποσοστό επιτυχίας για τη μεικτή περίπτωση στατικών και κινητών κέντρων ελέγχου με παραμέτρους απώθησης $\beta \in \{3, 4, 5\}$ όταν $TTL = 6$

Υλοποιούμε τα πρωτόκολλα μας στον προσομοιωτή δικτύων **ns-2** και εκτελούμε πειράματα στα οποία εξετάζουμε τις παραπάνω περιπτώσεις δικτύων τοποθετώντας από ένα μέχρι οκτώ, κινητά και ακίνητα, κέντρα ελέγχου. Μετρούμε το ποσοστό των παραδοθέντων μηνυμάτων ως προς το συνολικό αριθμό μηνυμάτων, τη μέση κατανάλωση ενέργειας και τη μέση καθυστέρηση από την στιγμή που δημιουργήθηκε η πληροφορία μέχρι την παράδοσή της στο κέντρο ελέγχου. Παρατηρούμε ότι στην πρώτη περίπτωση το πρωτόκολλό μας πετυχαίνει υψηλό ποσοστό παράδοσης και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ενώ όσο ο αριθμός των κέντρων ελέγχου αυξάνει, μειώνεται σημαντικά η καθυστέρηση. Ακόμα και με τέσσερα κινητά κέντρα ελέγχου η

4.6 Τεχνικές κατανομής συντονισμού κινητών κέντρων ελέγχου



Σχήμα 4.33: Κατανάλωση ενέργειας για τη μεικτή περίπτωση στατικών και κινητών κέντρων ελέγχου με παραμέτρους απώθησης $\beta \in \{3, 4, 5\}$ όταν $TTL = 6$



Σχήμα 4.34: Καθυστέρηση για τη μεικτή περίπτωση στατικών και κινητών κέντρων ελέγχου με παραμέτρους απώθησης $\beta \in \{3, 4, 5\}$ όταν $TTL = 6$

καθυστέρηση μειώνεται κατά 500% ενώ με επτά κέντρα ελέγχου, η μείωση είναι της τάξης του επιπλέον 100% βελτίωση. Στη μεικτή περίπτωση κινητών και σταθερών κέντρων ελέγχου το δεύτερο πρωτόκολλό μας πετυχαίνει λίγο χαμηλότερο ποσοστό παράδοσης και υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας αλλά μειώνει την καθυστέρηση κατά μία τάξη μεγέθους ακόμα και όταν μόνο τρία κέντρα ελέγχου κινούνται. Το πρωτόκολλο απώθησης παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το δεύτερο πρωτόκολλο αλλά μειώνει ακόμα περισσότερο την καθυστέρηση.

Κεφάλαιο 5

Προσαρμοστική διάδοση δεδομένων με κινητούς αισθητήρες

5.1 Εισαγωγή

Όπως επισημάναμε και σε προηγούμενα κεφάλαια, οι περισσότεροι ερευνητές μέχρι πρόσφατα διερευνούσαν περιπτώσεις δικτύων όπου το κέντρο ελέγχου παραμένει *στατικό* σε κάποιο σημείο του δικτύου, ενώ τα δεδομένα δρομολογούνται, με χρήση πολλών μεταδόσεων, από κόμβο σε κόμβο μέχρι να φτάσουν στο κέντρο ελέγχου, [22, 37]. Από την άλλη η μεγάλη πλειοψηφία των ερευνητικών εργασιών που υποθέτουν κίνηση στα δίκτυα αισθητήρων, υποθέτουν ότι μόνο το κέντρο ελέγχου ή ειδικά προορισμένες συσκευές κινούνται ενώ οι συσκευές αισθητήρων παραμένουν ακίνητες (δείτε [20, 41]), περίπτωση που εξετάσαμε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Όμως οι ραγδαίες εξελίξεις στα χαμηλής ενέργειας ενσωματωμένα συστήματα και τη ρομποτική, θα επιτρέψουν την εγκατάσταση αισθητήρων σε ευρεία κλίμακα στο άμεσο περιβάλλον όπου οι άνθρωποι ζουν και εργάζονται. Η διαθεσιμότητα τέτοιου όγκου πληροφορίας για το άμεσο περιβάλλον, αναμένεται να δώσει ώθηση σε νέες εφαρμογές όπως η επιτήρηση χώρων, παρακολούθηση περιβάλλοντος διαβίωσης, παρακολούθηση οικοσυστημάτων και μόλυνσης, διαχείριση κυκλοφορίας και άλλες. Σε αυτές τις περιπτώσεις *η κίνηση είναι κύριο χαρακτηριστικό του συστήματος*. Οι αισθητήρες μπορεί να ενσωματωθούν σε ρούχα, φορητές συσκευές, οχήματα, ρομπότ κλπ, τα οποία ακολουθούν τους ιδιοκτήτες που τα χρησιμοποιούν στην καθημερινή ζωή και εργασία τους.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι τέτοιες εφαρμογές έχουν συνήθως στόχο να συγκεντρώσουν σημαντική ποσότητα δεδομένων τα οποία υπόκεινται σε στατιστική επεξεργασία σε δεύτερο χρόνο προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα. Επιπλέον σε τέτοια δίκτυα άμεση αναφορά των δεδομένων είναι δύσκολη και έχει μεγάλο κόστος.

Αντίθετα, αυτό που μπορεί να γίνει είναι η τοπική αποθήκευση των δεδομένων στους αισθητήρες και η παράδοσή τους στο κέντρο ελέγχου να γίνεται ευκαιριακά όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές. Συγκεκριμένα, αφού οι αισθητήρες κινούνται μαζί με τα αντικείμενα στα οποία

είναι ενσωματωμένοι, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι μετά από κάποιο χρονικό διάστημα θα πλησιάσουν το κέντρο ελέγχου αρκετά ώστε να γίνει η παράδοση των δεδομένων με χαμηλό κόστος, πιθανότατα με μια μόνο μετάδοση. Αυτοί οι τύποι δικτύων ονομάζονται στη βιβλιογραφία και *δίκτυα ανεκτικά σε καθυστέρηση* (delay tolerant networks). Ένα σύνολο κόμβων ή όλοι, γίνονται *φορείς μηνυμάτων* δηλαδή αποθηκεύουν στη μνήμη τους όσο πιο πολλά μηνύματα γίνεται, είτε μηνύματα που παράγουν οι ίδιοι είτε άλλων κόμβων, μέχρι να συναντήσουν το κέντρο ελέγχου. Συνήθως δε ένα μήνυμα μεταδίδεται και αποθηκεύεται σε πολλούς κόμβους ώστε οι πλεονάζουσες αυτές μεταδόσεις να εξασφαλίσουν την παράδοση του μηνύματος και να αυξήσουν την πιθανότητα κάποιος φορέας του συγκεκριμένου μηνύματος να συναντήσει το κέντρο ελέγχου.

Αφού η μνήμη των συσκευών είναι περιορισμένη, είναι αδύνατο να διατηρήσουν όλα τα μηνύματα στη μνήμη έτσι υπάρχει ο κίνδυνος απώλειας όταν εξαντλείται η μνήμη. Επιπλέον, η διαδικασία συλλογής των δεδομένων με ευκαιριακό τρόπο, δεν μπορεί να παρεμβληθεί στη λειτουργία του συστήματος, για παράδειγμα δεν γίνεται να απαιτήσουμε από τον οδηγό κάποιου οχήματος να ακολουθήσει συγκεκριμένη διαδρομή ώστε να παραδοθούν τα δεδομένα που έχει συλλέξει. Επομένως, η κίνηση σε αυτό τον τύπο δικτύων είναι *ανεξέλεγκτη*. Ένα πρόσθετο χαρακτηριστικό, είναι το ότι οι κινητοί αισθητήρες μπορεί να ακολουθούν σημαντικά *διαφορετικές τροχιές αλλά και μορφές κίνησης*. Η μορφή κίνησης διαφέρει τόσο ανάμεσα σε διαφορετικούς αισθητήρες αλλά και στον ίδιο αισθητήρα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ανάλογα με το αντικείμενο στο οποίο είναι προσκολλημένος ο καθένας. Για παράδειγμα, αν αναλογιστούμε έναν άνθρωπο που περιμένει στη στάση του λεωφορείου για να μεταβεί στο χώρο εργασίας του, οι αισθητήρες που φέρει μαζί του πρώτα κινούνται ελάχιστα, έπειτα γρήγορα με συχνές στάσεις όσο βρίσκονται στο λεωφορείο και τέλος κινούνται αργά καθώς ο φορέας τους περπατά προς τον προορισμό του.

5.1.1 Σχετική βιβλιογραφία και συζήτηση

Όπως αναφέραμε, η κινητικότητα στα δίκτυα αισθητήρων έχει μελετηθεί κυρίως από τη σκοπιά της ύπαρξης δυνατότητας κίνησης μόνο στο κέντρο ελέγχου ή σε λίγους ειδικούς κόμβους που προορίζονται για υποστήριξη του δικτύου και διευκόλυνση της διάδοσης δεδομένων. Παρουσιάσαμε αρκετές εργασίες σχετικές με κινητά κέντρα ελέγχου στην παράγραφο 4.1.2.

Όσον αφορά δίκτυα με κίνηση των αισθητήρων, στο [40] παρουσιάζεται μία μελέτη εφαρμογών δικτύων ομοτίμων σε κινητά ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων. Στόχος είναι η παρακολούθηση των κινήσεων ενός κοπαδιού από ζέβρες, μια πιλοτική εφαρμογή με σημαντικές προεκτάσεις για την έρευνα στη βιολογία. Οι συγγραφείς υποθέτουν απλά μοντέλα κίνησης που διαφοροποιούν την ταχύτητα των κόμβων σε τρεις στάθμες. Η διάδοση δεδομένων βασίζεται στην διατήρηση ιστορικού επισκέψεων στο κέντρο ελέγχου, υποθέτοντας ότι οι κόμβοι που έχουν επισκεφθεί το κέντρο ελέγχου πολλές φορές είναι πιο πιθανό να το ξαναεπισκεφτούν, προτιμούνται για να μεταφέρουν δεδομένα. Η διάδοση των δεδομένων γίνεται με πλεονασμό δηλαδή τα ίδια δεδομένα προωθούνται σε διαφορετικούς γείτονες προκειμένου να αυξηθεί πιθανότητα παράδοσής τους. Στο [59] οι συγγραφείς επίσης προτείνουν ένα μηχανισμό διάδοσης πληροφορίας που επιλέγει τους καταλληλότερους κόμβους με βάση το ιστορικό επισκέψεων. Επιπλέον, υποθέτουν περιορισμένη μνήμη στις συσκευές και προτείνουν ένα μηχανισμό απόρριψης δεδομένων από τη μνήμη που βασίζεται στην πιθανότητα που έχει μία πληροφορία να παραδοθεί. Η πιθανότητα αυτή εκτιμάται ανάλογα με το πόσες φορές έχει προωθηθεί το κάθε

5.1 Εισαγωγή

μήνυμα σε γειτονικούς κόμβους. Στο [32] προτείνεται ένας αλγόριθμος δημιουργίας δρομολογίων για την κίνηση που ακολουθούν κινητά στοιχεία προκειμένου να επισκεφτούν τους κόμβους του δικτύου. Τα δρομολόγια κανονίζονται έτσι ώστε η συχνότητα επισκέψεων σε κάθε κόμβο, να είναι αντιστοιχη με το ρυθμό με τον οποίο παράγει δεδομένα αυτός ο κόμβος ώστε να μην υπάρχουν απώλειες λόγω γεμάτης μνήμης.

Παρομοίως, και εμείς προσπαθούμε να επιλέξουμε τους καταλληλότερους γείτονες για τη διάχυση της πληροφορίας, αλλά υποθέτουμε υψηλή μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών κίνησης των κόμβων οπότε δεν χρησιμοποιούμε το ιστορικό σαν κριτήριο. Αντίθετα, εισάγουμε μία νέα παράμετρο για να χαρακτηρίσουμε την κίνηση και επιλέγουμε κόμβους με την καλύτερη κινητικότητα. Στην εργασία μας, μοντελοποιούμε πολύ πιο πολύπλοκες μορφές κίνησης από αυτές που εξετάζονται στη σχετική βιβλιογραφία. Μία επιπλέον καινοτομία είναι ότι παρόλο που και εμείς διαχέουμε πλεονάζουσα πληροφορία, προσαρμόζουμε το ποσό των επιπλέον μεταδόσεων ανάλογα με τα επίπεδα κινητικότητας των κόμβων, μειώνοντας έτσι το συνολικό αριθμό μεταδόσεων και αριθμό μηνυμάτων που χρειάζεται να αποθηκεύουν οι κόμβοι.

Μία μέθοδο χαρακτηρισμού της κίνησης ενός κινητού κέντρου ελέγχου προτείνουν οι συγγραφείς του [44]. Υποθέτοντας περιορισμένη κίνηση του κέντρου ελέγχου σε μία συγκεκριμένη αλλά ακαθόριστη περιοχή, υπολογίζουν χονδρικά τα χαρακτηριστικά της κίνησης και προτείνουν ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που λαμβάνει υπόψη του τα χαρακτηριστικά αυτά για να βελτιώσει την απόδοση. Αντίθετα εμείς χρησιμοποιούμε πιο περίτεχνη μέθοδο για να χαρακτηρίσουμε την κινητικότητα, που αποτυπώνει καλύτερα μεταβολές της ταχύτητας και της τροχιάς. Επίσης στο [58] διερευνάται ένα συγγενές πρόβλημα, οι αντισταθμίσεις που δημιουργούνται ανάμεσα στην κινητικότητα των κόμβων και την κάλυψη του δικτύου. Οι τεχνικές μας εκμεταλλεύονται τέτοιους συμβιβασμούς υπό την έννοια ότι χρησιμοποιούμε υψηλή κινητικότητα για να αντικαταστήσουμε την συνδεσιμότητα και την κάλυψη. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εργασία [6], όπου οι συγγραφείς συγκρίνουν την τυχαία κίνηση κόμβων και μεθόδους που εκμεταλλεύονται την κίνηση του S , αναδεικνύοντας τα θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά κάθε προσέγγισης. Στο [17] οι συγγραφείς υποθέτουν την μεικτή περίπτωση ενός δικτύου με στατικούς κόμβους που λειτουργούν ως μηχανισμός υποστήριξης και κινητούς κόμβους. Οι κόμβοι οργανώνονται σε ομάδες με τους σταθερούς κόμβους να τίθενται επικεφαλής Χρησιμοποιώντας μία τεχνική που κωδικοποιεί με χρώματα κατά προσέγγιση τις αποστάσεις των κόμβων, προτείνεται ένα σχέδιο βελτιστοποίησης των μονοπατιών προς τους σταθερούς κόμβους στις ομάδες, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας.

5.1.2 Η προσέγγισή μας

Παρακινήμενοι από νέες εξελίξεις και εφαρμογές, εστιάζουμε σε δίκτυα με *πολυσύνθετη και δυναμική κινητικότητα* που χαρακτηρίζεται από ετερογενή προφίλ κίνησης των κόμβων, τα οποία μεταβάλλονται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε είναι η αποδοτική διάχυση πληροφορίας στο δίκτυο προκειμένου να βελτιωθεί το ποσοστό επιτυχούς παράδοσης δεδομένων και να μειωθεί η καθυστέρηση παράδοσης. Επεκτείνουμε την προσέγγιση των φορέων μηνυμάτων χρησιμοποιώντας προσαρμοστικές τεχνικές για να ελέγξουμε τη μετάδοση πλεονάζοντων μηνυμάτων. Η συνεισφορά μας συνοψίζεται ως εξής:

- (α) Προτείνουμε μία ρηξικέλευθη παράμετρο που χαρακτηρίζει τις συνθήκες στο δίκτυο, το *επίπεδο κινητικότητας* που, όπως επιδεικνύουμε, αποτυπώνει με αρκετή ακρίβεια σημαντικά χαρακτηριστικά της κίνησης (ταχύτητα, μετατόπιση και μεταβολή).

- (β) Ενώ η κινητικότητα των κόμβων δημιουργεί σημαντικές επιπλοκές, εδώ προτείνουμε τεχνικές που την αξιοποιούν προκειμένου να τη χρησιμοποιήσουμε σαν αντικατάσταση της συνεκτικότητας του δικτύου και του πλεονασμού στη διάχυση πληροφορίας: προτείνουμε προσαρμοστικά πρωτόκολλα, που διαχέουν λιγότερη πληροφορία υπό την παρουσία υψηλής κινητικότητας και προτιμούν κόμβους με υψηλή κινητικότητα για την μεταφορά τις πληροφορίας
- (γ) Προτείνουμε ένα πρωτόκολλο που ανταποκρίνεται στην κινητικότητα και την ποσότητα πλεοναζόντων μεταδόσεων που περιορίζει τις μεταδόσεις μειώνοντας το κόστος επικοινωνίας.

5.2 Μοντελοποίηση κινητών δικτύων αισθητήρων

Προκειμένου να μοντελοποιήσουμε κινητούς αισθητήρες μπορούμε να υποθέσουμε παρόμοιες παραδοχές με αυτές που παρουσιάσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια και συγκεκριμένα στην ενότητα 4.2, εδώ παραθέτουμε συνοπτικά το μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε για χάρη πληρότητας.

Υποθέτουμε πως κάθε κόμβος του δικτύου είναι μία ολοκληρωμένη, αυτόνομη υπολογιστική συσκευή με δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας και καταγραφής περιβαλλοντικών συνθηκών. Διαθέτει επεξεργαστή με περιορισμένη υπολογιστική ισχύ, ένα κύκλωμα ασύρματης επικοινωνίας που χαρακτηρίζεται από την εμβέλειά του $\mathcal{R}$ και μία αυτόνομη, ενσωματωμένη στις συσκευές πηγή ενέργειας η οποία κατά κανόνα είναι περιορισμένης διάρκειας.

Η περιοχή στην οποία αναπτύσσεται το δίκτυο $\mathcal{A}$, θεωρείται επίπεδη και τετράγωνη μεγέθους $D \times D$: αυτή η υπόθεση μπορεί να γίνει πιο ασθενής για να συμπεριλάβει περιοχές διαφόρων σχημάτων. Οι θέσεις των συσκευών στην περιοχή του δικτύου στην γενική περίπτωση κατανέμονται τυχαία και ομοιόμορφα. Κάθε συσκευή αισθητήρων είναι προσκολλημένη σε κάποιο κινούμενο αντικείμενο. Έστω ο αισθητήρας i , η κίνησή του ορίζεται από μία συνάρτηση $\mathcal{M}$, δείτε 4.2, που υλοποιεί κάποιο μοντέλο κίνησης (δείτε παράγραφο για την περιγραφή των μοντέλων κίνησης που προτείνουμε εδώ). Γενικά θεωρούμε ότι κάθε αισθητήρας μπορεί να κινείται με σημαντικά διαφορετικό τρόπο, με μόνους περιορισμούς να βρίσκεται πάντα μέσα στην περιοχή $\mathcal{A}$ και ότι η μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορεί να κινηθεί κάποιος αισθητήρας φράσσεται από ένα όριο s_{max} . Υποθέτουμε πως ο αισθητήρας μπορεί να υπολογίσει με ακρίβεια κάποια χαρακτηριστικά της κίνησής του. Την ταχύτητα με την οποία κινείται και τη διεύθυνσή του, τέτοιες μετρικές μπορούν να αποκτηθούν και από κυκλώματα μέτρησης επιτάχυνσης, επομένως ακριβής μετρήσεις της θέσης (πχ. χρησιμοποιώντας εξοπλισμό πλοήγησης, όπως GPS) δεν είναι απαραίτητες.

Ακολουθώντας το μοντέλο που παρουσιάζεται στα [35, 3, 51, 25] θεωρούμε ότι για την περίπτωση μετάδοσης ενός μηνύματος, το κύκλωμα του πομποδέκτη καταναλώνει ένα ποσό ενέργειας για τη λειτουργία του E_{elec} , ενώ ο ενισχυτής του σήματος καταναλώνει ενέργεια ϵ_{amp} . Επίσης, υποθέτουμε ένα απλό και ομοιόμορφο μοντέλο εξασθένησης κατά τη διάδοση του σήματος τέτοιο ώστε η ισχύς του σήματος σε απόσταση r από την πηγή να είναι αντιστρόφως ανάλογη του r^2 .

Υπάρχει μία ειδική συσκευή στο δίκτυο που συμβολίζουμε με $\mathcal{S}$, η οποία αντιπροσωπεύει το κέντρο ελέγχου στο οποίο πρέπει να παραδοθούν τα δεδομένα που συλλέγουν οι αισθητήρες. Το $\mathcal{S}$ παραμένει ακίνητο σε ένα σημείο εντός της περιοχής του δικτύου. Το $\mathcal{S}$ δεν έχει περιορισμούς,

5.3 Εκτιμώντας τα επίπεδα κίνησης

υποθέτουμε ότι διαθέτει σημαντικές υπολογιστικές και αποθηκευτικές δυνατότητες και πρακτικά ανεξάντλητη (για τα σενάρια που παρουσιάζουμε εδώ) πηγή ενέργειας.

Τέλος, υποθέτουμε ότι μια συγκεκριμένη, υψηλού επιπέδου, εφαρμογή εκτελείται από τα σωματίδια που απαρτίζουν το δίκτυο. Η εφαρμογή παράγει περιοδικά γεγονότα στους αισθητήρες, οπότε για κάθε γεγονός δημιουργείται ένα μήνυμα προκειμένου να διαδοθεί η πληροφορία στο κέντρο ελέγχου. Η εφαρμογή χαρακτηρίζεται από την ποσότητα λ_i , που εκφράζει τον ρυθμό παραγωγής μηνυμάτων σε κάθε αισθητήρα i του δικτύου αισθητήρων, που μετρείται σε αριθμό μηνυμάτων ανά χρονικό διάστημα.

5.3 Εκτιμώντας τα επίπεδα κίνησης

Η καταγραφή απλών μετρικών, όπως η απόσταση που διανύθηκε ή η τρέχουσα ταχύτητα δεν είναι αρκετές για να αποτυπώσουν τα χαρακτηριστικά της κίνησης. Επιπλέον, ανάλογα με τον τύπο κίνησης που ακολουθείται, η περιοχή που καλύπτεται μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Για παράδειγμα, αν συγκρίνουμε ένα κόμβο του οποίου η θέση μεταβάλλεται γύρω από ένα σημείο με ένα κόμβο που ταξιδεύει σε ευθεία γραμμή, τότε ξεκάθαρα ο δεύτερος μπορεί να διασχίσει το δίκτυο πολύ πιο γρήγορα από τον πρώτο, ακόμα και αν έχει μικρότερη ταχύτητα. Για να αποτυπώσουμε τέτοιες διαφορές ορίζουμε μία νέα μετρική, το *επίπεδο κίνησης*, που αποτυπώνει όχι μόνο διαφορές στην ταχύτητα αλλά και στην τροχιά που ακολουθείται. Η μετρική μας υπολογίζει υψηλότερες τιμές για κόμβους που κινούνται γρήγορα και τείνουν να διασχίζουν καινούργιες περιοχές, ενώ υπολογίζει μικρές τιμές για κόμβους που κινούνται με μικρή ταχύτητα και παραμένουν σε μια μικρή περιοχή του δικτύου.

Ο υπολογισμός του επιπέδου κίνησης μπορεί να γίνει εύκολα με πληροφορία τοπική στον κόμβο. Κάθε συσκευή i υπολογίζει το δικό της επίπεδο κίνησης. Θεωρήστε ένα χρονικό διάστημα t_l , ο κόμβος i καταγράφει τη θέση του (σε κάποιο δικό του σύστημα συντεταγμένων ή απλά μία εκτίμηση αυτής), έστω p_0 η καταγραφή στην αρχή του χρόνου t_l . Έστω ακέραιος $K > 1$, τότε ορίζουμε το διάστημα δειγματοληψίας $\delta = \frac{t_l}{K}$. Κάθε δ δευτερόλεπτα, η τρέχουσα θέση p_k του κόμβου καταγράφεται. Επομένως καταγράφονται K σημεία σε χρόνο t_l . έπειτα υπολογίζεται η απόσταση από το p_0 των υπόλοιπων $K - 1$ καταγεγραμμένων θέσεων. Έτσι έχουμε $K - 1$ μετρήσεις απόστασης $d(k)$ από την αρχική θέση p_0 , για $k = 1, 2, \dots, K - 1$. Έστω, $d_i^{max}(t) = \max\{d(k)\}$, δηλαδή το $d_i^{max}(t)$ είναι η μέγιστη μετατόπιση του i από το p_0 στο χρονικό διάστημα t_l . Επιπλέον, κάθε δ δευτερόλεπτα, η ταχύτητα του κόμβου καταγράφεται, έτσι δημιουργείται μία ακολουθία μετρήσεων $v(k)$ για $k = 0, 1, 2, \dots, K - 1$. Έστω $v_i(t) = \text{avg}\{v(k)\}$. Επομένως έχουμε υπολογίσει τη μέση ταχύτητα και τη μέγιστη μετατόπιση για το χρονικό διάστημα t_l . Τότε ορίζουμε το επίπεδο κίνησης του κόμβου i τη χρονική στιγμή t , ως:

$$M\ell_i(t) = v_i(t) \cdot d_i^{max}(t)$$

Προσέξτε ότι μόλις παρέλθει ο χρόνος t_l η διαδικασία συνεχίζεται, με νέες τιμές $M\ell_i(t)$ να υπολογίζονται κάθε δ δευτερόλεπτα. Στο χρόνο $t_l + \delta$ μία νέα μέτρηση θέσης και ταχύτητας καταγράφεται ενώ η παλαιότερη καταγραφή σβήνεται (δηλαδή το p_0), και η δεύτερη παλαιότερη καταγραφή γίνεται το νέο p_0 , ενώ νέες τιμές υπολογίζονται για τα $d_i^{max}(t)$ και $v_i(t)$. Οι παράμετροι K και t_l τίθενται από το διαχειριστή του δικτύου. Με χρήση των παραμέτρων K και t_l μπορούμε να ρυθμίσουμε το επίπεδο λεπτομέρειας στην καταγραφή, μεγάλες τιμές t_l και μικρό K μειώνουν

τη λεπτομέρεια, ενώ μικρότερες τιμές αυξάνουν την ευαισθησία της μέτρησης του επιπέδου κινητικότητας $M\ell_i(t)$.

5.4 Προσαρμοζόμενη διάχυση πληροφορίας

Για να αυξηθεί η πιθανότητα παράδοσης και να μειωθεί ο χρόνος παράδοσης, ακολουθούμε την τακτική της πλεονάζουσας μετάδοσης πληροφορίας. Δηλαδή κάθε μήνυμα που πρέπει να παραδοθεί στο $\mathcal{S}$, μεταδίδεται σε αρκετούς κόμβους. Κάθε κόμβος μεταδίδει την πληροφορία που καταγράφει σε β από τους γείτονες που έχει τι συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Έτσι, οι κόμβοι μεταφέρουν αντίγραφα μηνυμάτων που καταγράφηκαν από άλλους κόμβους και τα παραδίδουν στο $\mathcal{S}$ μαζί με τα δικά τους όταν βρεθούν στην εμβέλεια του $\mathcal{S}$. Το $\mathcal{S}$ μεταδίδει περιοδικά μηνύματα παρουσίας για να ανακοινώσει τη θέση του στους αισθητήρες. Όταν ένας κόμβος λάβει μήνυμα παρουσίας αμέσως ξεκινά την αποστολή των δεδομένων που έχει αποθηκευμένα στη μνήμη του. Μετά την παράδοση το μήνυμα διαγράφεται από τη μνήμη της συσκευής, αναγνωριστικό του μηνύματος διατηρείται όμως έτσι ώστε αν τυχόν το λάβουμε ξανά από κάποια άλλη συσκευή να μην αποθηκευτεί πάλι. Θεωρούμε ότι το αναγνωριστικό μηνύματος δεν χρειάζεται πολύ μνήμη οπότε μπορούμε να αποθηκεύσουμε πολύ περισσότερα αναγνωριστικά σε αντίθεση με τη μνήμη που προορίζεται για μηνύματα που είναι περιορισμένης χωρητικότητας.

Όμως, η επιλογή της τιμής β και περισσότερο σε ποιους β γείτονες στέλνουμε ένα αντίγραφο ενός μηνύματος, χρειάζεται προσεκτικό σχεδιασμό. Θέτοντάς $\beta = \infty$ το πρωτόκολλο εκφυλίζεται σε πλημμυρισμού του δικτύου από μηνύματα, ξοδεύοντας πολύ ενέργεια εξαιτίας των πλεονάζοντων μηνυμάτων· από την άλλη θα πρέπει έτσι να μειωθεί στο ελάχιστο η καθυστέρηση αφού τα μηνύματα θα ακολουθήσουν όλα τα μονοπάτια προς το $\mathcal{S}$. Από την άλλη, μικρή τιμή του β θα μειώσει το κόστος επικοινωνίας αλλά θα αυξήσει το χρόνο που χρειάζεται για να παραδοθεί στο $\mathcal{S}$. Εδώ προτείνουμε η επιλογή β να γίνεται ανά περίπτωση, σε κάθε κόμβο ξεχωριστά.

Διαισθητικά, αργοί κόμβοι ή κόμβοι περιορισμένοι σε μία μικρή περιοχή (δηλαδή κόμβοι με μικρό $M\ell$), θα πρέπει να διαλέξουν ένα μεγαλύτερο β για να επιταχύνουν την παράδοση του μηνύματος. Αφού οι ίδιοι θα χρειαστούν σημαντικό χρόνο για να φτάσουν κοντά στο $\mathcal{S}$, εξαπλώνοντας την πληροφορία και σε άλλους κόμβους, αυξάνεται η πιθανότητα κάποιος από τους κόμβους που έχει αντίγραφο του μηνύματος να συναντήσει το κέντρο ελέγχου. Από την άλλη, γρήγοροι κόμβοι που καλύπτουν μεγάλες περιοχές, μπορούν να βασισθούν στην υψηλή κινητικότητά τους και να επιλέξουν μικρή τιμή β . Αφού είναι ικανοί στο να καλύπτουν μεγάλες περιοχές του δικτύου και συνεπώς να εντοπίζουν το κέντρο ελέγχου τα μηνύματα έχουν υψηλή πιθανότητα να παραδοθούν έγκαιρα.

Όσον αφορά την επιλογή γειτόνων, σκεπτόμενοι με παρόμοιο τρόπο διαισθητικά καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι «γρήγοροι» κόμβοι είναι πιο κατάλληλοι για να γίνουν φορείς μηνυμάτων. Η αυξημένη ταχύτητά τους μπορεί να βοηθήσει στο να καλύψουν το δίκτυο γρήγορα και να επισκέπτονται το $\mathcal{S}$ πιο συχνά.

Πριν μπούμε στις λεπτομέρειες του πως επιλέγεται το β παρουσιάζουμε τον αλγόριθμο διάχυσης πληροφορίας. Ο γενικός αλγόριθμος που εκτελούν οι κόμβοι είναι ο εξής:

1. Νέα μηνύματα που χρειάζονται παράδοση ή μηνύματα που λαμβάνονται από άλλους κόμβους για πρώτη φορά, αποθηκεύονται σε μια ουρά FIFO (First In First Out), την οποία ονομάζουμε *ουρά προώθησης*. Η ουρά έχει περιορισμένο μέγεθος που εξαρτάται από τη

5.4 Προσαρμοζόμενη διάχυση πληροφορίας

μνήμη του κόμβου. Εάν η ουρά γεμίσει, τα παλαιότερα μηνύματα, δηλαδή αυτά που βρίσκονται στην κορυφή της ουράς, απορρίπτονται για να χωρέσουν νέα μηνύματα.

2. Ο κόμβος εξάγει το πρώτο μήνυμα από την ουρά, επιλέγει β γείτονες και μεταδίδει το μήνυμα σε αυτούς. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσο υπάρχουν μηνύματα στην ουρά προώθησης.
3. Τα μηνύματα που προωθήθηκαν β φορές, αποθηκεύονται στην *ουρά παράδοσης*, η οποία έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με την ουρά προώθησης.
4. Εάν ληφθεί ένα μήνυμα παρουσίας, τότε ο κόμβος ξεκινά την παράδοση των μηνυμάτων. Τα μηνύματα εξάγονται από την ουρά παράδοσης το ένα μετά το άλλο και ξεκινά η παράδοση των μηνυμάτων. Εάν η ουρά παράδοσης είναι άδεια τότε επιλέγονται μηνύματα από την ουρά προώθησης. Σε αυτή την περίπτωση τα μηνύματα δεν στέλνονται σε β γείτονες αφού παραδίδονται εκείνη τη στιγμή. Μετά την επιτυχή παράδοσή του, ένα μήνυμα διαγράφεται από την ουρά από την οποία προήλθε έτσι ώστε να ελευθερωθούν πόροι. Το μόνο που διατηρείται, είναι το αναγνωριστικό του μηνύματος ώστε να γνωρίζουμε ότι δεν χρειάζεται να το επεξεργαστούμε ξανά. Θα αναφέρουμε τη συμπεριφορά αυτή του κόμβου σαν συνδεδεμένη λειτουργία.
5. Εάν η παράδοση ενός μηνύματος στο $\mathcal{S}$ αποτύχει, κόμβος μεταπίπτει στην κατάσταση αποσυνδεδεμένης λειτουργίας και λειτουργεί σύμφωνα με τα βήματα 1,2,3.

Σημειώνουμε ότι για μηνύματα που λαμβάνονται από άλλους κόμβους ελέγχεται πρώτα αν υπάρχουν σε κάποια ουρά ή αν έχουν ήδη παραληφθεί και παραδοθεί στο παρελθόν οπότε σε αυτές τις περιπτώσεις να μην γίνεται η αποθήκευσή τους. Έπειτα παρουσιάζουμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια δύο τεχνικές που χρησιμοποιούν το επίπεδο κινητικότητας για να προσαρμόσουν την τιμή του β και τρεις μεθόδους που επιλέγουν ποιοι γείτονες θα λάβουν αντίγραφο του μηνύματος.

5.4.1 Προσαρμογή της τιμής β

Παρουσιάζουμε δύο τεχνικές που προσαρμόζουν την τιμή του β . Ο ακρογωνιαίος λίθος είναι η χρησιμοποίηση του επιπέδου κινητικότητας των κόμβων που συμμετέχουν στη διαδικασία για να εκτιμήσουμε την ανάγκη για επιπλέον μεταδόσεις του μηνύματος.

Τοπική προσαρμογή

Υποθέτοντας ότι κάθε κόμβος έχει μια μέγιστη ικανότητα για κίνηση, δηλαδή η μέγιστη ταχύτητά του φράσσεται από το όριο v_{max} (δείτε 5.2), τότε η μέγιστη τιμή του επιπέδου κινητικότητας που μπορεί να επιτύχει ο κόμβος είναι

$$M\ell_{max} = v_{max} \cdot (v_{max} \cdot t_l)$$

όπου το γινόμενο $(v_{max} \cdot t_l)$ μας δίνει τη μέγιστη μετατόπιση που πετυχαίνει ο κόμβος στο χρόνο t_l .

Ένας κόμβος που κινείται με το μέγιστο επίπεδο κινητικότητας, θεωρείται ικανός στο να παραδίδει μηνύματα χωρίς να χρειάζεται να τα προωθήσει και στους γειτόνους του. Συνήθως όμως

οι κινούμενοι κόμβοι θα πετυχαίνουν μικρότερα επίπεδα κινητικότητας, επομένως η συνεργασία μεταξύ τους είναι θεμιτή προκειμένου να εξασφαλίσουμε καλύτερα ποσοστά παράδοσης και μικρότερη καθυστέρηση. Υπολογίζουμε το β για ένα κόμβο i ως προς το τρέχον επίπεδο κινητικότητας και το μέγιστο επίπεδο κινητικότητας:

$$\beta_i = \left\lceil \frac{D}{M\ell_{max}} \cdot \left(1 - \frac{M\ell_i(t)}{M\ell_{max}}\right) \right\rceil \quad (5.1)$$

όπου D είναι η διάσταση της $D \times D$ περιοχής δικτύου. Η εξίσωση 5.1 αποτελείται από δύο όρους. Το κλάσμα $\frac{D}{M\ell_{max}}$ εκτιμά το χρόνο που χρειάζεται ένας ιδεατά κινούμενος κόμβος για να διασχίσει την περιοχή του δικτύου και να το παραδώσει στο $\mathcal{S}$. Ο δεύτερος όρος $1 - \frac{M\ell_i(t)}{M\ell_{max}}$ εκτιμά πόσο κοντά ο κόμβος i είναι στην ιδεατή περίπτωση. Το σκεπτικό πίσω από αυτή τη συνάρτηση είναι να υπολογιστεί μεγάλη τιμή του β για κόμβους που είναι «αργοί», που εμφανίζουν έντονη εντοπιότητα (δηλαδή, με χαμηλό επίπεδο κινητικότητας $M\ell$). Η τιμή φράσσεται από την ποσότητα $\frac{D}{M\ell_{max}}$. Το αντίθετο συμβαίνει για «γρήγορους», καθολικά κινούμενους κόμβους, καθώς το $M\ell_i(t)$ πλησιάζει το $M\ell_{max}$ τιμή της μεταβλητής β πλησιάζει το μηδέν, δηλαδή ο κόμβος δεν κάνει πλεονάζουσες μεταδόσεις του μηνύματος προς άλλους κόμβους, αλλά αντίθετα μεταδίδει απευθείας στο κέντρο ελέγχου όταν βρίσκεται στην εμβέλειά του. Επίσης προσέξτε ότι αφού το β_i εξαρτάται από το $M\ell_i(t)$, η τιμή του με την πάροδο του χρόνου αλλάζει ώστε να αντικατοπτρίζει τις αλλαγές στο επίπεδο κινητικότητας $M\ell_i(t)$, έτσι η συμπεριφορά των κόμβων είναι προσαρμοζόμενη στην κίνησή τους, όπως αυτή καταγράφεται στο $M\ell_i(t)$. Επίσης επισημάνουμε ότι αυτό το πρωτόκολλο υποθέτει μόνο τοπική γνώση, κάθε αισθητήρας επιλέγει το b , με χρήση μόνο της γνώσης που διαθέτει για το επίπεδο κινητικότητάς του.

Προσαρμογή με περιορισμένη επίγνωση

Χρησιμοποιώντας μόνο το επίπεδο κινητικότητας του ιδίου κόμβου στον υπολογισμό του β μπορεί να οδηγήσει σε αδικαιολόγητα μεγάλες τιμές. Ένα ακραίο παράδειγμα είναι όταν έχουμε ένα «αργό» κόμβο που περιστοιχίζεται από αρκετούς «γρήγορους» κόμβους. Τότε η μετάδοση ενός αντιγράφου του μηνύματος σε πολλούς από τους «γρήγορους» θα δημιουργήσει επιπλέον κόστος στο δίκτυο αφού αν έχουν αντίγραφο μόνο λίγοι «γρήγοροι» κόμβοι είναι αρκετό για την αποδοτική παράδοση του μηνύματος.

Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι πιο ουσιώδες να υπολογίσουμε το β με κατανομημένη πληροφορία, δηλαδή να λάβουμε συγκριτικά υπόψη τις τοπικές μετρήσεις του επιπέδου κινητικότητας πολλών κόμβων. Η μέθοδος που προτείνουμε εδώ βασίζεται στη συλλογή περιορισμένης γνώσης σχετικά με τις συνθήκες στην άμεση γειτονιά του δικτύου, μία αντίστοιχη τεχνική με αυτή που αναλύσαμε στο κεφάλαιο 3 (σελ. 41). Ένας κόμβος i πριν μεταδώσει ένα μήνυμα χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο για την ανίχνευση των γειτόνων του.

Πρωτόκολλο ανίχνευσης γειτόνων Ο κόμβος i μεταδίδει ένα μήνυμα ερώτηση ανακοινώνοντας το επίπεδο κινητικότητάς του $M\ell_i$ και την ταυτότητά του id . Η μετάδοση γίνεται με την φυσιολογική ακτίνα διάδοσης σε αντίθεση με το πρωτόκολλο συλλογής περιορισμένης γνώσης στο κεφάλαιο 3. Οι κόμβοι που λαμβάνουν το μήνυμα του i απαντούν με ένα μήνυμα που περιέχει τη δική τους ταυτότητα id , και το επίπεδο κίνησης ($M\ell$).

5.4 Προσαρμοζόμενη διάχυση πληροφορίας

Έπειτα αφού ο i συλλέξει την πληροφορία, υπολογίζει το μέσο επίπεδο κινητικότητας στη γειτονιά του, έστω $neigh_i(t)$ το σύνολο των γειτόνων του κόμβου i τη χρονική στιγμή t :

$$M\ell_i^{avg}(t) = \frac{\left(\sum_{j \in neigh_i(t)} M\ell_j(t)\right) + M\ell_i(t)}{|neigh_i(t)| + 1}$$

Ουσιαστικά, το $M\ell_i^{avg}(t)$ αποτυπώνει τη διαθέσιμη κινητικότητα στη γειτονιά του i τη χρονική στιγμή t . Χρησιμοποιώντας το $M\ell_i^{avg}(t)$, ο κόμβος i υπολογίζει το β_i που θα χρησιμοποιήσει για τη διάχυση του μηνύματος:

$$\beta_i = \left\lceil \frac{D}{M\ell_{max}} \cdot \left(1 - \frac{M\ell_i^{avg}(t)}{M\ell_{max}}\right) \right\rceil \quad (5.2)$$

Προσέξτε ότι το $M\ell_i^{avg}(t)$ ενσωματώνει και το επίπεδο κινητικότητας του κόμβου i , επομένως λαμβάνεται και αυτό υπόψη στον υπολογισμό του β_i , αλλιώς μπορεί να είχαμε το αντίθετο φαινόμενο που δεν διαχέεται πληροφορία στην ακραία περίπτωση που όλοι οι γείτονες έχουν κινητικότητα $M\ell_{max}$. Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο, β_i φράσσεται από $\frac{D}{M\ell_{max}}$ όταν η διαθέσιμη κινητικότητα στη γειτονιά είναι χαμηλή και τείνει στο μηδέν όταν η μέση κινητικότητα τείνει στο $M\ell_{max}$.

5.4.2 Επιλογή γειτόνων

Αφού υπολογίσουμε το β_i , ο κόμβος i πρέπει να επιλέξει συγκεκριμένους β_i γείτονες για να τους στείλει ένα αντίγραφο του μηνύματος. Όπως αναφέραμε και νωρίτερα, αυτή η επιλογή μπορεί να επηρεάσει τη συνολική συμπεριφορά του πρωτοκόλλου, διαισθητικά «γρήγοροι» κόμβοι πρέπει να προτιμούνται. Από την άλλη επιλέγοντας συνεχώς «γρήγορους» κόμβους θα οδηγήσει σε άνιση κατανομή φορτίου, οι κόμβοι αυτοί θα είναι συμφωρημένοι και θα σπαταλήσουν πολύ ενέργεια. Παρακάτω παρουσιάζουμε τρεις μεθόδους για την επιλογή κόμβων στους οποίους διαχέουμε το μήνυμα.

Τυχαία επιλογή. Ο κόμβος i επιλέγει β_i γείτονές του τυχαία, χρησιμοποιώντας την λίστα γειτόνων, πληροφορία που συνέλεξε με το πρωτόκολλο ανίχνευσης γειτόνων.

Επιλογή του καταλληλότερου. Ο κόμβος i επιλέγει β_i γείτονές του ώστε $M\ell_i(t) < M\ell_j(t)$, όπου j ένας γειτονικός κόμβος του i . Με αυτό το τρόπο οι «γρηγορότεροι» γείτονες επιλέγονται και έτσι ελπίζουμε να μειωθεί η αντίσταση. Στην περίπτωση που δεν βρέθηκαν γείτονες με υψηλότερο επίπεδο κινητικότητας, ο κόμβος i περιμένει ένα σύντομο χρονικό διάστημα και επαναλαμβάνει τη διαδικασία ανίχνευσης γειτόνων ελπίζοντας ότι είτε θα έχει φτάσει ο ίδιος σε μία νέα γειτονιά ή ότι διέρχονται από τη δική του νέοι.

Πιθανοτική επιλογή. Για να αποφύγουμε καθυστερήσεις μέχρι να βρεθούν γρηγορότεροι γείτονες και για να μειώσουμε και το κόστος ανίχνευσης γειτόνων, κάνουμε πιο ελαστικό το κριτήριο επιλογής.

Πάλι, ο κόμβος i επιλέγει β_i γείτονές του ώστε $M\ell_i(t) < M\ell_j(t)$, όμως εάν δεν βρεθούν με τη μία β_i γείτονες, τότε όλοι οι γείτονες είναι υποψήφιοι και επιλέγονται με κάποια μη μηδενική πιθανότητα. Έστω p_j η πιθανότητα επιλογής του κόμβου j για αποστολή μηνύματος. Τότε ορίζουμε το p_j ως:

$$p_j = \begin{cases} \frac{M\ell_j(t)}{M\ell_i(t)} & M\ell_j(t) \leq M\ell_i(t) \\ 1 & M\ell_j(t) > M\ell_i(t) \end{cases}$$

Έτσι, ο κόμβος εξετάζει την πληροφορία της γειτονίας και για κάθε γείτονα εκτελεί ένα πιθανοτικό πείραμα χρησιμοποιώντας την p_j υ μέχρι το μήνυμα να σταλεί σε β_i γείτονες.

5.4.3 Αποτροπή πλημμυρίδας μηνυμάτων

Ενώ επιλέγουμε μόνο β γείτονες για κάθε μήνυμα, οπότε μειώνουμε το ρυθμό με τον οποίο διαδίδεται το μήνυμα στο δίκτυο, αυτό γίνεται από κάθε κόμβο για κάθε μήνυμα. Επομένως η διάδοση εξακολουθεί να είναι ανεξέλεγκτη και το μήνυμα τελικά μπορεί να διαδοθεί σε όλους τους κόμβους. Ακόμα και αν ένας κόμβος k παραδώσει το μήνυμα στο κέντρο ελέγχου, οι υπόλοιποι δεν το γνωρίζουν αυτό και θα συνεχίσουν τις μεταδόσεις. Επομένως λόγω αυτής της πλημμυρίδας μηνυμάτων οι κόμβοι θα αρχίσουν να απορρίπτουν μηνύματα από τις ουρές για να κάνουν χώρο για τα καινούργια που καταφθάνουν διαρκώς. Εδώ παρουσιάζουμε ένα μηχανισμό για να μειώσει αυτό το φαινόμενο

Θεωρούμε ότι σε κάθε μήνυμα που αποστέλλεται, υπάρχει ένας μετρητής h_c που μετρά των αριθμό φορών που το μήνυμα έχει επαναμεταδοθεί στο δίκτυο. Κάθε κόμβος πριν μεταδώσει ένα μήνυμα αυξάνει το h_c . Κάθε κόμβος j που λαμβάνει ένα τέτοιο μήνυμα διεξάγει μία πιθανοτική επιλογή για να αποφασίσει αν θα προωθήσει περαιτέρω το μήνυμα στους γ γείτονές του ή αν θα το αποθηκεύσει κατ'ευθείαν στην ουρά παράδοσης Έστω p_{fwd} η πιθανότητα πρόωθησης

$$p_{fwd} = \left(1 - \frac{M\ell_j(t)}{M\ell_{max}}\right) \cdot \left(1 - \frac{h_c}{h_{opt}}\right)$$

όπου h_{opt} είναι ο βέλτιστος αριθμός μεταδόσεων από τον κόμβο πηγή του μηνύματος προς το κέντρο ελέγχου, όπως δίνεται από $h_{opt} = \lceil \frac{dist_{sink}(j)}{R} \rceil$, η ποσότητα $dist_{sink}(j)$ είναι η Ευκλείδεια απόσταση από το κέντρο ελέγχου. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται όταν $h_c \leq h_{opt}$, όταν $h_c > h_{opt}$ (μια περίπτωση που κανονικά δεν θα προκύψει αφού $h_c \leq h_{opt}$ από τον τρόπο λειτουργίας του πρωτοκόλλου) θέτουμε $p_{fwd} = 0$. Αφού η τοποθεσία του κέντρου ελέγχου ή του αισθητήρα συνήθως δεν είναι γνωστή (επομένως και το $dist_{sink}(j)$ είναι άγνωστο), το h_{opt} μπορεί να υπολογιστεί με βάση κάποια άλλη απόσταση, για παράδειγμα θέτοντας $dist_{sink}(j) = \frac{D}{2}$. Έτσι η πιθανότητα πρόωθησης εξαρτάται της απόστασης που ταξίδεψε το μήνυμα (όπως δίνεται από το h_c) σε σχέση με τη συνολική απαιτούμενη απόσταση (όπως δίνεται από το h_{opt}) και την κινητικότητα του κόμβου ως προς τη μέγιστη κινητικότητα. Έτσι ένα μήνυμα δεν θα προωθηθεί περισσότερο από h_{opt} μεταδόσεις και δεν θα προωθηθεί από κάποιον με τη μέγιστη κινητικότητα $M\ell_{max}$. Από την άλλη μηνύματα που ως τώρα έχουν ταξιδέψει μικρή απόσταση είναι πιο πιθανό να δρομολογηθούν για πρόωθηση. Αυτός ο μηχανισμός είναι κατάλληλος για χρήση με όλες εκτίμησεις του β και επιλογής συγκεκριμένων β γειτόνων.

5.5 Μοντελοποιώντας πολύμορφη κίνηση

Στα περισσότερα ρεαλιστικά σενάρια οι κόμβοι θα κινούνται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Για παράδειγμα ένα όχημα θα κινείται με υψηλή ταχύτητα και θα ακολουθεί μια τεθλασμένη γραμμή σαν τροχιά αποτελούμενη κυρίως από ευθύγραμμα τμήματα με λίγες αλλαγές κατεύθυνσης και σχεδόν καθόλου καμπύλες. Ένας πεζός από την άλλη κινείται πολύ πιο αργά σε μικρές αποστάσεις ακολουθώντας περισσότερο καμπύλες τροχιές.

5.5 Μοντελοποιώντας πολύμορφη κίνηση

Επίσης είναι πολύ πιθανό ένας κόμβος να αλλάξει τη μέθοδο κίνησής του, αλλάζοντας όχι μόνο τη μέση ταχύτητα αλλά και τον τύπο της τροχιάς του. Για παράδειγμα ένας άνθρωπος που οδηγεί ένα ποδήλατο για να μεταβεί στο ψώρο εργασίας του, αρχικά έχει γρήγορη κίνηση σε κυρίως ευθεία πορεία ενώ έπειτα περνά αρκετές ώρες δουλεύοντας οπότε είτε είναι καθιστός ή κινείται στο κτίριο από γραφείο σε γραφείο αργά.

5.5.1 Ρόλοι κινητικότητας

Τέτοια παραδείγματα επιδεικνύουν την διαφορετικότητα και μεταβλητότητα που μπορεί να εμφανιστεί σε τέτοια δίκτυα κινητών αισθητήρων. Η μοντελοποίηση ρεαλιστικών μοντέλων κίνησης αποτελεί ενεργό πεδίο έρευνας. Απλοϊκά μοντέλα όπως ο τυχαίος περίπατος δεν αποτυπώνουν αυτές τις συμπεριφορές. Εδώ προσπαθούμε να μιμηθούμε μερικούς τύπους κίνησης εμπνευσμένοι από τις παραπάνω συμπεριφορές. Παραμετροποιώντας καλώς ορισμένα μοντέλα κίνησης που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, ορίζουμε μερικούς χαρακτηριστικούς ρόλους κίνησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ορίσουμε μερικές πιο πολύπλοκες συμπεριφορές.

Κίνηση κατά την εργασία. Παραμετροποιούμε μία έκδοση του τυχαίου περιπάτου [15] για να επιτύχουμε αργή, περιορισμένη χωρικά κίνηση. Ορίζουμε τη συνάρτηση κίνησης $\mathcal{M}_{work}$ με τις εξής παραμέτρους: η ταχύτητα επιλέγεται τυχαία στο διάστημα $[0.5, 1.5]m/sec$, ενώ επιλέγουμε την απόσταση που διανύει σε κάθε βήμα προς κάποια κατεύθυνση στο διάστημα $[1, 5]m$.

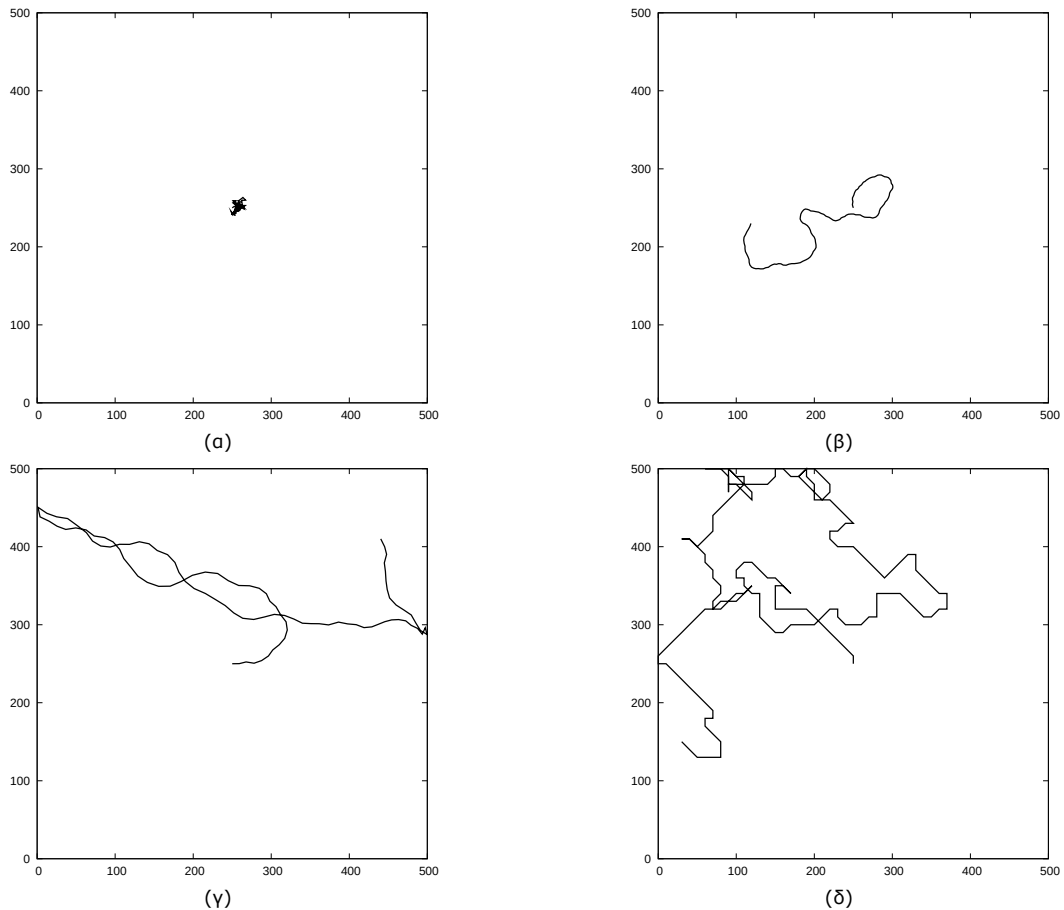
Κίνηση πεζού. Χρησιμοποιούμε μια παραλλαγή του μοντέλου Boundless Area (δείτε [15]) για να ορίσουμε την συνάρτηση κίνησης $\mathcal{M}_{walk}$, η οποία είναι πιο γρήγορη και λιγότερο τοπική από την $\mathcal{M}_{work}$. Η τροποποίηση είναι πως όταν ένας κόμβος φτάνει στο όριο της περιοχής του δικτύου, τον αναγκάζουμε να κάνει γυρίσει προς το εσωτερικό του δικτύου, πχ. τον αναγκάζουμε να κάνει μια αριστερή στροφή 45° . Περιορίζουμε τη μεταβολή της ταχύτητας στο διάστημα $[1, 2]m/s$, το χρονικό βήμα τιθεται στο $\Delta t = 2s$. Σε κάθε βήμα η μεταβολή της ταχύτητας μπορεί να είναι μέχρι $\Delta v = 0.25m/s$ και η κατεύθυνση να μεταβάλλεται μέχρι $\Delta \alpha = 30^\circ$.

Κίνηση ποδηλατιστή. Αυτός ο τύπος κίνησης είναι παρόμοιος με την κίνηση πεζού αλλά η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη και οι αλλαγές διεύθυνσης πιο ομαλές. Ορίζουμε τη συνάρτηση κίνησης $\mathcal{M}_{bic}$, με τη βοήθεια του ίδιου μοντέλου κίνησης με την $\mathcal{M}_{walk}$, αλλάζοντας τις παραμέτρους. Περιορίζουμε τη μεταβολή της ταχύτητας στο διάστημα $[3, 6]m/s$ ($10.8--21.6km/h$), το χρονικό βήμα τιθεται στο $\Delta t = 3s$. Σε κάθε βήμα η μεταβολή της ταχύτητας μπορεί να είναι μέχρι $\Delta v = 0.5m/s$ και η κατεύθυνση να μεταβάλλεται μέχρι $\Delta \alpha = 30^\circ$.

Κίνηση οχήματος. Αυτή η συνάρτηση κίνησης $\mathcal{M}_{veh}$ μοντελοποιεί την πιο γρήγορη κίνηση απ'όσες έχουμε δει ως τώρα. Την ορίζουμε με την βοήθεια του μοντέλου Probabilistic Random Walk [15], όπου ο κόμβος κινείται μόνο προς προκαθορισμένες κατευθύνσεις πχ βόρεια, νότια, ανατολικά, δυτικά ή και συνδυασμούς αυτών. Περιορίζουμε την ταχύτητα στο $[5.55, 10]m/s$ ($20--36km/h$). Προσομοιώσαμε αυτές τις συναρτήσεις κίνησης (δείτε την τροχιά που ακολουθούν οι κόμβοι στο σχήμα 5.1) και καταγράψαμε τις μετρήσεις του επιπέδου κινητικότητας, τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

5.5.2 Μεταβολές των ρόλων κινητικότητας

Η ανάθεση ενός διαφορετικού ρόλου κίνησης είναι αρκετή για να διαφοροποιήσει την κίνηση, και το επίπεδο κινητικότητας κατ' επέκταση, που ακολουθούν οι συσκευές η μια σε σχέση με



Σχήμα 5.1: Παράδειγμα τροχιάς ενός κόμβου όταν η κίνησή του ορίζεται από τη συνάρτηση: α) M_{work} β) M_{walk} γ) M_{bic} και δ) M_{veh} .

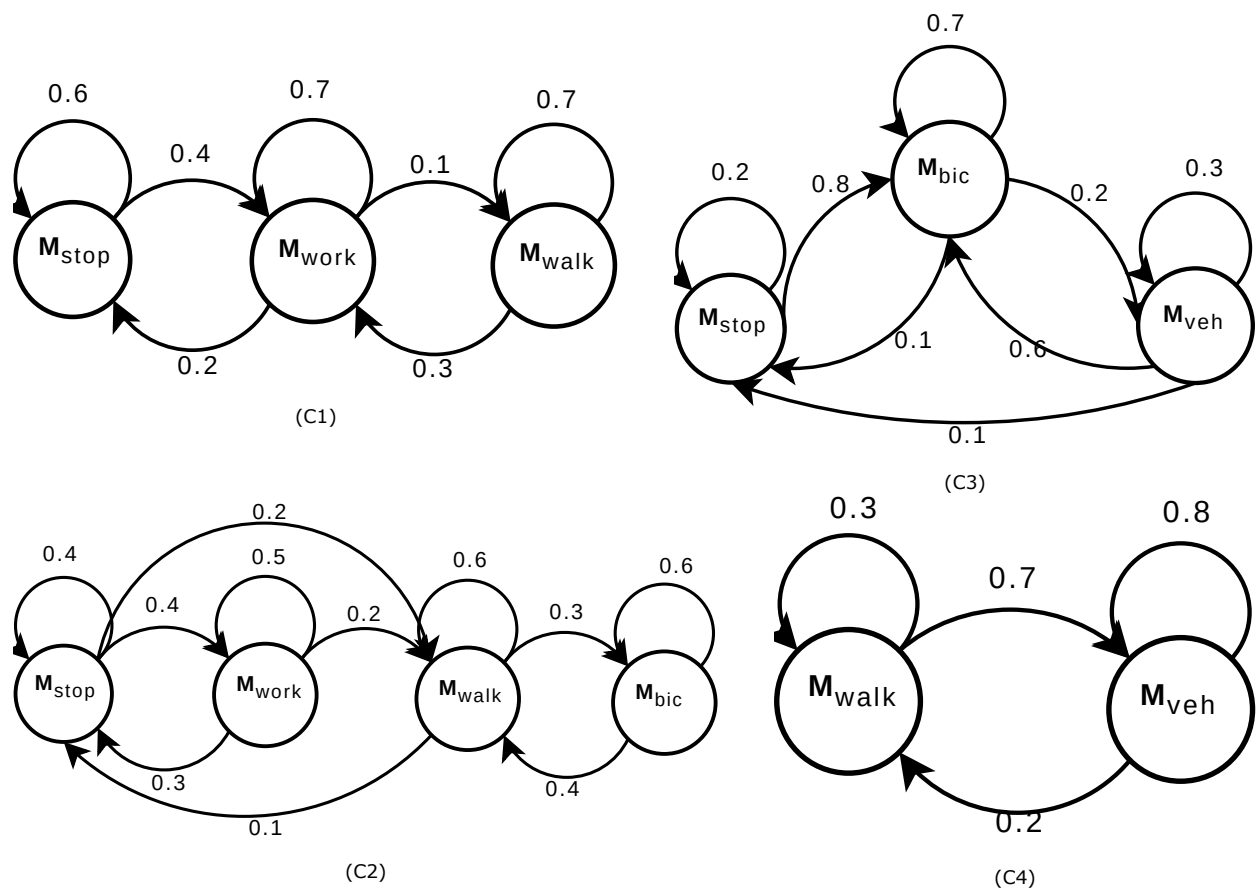
την άλλη. Όμως όπως επισημάναμε σε ρεαλιστικά σενάρια ένας κινούμενος κόμβος θα αλλάζει συμπεριφορά με την πάροδο του χρόνου. Για να μοντελοποιήσουμε τις μεταβολές στον τύπο κινητικότητας, ορίζουμε ένα διάγραμμα καταστάσεων με μεταβάσεις ανάμεσα στους διάφορους ρόλους. Συγκεκριμένα, κάθε κορυφή του διαγράμματος αντιστοιχεί σε ένα ρόλο κίνησης όπως τους ορίσαμε παραπάνω. Από κάθε κατάσταση υπάρχουν κατευθυντικές ακμές προς κάποιες ή όλες τις υπόλοιπες καταστάσεις ενώ μπορεί να υπάρχει ακμή που να δείχνει στην ίδια κατάσταση. Κάθε ακμή έχει συσχετιστεί με μία πιθανότητα μετάβασης με το σύνολο των εξερχόμενων ακμών από μία κατάσταση να αθροίζει στο 1. Ο κόμβος μπορεί να βρίσκεται σε μία μόνο κατάσταση, έστω Q , μια δεδομένη χρονική στιγμή, όσο βρίσκεται στην κατάσταση Q κινείται όπως ορίζει η συνάρτηση κίνησης που συσχετίζεται με αυτή την κατάσταση. Η μετάβαση ανάμεσα στις καταστάσεις γίνεται ως εξής, αρχικά καλείται η συνάρτηση κίνησης προκειμένου να ορίσει μια νέα θέση για τον κόμβο, όταν ο κόμβος φτάσει σε αυτή τη θέση αντι να κληθεί πάλι η συνάρτηση κίνησης, εκτελείται μια πιθανοτική επιλογή. Επιλέγεται μία από τις εξερχόμενες ακμές του διαγράμματος μεταβάσεων ανάλογα με την πιθανότητα που της αντιστοιχεί. Τότε ο κόμβος μεταπίπτει στη νέα κατάσταση που επελέγει και ακολουθεί πλέον το νέο ρόλο που

5.5 Μοντελοποιώντας πολύμορφη κίνηση

Ρόλος	Μ.Ο $M\ell$	ελάχιστο $M\ell$	μέγιστο $M\ell$	$M\ell_{max}$
$\mathcal{M}_{work}$	3.19	0.42	10.79	11.25
$\mathcal{M}_{walk}$	11.37	1.35	19.97	20.00
$\mathcal{M}_{bic}$	99.43	17.05	179.80	180.00
$\mathcal{M}_{veh}$	239.51	37.19	481.05	500.0

Πίνακας 5.1: Μέσο, ελάχιστο, μέγιστο καταγεγραμμένο επίπεδο κινητικότητας και το θεωρητικό μέγιστο για διάφορους ρόλους κινητικότητας.

ορίζει η κατάσταση αυτή. Στο σχήμα 5.2 φαίνονται τα διαγράμματα μεταβάσεων που ορίσαμε και χρησιμοποιήσαμε στην αξιολόγηση των πρωτοκόλλων μας. Προσέξτε ότι ορίζουμε και χρησιμοποιούμε, ένα νέο ρόλο κίνησης $\mathcal{M}_{stop}$, κατά τον οποίο οι κόμβοι παραμένουν ακίνητοι για ένα σύντομο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 5.2: Τα διαγράμματα μεταβάσεων ανάμεσα στους ρόλους κίνησης: C1) Μεταβάσεις ανάμεσα σε αργούς ρόλους κίνησης, C2) Μεταβάσεις με μέτρια κινητικότητα, C3) Μεταβάσεις με μέτρια κινητικότητα που εναλλάσσονται με γρήγορες κινήσεις και C4) Μεταβάσεις γρήγορης κινητικότητας

Προσμοιώνοντας αυτούς τους σύνθετους ρόλους, καταγράψαμε τις μετρήσεις του επιπέδου κινητικότητας, τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.2. Προσέξτε πως η διαφορά ανάμεσα στην ελάχιστη και μέγιστη τιμή του επιπέδου κινητικότητας αυξάνει, ενώ η μέση τιμή καθορίζεται ως επι το πλείστο από τον πιο πιθανό ρόλο. Το ελάχιστο καταγεγραμμένο επίπεδο κίνησης είναι μηδέν εξαιτίας του ρόλου $\mathcal{M}_{stop}$.

Σύνθετος ρόλος	M.O. $M\ell$	ελάχιστο $M\ell$	μέγιστο. $M\ell$
C1	3.09	0.000000	19.96
C2	35.18	0.000000	179.80
C3	89.85	0.000000	400.36
C4	153.98	1.528439	457.46

Πίνακας 5.2: Μέσο, ελάχιστο και μέγιστο επίπεδο κίνητικότητας για τους σύνθετους ρόλους

5.6 Πειραματική αξιολόγηση

5.6.1 Οργάνωση των πειραμάτων

Υλοποιούμε και αξιολογούμε τα παραπάνω πρωτόκολλα στο δημοφιλή προσομοιωτή **ns-2** χρησιμοποιώντας την επέκταση TRAILS [19] που διευκολύνει την υλοποίηση και προσομοίωση πολύπλοκων σεναρίων με κίνηση. Το μέγεθος της περιοχής του δικτύου είναι $1000m \times 1000m$ και 300 αισθητήρες αναπτύσσονται με τυχαίο και ομοιόμορφο τρόπο.

Η διαθέσιμη ενέργεια των αισθητήρων τέθηκε σε υψηλά επίπεδα ($E_i^{init} = 100J$), ώστε να αποκλείσουμε την εμφάνιση αποτυχιών λόγω εξαντλήσεως των ενεργειακών αποθεμάτων των αισθητήρων, κάτι που θα επηρέαζε τα αποτελέσματα και θα δυσκόλευε την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, ενώ υποθέτουμε ότι δε συμβαίνουν άλλου είδους αποτυχίες. Υποθέτουμε ότι μία εφαρμογή περιοδικής παρακολούθησης περιβαλλοντικών συνθηκών εκτελείται και «ανακαλύπτει» (παράγει) $\lambda_i = 0.025$ γεγονότα ανά δευτερόλεπτο σε κάθε συσκευή. Στην προσομοίωσή μας, ανιχνεύονται 20 γεγονότα από κάθε συσκευή. Η διάρκεια προσομοίωσης υπολογίζεται σύμφωνα με το ρυθμό παραγωγής γεγονότων και είναι αρκετά μεγάλη $800sec$ ώστε να επιτρέπει σε όλα τα μηνύματα να παραχθούν. Συνολικά 3600 δευτερόλεπτα χρόνου προσομοιώνονται για να επιτρέψουν την άφιξη καθυστερημένων μηνυμάτων και να δώσουν χρόνο στους κόμβους να έρθουν σε επαφή με το S .

Το κέντρο ελέγχου μεταδίδει μηνύματα παρουσίας με σταθερό ρυθμό $\lambda_{Beacon} = 1$. Το μέγεθος των πακέτων δεδομένων είναι 36 bytes ενώ το μέγεθος ενός μηνύματος παρουσίας 24 bytes. Κάθε κόμβος έχει σταθερού μεγέθους μνήμη για κάθε μια από τις ουρές, τόσο η ουρά προώθησης όσο και η ουρά παράδοσης έχουν μήκος 64 μηνύματα. Έτσι υπάρχει πιθανότητα για απόρριψη μηνυμάτων λόγω υπερχείλισης των ουρών. Η ακτίνα διάδοσης τόσο των κόμβων όσο και του S είναι $R = 70m$.

Κίνηση κόμβων. Αναθέτουμε διαφορετικούς ρόλους κίνησης στους κόμβους. Εξετάσαμε σενάρια όπου κάθε κόμβος εκτελεί ένα συγκεκριμένο ρόλο καθόλη τη διάρκεια του πειράματος, αναθέσαμε στο 25% των κόμβων να ακολουθεί το ρόλο $\mathcal{M}_{work}$, σε άλλο 25% τον $\mathcal{M}_{walk}$, σε άλλο 25% τον $\mathcal{M}_{bic}$ και στο εναπομείνων 25% τον $\mathcal{M}_{veh}$. Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων που διεξάγαμε και παρουσιάζουμε εδώ, η κίνηση των κόμβων ακολουθεί έναν από τους μεικτούς

5.6 Πειραματική αξιολόγηση

ρόλους που παρουσιάσαμε νωρίτερα, αναθέσαμε τον ρόλο **C1** στο 25% των κόμβων, τον **C2** σε άλλο 25%, τον **C3** σε άλλο 25% και τον **C4** στο υπόλοιπο 25%.

Πρωτόκολλα σύγκρισης. Με αυτές τις παραδοχές, υλοποιήσαμε άλλα δύο πρωτόκολλα τα οποία χρησιμεύουν ως μέτρα σύγκρισης για τα προσαρμοστικά μας πρωτόκολλα. Υλοποιούμε το *απλό πρωτόκολλο πλημμυρίδας* του δικτύου με μηνύματα απλά θέτοντας $\beta = \infty$ στο γενικευμένο πρωτόκολλο διάχυσης (δείτε ενότητα 5.4), χωρίς να εφαρμόζουμε προσαρμογή του β ή περιορισμό των πλεονάζοντων μηνυμάτων, πάντως εδώ δεν χρειάζεται να χρησιμοποιούμε το πρωτόκολλο ανίχνευσης δικτύων, ένα μήνυμα μεταδίδεται με μια μετάδοση σε όλους τους γείτονες. Το δεύτερο συγκριτικό πρωτόκολλο είναι μία μη προσαρμοστική έκδοση των πρωτοκόλλων μας όπου το β είναι σταθερό και παίρνει τις τιμές $\beta \in \{2, 4, 6, 8\}$. Συγκρίνουμε τα πρωτόκολλα, με βάση τις μετρικές *ποσοστό επιτυχούς παράδοσης*, *κατανάλωση ενέργειας* και την *καθυστερήση παράδοσης*, όπως τις ορίσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια.

5.6.2 Αποτελέσματα πειραμάτων

Ακρίβεια της μεθόδου υπολογισμού του επιπέδου κινητικότητας

Ορίσαμε τη μέθοδο υπολογισμού του επιπέδου κινητικότητας ως μια παραμετροποιήσιμη μέθοδο ώστε να μπορεί να ρυθμιστεί η ευαισθησία της και να μπορεί να διακρίνει ακόμα και μικρές διαφορές στην μορφή κίνησης. Εδώ ελέγχουμε πόσο καλά μπορεί να διακρίνει κινήσεις που μοιάζουν μεταξύ τους.

Εξετάζουμε ένα μόνο κινητό κόμβο και χρησιμοποιούμε ελεγχόμενες, ντετερμινιστικές μορφές κίνησης που παράγουν πρότυπα με παρόμοια χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, στο πρώτο πρότυπο κίνησης, ο κόμβος κινείται μπρος πίσω σε ένα ευθύγραμμο τμήμα μήκους $l = 50m$. Στο δεύτερο πρότυπο κίνησης, ο κόμβος κινείται στην περιφέρεια κυκλου με ακτίνα $r = \frac{l}{2\pi}$, δηλαδή η περίμετρός του ισούται με l . Στο τρίτο πρότυπο κίνησης, ο κόμβος κινείται στην περίμετρο τετραγώνου με πλευρά $\alpha = \sqrt{\frac{l^2}{4\pi}}$, έτσι ώστε το εμβαδόν του να είναι ίσο με του κύκλου του προηγούμενου προτύπου. Αυτά τα τρία πρότυπα παράγουν διαφορετικές τροχιές αλλά με κοινά στοιχεία. Συμπεριλαμβάνουμε στο πείραμα και δύο τυχαίες μορφές κίνησης, παραλλαγές των $\mathcal{M}_{work}$ και $\mathcal{M}_{walk}$ (ονομάζουμε τις παραλλαγές $\mathcal{M}'_{work}$ και $\mathcal{M}'_{walk}$ αντίστοιχα), ώστε ο κόμβος να κινείται πάντα με σταθερή ταχύτητα.

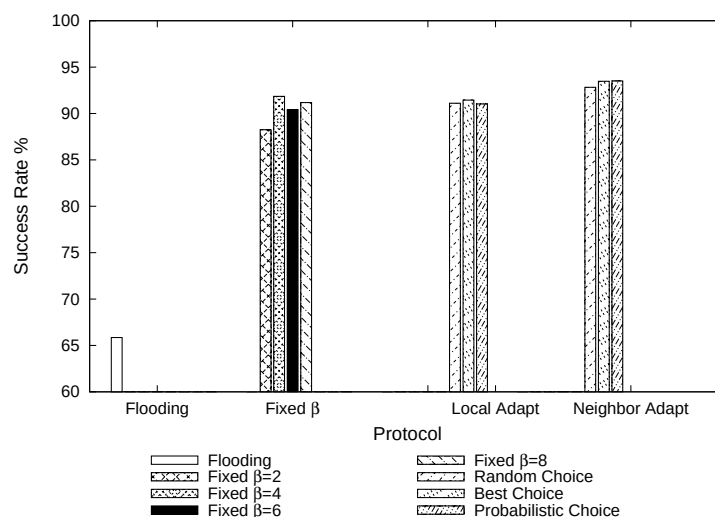
Σε όλες τις περιπτώσεις, διατηρούμε σταθερή την ταχύτητα του κόμβου στα $3\frac{m}{s}$, έτσι η συνιστώσα της ταχύτητας στον υπολογισμό του επιπέδου κίνησης εκμηδενίζεται αφού είναι ίδια συνεχώς. Αυτό έχει και το αποτέλεσμα του ότι σε κάθε περίπτωση ο κινητός κόμβος διανύει την ίδια απόσταση σε δεδομένο χρόνο, έτσι υπάρχει και μέτρο σύγκρισης ανάμεσα στις τυχαίες συναρτήσεις κίνησης και τις ντετερμινιστικές. Προσομοιώσαμε την κίνηση του κόμβου για $200sec$, ενώ θέσαμε $TL = 5sec$ και $K = 30$. Υπολογίσαμε τη μέση τιμή του επιπέδου κίνησης, ακόμα και σε αυτές τις παρόμοιες περιπτώσεις όπως φαίνεται στον πίνακα 5.3, το υπολογισμένο επίπεδο κίνησης είναι διαφορετικό.

Γραμμή l	Κύκλος $\frac{l}{2\pi}$	Τετράγωνο	$\mathcal{M}'_{work}$	$\mathcal{M}'_{walk}$
39.48	38.98	33.63	21.61	41.53

Πίνακας 5.3: Σύγκριση επιπέδων κινητικότητας για κινήσεις με κοινά χαρακτηριστικά

Συγκριτική αξιολόγηση

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων οι συσκευές ομαδοποιούνται σε τέσσερις ομάδες με ίσο αριθμό κόμβων και κάθε ομάδα ακολουθεί ένα συγκεκριμένο ρόλο, όπως περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα. Στο σχήμα 5.3, βλέπουμε ότι το υψηλότερο ποσοστό επιτυχίας το πετυχαίνουν τα προσαρμοστικά πρωτοκολλά με τη τεχνική προσαρμογής περιορισμένης επίγνωσης (93%). Η τοπική προσαρμογή πετυχαίνει περίπου τα ίδια αποτελέσματα με το πρωτόκολλο με σταθερό β , για κάποιες από τις τιμές του β . Παρατηρούμε ότι όταν $\beta = 2$ το ποσοστό παράδοσης μειώνεται, αφού το στατικό πρωτόκολλο και το πρωτόκολλο πλημμυρίδας, βασίζεται κυρίως στις πλεονάζουσες μεταδόσεις, παρά στη μεταφορά μηνυμάτων. Το πρωτόκολλο πλημμυρίδας εμφανίζει μικρό ποσοστό παράδοσης επειδή υπερχειλίζει τις ουρές των κόμβων. Ως προς την επιλογή γειτόνων μπορούμε να δούμε ότι η στρατηγική επιλογής του καταλληλότερου κόμβου, δηλαδή αυτού με τη μεγαλύτερη κινητικότητα, μπορεί να βελτιώσει το ποσοστό επιτυχίας σε σχέση με τις άλλες δύο στρατηγικές επιλογής γειτόνων.

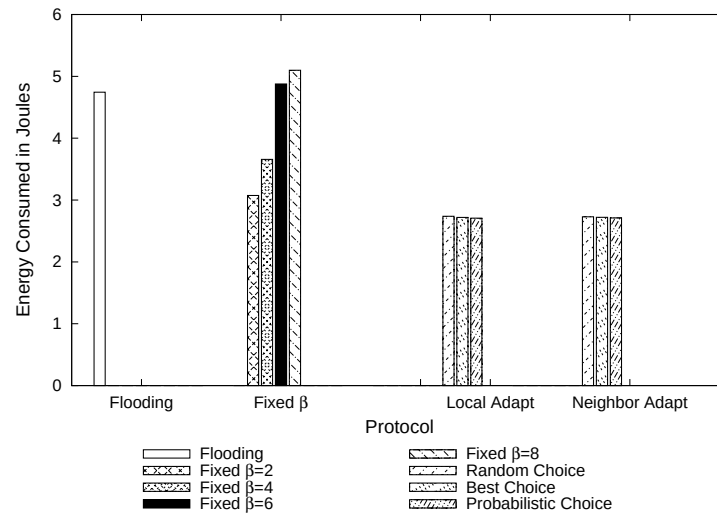


Σχήμα 5.3: Ποσοστό επιτυχούς παράδοσης όταν οι συσκευές κινούνται με διαφορετικούς αλλά αμετάβλητους ως προς το χρόνο ρόλους κίνησης

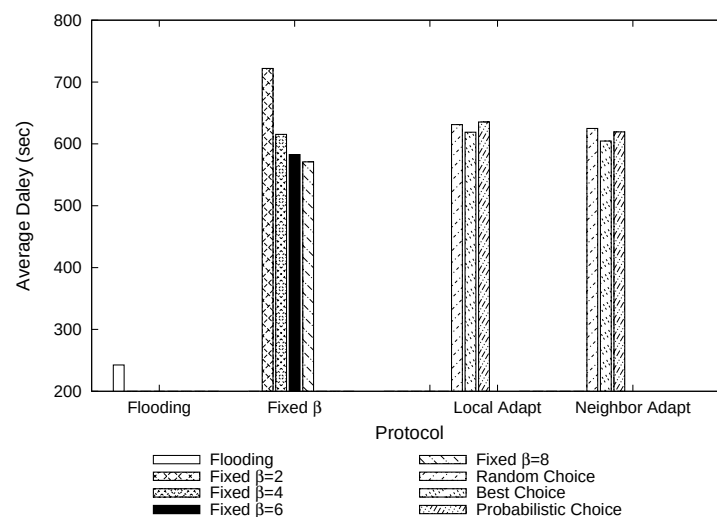
Στο σχήμα 5.4 παρατηρούμε ότι τα πρωτόκολλα πλημμυρισμού και σταθερού β καταναλώνουν σημαντικά ποσά ενέργειας. Τα προσαρμοστικά πρωτόκολλα καταναλώνουν περίπου 40% λιγότερη ενέργεια. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το ότι λόγω του υποπρωτοκόλλου ανίχνευσης γειτόνων και των πολλών μηνυμάτων που αποστέλλει, το πρωτόκολλο σταθερού β , για $\beta = 8$, καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από το πρωτόκολλο πλημμυρισμού μηνυμάτων. Οι τεχνικές προσαρμογής δεν εμφανίζουν σημαντική διαφορά μεταξύ τους.

Η καθυστέρηση παράδοσης φαίνεται στο σχήμα 5.5 παρατηρούμε ότι το πρωτόκολλο πλημμυρισμού έχει πολύ χαμηλή καθυστέρηση, αυτό είναι αναμενόμενο επειδή γίνονται πολλές μεταδόσεις αλλά και επειδή τα μηνύματα που δημιουργούνται μακριά από το S , που θα έχουν και τη μεγαλύτερη καθυστέρηση, είναι πολύ πιθανό να μην φτάσουν ποτέ λόγω των κορεσμένων ουρών, οπότε δεν προσμετρώνται στον υπολογισμό της καθυστέρησης. Το δεύτερο ταχύτερο πρωτόκολλο είναι το πρωτόκολλο σταθερού β όταν $\beta > 4$. Τα προσαρμοστικά πρωτόκολλα βασί-

5.6 Πειραματική αξιολόγηση



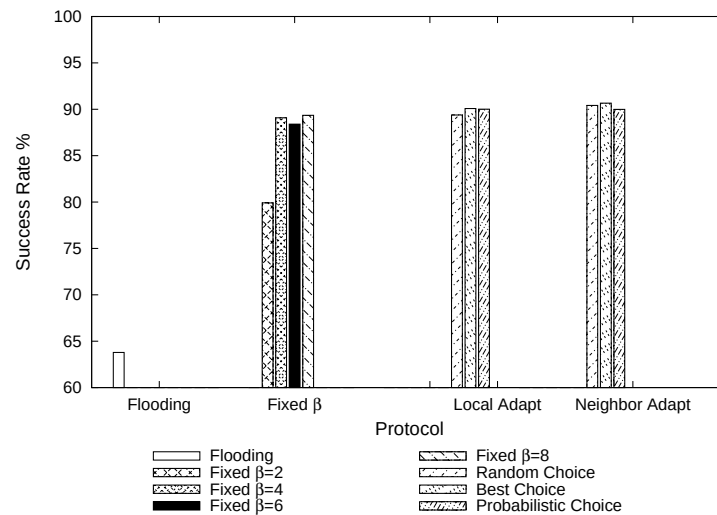
Σχήμα 5.4: Κατανάλωση ενέργειας όταν οι συσκευές κινούνται με διαφορετικούς αλλά αμετάβλητους ως προς το χρόνο ρόλους κίνησης



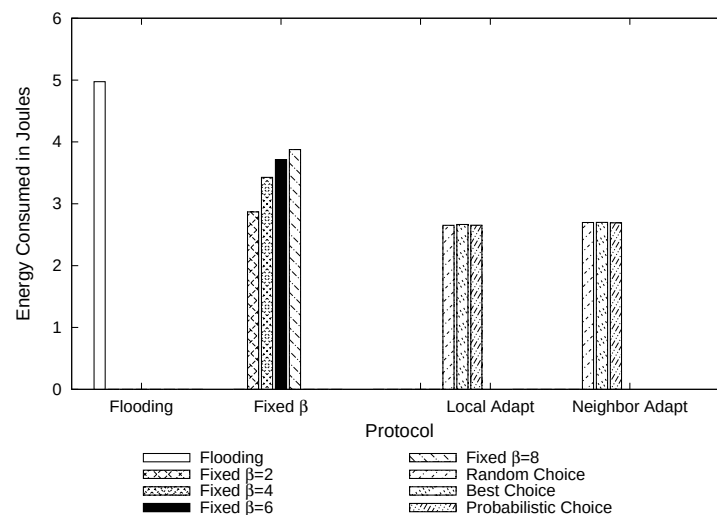
Σχήμα 5.5: Καθυστέρηση παράδοσης όταν οι συσκευές κινούνται με διαφορετικούς αλλά αμετάβλητους ως προς το χρόνο ρόλους κίνησης

ζονται περισσότερο στη μεταφορά μηνυμάτων παρά στις πλεονάζουσες μεταδόσεις, γι'αυτό και υποφέρουν από μεγαλύτερες καθυστερήσεις σε σχέση με τον πλημμυρισμό μηνυμάτων, ενώ σε σχέση με το πρωτόκολλο σταθερού β εμφανίζονται περίπου 10% πιο αργά. Επίσης παρατηρούμε ότι το πρωτόκολλο περιορισμένης επίγνωσης πετυχαίνει λίγο χαμηλότερη καθυστέρηση οπότε φαίνεται ότι αξιολογεί την επιπλέον γνώση. Επίσης, η επιλογή του καταλληλότερου κόμβου βελτιώνει περισσότερο την ενέργεια οπότε δικαιώνεται η προτίμησή μας προς τους «γρήγορους» κόμβους.

Προσαρμοστική διάδοση δεδομένων με κινητούς αισθητήρες



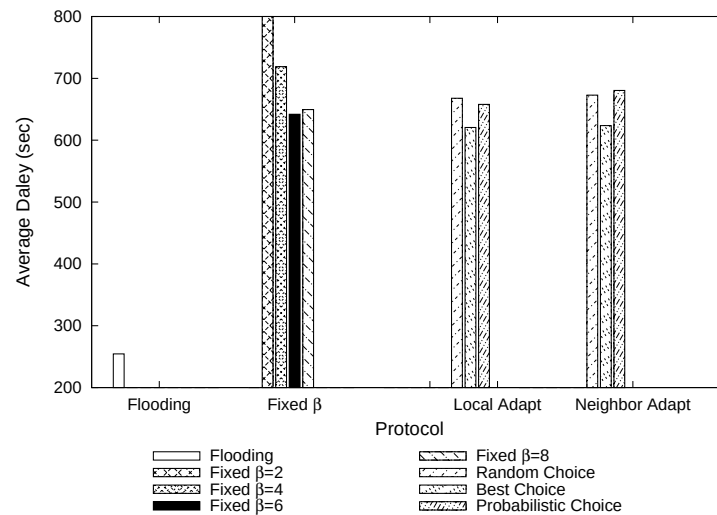
Σχήμα 5.6: Ποσοστό επιτυχούς παράδοσης όταν οι κόμβοι εκτελούν μεικτούς ρόλους κίνησης



Σχήμα 5.7: Κατανάλωση ενέργειας of the protocols όταν οι κόμβοι εκτελούν μεικτούς ρόλους κίνησης

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων, οι κόμβοι κινούνται με βάση κάποιον από τους μεικτούς ρόλους κίνησης (**C1**, ..., **C4**) όπως ορίζονται στη παράγραφο 5.5.2, επομένως η κίνησή τους είναι πολύ πιο δυναμική. Αυτή η δυναμική κίνηση έχει αρνητική επίπτωση στη συμπεριφορά όλων των πρωτοκόλλων, μειώνοντας την επίδοσή τους ως προς το ποσοστό παράδοσης δεδομένων. Το πρωτόκολλο πλημμυρισμού και τα προσαρμοστικά πρωτόκολλα επηρεάζονται λιγότερο, το πρωτόκολλο σταθερού β επηρεάζεται σημαντικά ειδικά για μικρό β . Το πρωτόκολλο περιορισμένης επίγνωσης επηρεάζεται λίγο παραπάνω σε σχέση με την τοπική προσαρμογή. Αυτό εξηγείται λόγω της δυναμικής συμπεριφοράς που αλλάζει τα δεδομένα στη γειτονία των

5.7 Συμπεράσματα και επεκτάσεις



Σχήμα 5.8: Καθυστέρηση παράδοσης όταν οι κόμβοι εκτελούν μεικτούς ρόλους κίνησης

κόμβων πιο γρήγορα επομένως η πληροφορία για τους γείτονες δεν είναι έγκυρη. Όμως και τώρα η επιλογή του καταλληλότερου ως προς το επίπεδο κίνησης, γείτονα πετυχαίνει καλύτερα αποτελέσματα.

Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας (δείτε σχήμα 5.7), παρατηρούμε ότι καταναλώνεται γενικά λιγότερη ενέργεια, ειδικά το πρωτόκολλο με σταθερό β μειώνει αρκετά την κατανάλωση σε σχέση με την προηγούμενη σειρά πειραμάτων. Αυτό εξηγείται από την πτώση του ποσοστού επιτυχίας, η πτώση του σημαίνει λιγότερες παραδόσεις μηνυμάτων οπότε λιγότερες μεταδόσεις που κοστίζουν ενεργειακά. Μοναδική εξαίρεση είναι το πρωτόκολλο πλημμυρισμού που καταναλώνει λίγο περισσότερη ενέργεια. Τα προσαρμοστικά πρωτόκολλα εξακολουθούν να είναι τα πιο οικονομικά.

Οι συχνές μεταβολές στην κίνηση επηρεάζουν και την καθυστέρηση. Το πρωτόκολλο με σταθερό β έχει τη χειρότερη καθυστέρηση από όλα τα πρωτόκολλα. Η καθυστέρηση των προσαρμοστικών πρωτοκόλλων αυξάνεται επίσης αλλά παραμένει πολύ κάτω από αυτή του στατικού πρωτοκόλλου. Το πρωτόκολλο πλημμυρισμού έχει ελαφρώς μεγαλύτερη καθυστέρηση και το ίδιο αλλά παραμένει το ταχύτερο απ'όσ εξετάζουμε. Η επιλογή του καταλληλότερου γείτονα επιτυγχάνει τη χαμηλότερη καθυστέρηση από τις υπόλοιπες μεθόδους επιλογής γείτονα.

5.7 Συμπεράσματα και επεκτάσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο, εστιάζουμε σε δίκτυα με πολύμορφη και δυναμική κίνηση των συσκευών αισθητήρων. Προτείνουμε μια νέα παράμετρο του δικτύου που χαρακτηρίζει την κινητικότητα ενός κόμβου και μπορεί να αποτυπώσει τις διαφορές και την ετερογένεια της κίνησης με αρκετή ακρίβεια. Προτείνουμε προσαρμοστικά πρωτόκολλα τα οποία επωφελούνται από υψηλά επίπεδα κινητικότητας, για να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, αντικαθιστώντας τις πλεονάζουσες μεταδόσεις μηνυμάτων με την μεταφορά μηνυμάτων από τους κινούμενους κόμβους. Η έρευνα που παρουσιάσαμε εδώ συνεχίζει την γραμμή έρευνας που εισάγαμε στα κεφάλαια 2 3

συνδυάζοντας τις δύο τεχνικές, της προσαρμοστικότητας και της περιορισμένης επίγνωσης. Το μόντελο δικτύου που εξετάσαμε εδώ έχει σημαντικές διαφορές από αυτά των προηγούμενων κεφαλαίων, αυτό το γεγονός επιβεβαιώνει την ισχύ των τεχνικών που διερευνούμε σε αυτή τη διατριβή και μας ενθαρρύνει να πιστεύουμε ότι τέτοιες τεχνικές μπορούν να βρουν εφαρμογή για την επίλυση πολλών και ποικιλόμορφων προβλημάτων.

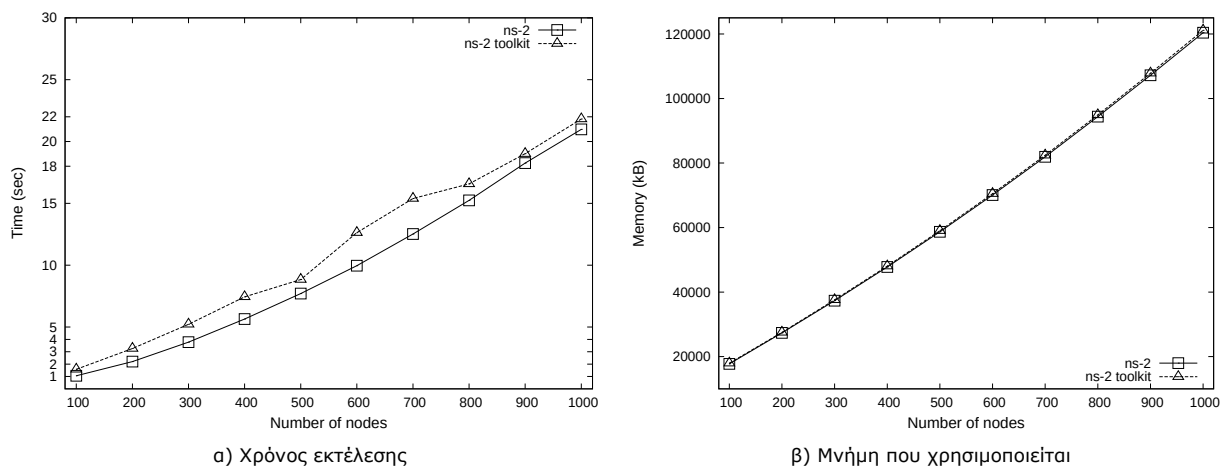
Οι ιδέες που παρουσιάζουμε εδώ μπορούν να επεκταθούν με αρκετούς τρόπους. Είδαμε ότι η ρεαλιστική υπόθεση περιορισμένης μνήμης επηρεάζει την απόδοση των πρωτοκόλλων που μελετήσαμε, η εισαγωγή κάποιου καλύτερου αλγορίθμου διαχείρισης της ουράς μηνυμάτων μπορεί να βελτιώσει ακόμα περισσότερο τις επιδόσεις τους. Ακόμα μπορούν να διερευνηθούν περιπτώσεις εφαρμογών που τα μηνύματα δεν έχουν όλα την ίδια σημασία και κάποια έχει μεγαλύτερη αξία να παραδοθούν σε σχέση με άλλα, επομένως εισάγεται μία νέα παράμετρος για προσαρμογή και διαχείριση των ουρών με βάση τις προτεραιότητες των μηνυμάτων. Επιπλέον, μια ενδιαφέρουσα επέκταση είναι η βελτίωση της μεθόδου υπολογισμού της κινητικότητας προκειμένου να μπορεί να αξιολογήσει όχι μόνο τα χαρακτηριστικά της κίνησης αλλά και τη χρησιμότητά της, πχ να εντοπίσει τροχιές που διέρχονται κοντά από το κέντρο ελέγχου. Επιπλέον ο υπολογισμός της κινητικότητας μπορεί να βοηθήσει στην επίλυση και άλλων προβλημάτων.

5.8 Ρεαλιστική προσομοίωση ασύρματων δικτύων με κινητικότητα, εμπόδια και αποτυχίες κόμβων

Όπως είδαμε στις προηγούμενες παραγράφους, η αξιολόγηση των πρωτοκόλλων μας έγινε κυρίως χρησιμοποιώντας τον δημοφιλή προσομοιωτή δικτύων **ns-2**. Η αξιολόγηση μέσω προσομοίωσης είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την ανάπτυξη αποδοτικών πρωτοκόλλων και αλγορίθμων. Συνήθως η διαδικασία ανάπτυξης ενός νέου πρωτοκόλλου περιλαμβάνει και την αξιολόγησή του σε πραγματικές συνθήκες και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων αποκαλύπτει όχι μόνο τις δυνατότητες του πρωτοκόλλου αλλά και τις αδυναμίες του, δίνοντας την ευκαιρία διόρθωσής τους. Όμως η ανάπτυξη ενός δικτύου αισθητήρων για την διεξαγωγή πειραμάτων έχει σημαντικό και συχνά απαγορευτικό κόστος τόσο σε χρήμα όσο και σε χρόνο, η χρήση πραγματικών πλατφορμών δοκιμών είναι δύσκολη μιας και υπάρχουν πολύ λίγες ενώ δεν υπάρχει κάποιος πρότυπος τρόπος ανάπτυξης μιας εφαρμογής σε αυτές. Με την προσομοίωση είναι εύκολη η διεξαγωγή πειραμάτων σε ευρεία κλίμακα και σε διαφορετικά σενάρια πυκνότητας, ενέργειας και διάταξης κόμβων.

Όμως στην αξιολόγηση των διαφόρων πρωτοκόλλων που είδαμε έως τώρα, τα σενάρια προσομοίωσης περιλάμβαναν περιπτώσεις δικτύων που χαρακτηρίζονταν από δυναμικά φαινόμενα όπως ετερογένεια, ανομοιόμορφη διάταξη και αποτυχίες κόμβων ενώ ένα σημαντικό μέρος της έρευνάς μας επικεντρώνεται σε δίκτυα με κινούμενους κόμβους. Για τέτοιες περιπτώσεις δικτύων, οι υπάρχοντες προσομοιωτές γενικού σκοπού όπως ο **ns-2**, δεν υποστηρίζουν άμεσα την προσομοίωση τέτοιων φαινομένων. Ένας ερευνητής χρειάζεται να υλοποιήσει τη λειτουργικότητα για να προσομοιωθούν τέτοια δίκτυα επιπλέον της υλοποίησης του πρωτοκόλλου. Στην εργασία [19] παρουσιάζουμε την σχεδίαση μίας επέκτασης του **ns-2**, που ονομάζουμε TRAILS, που παρέχει την απαραίτητη λειτουργικότητα για να προσομοιωθούν ασύρματα δίκτυα με κινητικότητα κόμβων, δίκτυα με παρουσία εμποδίων και με αποτυχίες στους κόμβους καθώς και άλλες ευκολίες. Συγκεκριμένα το TRAILS θέτει ως στόχο να πετύχει τα εξής: α) ρεαλιστικά μοντέλα κίνησης, εμποδίων και αποτυχιών, β) ανάδραση στην κινητικότητα ώστε να είναι δυνατή δυνα-

5.8 Ρεαλιστική προσομοίωση ασύρματων δικτύων με κινητικότητα, εμπόδια και αποτυχίες κόμβων



Σχήμα 5.9: Σύγκριση **ns-2** και **ns-2** με την επέκταση TRAILS α) χρόνος εκτέλεσης, β) μνήμη που χρησιμοποιείται, ως προς το πλήθος προσομοιούμενων, κινητών κόμβων

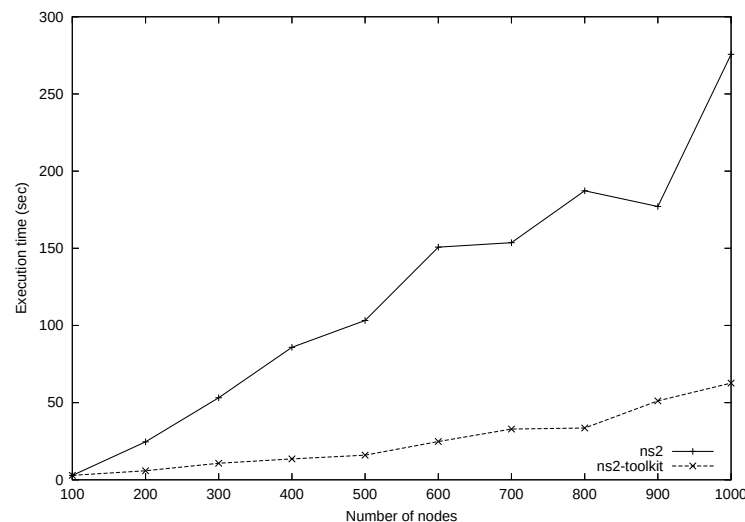
μική αλλαγή τροχιάς ενός κινούμενου κόμβου, γ) εμπόδια με πολύπλοκο σχήμα και δυναμική εξέλιξη κατά την προσομοίωση, δ) εύκολη εξαγωγή στατιστικών, ε) ευελιξία στην υλοποίηση και επαναχρησιμοποίηση κώδικα, στ) αποδοτικότητα, ώστε η επιπλέον λειτουργικότητα του TRAILS να μην εισάγει υπολογιστικό κόστος στην προσομοίωση.

Η αρχιτεκτονική που προτείνουμε για το TRAILS βασίζεται στην υλοποίηση επιμέρους επεκτάσεων, καθεμιά από τις οποίες χρησιμοποιείται για την υλοποίηση ενός συγκεκριμένου τύπου δυναμικής συμπεριφοράς στο δίκτυο. Συγκεκριμένα ορίζουμε τους εξής ακόλουθους τομείς λειτουργιών. Τομέας κινητικότητας: Επεκτείνουμε τον πυρήνα του **ns-2** ώστε να υπάρχει η δυνατότητα υλοποίησης πολύπλοκων μοντέλων κίνησης. Η ειδοποιός διαφορά έγκειται στο ότι η κίνηση υπολογίζεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης επιτρέποντας στα μοντέλα να λαμβάνουν υπόψη τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο.

- Τομέας εμποδίων: Ενσωματώσαμε στο TRAILS μια βιβλιοθήκη που επιτρέπει την αναπαράσταση πολύπλοκων γεωμετρικών σχημάτων και μετασχηματισμών τους. Έτσι παρέχουμε τη λειτουργία για τον ορισμό δυναμικών εμποδίων. Επιπλέον ενσωματώνουμε την ύπαρξη των εμποδίων στο χώρο κίνησης ώστε να είναι εμποδίζεται η διέλευση κόμβων διαμέσου εμποδίων.
- Τομέας αποτυχιών: Επεκτείνουμε τον **ns-2** ώστε οι κόμβοι του δικτύου να τίθενται σε κατάσταση αποτυχίας, δηλαδή να σταματούν να επικοινωνούν με τους υπόλοιπους. Παρέχουμε τη λειτουργικότητα για την υλοποίηση μοντέλων αποτυχίας που αποφασίζουν πότε και ποιοι κόμβοι αποτυγχάνουν. Βυζαντινές αποτυχίες δεν υποστηρίζονται προς το παρόν.
- Τομέας Στατιστικών: Παρέχουμε διευκολύνσεις που επιτρέπουν την καταχώρηση διαφόρων τιμών και μετρικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκειά ή στο τέλος της προσομοίωσης για εξαγωγή συμπερασμάτων.

Πέρα από αυτές τις λειτουργίες υλοποιήσαμε και βελτιώσεις στον ίδιο τον προσομοιωτή, συγκεκριμένα η προσομοίωση της μετάδοσης ενός μηνύματος είναι μια υπολογιστικά ακριβή

εργασία για τον **ns-2** αφού ελέγχεται η απόσταση ενός μεγάλου αριθμού κόμβων προκειμένου να αποφασιστεί ποιοι λαμβάνουν το μήνυμα. Χρησιμοποιώντας k-d δένδρα, υλοποιήσαμε αυτή τη λειτουργία πιο αποδοτικά. Εκτελέσαμε πειράματα για να μετρήσουμε την απόδοση του **ns-2** με ή χωρίς το TRAILS. Όσον αφορά την κίνηση κόμβων χωρίς επικοινωνία, με τη χρήση του TRAILS παρατηρήσαμε μια αύξηση στον χρόνο προσομοίωσης όσο αυξάνει ο αριθμός των κόμβων, σε κάθε περίπτωση όμως η διαφορά ήταν μέχρι 25% σε σχέση με τον **ns-2** χωρίς TRAILS. Η χρήση μνήμης αυξήθηκε κατά ένα σταθερό ποσό. Σε σενάρια με συχνή ανταλλαγή μηνυμάτων, παρατηρήσαμε ότι όσο αυξάνει ο αριθμός των προσομοιούμενων κόμβων, αυξάνει και ο χρόνος προσομοίωσης με ή χωρίς TRAILS. Όμως με χρήση του TRAILS, η αύξηση είναι πολύ μικρότερη και σε σχέση με τον **ns-2** χωρίς TRAILS τελικά μειώνεται ο χρόνος προσομοίωσης μέχρι και 4 φορές, ειδικά σε δίκτυα με μεγάλο αριθμό κόμβων που έχουν μεγάλη ακτίνα διάδοσης.



Σχήμα 5.10: Σύγκριση του χρόνου εκτέλεσης προσομοίωσης σεναρίου με δρομολόγηση δεδομένων στον **ns-2** και **ns-2** με την επέκταση TRAILS

Κεφάλαιο 6

Επίλογος

Στα προηγούμενα κεφάλαια προτείναμε, αναπτύξαμε και διερευνήσαμε διεξοδικά μια πληθώρα ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων. Οι αλγόριθμοί μας αντιμετωπίζουν σημαντικά προβλήματα που προκύπτουν στο πλαίσιο των δικτύων αισθητήρων.

Πιο συγκεκριμένα, για το πρόβλημα αποδοτικής διαχείρισης πόρων και εξοικονόμησης ενέργειας (κεφάλαιο 2) *διερευνούμε τεχνικές προσαρμογής* του κύκλου εργασιών των συσκευών, ελέγχοντας την εναλλαγή λειτουργίας τους ανάμεσα σε κατάσταση αδράνειας και κανονικής λειτουργίας. Η προσαρμογή βασίζεται σε γνώση που μπορεί να αποκτηθεί τοπικά σε κάθε κόμβο και αφορά τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο, όπως τον αριθμό των γειτόνων και τη μέση ενέργειά τους. Ο αλγόριθμός μας αδρανοποιεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα συσκευές με λίγη ενέργεια ή συσκευές με μεγάλο αριθμό γειτόνων, ώστε να παρατείνει τη διάρκεια ζωής των πρώτων και να εξοικονομήσει ενέργεια στους δεύτερους επωφελούμενο από τον πλεονασμό κόμβων. Αυτή η *δυναμική προσαρμογή* του προγράμματος εναλλαγών καταστάσεων είναι μια σημαντική νέα συμβολή όσον αφορά τις σχετικές ιδέες που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία. Χωρίς να μειωθεί η αποδοτικότητα του δικτύου, πετυχαίνουμε πολύ καλούς συμβιβασμούς ανάμεσα στο ποσοστό παράδοσης δεδομένων, την κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση παράδοσης.

Στο κεφάλαιο 3, αντιμετωπίσαμε το πρόβλημα της ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης δεδομένων με ανοχή σε σφάλματα. Προτείναμε ένα πρωτόκολλο που βασίζεται στην *τεχνική απόκτησης περιορισμένης τοπικά γνώσης* για την τοπολογία του δικτύου στην περιβάλλουσα περιοχή ενός κόμβου, η οποία αποκτιέται με μεταβολή της ακτίνας μετάδοσης του κόμβου όταν χρειάζεται. Η γνώση χρησιμοποιείται προκειμένου να σχηματιστεί ένα τοπικά βελτιστοποιημένο μονοπάτι διάδοσης προς το κέντρο ελέγχου. Η διαδρομή μέχρι τον τελικό προορισμό κατασκευάζεται από τη συνένωση αυτών των τμηματικά βελτιστοποιημένων μονοπατιών. Κατά αυτό τον τρόπο πετυχαίνουμε αξιόπιστη επικοινωνία με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και χαμηλότερη καθυστέρηση σε σχέση με καθιερωμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Στη συνέχεια (κεφάλαιο 4) εξετάσαμε δίκτυα με μια νέα δυνατότητα, αυτή της κίνησης του κέντρου αναφοράς και ελέγχου του δικτύου, μία υπόθεση που δημιουργεί πολλές δυνατότητες αλλά και προβλήματα. Αυτή η κατηγορία δικτύων αποτελεί μια νέα προσέγγιση που έχει σημαντικές εφαρμογές και πλεονεκτήματα αλλά παράλληλα απαιτεί την δημιουργία νέων αποδοτικών πρωτοκόλλων. Διερευνήσαμε τον αντίκτυπο που έχει η ύπαρξη ενός *κινητού κέντρου ελέγχου που σαρώνει την περιοχή του δικτύου και συλλέγει δεδομένα*. Προτείναμε μια συλλο-

γή από τεχνικές διάσχισης του δικτύου όπου καθεμία συνδυάζεται με μια κατάλληλη μέθοδο συλλογής δεδομένων. Η τεχνικές διάσχισης βασίζονται κυρίως σε τυχαίους ή πιθανοτικούς αλγόριθμους που καλύπτουν πλήρως ή και μερικώς το δίκτυο, ενώ εξετάσαμε και ντετερμινιστικές τεχνικές. Από τις τεχνικές διάσχισης ξεχωρίζει λόγω των πολύ θετικών αποτελεσμάτων, η *πιθανοτική διάσχιση με ευνοιοκρατικά κριτήρια*, που ευνοεί περιοχές με μεγάλη πυκνότητα ή με μικρή επισκεψιμότητα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί πλήρη συλλογή των δεδομένων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, αλλά με σημαντικό αντίκτυπο στην καθυστέρηση. Ακόμα στο ίδιο περιβάλλον εξετάσαμε την ύπαρξη πολλών κινητών κέντρων ελέγχου και συνδυασμούς κινητών και ακίνητων κέντρων ελέγχου. Προτείναμε ένα κατανομημένο αλγόριθμο που συντονίζει τα κινητά κέντρα ελέγχου ώστε να καλύπτουν καλύτερα την περιοχή του δικτύου.

Έπειτα για την περίπτωση δικτύων με κινητούς αισθητήρες, εξετάζουμε τεχνικές αποδοτικής διάχυσης πληροφορίας στο δίκτυο. Η έρευνα που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 5, συνεχίζει και επεκτείνει την γραμμή έρευνας που εισάγαμε στα κεφάλαια 2 και 3 συνδυάζοντας τις δύο τεχνικές, της προσαρμοστικότητας και της περιορισμένης επίγνωσης. Προτείναμε μια *νέα παράμετρο του δικτύου που χαρακτηρίζει την κινητικότητα* των κόμβων και μπορεί να αποτυπώσει τις διαφορές και την ετερογένεια της κίνησης με αρκετή ακρίβεια. Προτείναμε προσαρμοστικά πρωτόκολλα τα οποία επωφελοούνται από υψηλά επίπεδα κινητικότητας, για να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, αντικαθιστώντας τις πλεονάζουσες μεταδόσεις μηνυμάτων με την μεταφορά μηνυμάτων από τους κινούμενους κόμβους. Επιτύχαμε υψηλό ποσοστό επιτυχούς παράδοσης, σημαντική μείωση ενέργειας και αντίστοιχη ή καλύτερη καθυστέρηση σε σχέση με μη προσαρμοστικά πρωτόκολλα.

Πέρα από τα επιτεύγματα των τεχνικών και πρωτοκόλλων που διερευνήσαμε, μέσω της διεξοδικής αξιολόγησής τους αναδείχθηκαν και εγγενή χαρακτηριστικά της απόδοσης των δικτύων αισθητήρων. Κοινή διαπίστωση σε όλα τα πρωτόκολλα που διερευνήσαμε είναι ότι υπάρχει ένας συμβιβασμός κυρίως, ανάμεσα στην κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση στην παράδοση μηνυμάτων. Αυξάνοντας την κατανάλωση ενέργειας μπορεί να επιταχυνθεί η παράδοση μηνυμάτων, ενώ οι τεχνικές για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας που εξετάσαμε, έχουν σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη καθυστέρηση. Τα πρωτόκολλα που προτείναμε έχουν επίγνωση αυτής της κατάστασης και επιτρέπουν εκ σχεδιασμού, μέσω παραμετροποίησής τους, την ρύθμιση των αντισταθμίσεων ανάμεσα στην κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση.

Μία ακόμα συνεισφορά της διατριβής μας είναι και η μοντελοποίηση δικτύων αισθητήρων με δυναμικά φαινόμενα. Στο κεφάλαιο 2, εξετάζουμε δίκτυα αισθητήρων όπου η ανάπτυξη των κόμβων στην περιοχή του δικτύου μπορεί να γίνει ανά ομάδες σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, ενώ η κατανομή τους μπορεί να μην είναι ομοιόμορφη. Επιπλέον υποθέτουμε την ύπαρξη ετερογένειας στις συσκευές υπό τη μορφή «ισχυρών» συσκευών με περισσότερα αποθέματα ενέργειας. Παρόλο που τέτοιες ιδέες έχουν αναφερθεί και σε άλλες εργασίες, απ'όσο γνωρίζουμε αυτή είναι η πρώτη φορά που εξετάζονται διεξοδικά και αντιπαραβάλλονται ταυτόχρονα. Επιπλέον στο κεφάλαιο 4 εξετάζουμε μια άλλη μορφή ανομοιογένειας, την ύπαρξη περιοχών-θυλάκων υψηλής πυκνότητας κόμβων. Ακόμα, στο πλαίσιο των κινητών δικτύων αισθητήρων (κεφάλαιο 5) προτείνουμε μια νέα μέθοδο για την μοντελοποίηση σύνθετης κίνησης των αισθητήρων. Βασισμένοι σε γνωστά μοντέλα κίνησης από τη βιβλιογραφία, ορίζουμε ρόλους που ανταποκρίνονται σε πολύ διαφορετικές συμπεριφορές κίνησης, τόσο ως προς την ταχύτητα όσο και προς την τροχιά των κόμβων. Έπειτα συνδυάζουμε αυτούς τους ρόλους για να ορίσουμε σύνθετες συμπεριφορές που αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Τέτοιες δυνατότητες μοντε-

λοποίησης έχουν εξεταστεί σε πολύ πιο απλοϊκές μορφές σε ελάχιστες άλλες εργασίες.

Βρισκόμαστε ακόμα στην αρχή των μαζικών εφαρμογών δικτύων αισθητήρων, νέα προβλήματα θα προκύψουν μέσα από την ευρεία χρήση τους. Όμως πιστεύουμε ότι το πρόβλημα της ενεργειακά αποδοτικής λειτουργίας τους θα είναι πάντα επίκαιρο και οι τεχνικές που προτείνουμε εδώ θα συνεχίσουν να δίνουν λύσεις σε προβλήματα χάρη στην απλότητα, δύναμη και ευελιξία τους. Η διατριβή αφήνει πολλά ανοικτά ερευνητικά ερωτήματα. Είδαμε ότι οι τεχνικές μας εφαρμόζονται σε δίκτυα με πολύ διαφορετικές συνθήκες και πετυχαίνουν σημαντικά οφέλη. Στο κεφάλαιο 5 είδαμε μία πρώτη απόπειρα ενσωμάτωσής τους με ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Πιστεύουμε ότι τέτοιες τεχνικές μπορούν να συνδυαστούν ποικιλοτρόπως και να εφαρμοσθούν σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων. Ακόμα ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα περαιτέρω διερεύνησης των αντισταθμίσεων που προκύπτουν, καθώς και η αποδοτική διαχείρησή τους ώστε να επιτευχθούν ακόμα καλύτεροι συμβιβασμοί.

Δημοσιεύσεις σε Περιοδικά

- [1] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Adaptive energy management for incremental deployment of heterogeneous wireless sensors. *Theory of Computing Systems*, 42(1):42--72, January 2008. Special Issue on 17th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures.
- [2] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Fault-tolerant and efficient data propagation in wireless sensor networks using local, additional network information. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 67(4):456--473, April 2007.
- [3] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Efficient data propagation strategies in wireless sensor networks using a single mobile sink. *Elsevier Computer Communications*, 31(5):896--914, March 2008.

Δημοσιεύσεις σε Συνέδρια

- [1] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. An adaptive power conservation scheme for heterogeneous wireless sensors. In *17th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures (SPAA)*, pages 96--105. ACM, ACM Press, July 2005.
- [2] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Efficient and robust data dissemination using limited extra network knowledge. In *2nd IEEE/ACM International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, volume 4026 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 218--233. IEEE/ACM, Springer-Verlag, June 2006.
- [3] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Sink mobility protocols for data collection in wireless sensor networks. In *4th ACM Workshop on Mobility Management and Wireless Access (MOBIWAC)*, pages 52--59, October 2006.
- [4] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, Sotiris Nikolettseas, and Jose Rolim. Fast and energy efficient sensor data collection by multiple mobile sinks. In *5th ACM International Workshop on Mobility Management and Wireless Access (MobiWac)*, pages 25--32. ACM, October 2007.
- [5] Athanasios Kinalis and Sotiris Nikolettseas. Scalable data collection protocols for wireless sensor networks with multiple mobile sinks. In *40th Annual ACM/IEEE Simulation Symposium*, pages 60--72, March 2007.

- [6] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, Georgios Mylonas, Sotiris Nikolettseas, Grigorios Prasinos, and Christos Zaroliagis. Trails, a toolkit for efficient, realistic and evolving models of mobility, faults and obstacles in wireless networks. In *41th Annual ACM/IEEE Simulation Symposium*, pages 23--32. ACM/IEEE, SCS, April 2008.
- [7] Athanasios Kinalis and Sotiris Nikolettseas. Adaptive Redundancy for Data Propagation Exploiting Dynamic Sensory Mobility. In *11th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, pages 149--156. October 2008.

Άλλες Δημοσιεύσεις

- [1] Sotiris Nikolettseas, Ioannis Chatzigiannakis, Athanassios Antoniou, Charilaos Efthymiou, Athanasios Kinalis, and Georgios Mylonas. Energy efficient protocols for sensing multiple events in smart dust networks. In *37th Annual Simulation Symposium (ANSS)*, pages 15--24. SCS, IEEE Computer Society, April 2004.
- [2] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, Athanasios Poulakidas, Grigorios Prasinos, and Christos Zaroliagis. Dap: A generic platform for the simulation of distributed algorithms. In *37th Annual Simulation Symposium (ANSS)*, pages 167--177. SCS, IEEE Computer Society, April 2004.
- [3] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Wireless sensor networks protocols for efficient collision avoidance in multi-path data propagation. In *1st ACM Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (PE-WASUN)*, pages 8--16. ACM, ACM Press, October 2004.
- [4] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Power conservation schemes for energy efficient data propagation in heterogeneous wireless sensor networks. In *38th Annual ACM/IEEE Simulation Symposium (ANSS)*, pages 60--71. SCS, IEEE Computer Society, April 2005.
- [5] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Priority based adaptive coordination of wireless sensors and actors. In *2nd ACM Workshop on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks (Q2SWINET)*, pages 37--44. ACM, October 2006.
- [6] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Adaptive techniques for proactive collision avoidance for multi-path data propagation in wireless sensor networks. *Performance Evaluation*, 63(11):1074--1093, November 2006. Special Issue on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks.
- [7] Athanassios Antoniou, Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, Georgios Mylonas, Sotiris Nikolettseas, and Apostolos Papageorgiou. A peer-to-peer environment for monitoring multiple wireless sensor networks. In *10th ACM/IEEE Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM'07)*, pages 132--135. ACM/IEEE, ACM/IEEE, October 2007.

Βιβλιογραφία

- [1] Crossbow technology inc., mica motes. <http://www.xbow.com/>.
- [2] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Journal of Computer Networks*, 38:393--422, 2002.
- [3] T. Antoniou, A. Boukerche, I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, and S. Nikolettseas. A new energy efficient and fault-tolerant protocol for data propagation in smart dust networks using varying transmission range. In *37th ACM/IEEE Annual Simulation Symposium (ANSS 2004)*, pages 43--52, 2004. IEEE Press.
- [4] J. Aspnes, D. Goldberg, and Y. Yang. On the computational complexity of sensor network localization. In *1st International Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks (ALGOSENSORS)*, pages 32--44, 2004.
- [5] Chen Avin and Bhaskar Krishnamachari. The power of choice in random walks: an empirical study. In *MSWiM '06: Proceedings of the 9th ACM international symposium on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 219--228, New York, NY, USA, October 2006. ACM Press.
- [6] S. Basagni, A. Carosi, and C. Petrioli. Controlled vs. uncontrolled mobility in wireless sensor networks: Some performance insights. In *IEEE 66th Vehicular Technology Conference, VTC*, pages 269--273, 30 2007-Oct. 3 2007.
- [7] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, 1999. A Volume in the Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity.
- [8] A. Boukerche. *Handbook on Algorithms and Protocols for Wireless and Mobile Networks*. CRC/Chapman Hall, 2005.
- [9] A. Boukerche, X. Cheng, and J. Linus. Energy-aware data-centric routing in microsensor networks. In *6th ACM Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM 2003)*, pages 42--49, Paris, France, 2003.
- [10] A. Boukerche, X. Fei, and R. B. Araujo. An energy aware coverage-preserving scheme for wireless sensor networks. In *2nd ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless, Ad Hoc, Sensor and Ubiquitous Networks*, pages 205--213, 2005.

- [11] A. Boukerche and S. Nikolettseas. *Protocols for Data Propagation in Wireless Sensor Networks: A Survey*. Kluwer Academic Publishers, June 2004. Chapter in book.
- [12] A. Boukerche, R. Pazzi, and R. Araujo. A supporting protocol to periodic, event-driven and query-based application scenarios for critical conditions surveillance. In *1st International Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks (ALGOSENSORS 2004)*, 2004.
- [13] N. Bulusu, D. Estrin, L. Girod, and J. Heidemann. Scalable coordination for wireless sensor networks: self-configuring localization systems. In *International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA 2001)*, 2001.
- [14] C. Busch, M. Magdon-Ismail, F. Sinrikaya, and B. Yener. Contention-free MAC protocols for wireless sensor networks. In *18th International Workshop on Distributed Algorithms (DISC 2004)*, pages 245--259. Springer-Verlag, 2004. Lecture Notes in Computer Science, LNCS 3274.
- [15] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, 2(5):483--502, 2002.
- [16] A. Chakrabarti, A. Sabharwal, and B. Aazhang. Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks. In *IPSN*, 2003.
- [17] Tai-Jung Chang, Kuochen Wang, and Yi-Ling Hsieh. A color-theory-based energy efficient routing algorithm for mobile wireless sensor networks. *Computer Networks*, 52(3):531--541, 2008.
- [18] I. Chatzigiannakis, T. Dimitriou, S. Nikolettseas, and P. Spirakis. A probabilistic forwarding protocol for efficient data propagation in sensor networks. *Ad Hoc Networks Journal*, 4(5):621--635, 2005. Also, in: 5th European Wireless Conference on Mobile and Wireless Systems beyond 3G (EW 2004), pp. 344--350, 2004.
- [19] I. Chatzigiannakis, A. Kinalis, G. Mylonas, S. Nikolettseas, G. Prasinos, and C. Zaroliagis. TRAILS, a toolkit for efficient, realistic and evolving models of mobility, faults and obstacles in wireless networks. In *41st ACM/IEEE Annual Simulation Symposium (ANSS)*, pages 23--32, 2008.
- [20] I. Chatzigiannakis, A. Kinalis, and S. Nikolettseas. Sink mobility protocols for data collection in wireless sensor networks. In *4th ACM International Workshop on Mobility Management and Wireless Access Protocols (MobiWac)*, pages 52--59, October 2006.
- [21] I. Chatzigiannakis and S. Nikolettseas. A sleep-awake protocol for information propagation in smart dust networks. In *3rd International Workshop on Mobile, Ad-hoc and Sensor Networks (WMAN 2003)*, page 225, 2003. IPDPS Workshops.
- [22] I. Chatzigiannakis, S. Nikolettseas, and P. Spirakis. Smart dust protocols for local detection and propagation. In *2nd ACM International Annual Workshop on Principles of Mobile Computing (POMC)*, pages 9--16, 2002. Also, in the ACM Mobile Networks (MONET) Journal, Special Issue on Algorithmic Solutions for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks, Vol. 10 (1) (2005).

- [23] I. Chatzigiannakis, S. Nikolettseas, and P. Spirakis. Distributed communication algorithms for ad hoc mobile networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC)*, 63(1):58--74, January 2003.
- [24] I. Chatzigiannakis, S. Nikolettseas, and P. Spirakis. Efficient and robust protocols for local detection and propagation in smart dust networks. *Journal of Mobile Networks and Applications*, 10(1):133--149, 2005. Special Issue on Algorithmic Solutions for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks.
- [25] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Wireless sensor networks protocols for efficient collision avoidance in multi-path data propagation. In *1st ACM Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (PE-WASUN)*, pages 8--16. ACM, ACM Press, October 2004.
- [26] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Efficient and robust data dissemination using limited extra network knowledge. In *2nd IEEE/ACM International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, volume 4026 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 218--233. IEEE/ACM, Springer-Verlag, June 2006.
- [27] E.J. Duarte-Melo and M. Liu. Analysis of energy consumption and lifetime of heterogeneous wireless sensor networks. In *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2002)*, volume 1, pages 21--25. IEEE, 2002.
- [28] C. Efthymiou, S. Nikolettseas, and J. Rolim. Energy balanced data propagation in wireless sensor networks. In *4th International Workshop on Mobile, Ad-hoc and Sensor Networks (WMAN 2004)*, page 225, 2004. IPDPS Workshops. Also, accepted in the *Wireless Networks (WINET, Kluwer Academic Publishers) Journal*, Special Issue on ``Best papers of the 4th Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks (WMAN 2004)'' , 2006.
- [29] M. Elhadef, A. Boukerche, and H. Elkadiki. Diagnosing mobile ad-hoc networks: two distributed comparison-based self-diagnosis protocols. In *4th ACM International Workshop on Mobility Management and Wireless Access*, pages 18--27, 2006.
- [30] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker, and D. Estrin. Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks. *Mobile Computing and Communications Review*, 4(5):11--25, 2001.
- [31] D. Goldenberg, J. Lin, A.S. Morse, B. Rosen, and Y.R. Yang. Towards mobility as a network control primitive. In *5th ACM International Symposium on Mobile Ad-Hoc Networking and Computing (MobiHoc04)*, 2004.
- [32] Yaoyao Gu, Doruk Bozdağ, Robert W. Brewer, and Eylem Ekici. Data harvesting with mobile elements in wireless sensor networks. *Computer Networks*, 50(17):3449--3465, 2006.
- [33] C. Gui and P. Mohapatra. Power conservation and quality of surveillance in target tracking sensor networks. In *10th ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing (MOBICOM 2004)*, pages 129--143, Philadelphia, USA, 2004.

- [34] M.T. Hajiaghayi, N. Immorlica, and V.S. Mirrokni. Power optimization in fault-tolerant topology control algorithms for wireless multi-hop networks. In *9th ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing (MOBICOM)*, pages 300--312, 2003.
- [35] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *33rd IEEE Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2000)*, page 8020, 2000.
- [36] C. Hsin and M. Liu. Network coverage using low duty-cycled sensors: Random & coordinated sleep algorithms. In *3rd ACM International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2004)*, pages 433--442, Berkeley, CA, USA, 2004.
- [37] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *6th ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing (MOBICOM 2000)*, pages 56--67, 2000.
- [38] Exploratory research: Heterogeneous sensor networks. *Intel Technology Journal: Research & Development at Intel*, 2004. <http://www.intel.com/research/exploratory/heterogeneous.htm>.
- [39] D. Jea, A. Somasundara, and M. Srivastava. Multiple controlled mobile elements (data mules) for data collection in sensor networks. In *1st IEEE Conference in Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pages 244--257, 2005.
- [40] P. Juang, H. Oki, Y. Wang, M. Martonosi, L. Peh, and D. Rubenstein. Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with zebranet. In *10th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS2)*, 2002.
- [41] A. Kansal, A. Somasundara, D. Jea, M. Srivastava, and D. Estrin. Intelligent fluid infrastructure for embedded networks. In *2nd ACM/USENIX International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys04)*, 2004.
- [42] S. Kumar, T. Lai, and J. Balogh. On k-coverage in a mostly sleeping sensor network. In *10th ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing (MOBICOM 2004)*, pages 144--158, Philadelphia, USA, 2004.
- [43] P. Leone, S. Nikolettseas, and J. Rolim. An adaptive blind algorithm for energy balanced data propagation in wireless sensor networks. In *1st IEEE/ACM International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS 2005)*, pages 35--48. Springer-Verlag, 2005. Lecture Notes in Computer Science, LNCS 3560.
- [44] C. Liu and J. Wu. Scalable routing in delay tolerant networks. In *Mobihoc*, 2007.
- [45] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. Raghavendra. An adaptive energy-efficient and low-latency mac for data gathering in wireless sensor networks. In *4th International Workshop on Mobile, Ad-hoc and Sensor Networks (WMAN 2004)*, page 224, 2004. IPDPS Workshops.

- [46] J. Luo, J. Panchard, M. Piorkowski, M. Grossglauser, and J-P. Hubaux. Mobiroute: Routing towards a mobile sink for improving lifetime in sensor networks. In *IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Networks (DCOSS)*, volume 4026, pages 480--497, 2006.
- [47] Jun Luo and Jean-Pierre Hubaux. Joint Mobility and Routing for Lifetime Elongation in Wireless Sensor Networks. In *24th IEEE INFOCOM*, Miami, USA, 2005.
- [48] Ming Ma and Yuanyuan Yang. Sencar: An energy efficient data gathering mechanism for large scale multihop sensor networks. In *IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Networks (DCOSS)*, volume 4026, pages 498--513, 2006.
- [49] M.Elhadef, A. Boukerche, and H. Elkadiki. Performance analysis of a distributed comparison-based self-diagnosis protocol for wireless ad-hoc networks. In *9th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems MSWiM*, pages 165--172, 2006.
- [50] V. Mhatre, C. Rosenberg, D. Kofman, R. Mazumdar, and N. Shroff. A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint. *Transactions on Mobile Computing*, January 2004. To appear.
- [51] S. Nikolettseas, I. Chatzigiannakis, H. Euthimiou, A. Kinalis, T. Antoniou, and G. Mylonas. Energy efficient protocols for sensing multiple events in smart dust networks. In *37th Annual Simulation Symposium (ANSS 2004)*, pages 15--24, 2004. IEEE Press.
- [52] A. Rao, Ratnasamy S., Papadimitriou C., Shenker S., and I. Stoica. Geographic routing without location information. In *9th ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing (MOBICOM)*, pages 96--108, 2003.
- [53] Christian Schindelhauer. Mobility in wireless networks. In *32nd Annual Conference on Current Trends in Theory and Practice of Informatics*, Czech Republic, January 2006.
- [54] C. Schurgers, V. Tsiatis, S. Ganeriwal, and M. Srivastava. Topology management for sensor networks: Exploiting latency and density. In *3rd IEEE/ACM Annual International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MOBIHOC 2002)*, pages 135--145, 2002.
- [55] R. C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette. Data mules: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. In *IEEE Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA)*, 2003.
- [56] M. Singh and V. Prasanna. Energy-optimal and energy-balanced sorting in a single-hop wireless sensor network. In *1st IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM 2003)*, pages 50--59, 2003.
- [57] I. Stojmenovic and X. Lin. Loop-free hybrid single-path/flooding routing algorithms with guaranteed delivery for wireless networks. *IEEE Transactions On Parallel and Distributed Systems*, 12(10):1023--1032, 2001.
- [58] W. Wang, V. Srinivasan, and K-C. Chua. Trade-offs between mobility and density for coverage in wireless sensor networks. In *Mobicom*, 2007.

- [59] Y. Wang and H. Wu. DFT-MSN: The delay/fault-tolerant mobile sensor network for pervasive information gathering. In *INFOCOM*, 2006.