

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης
«Επιστήμη και Τεχνολογία των Υπολογιστών»

Διπλωματική Εργασία

Σχεδιασμός Προσομοίωσης και Αξιολόγηση Πρωτοκόλλων
Επικοινωνίας για Ασύρματα Δίκτυα Μικροαισθητήρων

Αθανάσιος Κίναλης

Επιβλέπων

Σωτήρης Νικολετσέας, Λέκτορας

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Χρήστος Κακλαμάνης, Καθηγητής

Σωτήρης Νικολετσέας, Λέκτορας

Παύλος Σπυράκης, Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2005

Πρόλογος

Τα τελευταία χρόνια εξελίξεις στην τεχνολογία της μικροηλεκτρονικής και των ψηφιακών επικοινωνιών έκαναν δυνατή τη δημιουργία αυτόνομων μικροσκοπικών συσκευών, εξοπλισμένων με αισθητήρες, επεξεργαστή και δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας, που ονομάζονται μικροαισθητήρες. Τα ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων αποτελούνται από ένα μεγάλο πλήθος μικροαισθητήρων που τοποθετούνται (συνήθως με τυχαίο τρόπο) σε μία περιοχή ενδιαφέροντος προκειμένου να μετρήσουν την τιμή ενός μεγέθους ενδιαφέροντος. Λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων των συσκευών, τόσο σε υπολογιστικούς πόρους, μνήμη και εμβέλεια επικοινωνίας όσο και κυρίως σε αποθέματα ενέργειας, είναι αναγκαία η ανάπτυξη πρωτοκόλλων επικοινωνίας που λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς αυτούς.

Στο παρόν κείμενο παρουσιάζουμε νέα πρωτόκολλα για ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων. Τα πρωτόκολλα καλύπτουν πολλές σημαντικές πτυχές του προβλήματος της επικοινωνίας σε αυτή την κατηγορία δικτύων, όπως είναι η αποτελεσματική διάδοση δεδομένων, η αποφυγή συγκρούσεων και η εξοικονόμηση ενέργειας. Ο σχεδιασμός τέτοιων πρωτοκόλλων απαιτεί ανάπτυξη και χρήση μη τετριμμένων αλγοριθμικών τεχνικών, όπως είναι η προσαρμοστικότητα, η ικανοποίηση trade-offs, η ετερογένεια του δικτύου ως σχεδιαστικό εργαλείο κλπ. Η ανάλυση των πρωτοκόλλων γίνεται με την διεξαγωγή εξαντλητικών πειραμάτων προσομοίωσης μεγάλης κλίμακας και την μέτρηση της απόδοσής τους σε συγκεκριμένες μετρικές. Οι επιδόσεις των πρωτοκόλλων αξιολογούνται σε σύγκριση με ευρέως αποδεκτά αντίστοιχα πρωτόκολλα που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία.

Το κείμενο διαιρείται σε δύο μέρη, στο πρώτο μέρος δίνεται η δυνατότητα στον αναγνώστη να έρθει σε επαφή με μία εισαγωγή στις βασικές έννοιες και την τεχνολογία των δικτύων μικροαισθητήρων. Ακόμα παρουσιάζονται επιλεγμένα παραδείγματα έρευνας αιχμής από τη διεθνή βιβλιογραφία και τεχνικές και εργαλεία για την προσομοίωση των ασύρματων δικτύων μικροαισθητήρων.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται η πρωτότυπη έρευνα που εκπονήθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται δύο νέα πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας με έμφαση στην εξοικονόμηση ενέργειας και την αποδοτική εφαρμογή τους σε δίκτυα με πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων.

Έπειτα αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα της αποφυγής συγκρούσεων κατά την επικοινωνία πρωτοκόλλων πολλαπλών μονοπατιών. Τα πρωτόκολλά μας αξιολογούν εκλεπτυσμένες, αλλά ταυτόχρονα απλές, τεχνικές παρακολούθησης της κατάστασης του δικτύου και προσαρμόζουν ανάλογα τη λειτουργία τους ώστε να μειώσουν τις παρεμβολές μεταξύ των κόμβων.

Τέλος, επεκτείνουμε την ιδέα της προσαρμοστικότητας και σε πρωτόκολλα για την εξοικονόμηση ενέργειας. Τα πρωτόκολλα αυτά ανάλογα με κάποιες μετρικές του δικτύου, που εκτιμούνται τοπικά και εμμέσως, αυξάνουν ή μειώνουν τον κύκλο εργασιών των συσκευών μικροαισθητήρων ώστε να εξασφαλιστεί η αποδοτικότητα τους και να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που στήριξε τις αποφάσεις μου, όσο λάθος και αν ήταν αυτές, και την προσπάθειά μου όλα αυτά τα χρόνια.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Σωτήρη Νικολετσέα, Λέκτορα του Πανεπιστημίου Πατρών, για την βοήθεια, την καθοδήγηση και την εποικοδομητική, και πολύ διδακτική, συνεργασία μας. Επίσης οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Δρ. Ιωάννη Χατζηγιαννάκη, που με βοήθησε σε πολλές δύσκολες περιόδους της διπλωματικής και αποδείχτηκε ένας ανεκτίμητος συνεργάτης και φίλος.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Χαρίλαο Ευθυμίου και Γεώργιο Μυλωνά για την άφογη συνεργασία και τη βοήθεια που μου παρείχαν.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου, παλιούς και νέους, που έκαναν αυτή την προσπάθειά μου πολύ πιο ευχάριστη.

Αφιερώνεται στον ανηψιό μου.

Περιεχόμενα

I	Εισαγωγή στα δίκτυα έξυπνης σκόνης	1
1	Ασύρματα Δίκτυα Μικροαισθητήρων	3
1.1	Χαρακτηριστικά ασύρματων δικτύων μικροαισθητήρων	3
1.2	Εφαρμογές ασύρματων δικτύων μικροαισθητήρων	5
1.3	Συσκευές μικροαισθητήρων	6
2	Πρωτόκολλα MAC	9
2.1	S-MAC	10
2.2	T-MAC	11
2.3	B-MAC	12
3	Πρωτόκολλα Διάδοσης Πληροφορίας	13
3.1	Directed Diffusion	13
3.2	LEACH	15
3.3	TEEN	16
3.4	LTP	16
3.5	PFR	17
3.6	VTRP	18
3.7	NRG	19
4	Προσομοίωση	21
4.1	Κατηγορίες προσομοίωσης	22
4.1.1	Προσομοίωση διακριτών γεγονότων	22
4.1.2	Προσομοίωση συνεχούς χρόνου	22
4.1.3	Προσομοίωση Monte Carlo	22
4.2	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα προσομοίωσης	22
4.3	OPNET Modeler	23
4.4	ns-2	24
4.5	GloMoSim	26

5	Ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα για την ανίχνευση πολλαπλών γε- γονότων σε ασύρματα δίκτυα έξυπνης σκόνης	29
5.1	Το μοντέλο	29
5.1.1	Το πρόβλημα της διάδοσης δεδομένων	32
5.2	Sleep-Awake Probabilistic Forwarding Protocol–SW-PFR	33
5.2.1	Φάση 1: Η φάση δημιουργίας μετώπου διάδοσης	33
5.2.2	Φάση 2: Η φάση στοχαστικής προώθησης	35
5.2.3	Υπολογισμός της γωνίας ϕ	35
5.2.4	Εξοικονόμηση ενέργειας	35
5.3	Hierarchical Threshold sensitive Energy Efficient Network protocol (H-TEEN)	36
5.3.1	Φάση αυτοοργάνωσης	37
5.3.2	Φάση διάδοσης δεδομένων	38
5.4	Λεπτομέρειες υλοποίησης	38
5.5	Μετρικές απόδοσης	40
5.6	Πειραματική αξιολόγηση	41
5.7	Συζήτηση και συμπεράσματα	45
6	Πρωτόκολλα Αποφυγής Συγκρούσεων σε Ασύρματα Δίκτυα Μικροαι- σθητήρων για Μετάδοση Δεδομένων Μέσω Πολλαπλών Μονοπατιών	47
6.1	Μετάδοση Πληροφορίας Μέσω Πολλαπλών Μεταδόσεων	47
6.2	Η ανάγκη για αποδοτικά πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης μέσου	48
6.3	Το μοντέλο	50
6.4	Simple Random Backoff Protocol (SRBP)	51
6.5	Adaptive Random Backoff Protocol (ARBP)	52
6.5.1	Το υποπρωτόκολλο παρακολούθησης πυκνότητας ($P_{density}$)	53
6.5.2	Το υποπρωτόκολλο παρακολούθησης κυκλοφορίας μηνυμάτων ($P_{traffic}$)	54
6.5.3	Προσαρμογή της χρονικής αναμονής	54
6.6	Range Adaptive Random Backoff Protocol (RARBP)	55
6.7	Πειραματική αξιολόγηση	56
6.8	Συμπεράσματα	63
7	Πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας για αποδοτική διάδοση δεδο- μένων σε ετερογενή δίκτυα αισθητήρων	67
7.1	Το μοντέλο	68
7.2	Οικογένεια πρωτοκόλλων για εξοικονόμηση ενέργειας	70
7.3	Sleep-Awake Protocol (SWP)	70
7.4	Density Adaptive Sleep–Awake Protocol (DA-SWP)	71
7.4.1	Το υποπρωτόκολλο παρακολούθησης πυκνότητας ($P_{density}$)	72
7.4.2	Προσαρμογή με βάση την πυκνότητα	73
7.5	Energy Adaptive Sleep–Awake Protocol (EA-SWP)	73
7.5.1	Το υποπρωτόκολλο μέτρησης ενέργειας (P_{energy})	74

7.5.2	Προσαρμογή με βάση τα ενεργειακά αποθέματα	74
7.6	Αρχιτεκτονική υλοποίησης των πρωτοκόλλων	74
7.7	Υλοποίηση των πρωτοκόλλων	75
7.8	Πειραματική αξιολόγηση	76
7.8.1	Οργάνωση των πειραμάτων	76
7.8.2	Πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση	76
7.9	Συμπεράσματα	87

Μέρος Ι

Εισαγωγή στα δίκτυα έξυπνης σκόνης

Κεφάλαιο 1

Ασύρματα Δίκτυα Μικροαισθητήρων

Τα τελευταία χρόνια οι ραγδαίες εξελίξεις στην τεχνολογία της μικροηλεκτρονικής έκαναν δυνατή την κατασκευή μικρότερων και ταχύτερων ημιαγωγών. Παράλληλα η έκρηξη στον τομέα των τηλεπικοινωνιών οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών αποδοτικών τεχνικών για ασύρματη επικοινωνία. Ο συνδυασμός των δύο τομέων έκανε δυνατή τη δημιουργία *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. 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 φορητή πηγή ενέργειας που διαθέτουν. Λόγω αυτών των περιορισμών είναι αναγκαία η ανάπτυξη πρωτοκόλλων επικοινωνίας 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 σαν σωματίδια ή κόκκοι. Για μία εξαιρετική εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων δείτε [1].

1.1 Χαρακτηριστικά ασύρματων δικτύων μικροαισθητήρων

Η έρευνα στον τομέα των δικτύων μικροαισθητήρων έχει εντατικοποιηθεί τα τελευταία χρόνια, αφού σε σχέση με τα κλασσικά δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν αυξημένο πεδίο εφαρμογών. Πιο αναλυτικά, τα δίκτυα αισθητήρων διαθέτουν κατάλληλο εξοπλισμό για να μετρήσουν ή να αισθανθούν τη θερμοκρασία, την υγρασία, κίνηση κάποιου οχήματος, συνθήκες φωτισμού, πίεση, επίπεδα θορύβου, την παρουσία ή απουσία συγκεκριμένων αντικειμένων, επίπεδα μηχανικής καταπόνησης σε προσκολλημένα αντικείμενα, ταχύτητα ή κατεύθυνση και το μέγεθος αντικειμένων, χωρίς να περιορίζονται σε αυτά. Η δημιουργία ενός δικτύου γίνεται με την τοποθέτηση των

αισθητήρων με κάποιο τρόπο στην περιοχή ενδιαφέροντος. Μερικοί μέθοδοι για την τοποθέτηση των συσκευών είναι οι εξής: ρίψη από ένα αεροπλάνο, ελικόπτερο ή πύραυλο, ρίψη με κάποιο καταπέλτη, να τοποθετηθούν ένας προς ένα από κάποιον άνθρωπο ή robot ή να απλωθούν από ένα όχημα που κινείται μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Αναφέρουμε μερικά χαρακτηριστικά των εφαρμογών των κλασικών δικτύων αισθητήρων.

- Οι αισθητήρες τοποθετούνται μακριά από το φαινόμενο ενδιαφέροντος και με ειδικές τεχνικές, συνήθως αρκετά περιπλοκές, διεξάγουν μετρήσεις.
- Συνήθως χρειάζεται η δημιουργία σταθερής υποδομής για την τροφοδοσία με ενέργεια και την επικοινωνία με τις συσκευές.
- Ο αριθμός των αισθητήρων είναι μερικοί κόμβοι, μερικές δεκάδες ίσως. Η θέση τους στο δίκτυο είναι προσεκτικά υπολογισμένη και στέλνουν σε κεντρικό κόμβο τις μετρήσεις τους.

Από την άλλη πλευρά τα ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων έχουν πολλά πλεονεκτήματα.

- Οι μικροαισθητήρες τοποθετούνται μέσα στη περιοχή ενδιαφέροντος ή πολύ κοντά σε αυτή.
- Δεν χρειάζεται η ύπαρξη υποδομής αφού οι συσκευές είναι αυτόνομες και επικοινωνούν ασύρματα.
- Τα δεδομένα μπορούν να υποστούν προεπεξεργασία στον επεξεργαστή των μικροαισθητήρων.
- Το χαμηλό κόστος των συσκευών επιτρέπει την ανάπτυξή τους σε μεγάλες περιοχές ή περιοχές με παράγοντες που φθείρουν τις συσκευές (π.χ. βροχή, υψηλή θερμοκρασία).
- Η πληροφορία μπορεί να μεταφερθεί από συσκευή σε συσκευή σε ένα κεντρικό κόμβο χωρίς να χρειάζεται η απεύθείας επικοινωνία.

Αυτά τα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων μπορεί να θυμίσουν στον αναγνώστη τα *ad-hoc* δίκτυα. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχουν έμφυτες διαφορές που καθιστούν τις τεχνικές και τα πρωτόκολλα των *ad-hoc* δικτύων αναποτελεσματικά ή εντελώς ακατάλληλα για τα δίκτυα μικροαισθητήρων. Οι πιο σημαντικές από αυτές τις διαφορές είναι (δείτε και [1]):

- Το πλήθος των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από ένα κλασικό *ad-hoc* δίκτυο.
- Οι αισθητήρες είναι πολύ πιθανό να χαλούν λόγω των φτηνών υλικών ή λόγω της έκθεσής τους σε ζημιογόνους παράγοντες.
- Οι εμβέλεια επικοινωνίας και η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων είναι πολύ περιορισμένες.
- Τα αποθέματα ενέργειας είναι πολύ περιορισμένα και εξαντλούνται γρήγορα.

- Λόγω βλαβών ή εξάντλησης των ενεργειακών αποθεμάτων των συσκευών η τοπολογία του δικτύου αλλάζει πολύ γρήγορα.

1.2 Εφαρμογές ασύρματων δικτύων μικροαισθητήρων

Οι εφαρμογές των ασύρματων δικτύων μικροαισθητήρων αναμένεται να αλλάξουν τον τρόπο που πραγματοποιούνται σήμερα ένα πλήθος εμπορικών, στρατιωτικών και επιστημονικών εφαρμογών. Ειδικά, για την επιστημονική έρευνα τα δίκτυα μικροαισθητήρων δίνουν τη δυνατότητα να παρατηρηθούν φαινόμενα ευρείας κλίμακας που είναι αδύνατο να παρατηρηθούν σε εργαστηριακές συνθήκες. Χιλιάδες μικρών αισθητήρων μπορούν να τοποθετηθούν σε εξωτερικούς χώρους και να καταγράψουν κλιματικές συνθήκες, ή να ριφθούν σε ρήγματα ή ηφαίστεια για την παρακολούθηση διάφορων γεωλογικών φαινομένων. Οι κόμβοι είναι σε θέση να μεταδίδουν την πληροφορία, με τρόπο που να αποφεύγονται φυσικά εμπόδια όπως βράχια και δέντρα. Έτσι μπορούν να αναπτυχθούν σε ένα δάσος για την καταγραφή της βιοποικιλότητας περιοχών ή για την έγκαιρη προειδοποίηση από πυρκαγιές. Πολύ σημαντική μπορεί να είναι η εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων στη γεωργία, όπου μπορεί να παρακολουθούνται οι συνθήκες ανάπτυξης των εσοδειών ενώ μπορούμε να μετράμε τα επίπεδα μόλυνσης στο έδαφος ή στον αέρα από φυτοφάρμακα.

Η ευκολία με την οποία μπορούν τα δίκτυα αυτά να αναπτυχθούν, η δυνατότητα αυτοοργάνωσης και η ανοχή σε σφάλματα (fault-tolerance) κάνουν τα δίκτυα αισθητήρων πολύ ελκυστικά για στρατιωτικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν στον εξοπλισμό μίας ομάδας ώστε να είναι γνωστή η κατάσταση του εξοπλισμού. Αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε κρίσιμες περιοχές, πολύ εύκολα και πολύ γρήγορα, και αυτές οι περιοχές να επιβλέπονται συνεχώς. Ένα ακόμη σενάριο εφαρμογής είναι η πολύ γρήγορη αναγνώριση αντίπαλων δυνάμεων. Τέλος, δίκτυα αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση χημικών ή βιολογικών επιθέσεων.

Δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διατήρηση των επιθυμητών επιπέδων θερμοκρασίας και υγρασίας σε ένα κτίριο ελέγχοντας τη ροή του αέρα και τη θερμοκρασία, μία λύση, που μπορεί να οδηγήσει στην ελάττωση της κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη και θέρμανση κτιρίων. Μία άλλη πιθανή εφαρμογή είναι τα διαδραστικά μουσεία, όπου τα αντικείμενα εφοδιάζονται με αισθητήρες ώστε να μπορούν να αντιδρούν σε ερεθίσματα όπως αφή ή ομιλία προκειμένου να πληροφορήσουν τον επισκέπτη και να προστατεύσουν τα εκθέματα. Η παρακολούθηση και ανίχνευση οχημάτων είναι μία ακόμα πιθανή εφαρμογή δικτύου αισθητήρων. Τέλος, αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε χώρους αποθήκευσης, πράγμα που θα επιτρέπει σε κάποιον ανά πάσα στιγμή να γνωρίζει εάν κάποιο συγκεκριμένο αντικείμενο είναι διαθέσιμο ή όχι.

Speed	4MHz
Flash	128K bytes
SRAM	4K bytes
Serial Comms	UART
Processor Current Draw	5.5 mA
Serial Flash	4Mbit
Radio Frequency	916 MHz
Data Rate	40 Kbits/sec
Radio Current Draw	12mA (transmit), 1.8mA(receive)
Radio Range	30m
Power	2 × AA batteries
User Interface	3 LEDs

Πίνακας 1.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Mica Motes

1.3 Συσκευές μικροαισθητήρων

Αρκετές προσπάθειες για την ανάπτυξη συσκευών αισθητήρων βρίσκονται σε εξέλιξη και συνήθως είναι προϊόν της συνεργασίας κάποιου ακαδημαϊκού ιδρύματος σε συνεργασία με κάποια εταιρία κατασκευής ηλεκτρονικών συστημάτων. Μία από τις πρώτες συσκευές κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στο Berkeley και ονομάστηκε Cots Dust. Η ομάδα του Berkeley (που τώρα έχει ιδρύσει την εταιρία Crossbow Technology Inc.) έβγαλε μία πληθώρα συσκευών η πιο επιτυχημένη από τις οποίες είναι η σειρά Mica Motes (δείτε [21]).

Τα Mica Motes αποτελούνται από μία πλακέτα που περιλαμβάνει τον επεξεργαστή, τη μνήμη, το κύκλωμα τηλεπικοινωνίας και μία σειριακή σύνδεση στην οποία μπορεί να συνδεθεί είτε μία δεύτερη πλακέτα που περιέχει τους αισθητήρες είτε ένα ειδικό κύκλωμα για την επικοινωνία με έναν υπολογιστή. Τα χαρακτηριστικά της συσκευής παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1.

Το λειτουργικό σύστημα των Mica Motes ονομάζεται TinyOS (δείτε [33]), είναι βασισμένο στην διαχείριση γεγονότων και ορίζει ένα σύνολο διεπαφών με τις οποίες ο χρήστης μπορεί να προσπελάσει τους αισθητήρες και το πομποδέκτη, ενώ είναι σχεδιασμένο ώστε να επεκτείνεται εύκολα και να υποστηρίζει πρόσθετες συσκευές. Η τελευταία έκδοση της πλατφόρμας Mica Motes ονομάζεται MicaZ, τα χαρακτηριστικά της φαίνονται στο πίνακα 1.2.

Μια άλλη πλατφόρμα *motes* είναι τα Telos Sky Motes (δείτε [23]). Αν και ο πομποδέκτης τους είναι ίδιος με αυτό των MicaZ Motes, αυτές οι συσκευές έχουν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας από τα Mica Motes, χάρη στον επεξεργαστή τους. Χρησιμοποιούν και αυτές το TinyOS σαν λειτουργικό σύστημα ενώ προσφέρουν εύκολη σύνδεση μέσω θύρας USB. Τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στο πίνακα 1.3.

Speed	8MHz
Flash	128K bytes
SRAM	4K bytes
Serial Comms	UART
Processor Current Draw	8 mA
Serial Flash	4Mbit
Radio Frequency	2400–2483.5 MHz
Data Rate	250 Kbits/sec
Radio Current Draw	19.7mA (transmit), 11mA(receive)
Radio Range	100m
Power	2 × AA batteries
User Interface	3 LEDs

Πίνακας 1.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά MicaZ Motes

Speed	8MHz
Flash	48K bytes
SRAM	10K bytes
USB Comms	USB 2.0
Processor Current Draw	600 μ A
Radio Frequency	2400–2483.5 MHz
Data Rate	250 Kbits/sec
Radio Current Draw	19.7mA (transmit), 11mA(receive)
Radio Range	100m
Power	2 × AA batteries

Πίνακας 1.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά Telos Sky Motes

Κεφάλαιο 2

Πρωτόκολλα MAC

Τα πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control **MAC**) βρίσκονται στο χαμηλότερο επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλων δικτύωσης (δείτε [28, 30]). Το επίπεδο **MAC** ελέγχει την πρόσβαση στο μέσο δηλαδή πότε μπορεί ένας κόμβος να χρησιμοποιήσει το μέσο για να μεταδώσει ή να λάβει πληροφορία. Στην περίπτωση των ασύρματων επικοινωνιών το μέσο είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται στον χώρο. Ο στόχος αυτών των πρωτοκόλλων είναι να μειώσουν τις συγκρούσεις κατά την επικοινωνία των συσκευών μικροαισθητήρων, να εξοικονομήσουν ενέργεια και να μεγιστοποιήσουν την μεταφορά δεδομένων.

Κατά την ασύρματη επικοινωνία 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 και η ανάγκη για επανάληψη της εκπομπής σημαίνει σπατάλη ενέργειας.
- **Αδρανείς κόμβοι:** Συχνά το τμήμα ραδιοεπικοινωνίας ενός κόμβου παραμένει ανοικτό αλλά αδρανές επειδή ο κόμβος περιμένει τη λήψη ενός μηνύματος. Η αιτία αυτής της σπατάλης ενέργειας είναι το ότι η επικοινωνία στα ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων δεν γίνεται συγχρονισμένα με αποτέλεσμα να υπάρχουν μη αμελητέοι χρόνοι αναμονής για την άφιξη 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, και η διαδικασία αποκωδικοποίησης των ραδιοκυμάτων είναι μια ενεργοβόρα διαδικασία που απαιτεί τη λειτουργία πολύπλοκων κυκλωμάτων αποδιαμόρφωσης.
- **Κόστος πρωτοκόλλου:** Το ίδιο το **MAC** πρωτόκολλο χρειάζεται να εκπέμπει κάποια

μηνύματα προκειμένου να επιτελέσει το έργο του. Αυτά τα επιπλέον μηνύματα χαρακτηρίζουν και το κόστος της λειτουργίας ενός **MAC** πρωτοκόλλου. Ανάλογα με το πρωτόκολλο ο αριθμός και το μέγεθος αυτών των μηνυμάτων διαφέρει και υπό αντίξοες συνθήκες το κόστος του πρωτοκόλλου **MAC** μπορεί να είναι συγκρίσιμο με το κόστος μετάδοσης δεδομένων.

Τα φαινόμενα που μόλις περιγράψαμε αντιμετωπίζονται με διάφορους τρόπους από το **MAC** στρώμα. Συνήθως για την αποφυγή των συγκρούσεων χρησιμοποιούνται μηχανισμοί **CSMA**, δηλαδή κάθε κόμβος «ακούει» το μέσο ώστε να εντοπίσει μεταδόσεις άλλων κόμβων και να αναβάλλει τη δικιά του. Ακόμα πριν την αποστολή του κύριου όγκου των δεδομένων ο πομπός στέλνει πρώτα ένα σύντομο μήνυμα-αίτηση (**RTS-Request To Send**) στο δέκτη, και προχωρά στη μετάδοση του ωφέλιμου μηνύματος μόνο όταν ο δέκτης δώσει την άδεια του με ένα μήνυμα **CTS (Clear To Send)**. Όταν το πρωτόκολλο **MAC** ανιχνεύσει ότι μία απόπειρα για αποστολή κατέληξε σε σύγκρουση, τηρείται ένα τυχαίο διάστημα αναμονής, πριν γίνει μία νέα απόπειρα αποστολής, ενώ η αναμονή αυξάνει εκθετικά με κάθε αποτυχημένη προσπάθεια αποστολής.

Πιο προχωρημένες, αλλά και πιο απαιτητικές σε πόρους, τεχνικές αποφυγής συγκρούσεων είναι το **TDMA** κατά το οποίο δημιουργείται ένα χρονοπρόγραμμα που ορίζει συγκεκριμένες χρονικές στιγμές για κάθε κόμβο στις οποίες μπορεί να λάβει ή να εκπέμψει ένα μήνυμα. Επίσης το **FDMA** διαχωρίζει το φάσμα ασύρματων συχνοτήτων σε πολλά κανάλια και επιτρέπει ταυτόχρονη επικοινωνία μέσω των διαφορετικών καναλιών χωρίς να γίνονται συγκρούσεις. Ακόμα η τεχνική **CDMA** επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση ενός καναλιού για μετάδοση πολλών διαφορετικών πακέτων. Αυτό επιτυγχάνεται με προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης των δεδομένων, με βάση ένα σύνολο κωδικών τα διαφορετικά σήματα διαμορφώνονται έτσι ώστε ο παραλήπτης γνωρίζοντας τον κωδικό του αποστολέα να μπορεί να ανακτήσει τα δεδομένα από το πολυπλεγμένο σήμα.

Η επιπλέον κατανάλωση ενέργειας που οφείλεται στο πρόβλημα των αδρανών κόμβων και των άκυρων λήψεων συνήθως αντιμετωπίζεται με σβήσιμο του κυκλώματος του δέκτη του σωματιδίου για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Η δυσκολία εφαρμογής αυτής της μεθόδου είναι στο να υπολογιστεί σωστά το διάστημα αυτό ώστε να αποφευχθεί η λήψη ενός μηνύματος που δεν προορίζεται για τον κόμβο ή η άσκοπη παρακολούθηση του μέσου. Όμως ο δέκτης ενός κόμβου, πρέπει να είναι σε κατάσταση λειτουργίας μέχρι την εμφάνιση του επόμενου μηνύματος, το οποίο μπορεί να προορίζεται για αυτόν. Συνήθως για να επιλυθούν τα προβλήματα αυτού του τύπου εφαρμόζονται τεχνικές συγχρονισμού των σωματιδίων όπως το **TDMA**. Παρακάτω παρουσιάζουμε διάφορα **MAC** πρωτόκολλα που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για ασύρματα δίκτυα έξυπνης σκόνης.

2.1 S-MAC

Το **S-MAC** (δείτε [32]) εστιάζει σε περιπτώσεις δικτύων όπου τα σωματίδια παραμένουν για αρκετό διάστημα αδρανή μέχρι να καταγράψουν κάποιο γεγονός και να εκπέμψουν δεδομένα. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί ένα σύνολο τεχνικών προκειμένου να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας που προκαλείται από αδρανείς κόμβους και άκυρες λήψεις καθώς επίσης για να επιταχύνει την παράδοση μηνυμάτων.

Συγκεκριμένα, το **S-MAC** ορίζει εναλλασσόμενες περιόδους κατά τις οποίες κλείνει το κύκλωμα τηλεπικοινωνιών των σωματιδίων οπότε δεν υπάρχει καμία επικοινωνία, ενώ ενδιάμεσα ενεργοποιείται το κύκλωμα τηλεπικοινωνιών προκειμένου ο κόμβος να συμμετέχει στην ανταλλαγή μηνυμάτων. Στη φάση αρχικοποίησης του δικτύου οι κόμβοι οργανώνονται σε ομάδες. Κάθε κόμβος επιλέγει ένα χρονοπρόγραμμα με τις περιόδους ενεργοποίησης και αδράνειας του πομποδέκτη του. Κάθε κόμβος περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα πριν εκπέμψει το χρονοπρόγραμμά του. Αν εν τω μεταξύ ακούσει το πρόγραμμα κάποιου άλλου κόμβου τότε συγχρονίζεται με αυτόν ακολουθώντας το πρόγραμμα που άκουσε. Έτσι δημιουργούνται ομάδες κόμβων που έχουν συγχρονισμένα προγράμματα μεταδόσεων, ενώ μερικοί κόμβοι μπορεί να ανήκουν σε παραπάνω από μία ομάδες οπότε ακολουθούν και τα δύο προγράμματα. Κατ' αυτό τον τρόπο το **S-MAC** αντιμετωπίζει το πρόβλημα των αδρανών κόμβων αφού η επικοινωνία ανάμεσα στους κόμβους μίας ομάδας γίνεται μόνο σε συγκεκριμένες περιόδους.

Για την αποφυγή συγκρούσεων χρησιμοποιείται **CSMA** με ανταλλαγή RTS CTS μηνυμάτων. Επίσης κάθε κόμβος εκπέμπει μαζί με τα RTS, CTS το μέγεθος των δεδομένων που θα ακολουθήσουν. Έτσι οι κόμβοι που ακούνε τα RTS, CTS ξέρουν ότι μπορούν να κλείσουν τους δέκτες τους για δεδομένο χρονικό διάστημα, οπότε αποφεύγεται και το πρόβλημα των άκυρων λήψεων.

Η αποστολή μεγάλων μηνυμάτων γίνεται με οικονομικό τρόπο στο **S-MAC**, τα δεδομένα διαιρούνται σε ένα μικρότερο αριθμό πακέτων ενώ τα RTS, CTS αναφέρουν το χρόνο που χρειάζεται για να μεταδοθούν όλα τα πακέτα. Στην πειραματική αξιολόγηση που διεξάγουν οι συγγραφείς συγκρίνουν το **S-MAC** με το 802.11 όπου φαίνεται ότι πετυχαίνει να εξοικονομήσει αρκετή ενέργεια με αντάλλαγμα αυξημένη καθυστέρηση.

2.2 T-MAC

Το **T-MAC** (δείτε [31]) είναι ένα άλλο πρωτόκολλο **MAC** που επεκτείνει τις ιδέες του **S-MAC** που παρουσιάσαμε στην παράγραφο 2.1. Το **T-MAC** εντοπίζει την εξής αδυναμία του **S-MAC**, από τη στιγμή που οι περίοδοι ενεργοποίησης του πομπού ενός σωματιδίου είναι προκαθορισμένες αυτό σημαίνει ότι ο κόμβος μπορεί να μένει αδρανής στην περίπτωση που δεν υπάρχουν μηνύματα στο δίκτυο. Το **T-MAC** αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα με την ρύθμιση της διάρκειας των περιόδων ενεργοποίησης ανάλογα με την παρατηρούμενη κίνηση.

Το **T-MAC** υιοθετεί το μηχανισμό σχηματισμών ομάδων του **S-MAC** και τον συγχρονισμό των περιόδων ενεργοποίησης των μελών της ομάδας. Η καινοτομία του **T-MAC** είναι ότι η διάρκεια ενεργοποίησης μπορεί να διακοπεί νωρίτερα αν για ένα χρονικό διάστημα TA δε ανιχνευθεί κάποιο γεγονός ενεργοποίησης. Τα γεγονότα ενεργοποίησης ορίζονται ως εξής:

- Η λήψη οποιονδήποτε δεδομένων.
- Το τέλος της αποστολής δεδομένων από τον κόμβο.
- Η ανίχνευση επικοινωνίας ανάμεσα σε δύο άλλους κόμβους.
- Το τέλος της επικοινωνίας ανάμεσα σε δύο άλλους κόμβους.

Η επιλογή του χρόνου TA είναι πολύ σημαντική για την ορθή λειτουργία του πρωτοκόλλου, επίσης οι συγγραφείς αναγνωρίζουν ότι κάποιος κόμβος A μπορεί να έχει δεδομένα για έναν κόμβο B αλλά να μην μπορεί να τα μεταδώσει επειδή άκουσε το RTS ή CTS πακέτο ενός άλλου κόμβου (δείτε 2.1). Υπάρχει τότε ο κίνδυνος ο B να τερματίσει την περίοδο ενεργοποίησής του πριν προλάβει ο A να στείλει τα δεδομένα. Γι αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται ένας νέος τύπος μηνύματος μελλοντικής αίτησης $FRTS$ που μπορεί να στείλει ο A στο B για να τον ειδοποιήσει ότι θα του στείλει δεδομένα στο μέλλον.

Η εκτεταμένη πειραματική αξιολόγηση του **T-MAC** δείχνει ότι υπάρχουν αυξημένα οφέλη όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας αφού σε συνθήκες χαμηλής κίνησης οι κόμβοι έχουν κλειστό τον πομποδέκτη τους. Σε αντάλλαγμα παρατηρείται μία μικρή μείωση στην συνολική ταχύτητα διάδοσης εξαιτίας του προβλήματος της πρόωρης απενεργοποίησης που περιγράψαμε παραπάνω.

2.3 B-MAC

Το **B-MAC** (δείτε [27]) είναι ένα **MAC** πρωτόκολλο που, όπως και τα **T-MAC** και **S-MAC**, βασίζεται σε ένα μηχανισμό **CSMA** και ανταλλαγής RTS , CTS για την αποφυγή συγκρούσεων. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα πρωτόκολλα, για να εξοικονομήσει ενέργεια, το **B-MAC** βελτιώνει το μηχανισμό **CSMA** ώστε να αντιλαμβάνεται τότε πρέπει να ακούσει το μέσο χωρίς να χρειάζεται συγχρονισμός των κόμβων.

Συγκεκριμένα, το **B-MAC** απενεργοποιεί τον πομποδέκτη των σωματιδίων ενώ περιοδικά, ανά χρόνο LPL (π.χ. $LPL = 100ms$), τον ενεργοποιεί για να ελέγξει εάν το κανάλι χρησιμοποιείται. Αν το κανάλι χρησιμοποιείται τότε ο κόμβος λαμβάνει το μήνυμα ακόμα και αν δεν προορίζεται για αυτόν. Όταν ο κόμβος θέλει να μεταδώσει ένα μήνυμα γίνεται πάλι ο έλεγχος οπότε αν το κανάλι είναι ελεύθερο το μήνυμα μεταδίδεται (με το μηχανισμό $RTS-CTS$), ειδάλλως ο πομποδέκτης απενεργοποιείται πάλι για ένα σύντομο χρονικό διάστημα και ο έλεγχος επαναλαμβάνεται.

Η καινοτομία του **B-MAC** είναι ο τρόπος με τον οποίο τελικά αποφασίζεται πότε χρησιμοποιείται ή όχι το κανάλι. Συγκεκριμένα, το **B-MAC** σε περιόδους που είναι γνωστό ότι το κανάλι δε χρησιμοποιείται, για παράδειγμα αμέσως αφού έχει τελειώσει μία μετάδοση, καταγράφει την ισχύ του θορύβου στο κανάλι. Οι μετρήσεις αυτές αποθηκεύονται σε μία ουρά που συγκρατεί της τελευταίες π.χ. 10 μετρήσεις, έπειτα υπολογίζεται ο μέσος όρος τους και τελικά υπολογίζεται η τρέχουσα τιμή θορύβου σαν συνάρτηση αυτού του μέσου όρου και της προηγούμενης τιμής θορύβου. Έτσι με βάση αυτή τη μέτρηση το **B-MAC** είναι σε θέση να ανιχνεύσει πιο αξιόπιστα πότε το κανάλι χρησιμοποιείται και πότε όχι συγκρίνοντας την τρέχουσα ισχύ σήματος στο κανάλι με τον υπολογισμένο θόρυβο. Βέβαια, όταν ένας κόμβος θέλει να μεταδώσει ένα μήνυμα πρέπει να εκπέμψει ένα προοίμιο διάρκειας τουλάχιστον LPL πριν μεταδώσει τα πραγματικά δεδομένα προκειμένου να το ανιχνεύσουν οι υπόλοιποι κόμβοι.

Στην εκτεταμένη σύγκριση με το **S-MAC** που διεξήγαγαν οι συγγραφείς διαπιστώνουν ότι το **B-MAC** επιτυγχάνει υψηλότερο ρυθμό διαμεταγωγής δεδομένων, μικρότερη καθυστέρηση και σε ορισμένες περιπτώσεις, μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.

Κεφάλαιο 3

Πρωτόκολλα Διάδοσης Πληροφορίας

Ένα πολύ σημαντικό επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλων δικτύωσης των συσκευών έξυπνης σκόνης είναι το επίπεδο δρομολόγησης. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης αποφασίζουν την πορεία που θα ακολουθήσουν τα πακέτα προκειμένου να φτάσουν στον προορισμό τους. Τα πρωτόκολλα για δίκτυα έξυπνης σκόνης έχουν διαφορετικές προδιαγραφές και απαιτήσεις από τα αντίστοιχα πρωτόκολλα για ad-hoc δίκτυα. Σύμφωνα με τα συνηθέστερα μοντέλα στα δίκτυα έξυπνης σκόνης η πληροφορία που παράγεται στους αισθητήρες πρέπει να διαδοθεί οικονομικά και γρήγορα σε ένα ή περισσότερα κέντρα ελέγχου. Επομένως, η κίνηση των δεδομένων ακολουθεί συγκεκριμένα πρότυπα που δεν εμφανίζονται σε άλλες κατηγορίες δικτύων. Επιπλέον, επειδή ακριβώς είναι πιο σημαντικό να αναφερθεί η πληροφορία και όχι απλά να μεταφερθούν τα πακέτα, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για δίκτυα έξυπνης σκόνης ονομάζονται και πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας.

Ο μεγάλος αριθμός κόμβων στα δίκτυα έξυπνης σκόνης απαιτεί μεγάλη ευελιξία και ικανότητα κλιμάκωσης εκ μέρους των πρωτοκόλλων, ακόμα η κυριότερη απαίτηση είναι η αποτελεσματική χρήση της ενέργειας των συσκευών και η χαμηλή καθυστέρηση αναφοράς των γεγονότων, ενώ ανάλογα με την εφαρμογή και τη χρήση για την οποία προορίζεται ένα δίκτυο οι απαιτήσεις μπορεί να είναι διαφορετικές, στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζουμε αρκετά πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας που εστιάζουν στην επίλυση αυτών των προβλημάτων.

3.1 Directed Diffusion

Το πρωτόκολλο **Directed Diffusion** (δείτε [18]) είναι ένα από τα πρώτα πρωτόκολλα για δίκτυα έξυπνης σκόνης και προτείνει ένα πρωτότυπο μηχανισμό θετικής ή αρνητικής ενίσχυσης των μονοπατιών που σχηματίζονται μέσα από τη διαδικασία ελεγχόμενης πλημμύρας του δικτύου με μηνύματα (flooding). Επίσης το **Directed Diffusion** παρέχει και ένα μηχανισμό για την υλοποίηση εφαρμογών παρακολούθησης συνθηκών που βασίζεται στην περιγραφή και τη διάχυση στους κατάλληλους κόμβους των απαιτήσεων της εφαρμογής.

Σχηματισμός μονοπατιών. Πιο αναλυτικά, υποτίθεται ότι το δίκτυο εξυπηρετεί ένα σύνολο από αιτήσεις παρακολούθησης, π.χ. την ανίχνευση κίνησης ενός ζώου, τη μεταβολή της θερμοκρασίας μίας περιοχής κ.ο.κ. Το κέντρο ελέγχου του δικτύου δημιουργεί ένα μήνυμα

interest που περιέχει μία περιγραφή της αίτησης ως μία ακολουθία χαρακτηριστικών και τιμών π.χ. θερμοκρασία = 30° , περιοχή $[(0, 100), (100, 200)]$. Τα interest μεταδίδονται από το κέντρο ελέγχου και διαχέονται σε όλο το δίκτυο από κόμβο σε κόμβο.

Ένα διάνυσμα (gradient) αποθηκεύεται στον παραλήπτη ενός interest, το οποίο «δείχνει» προς τον κόμβο που του το έστειλε. Τα gradients σχηματίζουν μονοπάτια προς το κέντρο ελέγχου μέσω των οποίων μεταφέρεται η πληροφορία στο κέντρο ελέγχου, προσέξτε ότι έτσι σχηματίζονται πολλά διαφορετικά μονοπάτια.

Ενίσχυση μονοπατιών. Από τη στιγμή που θα σχηματιστούν τα μονοπάτια δεδομένα αρχίζουν να μεταφέρονται στο κέντρο ελέγχου. Ο ρυθμός λήψης δεδομένων που περιγράφεται αρχικά στα interest δεν είναι όσο μεγάλος όσο απαιτεί η εφαρμογή. Αυτό γίνεται επειδή πρώτα επιχειρείται η ανίχνευση μονοπατιών και με το χαμηλό ρυθμό μετάδοσης το κέντρο ελέγχου προσπαθεί να χρησιμοποιήσει μια όσο γίνεται πιο οικονομική μέθοδο για να βρει τα κατάλληλα μονοπάτια. Το κέντρο ελέγχου επιλέγει κάποιο από τα μονοπάτια που έχουν σχηματιστεί και ανανεώνει το interest που έχει στείλει, αλλάζοντας τον αιτούμενο ρυθμό εκπομπής των δεδομένων για το συγκεκριμένο μονοπάτι. Η επιλογή μονοπατιού γίνεται με βάση διάφορα κριτήρια όπως π.χ. τη χαμηλή καθυστέρηση. Αλλαγές στην κατάσταση κάποιου μονοπατιού μπορεί να οδηγήσουν το κέντρο ελέγχου να επιλέξει καινούργια διαδρομή ενισχύοντας έναν καινούργιο μονοπάτι. Όμως ενισχύοντας κάποιο μονοπάτι, έστω B, έναντι ενός άλλου, έστω A, πρέπει με κάποιο τρόπο να ελαττωθεί ο ρυθμός που τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω του μονοπατιού A. Χρειάζεται δηλαδή ένας μηχανισμός αρνητικής ενίσχυσης.

Αρνητική ενίσχυση μονοπατιών. Μία απλή λύση είναι με τη χρήση ενός χρονομέτρου, να λήξουν όλα τα διανύσματα με μεγάλο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων. Με την προσέγγιση αυτή το κέντρο ελέγχου περιοδικά θα ενισχύει το γείτονά του από το μονοπάτι B και θα σταματήσει να ενισχύει το γείτονα που ανήκει στο μονοπάτι A. Το μονοπάτι A σιγά σιγά θα ελαττώσει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε μικρότερο ρυθμό. Μία άλλη προσέγγιση είναι να ξεκινήσει από το κέντρο ελέγχου η υποβάθμιση του μονοπατιού A. Αυτό μπορεί να γίνει εάν το κέντρο ελέγχου στείλει στο γείτονά του από το μονοπάτι το A ένα interest που του ζητά να ελαττώσει το ρυθμό αποστολής δεδομένων.

Το **Directed Diffusion** δεν απαιτεί παρά μόνο τοπική πληροφορία όσο αναφορά τους κόμβους σε συνδυασμό με τις βήμα-βήμα μεταδόσεις, έτσι είναι αρκετά ευέλικτο ώστε να λειτουργεί για μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Η αξιολόγηση των μονοπατιών γίνεται κάθε φορά χρησιμοποιώντας εμπειρικά δεδομένα, όπως ποιο μονοπάτι μεταδίδει με μικρότερη καθυστέρηση. Από την πειραματική αξιολόγηση του **Directed Diffusion**, είναι εμφανές ότι η κατανάλωση ενέργειας είναι αρκετά περιορισμένη.

Στα αρνητικά μπορούμε να καταλογίσουμε ότι η περιγραφή του είναι τόσο γενική ώστε δεν έχει γίνει κάποια αυστηρή ποσοτικοποίηση παραμέτρων που μας ενδιαφέρουν, για παράδειγμα, δεν γνωρίζουμε ποσοτικά πόση παραπάνω ενέργεια καταναλώνει σε σύγκριση με μία θεωρητικά βέλτιστη περίπτωση, ποια είναι η συμπεριφορά του σε αυξομειώσεις της πυκνότητας κ.α. Γενικά, δεν υπάρχουν αυστηρές εγγυήσεις για ένα σύνολο παραμέτρων του πρωτοκόλλου **Directed Diffusion**.

3.2 LEACH

Το πρωτόκολλο LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) (δείτε [15] και παράγραφο 5.3) είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης πακέτων σε δίκτυο αισθητήρων και έχει ως στόχο να ελαττώσει την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο ενώ ταυτόχρονα να αυξήσει τη διάρκεια ζωής του δικτύου κατανέμοντας ομοιόμορφα, όσο αυτό είναι δυνατό, την κατανάλωση ενέργειας στους αισθητήρες του δικτύου. Στο **LEACH** οι κόμβοι οργανώνονται σε ομάδες και η επικοινωνία γίνεται από τους απλούς κόμβους προς τους αρχηγούς των ομάδων και από εκεί προς το κέντρο ελέγχου. Επιπλέον, η επικοινωνία των κόμβων με τους αρχηγούς τους γίνεται με συγχρονισμένο τρόπο.

Το πρωτόκολλο λειτουργεί σε δύο εναλλασσόμενες φάσεις.

Φάση αυτοοργάνωσης. Σε αυτήν την φάση, κάθε σωματίδιο αποφασίζει σχετικά με το εάν πρέπει να γίνει επικεφαλής μίας ομάδας ή όχι. Η παρούσα απόφαση είναι βασισμένη σε μια σταθερή πιθανότητα P_c και εάν έχει διατελέσει επικεφαλής μίας ομάδας στους τελευταίους $1/P_c$ γύρους. Ο μηχανισμός της απόφασης είναι τέτοιος ώστε η πιθανότητα εκλογής να αυξάνεται με το πέρασμα των γύρων και έτσι μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι κάθε κόμβος θα γίνει ένας επικεφαλής σε κάποια στιγμή μέσα σε $1/P_c$ γύρους. Η διαδικασία εκλογής επαναλαμβάνεται κάθε $1/P_c$ γύρους.

Όταν ένα σωματίδιο αποφασίσει να γίνει ένας επικεφαλής, μεταδίδει ένα μήνυμα-ανακοίνωση σε ολόκληρο δίκτυο. Τα άλλα σωματίδια ακούνε τις ανακοινώσεις από όλους τους επικεφαλείς, και επιλέγουν τον επικεφαλή της ομάδας που θα ανήκουν βασισμένα στην ισχύ του σήματος που έλαβαν. Όταν ένα σωματίδιο αποφασίσει σε ποια ομάδα θα ανήκει, διαβιβάζει μια απάντηση πίσω στον επικεφαλή της αντίστοιχης ομάδας. Ο επικεφαλής μετά οργανώνει έπειτα ένα πρόγραμμα **TDMA** για τις μεταδόσεις. Έπειτα μεταδίδει αυτό το πρόγραμμα στα σωματίδια στην ομάδα του.

Φάση διάδοσης δεδομένων. Αφότου έχουν οργανωθεί οι ομάδες και έχει γίνει η ανάθεση των προγραμμάτων **TDMA**, οι πραγματικές μεταδόσεις δεδομένων από τα σωματίδια μπορούν να αρχίσουν. Οι μεταδόσεις από τα σωματίδια στους επικεφαλείς των ομάδων γίνονται σύμφωνα με το πρόγραμμα **TDMA** κάθε ομάδας. Έπειτα οι επικεφαλείς μεταδίδουν τα δεδομένα στο κέντρο ελέγχου. Προσέξτε ότι αφού όλα τα δεδομένα συγκεντρώνονται στους αρχηγούς των ομάδων είναι δυνατή η προεπεξεργασία των δεδομένων, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας, σε περιπτώσεις βέβαια όπου η συσχέτιση ανάμεσα στα δεδομένα είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει ικανοποιητική συμπίεση τους. Ακόμα, για να μειωθούν οι παρεμβολές μεταξύ των διαφορετικών γειτονικών ομάδων, οποιοσδήποτε επικεφαλής επιλέγει τυχαία έναν κώδικα από έναν προκαθορισμένο κατάλογο και έτσι τα σωματίδια σε κάθε συστάδα χρησιμοποιούν διαφορετικούς κώδικες **CDMA**.

Το πρωτόκολλο στην υλοποίησή του φαίνεται να είναι αρκετά απλό αν και χρησιμοποιεί ένα πλήθος από διαφορετικές τεχνικές πολύπλεξης, για την επικοινωνία των κόμβων μεταξύ τους. Οι συγγραφείς του [15] υποστηρίζουν ότι με την εναλλαγή των επικεφαλών των ομάδων στο δίκτυο η κατανάλωση ενέργειας ισοκατανέμεται. Είναι εμφανές ότι αυτό δεν είναι απολύτως σωστό αφού οι επικεφαλείς που βρίσκονται πιο μακριά από το κέντρο ελέγχου είναι εξ' ορισμού αναγκασμένοι να μεταδίδουν πιο μακριά από αυτούς που βρίσκονται κοντύτερα.

3.3 TEEN

Το **TEEN** (δείτε [20] και παράγραφο 5.3) είναι μία παραλλαγή του **LEACH** που παρουσιάσαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Το **TEEN** έχει διατηρήσει το μηχανισμό δημιουργίας ομάδων και προώθησης δεδομένων του **LEACH** ενώ η κύρια συνεισφορά του είναι η προσθήκη δύο συνθηκών-ορίων (το «αυστηρό» και το «ελαστικό») που πρέπει να ικανοποιηθούν προκειμένου να εκπέμψει πληροφορία ένας απλός κόμβος. Στόχος είναι να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας αποφεύγοντας περιττές μεταδόσεις.

Πιο συγκεκριμένα, την πρώτη φορά που μία υπό παρακολούθηση συνθήκη λάβει την τιμή που ορίζει το αυστηρό κατώτατο όριο, το σωματίδιο αποθηκεύει αυτή την τιμή και διαβιβάζει την πληροφορία στο κέντρο ελέγχου. Εάν το επόμενο δείγμα διαφέρει από την αποθηκευμένη τιμή περισσότερο από το ποσό που ορίζει το ελαστικό κατώτατο όριο, πληροφορία για την τιμή της συνθήκης διαβιβάζεται πίσω στο κέντρο ελέγχου. Ένα παράδειγμα λειτουργίας αυτών των κατώτατων ορίων είναι για μετρούμενη συνθήκη τη θερμοκρασία, να θέσουμε το αυστηρό κατώτατο όριο στους 30° βαθμούς και το ελαστικό κατώτατο όριο οποιαδήποτε αλλαγή άνω των 0.5°. Οι συγγραφείς του **TEEN** δείχνουν ότι το πρωτόκολλό τους επιτυγχάνει μεγάλο ποσοστό επιτυχίας και μειώνει την κατανάλωση ενέργειας του **LEACH**.

3.4 LTP

Το πρωτόκολλο Local Target Protocol (LTP) (δείτε [12, 13]) χρησιμοποιεί μία σύντομη φάση αναζήτησης για την ανακάλυψη του επόμενου βήματος. Το **LTP** υποθέτει ότι τα μηνύματα παραδίδονται σε ένα «τείχος» W που καλύπτει μία πλευρά του δικτύου, γενικεύοντας έτσι την έννοια του κέντρου ελέγχου.

Η μετάδοση δεδομένων γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο. Έστω $d(p_i, p_j)$ η απόσταση που προχωρά ένα μήνυμα ως προς το τείχος, όταν αυτό κινείται από τον κόμβο p_i στον κόμβο p_j . Κατ' επέκταση $d(p_i, W)$ είναι η απόσταση ενός κόμβου από το τείχος. Έστω $info(E)$ το μήνυμα που παράγεται στο δίκτυο μετά τη εμφάνιση ενός κρίσιμου γεγονότος E που πρέπει να αναφερθεί και p ο κόμβος που κατέγραψε το γεγονός αυτό και ξεκινά την εκτέλεση του πρωτοκόλλου. Έστω ο κόμβος p' μόλις έχει λάβει το μήνυμα $info(E)$

- **Φάση αναζήτησης:** Ο κόμβος p' χρησιμοποιεί χαμηλής ισχύος κατευθυντικές μεταδόσεις για να ανακαλύψει κάποιον κόμβο που βρίσκεται πιο κοντά στο W . Ψάχνει δηλαδή για έναν κόμβο p'' τέτοιον ώστε $d(p'', W) < d(p', W)$.
- **Φάση απευθείας μετάδοσης:** Εάν ο p' κατά τη διάρκεια της φάσης αναζήτησης βρήκε κάποιον κατάλληλο κόμβο, p'' , τότε του στέλνει το $info(E)$.
- **Φάση οπισθοδρόμησης** Αν συνεχόμενες επαναλήψεις της φάσης αναζήτησης αποτύχουν να βρουν κατάλληλο p'' , ο p' στέλνει το πακέτο στον κόμβο που του το έστειλε αρχικά.

Οι κατευθυντικές μεταδόσεις του πρωτοκόλλου στη φάση αναζήτησης γίνονται πάνω στο τόξο γωνίας 2α γύρω από την κάθετη προς το τείχος W ευθεία που διέρχεται από τον πομπό p' .

Το πρωτόκολλο **LTP** αναλύεται διεξοδικά και δεδομένου ότι ανακαλύπτεται τουλάχιστον ένας γείτονας στη φάση αναζήτησης αποδεικνύεται ότι για το λόγω του αναμενόμενου μέσου αριθμού βημάτων που εκτελούνται h ως προς το βέλτιστο αριθμό βημάτων h_{opt} , ισχύει $E(\frac{h}{h_{opt}}) \simeq \frac{\alpha}{\sin \alpha}$ για μεγάλο h_{opt} . Επίσης $1 \leq E(\frac{h}{h_{opt}}) \leq \frac{\pi}{2} \simeq 1.57$ για $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$.

Εάν κάνουμε μία επιπλέον υπόθεση ότι φάση αναζήτησης του κόμβου p' δώσει τουλάχιστον δύο πιθανούς κόμβους, τους p'' και p''' με τον καθένα τους να βρίσκεται τυχαία και με ομοιόμορφο τρόπο μέσα στο τόξο $(-\alpha, \alpha)$, στο [13] προτείνεται μία βελτιστοποίηση, επιλέγεται ο κόμβος που η θέση του βρίσκεται πιο κοντά στην ευθεία που ενώνει τον κόμβο p' και τέμνει κάθετα το τοίχος W . Σε αυτή την περίπτωση αποδεικνύεται ότι:

$$1 \leq E(\frac{h}{h_{opt}}) \leq \frac{\pi^2}{8} \simeq 1.24$$

για μεγάλα h και για $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$.

Στα θετικά του πρωτοκόλλου μπορούμε να αναφέρουμε ότι δεν απαιτεί καθολική πληροφορία, όταν το δίκτυο είναι αρκετά πυκνό μεταδίδει αποδοτικά τα δεδομένα, με εγγυημένη απόδοση. Στα αρνητικά του πρωτοκόλλου είναι ό,τι το κριτήριο μετάδοσης δεν είναι κάποια παράμετρος του δικτύου, αλλά ένα μέγεθος που παραμένει σταθερό συνεχώς, η γωνία όπου κάθε κόμβος ερευνά, επομένως αν αλλάξει αρκετά η τοπολογία του δικτύου η απόδοση του πρωτοκόλλου μπορεί να ελαττωθεί. Το πρωτόκολλο **VTRP** που θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια είναι μία πιο ευέλικτη λύση σε τέτοιου είδους προβλήματα μετάδοσης.

3.5 PFR

Το πρωτόκολλο PFR (Probabilistic Forwarding Protocol) (δείτε [7] και παράγραφο 5.2) χρησιμοποιεί στοχαστικές μεθόδους για να ευνοήσει τις μεταδόσεις προς το κέντρο ελέγχου μέσα σε μια λεπτή ζώνη σωματιδίων γύρω από τη γραμμή που συνδέει το σωματίδιο που αισθάνεται το γεγονός \mathcal{E} και το κέντρο ελέγχου. Για να γίνει η μετάδοση προς το \mathcal{S} , κάθε σωματίδιο χρησιμοποιεί κατευθυνόμενη μετάδοση που περιορίζεται υπό συγκεκριμένη γωνία, για να μεταδώσει τα στοιχεία τους σε όλους γείτονές του, που βρίσκονται στην κατεύθυνση του \mathcal{S} . Το πρωτόκολλο είναι ιδιαίτερα απλό στην υλοποίησή του γιατί δεν απαιτεί το συντονισμό ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου. Το πρωτόκολλο εξελίσσεται σε δύο φάσεις που περιγράφουμε παρακάτω.

Φάση 1: Η φάση δημιουργίας μετώπου διάδοσης.

Κατά τη διάρκεια αυτής της αρχικής φάσης ένα αρκετά μεγάλο μέτωπο δημιουργείται για να εξασφαλιστεί ότι η διαδικασία διάδοσης δεδομένων επιζεί για μια μεγάλη χρονική περίοδο. Το μέτωπο δημιουργείται ως εξής, η επικεφαλίδα κάθε μηνύματος περιλαμβάνει έναν μετρητή που ονομάζουμε β . Αυτός ο μετρητής τίθεται σε μια προκαθορισμένη αξία από το σωματίδιο που αντιλαμβάνεται το γεγονός. Κάθε σωματίδιο, όταν λάβει ένα σχετικό μήνυμα που περιέχει έναν θετικό μετρητή ($\beta \leq 0$), μειώνει την τιμή του β κατά 1 και προωθεί το μήνυμα προς το κέντρο ελέγχου. Όταν ο μετρητής γίνεται μηδέν, το σωματίδιο προχωρά στη δεύτερη φάση του πρωτοκόλλου **SW-PFR**.

Φάση 2: Η φάση στοχαστικής προώθησης.

Σε αυτήν την δεύτερη φάση, η διάδοση δεδομένων γίνεται κατά τρόπο στοχαστικό. Κάθε σωματίδιο που λαμβάνει ένα μήνυμα υπολογίζει την πιθανότητα της συμμετοχής του στη διαδικασία διάδοσης. Όσο πιο κοντά βρίσκεται ένα σωματίδιο στη βέλτιστη γραμμή μετάδοσης, που συνδέει τον κόμβο-πηγή \mathcal{E} που ανίχνευσε ένα γεγονός και το κέντρο ελέγχου \mathcal{S} , τόσο υψηλότερη η πιθανότητα να διαβιβάσει τα δεδομένα που αναφέρουν το γεγονός. Η πιθανότητα αποστολής \mathbb{P}_{fwd} υπολογίζεται ως $\mathbb{P}_{fwd} = \frac{\phi}{\pi}$, όπου ϕ είναι η γωνία που καθορίζεται από (α) τη γραμμή που συνδέει το σωματίδιο που εκτελεί την τυχαία επιλογή και τον αισθητήρα που αρχικά ανίχνευσε το γεγονός, και (β) τη γραμμή που συνδέει αυτόν τον κόμβο με το κέντρο ελέγχου. Παρατηρήστε ότι μια μεγαλύτερη γωνία ϕ αντιστοιχεί σε θέση του αισθητήρα πιο κοντά στην ευθεία γραμμή μεταξύ του \mathcal{E} και του \mathcal{S} .

Το **PFR** έχει αναλυθεί διεξοδικά με αναλυτικά μέσα και έχει αποδειχθεί η ορθότητά του. Επιπλέον η απόδοσή του έχει ελεγχθεί και μέσω προσομοίωσης με αποτελέσματα που καταδεικνύουν υψηλό ποσοστό παράδοσης δεδομένων, γρήγορη παράδοση και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Στα αρνητικά θα μπορούσαμε να συγκαταλέξουμε το γεγονός ότι η μεταδόσεις γίνονται με βάση κάποια απόλυτα δεδομένα, π.χ. οι θέσεις κόμβων στο δίκτυο. Το μειονέκτημα στην περίπτωση αυτή είναι ότι εμπόδια ή περιοχές με κατεστραμμένους κόμβους δεν μπορούν να αποφευχθούν χρησιμοποιώντας κάποια εναλλακτική διαδρομή γιατί το πρωτόκολλο δεν αντιδρά σε πιθανές αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου.

3.6 VTRP

Το **VTRP**, δείτε [2], είναι μία προέκταση του **LTP**. Η κύρια διαφορά τους είναι ότι το **VTRP** στην περίπτωση που δεν μπορεί κάποιος κόμβος να βρει γειτονικό του κόμβο για να προωθήσει περαιτέρω το μήνυμά του, αυξάνει την εμβέλεια εκπομπής του μέχρι να βρει κάποιον.

Παρακάτω περιγράφουμε συνοπτικά τη λειτουργία του πρωτοκόλλου. Έστω ότι ένας κόμβος p' έχει λάβει ένα μήνυμα από τον κόμβο p που αναφέρει ένα γεγονός \mathcal{E} , έστω $info(\mathcal{E})$ το μήνυμα αυτό. Ο p' εκτελεί το παρακάτω πρωτόκολλο:

Φάση 1: Αναζήτηση. Χρησιμοποιώντας μία χαμηλής ενέργειας μετάδοση επιχειρεί ο p' να βρει έναν κόμβο που βρίσκεται πιο κοντά στο κέντρο ελέγχου \mathcal{S} και επιλέγει να μεταδώσει στο κόμβο p'' ο οποίος είναι ο καλύτερος γείτονας όσο αναφορά στη πρόοδο της μετάδοσης προς το \mathcal{S} .

Φάση 2: Μετάδοση. Ο p' στέλνει το $info(\mathcal{E})$ στον p'' και ένα μήνυμα *success* στον κόμβο p .

Φάση 3: Μεταβολή της ακτίνας μετάδοσης. Η φάση αυτή ενεργοποιείται όταν αποτύχει η φάση 1. Υπάρχει ένας μετρητής τ , αρχικά $\tau = 0$. Κάθε φορά όπου αποτυγχάνει η φάση αναζήτησης το τ αυξάνει κατά 1 και η ακτίνα μετάδοσης του κάθε κόμβου αυξάνεται κατά $\mathcal{F}(\tau)$.

Η συνάρτηση \mathcal{F} , η συνάρτηση μεταβολής της ακτίνας μετάδοσης, μπορεί να είναι πολλών ειδών, οι συγγραφείς του [2], προτείνουν μερικά είδη:

Γραμμική μεταβολή . Η ακτίνα μετάδοσης μεγαλώνει κατά μία σταθερή ποσότητα c . Στην περίπτωση αυτή η συνάρτηση \mathcal{F} θα έχει τη μορφή:

$$\mathcal{F}(\tau) = R_{init} + c \cdot \tau$$

Υπερ-γραμμική μεταβολή . Η συνάρτηση \mathcal{F} αυξάνει την ακτίνα μετάδοσης κατά ένα πολλαπλάσιο της αρχικής ακτίνας R_{init} και είναι της μορφής:

$$\mathcal{F}(\tau) = R_{init} + R_{init} \cdot m \cdot \tau$$

Εκθετική μεταβολή . Η αύξηση στην ακτίνα μετάδοσης γίνεται κατά μία δύναμη της R_{init} και έχει τη μορφή:

$$\mathcal{F}(\tau) = R_{init} + R_{init}^{\sqrt{\tau+1}}$$

Τυχαία μεταβολή . Προκειμένου να αποφευχθεί μείωση της απόδοσης όταν η κατανομή των σωματιδίων είναι άγνωστη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τυχαιότητα για την επιλογή νέας ακτίνας μετάδοσης. Στην περίπτωση αυτή η συνάρτηση \mathcal{F} είναι η παρακάτω:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(0) &= R_{init} \\ \mathcal{F}(\tau) &= \mathcal{F}(\tau - 1) + \mathcal{R} \cdot r \end{aligned}$$

με r τυχαία μεταβλητή που μεταβάλλεται ομοιόμορφα στο διάστημα $r \in (0, 8]$

Αυτά που παρατηρήθηκαν, μετά από προσομοιώσεις, είναι τα παρακάτω: Το **VTRP** δείχνει να λειτουργεί πολύ καλά σε δίκτυα χαμηλής πυκνότητας, αυτό οφείλεται στην δυνατότητα που παρέχει το πρωτόκολλο **VTRP** στους κόμβους να μεταβάλλουν την ακτίνα εκπομπής τους μέχρι να βρεθεί κατάλληλος γείτονας. Κατ' αυτό τον τρόπο, το **VTRP** μπορεί να παρακάμψει προβληματικές περιοχές του δικτύου, δηλαδή περιοχές που η διάδοση δεδομένων είναι δύσκολη είτε λόγω υπερβολικού φόρτου ή εμποδίων είτε λόγω εξάντλησης των αποθεμάτων των συσκευών αισθητήρων, όπως γίνεται συνήθως κοντά στο κέντρο ελέγχου. Η κατανάλωση ενέργειας του **VTRP**, εμφανίζεται αυξημένη σε σχέση με το **LTP** αλλά είναι εμφανές ότι υπάρχει ένας συμβιβασμός αφού πετυχαίνει μεγαλύτερη απόδοση στην παράδοση μηνυμάτων.

Τέλος, η σύγκριση ανάμεσα στις διάφορες στρατηγικές του **VTRP** έδειξε ότι η περίπτωση της γραμμικής μεταβολής έχει το μεγαλύτερο ποσοστό αποτυχιών στην παράδοση μηνυμάτων έναντι των υπολοίπων, που δείχνουν να συμπεριφέρονται σχεδόν με τον ίδιο τρόπο. Από την άλλη πλευρά η στρατηγική γραμμικής μεταβολής φαίνεται να καταναλώνει και τα μικρότερα ποσά ενέργειας.

3.7 NRG

Το πρωτόκολλο **NRG** (δείτε [14]) εξισορροπεί την κατανάλωση ενέργειας ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου βασισμένο στην γεωγραφική τους θέση. Οι συγγραφείς του πρωτοκόλλου κάνουν την πολύ εύστοχη παρατήρηση ότι ανάλογα με τη γεωγραφική τους θέση στο δίκτυο

κάποιοι κόμβοι είναι αναγκασμένοι να ξοδεύουν περισσότερη ενέργεια. Στα πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας βήμα-βήμα (π.χ. **LTP**, **PFR**, **VTRP**, **Directed Diffusion**) οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά στο κέντρο ελέγχου καταπονούνται περισσότερο αφού το σύνολο τη κίνησης διέρχεται μέσω αυτών. Αντίθετα, στα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν απευθείας μεταδόσεις στο κέντρο ελέγχου (π.χ. **LEACH**, **TEEN**) καταπονούνται περισσότερο οι κόμβοι που βρίσκονται μακριά από το κέντρο ελέγχου αφού οι μεγάλης απόστασης μεταδόσεις χρειάζονται πολύ ενέργεια.

Το **NRG** για να εξισορροπήσει την κατανάλωση ενέργειας δίνει την δυνατότητα στους κόμβους να επιλέξουν τη μέθοδο διάδοσης για την επόμενη μετάδοση του μηνύματος. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται στοχαστικές μέθοδοι προκειμένου να επιλέξουν ανάμεσα σε απευθείας μετάδοση στο κέντρο ελέγχου ή μετάδοση σε κάποιο γείτονα. Το πρωτόκολλο μπορεί να χωριστεί σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση περιλαμβάνει το διαχωρισμό του δικτύου σε κυκλικούς τομείς (sectors) ανάλογα την απόστασή τους από το κέντρο ελέγχου. Στη δεύτερη και τελευταία φάση μπορούν οι κόμβοι να μεταδώσουν τα δεδομένα τους.

Διαμέριση του Δικτύου

Το δίκτυο προσεγγίζεται με τομέα δίσκου ακτίνας l και γωνίας ϕ . Το κέντρο ελέγχου αρχικοποιεί αυτή τη φάση όπου οι κόμβοι χωρίζονται, μαθαίνουν την απόστασή τους από το κέντρο ελέγχου και χωρίζονται σε ομάδες, (θα της λέμε sector). Οι ομάδες αυτές είναι κλάσεις συμμετρίας όσο αφορά την κατανάλωση ενέργειας για τη μετάδοση των μηνυμάτων, δηλαδή λίγο πολύ οι κόμβοι που ανήκουν στην ίδια ομάδα χρειάζονται τον ίδιο κόπο (ποσό ενέργειας ή αριθμό βημάτων) για να μεταδώσουν το μήνυμά τους στο κέντρο ελέγχου. Τα sectors αυτά έχουν πλάτος R , το οποίο είναι μία σταθερά για την εκτέλεση του πρωτοκόλλου. Το πρωτόκολλο χειρίζεται τα μηνύματα που βρίσκονται στους κόμβους του ίδιου sector με τον ίδιο τρόπο.

Μεταφορά Πληροφορίας

Έστω ότι ένας κόμβος στο sector i έχει να μεταδώσει ένα μήνυμα. Τότε η μετάδοση γίνεται με βάση τις δύο τυχαίες επιλογές:

- προώθησε το μήνυμα στο sector $i - 1$ με πιθανότητα p_i .
- προώθησε το μήνυμά στο κέντρο ελέγχου με πιθανότητα $1 - p_i$.

Η τυχαία επιλογή για κάθε μήνυμα είναι ανεξάρτητη από τις επιλογές έγιναν για τα προηγούμενα μηνύματα. Η επιλογή της πιθανότητας p_i έχει ως στόχο η κατά μέσο όρο κατανάλωση ενέργειας να είναι η ίδια για όλους τους κόμβους του δικτύου, ανεξάρτητα από το sector στο οποίο ανήκουν. Η ανάλυση του πρωτοκόλλου γίνεται με αναλυτικά μέσα, μετά από μία ενδιαφέρουσα και διεξοδική ανάλυση οι συγγραφείς εξάγουν ένα τύπο για τον υπολογισμό της πιθανότητας p_i για κάθε τομέα i του δικτύου που εξασφαλίζει την εξισορροπήσει της κατανάλωσης ενέργειας.

Το πρωτόκολλο **NRG** είναι ίσως το μοναδικό πρωτόκολλο που εξασφαλίζει ότι η μέση κατανάλωση ενέργειας είναι ίδια σε οποιοδήποτε κόμβο του δικτύου. Από την άλλη όμως αφήνει αρκετά ανοικτά ζητήματα αφού προϋποθέτει ένα πρωτόκολλο **MAC** που χειρίζεται αποτελεσματικά τις συγκρούσεις κάτι που όπως είδαμε μπορεί να αλλάξει σημαντικά τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις. Επίσης δεν εξετάζεται η πιθανότητα ύπαρξης εμποδίων στη διάδοση ή ανομοιογενών κατανομών των σωματιδίων στο δίκτυο.

Κεφάλαιο 4

Προσομοίωση

Συχνά στην επιστημονική έρευνα χρειάζεται να μελετηθούν πολύπλοκες φυσικές διαδικασίες ή συστήματα που αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό οντοτήτων. Συνήθως τότε καταφεύγουμε στην επιστήμη των υπολογιστών για να χειριστούμε τον τεράστιο όγκο των υπολογισμών και των δεδομένων που εμπλέκονται σε τέτοια συστήματα.

Η μεθοδολογία για την ανάλυση αυτών των συστημάτων συνήθως αποτελείται από την κατασκευή ενός μοντέλου του πραγματικού συστήματος και τον πειραματισμό με αυτό το μοντέλο. Τα μοντέλα μπορεί να είναι είτε *φυσικά* είτε *μαθηματικά*. Τα φυσικά μοντέλα αποτελούν μία μικρογραφία του πραγματικού συστήματος που επιτρέπει τον καλύτερο χειρισμό του. Παραδείγματος χάριν, η αεροδυναμική ενός αεροπλάνου μπορεί να μελετηθεί με την κατασκευή μίας μικρογραφίας και την μελέτη της ροής του ανέμου σε μία αεροδυναμική σήραγγα. Από την άλλη τα μαθηματικά μοντέλα προσπαθούν να εκφράσουν τις ιδιότητες του συστήματος και τους κανόνες που διέπουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των οντοτήτων του συστήματος. Τα μαθηματικά μοντέλα αποτελούνται από ένα σύνολο λογικών και ποσοτικών σχέσεων τις οποίες μπορούμε να χειριστούμε προκειμένου να εξετάσουμε πως συμπεριφέρεται το πραγματικό σύστημα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων είναι η ορθότητα του μοντέλου που πρέπει να περιγράφει το σύστημα στο βαθμό λεπτομέρειας που επιθυμούμε.

Μετά τη δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για να αναλύσουμε το υπό εξέταση σύστημα. Η εξαγωγή συμπερασμάτων μπορεί να γίνει είτε με *αναλυτική επίλυση* του μοντέλου είτε με *προσομοίωση*. Στην περίπτωση που το μοντέλο είναι αρκετά απλό μπορούμε να το επιλύσουμε με μαθηματικές μεθόδους και εξάγουμε έτσι την συμπεριφορά του συστήματος. Όμως πολύ συχνά όταν ασχολούμαστε με πολύπλοκα συστήματα η επίλυση με μαθηματικά μέσα απαιτεί την εφαρμογή πολύπλοκων υπολογιστικών μεθόδων και την χρήση υπερβολικά πολλών υπολογιστικών πόρων που καθιστούν την επίλυση του συστήματος αδύνατη. Σε αυτή την περίπτωση είναι προτιμότερο να προσομοιώνεται το μοντέλο. Η προσομοίωση είναι η διαδικασία υπολογισμού των διαδοχικών καταστάσεων από τις οποίες διέρχεται το σύστημα για συγκεκριμένες τιμές εισόδου, ώστε να δούμε πως επηρεάζεται η απόδοση του συστήματος. Η προσομοίωση σαν εργαλείο ανάλυσης πολύπλοκων συστημάτων όπως είναι τα δίκτυα έξυπνης σκόνης, χρησιμοποιείται ευρύτατα από την ακαδημαϊκή κοινότητα.

4.1 Κατηγορίες προσομοίωσης

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές προσομοίωσης, οι πιο δημοφιλείς είναι η προσομοίωση διακριτών χρονικών γεγονότων, η προσομοίωση συνεχούς χρόνου και η προσομοίωση Monte Carlo.

4.1.1 Προσομοίωση διακριτών γεγονότων

Η προσομοίωση διακριτών χρονικών γεγονότων εφαρμόζεται σε συστήματα όπου οι μεταβλητές που χαρακτηρίζουν το σύστημα αλλάζουν στιγμιαία σε διακριτά και καθορισμένα ή υπολογίσιμα χρονικά σημεία. Αυτά τα χρονικά σημεία καθορίζουν τις στιγμές όπου συμβαίνουν συγκεκριμένα γεγονότα που αλλάζουν την κατάσταση του συστήματος.

Ο προσομοιωτής ξεκινά με το χρόνο της προσομοίωσης στο 0 και εκτελεί όλα τα γεγονότα που συμβαίνουν σε αυτό το χρονικό σημείο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον υπολογισμό της νέας κατάστασης του συστήματος και πιθανώς τη δημιουργία νέων μελλοντικών γεγονότων. Έπειτα ο χρόνος προσομοίωσης προχωρά στην επόμενη χρονική στιγμή που συμβαίνει ένα γεγονός και η διαδικασία επαναλαμβάνεται ώσπου να ικανοποιηθούν οι συνθήκες τερματισμού που έχει θέσει ο χρήστης.

4.1.2 Προσομοίωση συνεχούς χρόνου

Η προσομοίωση συνεχούς χρόνου χρησιμοποιείται όταν οι μεταβλητές του συστήματος αλλάζουν κατά τρόπο συνεχή με την πάροδο του χρόνου. Συνήθως η μεταβολή δίνεται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων που μπορούν να επιλυθούν είτε αναλυτικά είτε με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Τότε ο προσομοιωτής υπολογίζει τις τιμές των μεταβλητών του συστήματος με βάση τις αρχικές τιμές τους στο χρόνο 0.

4.1.3 Προσομοίωση Monte Carlo

Η προσομοίωση Monte Carlo είναι μία στοχαστική μέθοδος προσομοίωσης που χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που το σύστημα περιγράφεται από ένα σύνολο τυχαίων μεταβλητών. Συνήθως, η τελική επίλυση του συστήματος δίνει την κατάσταση σε ένα βήμα, δηλαδή δεν συμπεριλαμβάνει την πάροδο του χρόνου, επομένως σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες μεθόδους είναι μία στατική μέθοδος προσομοίωσης. Η προσομοίωση Monte Carlo χρησιμοποιείται πολύ συχνά για την επίλυση στατιστικών προβλημάτων που είναι πολύ δύσκολο να λυθούν με αναλυτικό τρόπο.

4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα προσομοίωσης

Η χρήση της προσομοίωσης έχει και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

- Πολλά συστήματα δεν μπορούν να περιγραφούν με την απαιτούμενη λεπτομέρεια με μαθηματικά μοντέλα και να είναι επιλύσιμα με αναλυτικά μέσα. Αυτά τα συστήματα μπορούν να εξεταστούν μέσω προσομοίωσης.

- Η προσομοίωση επιτρέπει τη μελέτη της συμπεριφοράς υπαρχόντων συστημάτων ή συστημάτων υπό ανάπτυξη κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες είναι ελέγξιμες.
- Η προσομοίωση επιτρέπει τη συγκριτική μελέτη διαφόρων τεχνικών προκειμένου να αποφασιστεί ποια είναι η καλύτερη.
- Μέσω προσομοίωσης μπορούμε να μελετήσουμε συστήματα που λειτουργούν σε μεγάλο βάθος χρόνου, π.χ. καιρικά φαινόμενα, σε μικρότερο χρονικό πλαίσιο ή να αναλύσουμε φαινόμενα που διαρκούν πολύ μικρό χρονικό διάστημα, π.χ. διάσπαση του ατόμου, με λεπτομέρεια που δεν μπορεί να μετρηθεί με φυσικά μέσα.

Βέβαια τα μειονεκτήματα της ανάλυσης με προσομοίωση είναι υπαρκτά.

- Στην πραγματικότητα, όταν σε ένα σύστημα υπάρχουν στοχαστικές διαδικασίες η προσομοίωση δίνει μόνο μία εκτίμηση της συμπεριφοράς του.
- Η ανάπτυξη προσομοιωτών και μοντέλων προσομοίωσης είναι ένα δύσκολο και χρονοβόρο έργο.
- Πολλές φορές οι ερευνητές δίνουν μεγαλύτερη σημασία στον όγκο των δεδομένων που παράγονται και την ανάλυσή τους, παρά στην ορθότητα του μοντέλου.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι η προσομοίωση είναι ένα πολύτιμο εργαλείο και δίνει πρόσβαση σε αποτελέσματα για τη συμπεριφορά συστημάτων που δεν θα μπορούσαν να παραχθούν αλλιώς. Όμως αυτά τα αποτελέσματα πρέπει να αντιμετωπίζονται με κάποια επιφύλαξη. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε την εργασία [5] στην οποία το ίδιο πείραμα εκτελείται σε 3 διαφορετικούς προσομοιωτές και παράγονται 3 διαφορετικά αποτελέσματα που για ορισμένες μετρικές παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση. Στη συνέχεια περιγράφουμε συνοπτικά μερικούς προσομοιωτές διακριτών χρονικών γεγονότων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση δικτύων έξυπνης σκόνης.

4.3 OPNET Modeler

Ο **OPNET Modeler** είναι ένας ισχυρός προσομοιωτής δικτύων που αναπτύσσεται από την εταιρία OPNET. Μπορεί να προσομοιώσει όλα τα είδη ενσύρματων δικτύων, ενώ παρέχεται και μια υλοποίηση του επιπέδου **MAC IEEE802.11**. Αν και ο **OPNET Modeler** προορίζεται κυρίως για χρήση από επιχειρήσεις που θέλουν να εντοπίσουν πιθανά προβλήματα ή να αναδιοργανώσουν το δίκτυό τους, κάποιοι ερευνητές τον χρησιμοποιούν για να προσομοιώσουν δίκτυα έξυπνης σκόνης. Η προσαρμογή στις ανάγκες των δικτύων έξυπνης σκόνης γίνεται με την επέκταση και την επαναχρησιμοποίηση πολλών υπαρχόντων τμημάτων λογισμικού.

Το μεγαλύτερο μέρος της επέκτασης γίνεται μέσω ενός ιεραρχικού γραφικού περιβάλλοντος επικοινωνίας με τον χρήστη. Βασικά, η διαδικασία επέκτασης περνά από διάφορες φάσεις. Πρώτα επιλέγονται και ρυθμίζονται τα μοντέλα κόμβων (δηλαδή οι διαφορετικοί τύποι) κόμβων

που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στις προσομοιώσεις - παραδείγματος χάριν ένας ασύρματος κόμβος, ένας τερματικός σταθμός-κέντρο ελέγχου κ.λ.π.. Κατόπιν οργανώνεται το δίκτυό με τον καθορισμό των διασυνδέσεων μεταξύ των διαφορετικών οντοτήτων. Το τελευταίο βήμα συνίσταται στην επιλογή των στατιστικών που πρέπει να συλλεγούν κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων.

Στην περίπτωση που θέλουμε να εξετάσουμε ένα πρωτόκολλο διάδοσης για δίκτυα έξυπνης σκόνης, πρέπει να δημιουργηθεί ένα νέο μοντέλο κόμβων που διαθέτει το 802.11 επίπεδο **MAC** που παρέχει ο **OPNET Modeler**, ενώ στο επόμενο επίπεδο πρέπει να υλοποιηθεί το υπό εξέταση πρωτόκολλο. Ένα νέο μοντέλο ενός τμήματος του δικτύου (όπως ένας νέος αλγόριθμος δρομολόγησης) περιγράφεται σαν μία μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων. Κάθε κατάσταση μπορεί να έχει κάποιο κώδικα που εκτελείται όταν αυτή ενεργοποιηθεί. Μια μετάβαση που συνδέει δύο καταστάσεις ακολουθείται όποτε μία συγκεκριμένη συνθήκη που ορίζεται από τη μετάβαση γίνεται αληθής. Η δυσκολία εργασίας με τον **OPNET Modeler** βρίσκεται στο ότι πρέπει να δημιουργηθεί μία μηχανή καταστάσεων για κάθε επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλων δικτύωσης. Αυτή η προσέγγιση δυσκολεύει την επέκταση του προσομοιωτή και γενικά είναι δύσκολο να εκφραστεί ένας αλγόριθμος σε μια τέτοια μηχανή καταστάσεων. Αλλά οπωσδήποτε, οι μηχανές καταστάσεων ταιριάζουν στο μοντέλο της προσομοίωσης διακριτού χρόνου και εκτελούνται αρκετά αποδοτικά. Εν κατακλείδι, στον **OPNET Modeler** είναι δυνατό να επαναχρησιμοποιηθούν πολλά υπάρχοντα τμήματα (στρώμα της **MAC**, πομποδέκτες, συνδέσεις, κλπ.) διευκολύνοντας έτσι τη χρήση του προσομοιωτή. Αλλά αφ' ετέρου, οποιοδήποτε νέο χαρακτηριστικό του δικτύου πρέπει να περιγραφεί ως μηχανή καταστάσεων που δυσκολεύει την επέκταση του προσομοιωτή την αποσφαλμάτωση του και την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του.

4.4 ns-2

Ο **ns-2** (δείτε [25]) είναι ένας προσομοιωτής δικτύων διακριτών γεγονότων που ξεκίνησε να αναπτύσσεται το 1989 ως παραλλαγή του προσομοιωτή δικτύων **REAL** [29]. Αρχικά σχεδιάστηκε για την προσομοίωση ενσύρματων δικτύων, μέχρι που το 1998 το εργαστήριο **MONARCH** στο **Carnegie Mellon University** επέκτεινε τον **ns-2** ώστε να υποστηρίζει και ασύρματη δικτύωση όπως είναι τα **ad-hoc** δίκτυα και το ασύρματο **LAN** (δείτε [22]). Αρκετά πρωτόκολλα δρομολόγησης για **ad-hoc** δίκτυα είναι διαθέσιμα για **ns-2**, όπως τα **AODV**, **DSR**, **DSDV** και **TORA** (δείτε [26]), καθώς επίσης και μια υλοποίηση του στρώματος **MAC** 802.11. Ο **ns-2** είναι λογισμικό ανοικτού κώδικα, δηλαδή ο πηγαίος κώδικάς του διατίθεται και επιτρέπει την τροποποίηση και επέκταση του προσομοιωτή. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται πολύ συχνά για τη διεξαγωγή ακαδημαϊκής έρευνας και τη μελέτη των δικτύων έξυπνης σκόνης.

Ο πηγαίος κώδικας του **ns-2** είναι χωρισμένος μεταξύ της **C++** στην οποία υλοποιείται ο πυρήνας της προσομοίωσης και της **OTcl**, η οποία είναι μια αντικειμενοστραφής έκδοση της **Tcl** που χρησιμοποιείται για την παραμετροποίηση των διαφόρων τμημάτων του προσομοιωτή και τη συγγραφή των σεναρίων προσομοίωσης από το χρήστη. Ο συνδυασμός των δύο γλωσσών είναι ένας ενδιαφέρων συμβιβασμός μεταξύ της απόδοσης και της ευκολίας της χρήσης.

Η υλοποίηση ενός πρωτοκόλλου και η προσομοίωσή του στον **ns-2** αποτελείται από 4 βήματα:

1. Αρχικά υλοποιείται το πρωτόκολλο με την προσθήκη, στο κυρίως σώμα του κώδικα του **ns-2**, ενός συνδυασμού κώδικα **C++** και **OTcl**. Η στρατηγική που ακολουθείται σε αυτό το συνδυασμό είναι να υλοποιηθούν οι υπολογιστικά ακριβές λειτουργίες του πρωτοκόλλου στη γρήγορη **C++**, ενώ στην **OTcl** υλοποιούνται συναρτήσεις αρχικοποίησης ή καταγραφής στατιστικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα σενάρια του χρήστη.
2. Έπειτα ο χρήστης περιγράφει το σενάριο της προσομοίωσης σε ένα πρόγραμμα **OTcl** το οποίο μεταφράζεται από τον προσομοιωτή και ελέγχει τη διαδικασία προσομοίωσης. Σε αυτό πρόγραμμα ο χρήστης περιγράφει ποια πρωτόκολλα θα χρησιμοποιηθούν και ορίζει τις παραμέτρους λειτουργίας τους. Ακόμα περιγράφει την τοπολογία του δικτύου, τα χαρακτηριστικά του φυσικού μέσου, το μοντέλο κίνησης των κόμβων κλπ.
3. Έπειτα εκτελείται η προσομοίωση, σε αυτό το στάδιο ο χρήστης δεν έχει έλεγχο της διαδικασίας ούτε μπορεί να δει άμεσα τα αποτελέσματα.
4. Αφού τελειώσει η προσομοίωση έχει δημιουργηθεί ένα αρχείο που περιέχει μία λεπτομερή περιγραφή (ανάλογα βέβαια με τις ρυθμίσεις που έχει κάνει ο χρήστης) των γεγονότων που συνέβησαν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, π.χ. μεταδόσεις και παραδόσεις μηνυμάτων, συγκρούσεις κλπ. Ο χρήστης πρέπει να επεξεργαστεί αυτό το αρχείο για να εξάγει τις μετρικές που επιθυμεί.

Όπως περιγράψαμε η υλοποίηση ενός νέου πρωτοκόλλου σε **ns-2** απαιτεί τον κώδικα **C++** για τη λειτουργία του πρωτοκόλλου, καθώς επίσης και προγράμματα **OTcl**. Ο κώδικας **C++** περιγράφει επίσης ποιες παράμετροι και μέθοδοι μπορούν να κληθούν ή να προσπελαστούν από την **OTcl**, γεγονός που προσθέτει ένα ακόμα επίπεδο δυσκολίας για τον χρήστη του προσομοιωτή. Η συγγραφή του τμήματος του πρωτοκόλλου που υλοποιεί η **OTcl** είναι μία δύσκολη διαδικασία καθώς πρέπει να επεκταθούν ή να αλλαχθούν ένας αριθμός από τα αρχεία του προσομοιωτή ώστε το νέο πρωτόκολλο και οι παράμετροί του να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία προσομοίωση.

Η αρχιτεκτονική του **ns-2** ακολουθεί στενά το πρότυπο OSI. Συγκεκριμένα υλοποιούνται τα επίπεδα από το φυσικό ως και το επίπεδο εφαρμογής από ένα σύνολο κλάσεων. Εκτός από την άμεση κλήση των μεθόδων μίας κλάσης, τα επίπεδα επικοινωνούν και με την ανταλλαγή «πακέτων». Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει μία ειδική κατηγορία κλάσεων οι *agents*, που στην ορολογία του **ns-2** αντιπροσωπεύουν ένα σημείο στη ροή πακέτων προσομοίωσης, όπου τα πακέτα δικτύων κατασκευάζονται, υποβάλλονται σε επεξεργασία ή καταναλώνονται. Η δρομολόγηση στο δίκτυο καθορίζεται από έναν *agent* δρομολόγησης ο οποίος επεξεργάζεται τα πακέτα που δημιουργεί ο *agent* που υλοποιεί το επίπεδο εφαρμογής.

Μερικά μειονεκτήματα του **ns-2** πηγάζουν από την φύση ανοικτού κώδικα. Κατ' αρχάς, η τεκμηρίωση είναι συχνά περιορισμένη και δεν έχει ανανεωθεί ώστε να περιγράφει την τρέχουσα έκδοση του προσομοιωτή. Ευτυχώς τα περισσότερα προβλήματα μπορούν να λυθούν με την βοήθεια της δυναμικής κοινότητας χρηστών του **ns-2** και το ξεφύλλισμα του κώδικα. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι ότι υπάρχει μια έλλειψη εργαλείων για να περιγράφονται τα σενάρια προσομοίωσης και να αναλύονται ή να απεικονίζονται τα δεδομένα προσομοίωσης. Αυτά τα εργαλεία γράφονται συχνά με γλώσσες όπως η Perl και το AWK. Η έλλειψη γενικευμένων

εργαλείων ανάλυσης μπορεί να οδηγήσει τους ερευνητές να μετρούν διαφορετικές τιμές για τις ίδιες μετρικές. Ακόμα, η εκμάθηση του **ns-2** είναι δύσκολη και η διόρθωση του κώδικα δυσχεραίνεται από τη χρήση δύο γλωσσών προγραμματισμού. Ένας πιο ουσιαστικός περιορισμός του **ns-2** είναι το μεγάλο ίχνος μνήμης του και η έλλειψη κλιμάκωσής του μόλις αναλαμβάνονται προσομοιώσεις μερικών εκατοντάδων ή μερικών χιλιάδων κόμβων. Εντούτοις ο **ns-2** παραμένει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την μελέτη των δικτύων έξυπνης σκόνης αφού παρέχει υψηλή λεπτομέρεια προσομοίωσης και μεγάλες δυνατότητες προσαρμογής. Επιπλέον, έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται αρκετές παραλλαγές του **ns-2** που έχουν σαν στόχο να εξαλείψουν ορισμένα από τα μειονεκτήματα αυτά ή να προσθέσουν επιπλέον λειτουργικότητα στον προσομοιωτή.

4.5 GloMoSim

Ο GloMoSim είναι ένα κλιμακούμενο περιβάλλον προσομοίωσης για τα ασύρματα και ενσύρματα δίκτυα. Η ανάπτυξή του ξεκίνησε στο εργαστήριο πληροφορικής του UCLA και παρέχεται δωρεάν για ακαδημαϊκή χρήση. Σχεδιάστηκε με την ικανότητα υποστήριξης παράλληλης προσομοίωσης, η ιδιαίτερη αυτή ικανότητα παρέχεται από μια παράλληλη γλώσσα προσομοίωσης που είναι βασισμένη στη C, την parsec. Ο GloMoSim υποστηρίζει την προσομοίωση και τη δημιουργία πρωτοκόλλων για αμιγώς ασύρματα δίκτυα. Η αρχιτεκτονική του είναι οργανωμένη στην ανάλυση των χαρακτηριστικών του δικτύου σε διαφορετικά επίπεδα. Τυποποιημένες διεπαφές (Application Programming Interfaces) χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων. Αυτό επιτρέπει τη γρήγορη ενσωμάτωση των προτύπων που αναπτύσσονται από τους χρήστες για τα διαφορετικά επίπεδα.

Ο GloMoSim στα διάφορα επίπεδα παρέχει έτοιμες εφαρμογές όπως γέννηση δεδομένων (CBR, FTP, Telnet), πρωτόκολλα μεταφορών (TCP, UDP), πρωτόκολλα δρομολόγησης (AODV) και μοντέλα κινητικότητας (random waypoint). Η δημιουργία προσομοιώσεων είναι σχετικά απλή, ο χρήστης αρκεί να διευκρινίσει τα χαρακτηριστικά δικτύων και των εφαρμογών που εκτελούνται σε δύο αρχεία. Το ένα περιέχει την περιγραφή της κίνησης που παράγει το δίκτυο (τύπος εφαρμογής, πλήθος δυαδικών ψηφίων, κ.λ.π.) και το δεύτερο περιέχει την περιγραφή των υπολοίπων παραμέτρων. Οι στατιστικές που συλλέγονται μπορούν να αποθηκεύονται είτε σε κείμενο είτε να παρουσιάζονται γραφικά.

Με τον GloMoSim, η μεγαλύτερη δυσκολία παρουσιάζεται όταν πρόκειται να προσομοιωθεί μια απλή εφαρμογή που παρακάμπτει τα περισσότερα επίπεδα που ορίζονται από το OSI. Η παράκαμψη της στοίβας των πρωτοκόλλων δικτύωσης δεν είναι προφανής καθώς οι περισσότερες εφαρμογές βρίσκονται συνήθως πάνω από αυτή, ενώ απαραίτητη είναι και η γνώση της γλώσσας parsec για την υλοποίηση της εφαρμογής. Σε σχέση με τον **OPNET Modeler** και τον **ns-2**, παραδείγματος χάριν, η αρχιτεκτονική του GloMoSim είναι πολύ λιγότερο ευέλικτη.

Μέρος II

Πρωτόκολλα για δίκτυα έξυπνης σκόνης

Κεφάλαιο 5

Ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα για την ανίχνευση πολλαπλών γεγονότων σε ασύρματα δίκτυα έξυπνης σκόνης

Σε αυτό το κεφάλαιο¹ ασχολούμαστε με τη πρόβλημα της διάδοσης πολλών γεγονότων σε ασύρματα δίκτυα έξυπνης σκόνης. Συγκεκριμένα, προτείνουμε εκτεταμένες εκδόσεις δύο πρωτοκόλλων διάδοσης δεδομένων: του στοχαστικού πρωτοκόλλου αποστολής δεδομένων με φάσεις νάρκης και εγρήγορσης (Sleep-Awake Probabilistic Forwarding Protocol–**SW-PFR**) και το ενεργειακά αποδοτικό ιεραρχικό πρωτόκολλο με όρια ενεργοποίησης (Hierarchical Threshold sensitive Energy Efficient Network protocol–**H-TEEN**), δείτε [24]. Αυτές οι επεκτάσεις βελτιώνουν την απόδοση των αρχικών πρωτοκόλλων, με την εισαγωγή των περιόδων νάρκης και εγρήγορσης στο πρωτόκολλο **PFR**, δείτε [7], για εξοικονόμηση ενέργειας, και την εισαγωγή μιας ιεραρχίας των ομάδων του πρωτοκόλλου **TEEN**, δείτε [20], προκειμένου να αντιμετωπίσει καλύτερα δίκτυα με μεγάλο αριθμό κόμβων.

Ακόμα εφαρμόζουμε τα δύο πρωτόκολλα και διεξάγουμε μια εκτενή συγκριτική προσομοίωση των διάφορων σημαντικών μετρικών της απόδοσής των δύο πρωτοκόλλων, εστιάζοντας κυρίως στην κατανάλωση ενέργειας, ερευνούμε λεπτομερώς τα σχετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε πρωτοκόλλου, και συζητάμε έναν πιθανό υβριδικό συνδυασμό των δύο πρωτοκόλλων προς τη βελτιστοποίηση της απόδοσης σε ορισμένες περιπτώσεις.

5.1 Το μοντέλο

Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από έναν πολύ μεγάλο αριθμό εξαιρετικά μικρών ομοιογενών αισθητήρων, τους οποίους καλούμε εδώ κόκκους ή σωματίδια. Κάθε σωματίδιο είναι μια

¹Το παρόν κεφάλαιο είναι αποτέλεσμα συνεργασίας με τους Σωτήρη Νικολετσέα, Ιωάννη Χατζηγιαννάκη, Χαρίλαο Ευθυμίου, Αθανάσιο Αντωνίου και Γιώργο Μυλωνά. Δημοσιεύτηκε στο 37th Annual Simulation Symposium, δείτε [24] για λεπτομέρειες.

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. Τέτοια σωματίδια (στο μοντέλο μας) δεν κινούνται. Έστω n ο αριθμός έξυπνων σωματιδίων σκόνης που αναπτύσσονται σε μια επίπεδη περιοχή, δηλαδή δύο διαστάσεων όπως στα [15, 16, 18, 17, 20], \mathcal{A} . Συμβολίζουμε με d την πυκνότητα των σωματιδίων, δηλαδή $d = \frac{n}{\mathcal{A}}$. Υπάρχει ένα μοναδικό σημείο στην περιοχή του δικτύου \mathcal{S} , που αντιπροσωπεύει ένα κέντρο ελέγχου όπου πρέπει να μεταδοθούν τα δεδομένα.

Υποθέτουμε ότι υπάρχει μια φάση οργάνωσης του έξυπνου δικτύου σκόνης, κατά τη διάρκεια της οποίας τα σωματίδια έξυπνης σκόνης εξαπλώνονται στην περιοχή \mathcal{A} , πιθανότητα με τη ρίψη τους από ένα αεροπλάνο. Μόλις το «σύννεφο» των σωματιδίων έξυπνης σκόνης πέσει στην περιοχή ενδιαφέροντος (δείτε σχήμα 5.2) ξεκινά μία φάση αρχικοποίησης του δικτύου. Κατά τη φάση αρχικοποίησης με την ανταλλαγή ειδικών μηνυμάτων ελέγχου (που είναι πολύ σύντομα και επομένως φτηνά και διαβιβάζονται μόνο μία φορά) κάθε έξυπνο σωματίδιο σκόνης μαθαίνει την κατεύθυνση του \mathcal{S} . Με να υποθέσουμε ότι κάθε σωματίδιο έξυπνης σκόνης έχει μια ατομική αίσθηση προσανατολισμού, και επομένως με τη χρήση αυτών των μηνυμάτων ελέγχου, κάθε σωματίδιο γνωρίζει κατά προσέγγιση τη θέση του \mathcal{S} .

Τα σωματίδια είναι εξοπλισμένα με ένα σύνολο οργάνων μέτρησης διάφορων συνθηκών (αισθητήρες) όπως είναι η ένταση του φωτός, η πίεση, η θερμοκρασία κ.λπ. Κάθε σωματίδιο έχει έναν πομπό μετάδοσης ραδιοκυμάτων που χαρακτηρίζεται από την εμβέλειά του R . Κάθε σωματίδιο είναι εξοπλισμένο με μια παροχή ηλεκτρικού ρεύματος (π.χ. μπαταρία), η οποία διαθέτει περιορισμένη ωφέλιμη διάρκεια ζωής και είναι ασύμφορο να αντικατασταθεί.

Κάθε σωματίδιο μπορεί να επικοινωνεί με τη χρήση του πομπού ραδιοκυμάτων. Ο πομπός μπορεί να εκπέμπει προς μια κατεύθυνση που ορίζεται από τη γωνία εκπομπής α γύρω από μια ορισμένη γραμμή (ενδεχομένως χρησιμοποιείται κάποιο ειδικό είδος κεραίας, δείτε το σχήμα 5.2). Η ακτίνα μετάδοσης R και η γωνία μετάδοσης α μπορεί να ποικίλουν. Σημειώστε πάντως ότι τα πρωτόκολλα που μελετάμε σε αυτήν την εργασία μπορούν να λειτουργήσουν ακόμη και με ραδιοφωνική μετάδοση προς όλες τις κατευθύνσεις.

Οποιαδήποτε στιγμή, κάθε σωματίδιο μπορεί να είναι σε μία από τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις κατανάλωσης ενέργειας: (α) μετάδοση ενός μηνύματος, (β) λήψη ενός μηνύματος, (γ) αντίληψη των γεγονότων και (δ) μία ειδική κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας που ονομάζουμε νάρκωση (sleep). Σε αντίθεση με την φυσιολογική κατάσταση λειτουργίας, που χάριν συμμετρίας θα ονομάζουμε και κατάσταση εγρήγορσης, κατά τη διάρκεια της κατάστασης νάρκωσης, το σωματίδιο παύει 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 νάρκωσης είναι αμελητέα. Όπως και στο μοντέλο που παρουσιάζεται στο [15] θεωρούμε ότι για την περίπτωση μετάδοσης ενός μηνύματος, το κύκλωμα του πομπού καταναλώνει ένα ποσό ενέργειας για τη λειτουργία του E_{elec} και ο ενισχυτής του σήματος καταναλώνει ϵ_{amp} . Τέλος υποθέτουμε ένα μοντέλο εξασθένισης του σήματος που η ισχύς του σήματος σε απόσταση r είναι αντιστρόφως ανάλογη του r^2 . Επομένως, για να μεταδώσει ένα μήνυμα μήκους $kbit$, ο πομπός χρησιμοποιεί ενέργεια

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

και για τη λήψη ενός μηνύματος ξοδεύεται ενέργεια

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

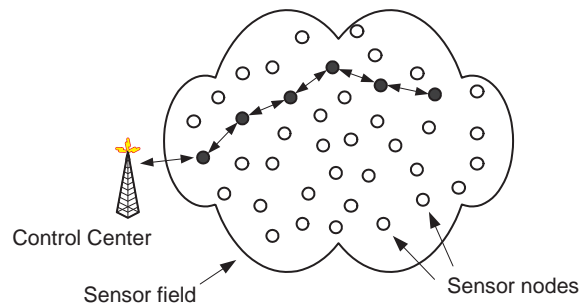
όπου οι ποσότητες E_{T-elec} , E_{R-elec} αντιστοιχούν στην ενέργεια που ξοδεύει το κύκλωμα του πομπού και του δέκτη.

Συνοψίζοντας θεωρούμε τις εξής τιμές για την κατανάλωση ενέργειας:

- E_T : Κατανάλωση για τη μετάδοση.
- E_R : Κατανάλωση για τη λήψη.
- E_{idle} : Κατανάλωση στην κατάσταση αδράνειας.
- $E_{powerup}$: Κατανάλωση ενέργειας όταν επιστρέφουμε από την κατάσταση νάρκης.

Στην κατάσταση αδράνειας, 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). Αφ' ετέρου, η ενέργεια που καταναλώνεται για την ενεργοποίηση της συσκευής είναι ίση με τρεις φορές το ποσό ενέργειας που καταναλώνεται σε μια χρονική μονάδα κατά τη διάρκεια της κατάστασης αδράνειας, δηλαδή είναι $3 \cdot E_{elec}$.

Τα σωματίδια στο πρωτόκολλο **H-TEEN** δεν εκμεταλλεύονται τη δυνατότητα μετάβασης στην κατάσταση νάρκης, κατά συνέπεια η κατανάλωση ενέργειας του πρωτοκόλλου χαρακτηρίζεται από τις υπόλοιπες τρεις αιτίες κατανάλωσης ενέργειας. Τέλος, υποθέτουμε ότι κάθε σωματίδιο, στο πρωτοκόλλο **H-TEEN**, δεν ξοδεύει καθόλου ενέργεια λαμβάνοντας μηνύματα άλλων κόμβων τις ομάδες του που στέλνονται στον επικεφαλής κόμβο. Σημειώνουμε ότι στις προσομοιώσεις μας μετράμε με λεπτομέρεια τις ανωτέρω ενεργειακές δαπάνες. Το πρότυπό μας, αν και απλό, απεικονίζει με αρκετή ακρίβεια τις τεχνολογικές προδιαγραφές των πραγματικών συσκευών έξυπνων σκόνης. Σε αντίθεση με το [18], το μοντέλο μας είναι πιο αδύνατο αφού δεν υποθέτουμε καμία δυνατότητα προσδιορισμού της γεωγραφικής θέσης για τα σωματίδια (π.χ. μια συσκευή GPS) έτσι οδηγούμαστε σε γενικότερα και πιο ισχυρά αποτελέσματα.



Σχήμα 5.1: Ένα νέφος έξυπνης σκόνης

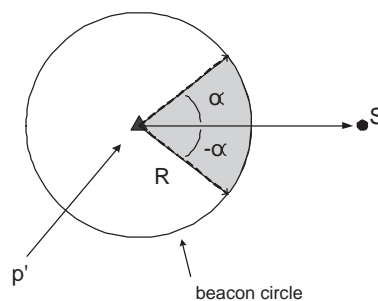
5.1.1 Το πρόβλημα της διάδοσης δεδομένων

Τα πρωτόκολλα που παρουσιάζουμε είναι χαρακτηριστικά πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας σε ένα δίκτυο έξυπνης σκόνης. Όμως η φράση «διάδοση πληροφορίας» μπορεί να έχει διαφορετική σημασία και να αναφέρεται σε διαφορετικό πρόβλημα ανάλογα με το σύστημα-δίκτυο που εξετάζουμε. Στη συνέχεια παραθέτουμε έναν ορισμό του προβλήματος διάδοσης πληροφορίας που επιλύουν τα πρωτόκολλά μας. Υποθέτουμε την πραγματοποίηση μιας σειράς K κρίσιμων γεγονότων, με κάθε γεγονός να γίνεται αντιληπτό από ένα μόνο σωματίδιο p_i ($i = 1, 2, \dots, K$). Κατόπιν το πρόβλημα \mathcal{P} διάδοσης πολλαπλών γεγονότων είναι το ακόλουθο: «Πώς μπορεί κάθε σωματίδιο p_i ($i = 1, 2, \dots, K$), μέσω της συνεργασίας με τα υπόλοιπα σωματίδια, αποδοτικά (κυρίως όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας) να διαδώσει πληροφορία $info(\mathcal{E}_i)$ που αναφέρει την πραγματοποίηση του γεγονότος \mathcal{E}_i στο κέντρο ελέγχου Σ ».

Βεβαίως, λόγω της πυκνής κατανομής και κοντινής απόστασης των σωματιδίων αισθητήρων, η επικοινωνία μεταξύ δύο σωματιδίων είναι πολύ περισσότερο οικονομική, δηλαδή καταναλώνει λιγότερη ενέργεια, από την άμεση μετάδοση στο κέντρο ελέγχου. Επιπλέον, οι μικρής εμβέλειας, βήμα-βήμα (δηλαδή από σωματίδιο σε σωματίδιο-hop-by-hop) μεταδόσεις, μπορούν αποτελεσματικά να αντιμετωπίσουν μερικά από τα φαινόμενα διάδοσης σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις (π.χ. φαινόμενα σκεδασμού) και μπορούν να βοηθήσουν ώστε να συνεχιστεί ομαλά η διάδοση γύρω από τυχών εμπόδια (π.χ. πυκνή βλάστηση, κτίρια). Τέλος, οι χαμηλής ενέργειας μεταδόσεις στην επικοινωνία πολλαπλών βημάτων μπορούν να ενισχύσουν την ασφάλεια, δηλαδή να προστατέψουν το δίκτυο σε στρατιωτικές εφαρμογές από την ανεπιθύμητη ανακάλυψη της λειτουργίας διάδοσης δεδομένων.

Αφ' ετέρου, οι μεγάλης εμβέλειας μεταδόσεις απαιτούν τη συμμετοχή λίγων σωματιδίων και επομένως μειώνουν τις απαιτήσεις όσον αφορά τον αριθμό των διαθέσιμων σωματιδίων και παρέχουν καλύτερους χρόνους απόκρισης στο δίκτυο. Επιπλέον, η μεγάλη ακτίνας επικοινωνία επιτρέπει την εφαρμογή τεχνικών ομαδοποίησης (clustering) και άλλων αποδοτικών τεχνικών, που αναπτύχθηκαν για τα ad-hoc ασύρματα δίκτυα. Ειδικότερα, η ομαδοποίηση των σωματιδίων επιτρέπει στους επικεφαλείς των ομάδων, να μειώσει το ποσό των διαβιβασθέντων δεδομένων με τη συμπίεση των πληροφοριών.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις δείχνουν ότι πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις υπάρχουν στη λύση του προβλήματος διάδοσης πολλαπλών γεγονότων \mathcal{P} . Εν πάση περιπτώσει, ο στόχος είναι



Σχήμα 5.2: Κατευθυνόμενη μετάδοση υπό γωνία α

να διαδοθούν αποτελεσματικά όσο το δυνατό περισσότερο, εάν όχι όλα, γεγονότα \mathcal{E}_i στο κέντρο ελέγχου. Σημειώστε ότι, λόγω του πλήθους των γεγονότων που ανακαλύπτονται και των μικρών αποθεμάτων ενέργειας των σωματιδίων, δεν είναι προφανές ότι όλα αυτά τα γεγονότα επιτυγχάνεται να αναφερθούν στο κέντρο ελέγχου. Αποδοτικότητα σημαίνει να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο αισθητήρων, ένας τρόπος είναι με την ελαχιστοποίηση του αριθμού μεταδόσεων και την ελαχιστοποίηση των διπλότυπων μηνυμάτων (των μηνυμάτων που αναφέρουν το ίδιο γεγονός, που παρατηρούνται στην διάδοση πολλών βημάτων. Μία διαφορετική προσέγγιση είναι η μείωση του μεγέθους των δεδομένων (με τεχνικές συμπίεσης) και του αριθμού μεταδόσεων (με την ομαδοποίηση) κατά την επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις. Σημειώστε ότι ένα κατάλληλο πρωτόκολλο **MAC** απαιτείται σε καθεμία περίπτωση για να χειριστεί τις συγκρούσεις και να αποφύγει τις αναμεταδόσεις μηνυμάτων [32, 8].

Επιπλέον, μια ενδιαφέρουσα πτυχή του προβλήματος που ερευνούμε είναι η διάρκεια ζωής των σωματιδίων, μία παράμετρος που έχει σημαντικές επιπτώσεις στη δυνατότητα διάδοσης δεδομένων διαμέσου του δικτύου. Με την πάροδο του χρόνου, δεδομένου ότι όλο και περισσότερα σωματίδια καταναλώνουν τους ενεργειακούς πόρους τους και «πεθαίνουν», οι διαθέσιμες διαδρομές δεδομένων μειώνονται και έτσι μειώνεται η αποδοτικότητα του δικτύου όσον αφορά την επιτυχή αναφορά γεγονότων.

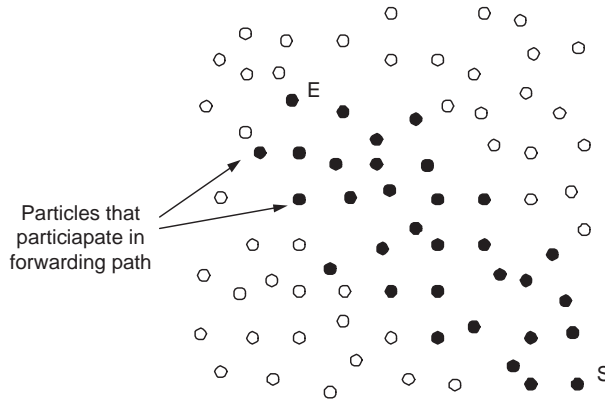
5.2 Sleep-Awake Probabilistic Forwarding Protocol—SW-PFR

Η βασική ιδέα του πρωτοκόλλου είναι ότι προσπαθεί με στοχαστικές μεθόδους να ευνοήσει τις μεταδόσεις προς το κέντρο ελέγχου μέσα σε μια λεπτή ζώνη σωματιδίων γύρω από τη γραμμή που συνδέει το σωματίδιο που αισθάνεται το γεγονός \mathcal{E} και το κέντρο ελέγχου (δείτε το σχήμα 5.3 για μια γραφική αναπαράσταση). Αν και η διάδοση δεδομένων κατά μήκος αυτής της γραμμής είναι βέλτιστη, όσον αφορά το κόστος σε ενέργειας και χρόνο, τέτοια διάδοση δεν είναι πάντα εφικτή. Αυτό συμβαίνει επειδή, ακόμα κι αν αρχικά αυτή η γραμμή «καλύπτεται», δηλαδή υπάρχουν αισθητήρες πολύ κοντά ή πάνω σε όλο το μήκος της γραμμής, ορισμένοι αισθητήρες αναπόφευκτα θα γίνουν ανενεργοί, είτε μόνιμα (επειδή η ενέργειά τους έχει εξαντληθεί) ή προσωρινά (επειδή αυτοί οι αισθητήρες βρίσκονται σε κατάσταση νάρκης για να εξοικονομήσουν ενέργεια). Το πρωτόκολλο εξελίσσεται σε δύο φάσεις που περιγράφουμε αναλυτικά παρακάτω.

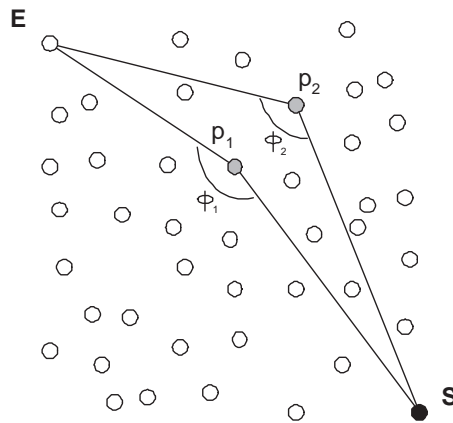
5.2.1 Φάση 1: Η φάση δημιουργίας μετώπου διάδοσης

Κατά τη διάρκεια αυτής της αρχικής φάσης ένα αρκετά μεγάλο μέτωπο μηνυμάτων δημιουργείται για να εξασφαλίσει ότι η διαδικασία διάδοσης δεδομένων θα επιζεί για μια μεγάλη χρονική περίοδο και ότι κάποια μηνύματα θα προωθηθούν με βάση το στοχαστικό κριτήριο της δεύτερης φάσης, ώστε τελικά τα δεδομένα να φτάσουν στο κέντρο ελέγχου. Αυτό το μέτωπο δημιουργείται με τη χρήση ενός μηχανισμού περιορισμένης «πλημμύρας» του δικτύου με μηνύματα για έναν αριθμό βημάτων που ρυθμίζεται κατάλληλα. Σύμφωνα με αυτόν τον μηχανισμό, η επικεφαλίδα κάθε μηνύματος περιλαμβάνει έναν μετρητή που ονομάζουμε β . Αυτός ο μετρητής τίθεται σε μια προκαθορισμένη αξία από το σωματίδιο που αντιλαμβάνεται το γεγονός, όταν παράγει το

μήνυμα που αναφέρει το αισθανόμενο γεγονός. Έπειτα από αυτή την αρχικοποίηση το μήνυμα μεταδίδεται. Κάθε σωματίδιο, όταν λάβει ένα σχετικό μήνυμα που περιέχει έναν θετικό μετρητή ($\beta \leq 0$), μειώνει την τιμή του β κατά 1 και προωθεί το μήνυμα προς το κέντρο ελέγχου. Για να γίνει η μετάδοση προς το \mathcal{S} , κάθε σωματίδιο χρησιμοποιεί την κατευθυνόμενη μετάδοση υπό γωνία, για να μεταδώσει τα στοιχεία τους σε όλους γείτονές του, που βρίσκονται στην κατεύθυνση του \mathcal{S} . Όταν ο μετρητής γίνεται μηδέν, το σωματίδιο προχωρά στη δεύτερη φάση του πρωτοκόλλου **SW-PFR**. Ουσιαστικά, ο μετρητής καθορίζει το μήκος της πρώτης φάσης του πρωτοκόλλου **SW-PFR**.



Σχήμα 5.3: Ζώνη σωματιδίων γύρω από τη γραμμή που ενώνει το σωματίδιο που αντιλαμβάνεται το γεγονός \mathcal{E} και του κέντρου ελέγχου \mathcal{S} .



Σχήμα 5.4: Η σχέση της γωνίας ϕ και της εγγύτητας στην βέλτιστη γραμμή μετάδοσης.

5.2.2 Φάση 2: Η φάση στοχαστικής προώθησης

Σε αυτήν την δεύτερη φάση, η διάδοση δεδομένων γίνεται κατά τρόπο στοχαστικό. Κάθε σωματίδιο που λαμβάνει ένα μήνυμα υπολογίζει την πιθανότητα της συμμετοχής του στη διαδικασία διάδοσης. Όσο πιο κοντά βρίσκεται ένα σωματίδιο στη βέλτιστη γραμμή μετάδοσης, που συνδέει τον κόμβο-πηγή \mathcal{E} που ανίχνευσε ένα γεγονός και το κέντρο ελέγχου \mathcal{S} , τόσο υψηλότερη η πιθανότητά του για να διαβιβάσει τα δεδομένα που αναφέρουν το γεγονός. Η πιθανότητα αποστολής \mathbf{P}_{fwd} υπολογίζεται ως $\mathbf{P}_{fwd} = \frac{\phi}{\pi}$, όπου ϕ είναι η γωνία που καθορίζεται από (α) τη γραμμή που συνδέει το σωματίδιο που εκτελεί την τυχαία επιλογή και τον αισθητήρα που αρχικά ανίχνευσε το γεγονός, και (β) τη γραμμή που συνδέει αυτόν τον κόμβο με το κέντρο ελέγχου. Παρατηρήστε ότι μια μεγαλύτερη γωνία ϕ αντιστοιχεί σε θέση του αισθητήρα πιο κοντά στην ευθεία γραμμή μεταξύ του \mathcal{E} και του \mathcal{S} , στο σχήμα 5.4 φαίνεται γραφικά. Σαφώς, όταν $\phi = \pi$, ο αισθητήρας βρίσκεται πάνω σε αυτήν την γραμμή. Κατά συνέπεια, όταν ισχύει $\phi_1 > \phi_2$ τότε για τα αντίστοιχα σωματίδια p_1, p_2 , έχουμε ότι το p_1 είναι πιο κοντά στη γραμμή \mathcal{E} - \mathcal{S} από ότι το p_2 , επομένως ισχύει $\mathbf{P}_{fwd}(p_1) = \frac{\phi_1}{\pi} > \frac{\phi_2}{\pi} = \mathbf{P}_{fwd}(p_2)$.

5.2.3 Υπολογισμός της γωνίας ϕ

Κάτω από κατάλληλες, αλλά ταυτόχρονα και ρεαλιστικές, υποθέσεις για τα μοντέλα σωματιδίων αισθητήρων, η γωνία ϕ μπορεί να υπολογιστεί τοπικά τρέχοντας ένα απλό υποπρωτόκολλο (δείτε [7]) για τη λεπτομερή συζήτηση). Τέτοιες υποθέσεις μοντελοποίησης περιλαμβάνουν α) τη δυνατότητα των σωματιδίων αισθητήρων να υπολογίσουν την κατεύθυνση από την οποία προέρχεται μια λαμβανόμενη μετάδοση (π.χ. με χρήση κεραιών υπολογισμού κατεύθυνσης), β) να υπολογίσουν την απόσταση από ένα κοντινό σωματίδιο που έκανε τη μετάδοση (π.χ. μέσω των μοντέλων εξασθένησης του σήματος), γ) να έχουν ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων και δ) να ξέρουν την κατεύθυνση προς το κέντρο ελέγχου (αυτό γίνεται ενδεχομένως κατά τη διάρκεια μιας φάσης οργάνωσης στη αρχή λειτουργίας του δικτύου). Σημειώστε ότι δεν χρειαζόμαστε πληροφορίες GPS ή γνώση της δομής ολόκληρου του δικτύου.

5.2.4 Εξοικονόμηση ενέργειας

Το πρωτόκολλο **SW-PFR** που προτείνεται εδώ είναι μια μη τετριμμένη τροποποίηση του πρωτοκόλλου **PFR** που προτείνεται στο [7]. Υπάρχουν δύο σημαντικές προσθήκες σε σχέση με εκείνο το πρωτόκολλο. Κατ' αρχάς, το **SW-PFR**, λειτουργεί σε δίκτυα αισθητήρων στα οποία διαδίδονται πολλά μηνύματα που αναφέρουν γεγονότα. Ειδικότερα, οποιαδήποτε στιγμή μπορεί να υπάρχουν περισσότερα από ένα γεγονότα που διαδίδονται προς το κέντρο ελέγχου. Προκειμένου να αποφευχθούν οι επαναλαμβανόμενες μεταδόσεις και οι άπειροι βρόγχοι, σε κάθε σωματίδιο παρέχεται μια περιορισμένη «χρυφή μνήμη» (cache). Σε αυτήν την cache, το σωματίδιο καταχωρεί ένα μοναδικό αριθμό ταυτοποίησης γεγονότος, για κάθε διαφορετικό γεγονός που «έχει ακούσει». Η μοναδικότητα κάθε ταυτότητας γεγονότος εξασφαλίζεται, αφού κατασκευάζεται σαν μια αλληλουχία της ταυτότητας του σωματιδίου πηγής και της χρονοσφραγίδας που αναθέτει με βάση ένα εσωτερικό χρονόμετρο (ή έναν απλό μετρητή) στο αισθανόμενο γεγονός. Ο παραλήπτης ενός μηνύματος ελέγχει εάν το σχετικό γεγονός υπάρχει καταχωρημένο στην

μνήμη του. Εάν το συγκεκριμένο γεγονός δεν είναι στην μνήμη του σωματιδίου, καταχωρείται και έπειτα το σωματίδιο εκτελεί τις ενέργειες που ορίζονται από το πρωτόκολλο **PFR**. Εντούτοις, εάν το γεγονός έχει ήδη ληφθεί, το μήνυμα απορρίπτεται και καμία περαιτέρω ενέργεια δεν εκτελείται.

Πιθανώς, ένα σχετικά μικρό μέγεθος μνήμης (π.χ. μέχρι $512kB$) θα ήταν επαρκές για ένα τέτοιο σκοπό. Επίσης, το σωματίδιο θα μπορούσε να επιβάλει μια πολιτική περιορισμένης διάρκειας ζωής για κάθε μία αποθηκευμένη ταυτότητα, μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις σε μνήμη στο ελάχιστο. Επιπλέον, η συμπίεση δεδομένων αποτελεί ένα ανοικτό πεδίο έρευνας που μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου σε αυτόν τον τομέα, αφού μπορεί να μειώσει τον αριθμό των μηνυμάτων που πρέπει να αποθηκευτούν.

Μία δεύτερη διαφοροποίηση του **SW-PFR** από το **PFR**, είναι ότι προτείνει μία ενδιαφέρουσα μέθοδο εναλλαγής καταστάσεων των σωματιδίων, ανάμεσα σε καταστάσεις νάρκης και εγρήγορσης. Εφαρμόζοντας αυτή τη μέθοδο, κάθε σωματίδιο περνά από εναλλασσόμενες περιόδους νάρκης και εγρήγορσης. Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου νάρκης, τα σωματίδια παύουν οποιαδήποτε επικοινωνία με το περιβάλλον, κατά συνέπεια υποθέτουμε ότι η κατανάλωση ισχύος είναι ελάχιστη και σχεδόν ασήμαντη, ενώ όταν ένα σωματίδιο είναι σε εγρήγορση, καταναλώνει το κανονικό ποσό ενέργειας. Επιπλέον, ένα ειδικό ενεργειακό ποσό θεωρείται ότι καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της μετάβασης από την νάρκη σε εγρήγορση, που οφείλεται στην αρχικοποίηση των κυκλωμάτων. Υποθέτουμε ότι οι περίοδοι νάρκης και εγρήγορσης εναλλάσσονται στοχαστικά ανεξάρτητα σε κάθε σωματίδιο και έχουν διάρκειες s , w αντίστοιχα. Θεωρούμε

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

, η αναλογία αυτή ποσοτικοποιεί την εξοικονόμηση ενέργειας που πετυχαίνει το πρωτόκολλο στα σωματίδια έξυπνης σκόνης. Συμβολίζουμε με en τον παράγοντα εξοικονόμησης ενέργειας, 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 νάρκης και μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας.

5.3 Hierarchical Threshold sensitive Energy Efficient Network protocol (H-TEEN)

Το ενεργειακά αποδοτικό ιεραρχικό πρωτόκολλο με όρια ενεργοποίησης παρουσιάζεται στο [20] και είναι μια ενδιαφέρουσα τροποποίηση του πρωτοκόλλου **LEACH** (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, δείτε [15]) για δίκτυα αισθητήρων ανταπόκρισης. Τα δίκτυα αισθητήρων ανταπόκρισης είναι εκείνα τα δίκτυα όπου τα σωματίδια αντιδρούν αμέσως μόνο στις ξαφνικές και δραστικές αλλαγές στην τιμή μιας περιβαλλοντικής συνθήκης υπό παρακολούθηση. Οι βασικές ιδέες που χρησιμοποιούνται στο **TEEN** είναι ο διαχωρισμός των σωματιδίων σε ομάδες και η

χρήση κατώτατων ορίων στην μεταβολή των συνθηκών προκειμένου να αποφασιστεί εάν ένα σωματίδιο πρέπει να αναφέρει το γεγονός στο κέντρο ελέγχου.

Το **TEEN** χρησιμοποιεί την αυτοοργάνωση σωματιδίων σε ομάδες, όπως προτείνονται στο **LEACH**, προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των μεταδόσεων που χρειάζονται για να αναφερθεί ένα γεγονός στο δίκτυο. Έχουμε επεκτείνει την έννοια της ομαδοποίησης στο σχηματισμό μιας ιεραρχικής δομής των ομάδων, μια πρόταση που αναφέρεται στο αρχικό έγγραφο. Η μετάδοση δεδομένων γίνεται μέσω μίας «δενδρικής» διαδρομής, η οποία σχηματίζεται επειδή κάθε σωματίδιο διαβιβάζει τα δεδομένα μόνο στον επικεφαλής της ομάδας του (θα αναφερόμαστε σε αυτούς τους κόμβους και σαν γονείς). Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του **TEEN** διαιρείται σε χρονικές περιόδους-γύρους που επαναλαμβάνονται κυκλικά, κάθε γύρος διαιρείται περαιτέρω σε μία σύντομη φάση οργάνωσης, κατά την οποία γίνεται η οργάνωση σε ομάδες, και μία σχετικά μακροβιότερη σταθερή φάση, κατά την οποία η κανονική λειτουργία διάδοσης δεδομένων υλοποιείται.

5.3.1 Φάση αυτοοργάνωσης

Σε αυτήν την φάση, κάθε σωματίδιο αποφασίζει σχετικά με το εάν πρέπει να γίνει επικεφαλής μίας ομάδας ή όχι. Η παρούσα απόφαση είναι βασισμένη σε μια σταθερή πιθανότητα P_c (στην προσομοίωση που διεξάγουμε θέτουμε $P_c = 0.05$) και εάν έχει διατελέσει επικεφαλής μίας ομάδας στους τελευταίους $1/P_c$ γύρους. Συγκεκριμένα, ένα σωματίδιο n επιλέγει έναν τυχαίο αριθμό από 0 έως 1 και τον συγκρίνει με ένα κατώτατο όριο $T(n)$, το οποίο υπολογίζεται σε κάθε γύρο ως

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P_c}{1 - P_c * (r \bmod \frac{1}{P_c})} & \text{εάν } n \in G \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

εδώ r είναι ο τρέχων γύρος και G είναι το σύνολο σωματιδίων που δεν έχουν εκλεγεί ως επικεφαλής στους τελευταίους $1/P_c$ γύρους. Όπως μπορούμε να δούμε, αυτό το κατώτατο όριο αυξάνεται με το πέρασμα των γύρων και έτσι μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι κάθε κόμβος θα γίνει ένας επικεφαλής σε κάποια στιγμή μέσα σε $1/P_c$ γύρους. Η ίδια διαδικασία εκλογής επικεφαλών και δημιουργίας ομάδων επαναλαμβάνεται μετά από $1/P_c$ γύρους.

Όταν ένα σωματίδιο αποφασίσει να γίνει ένας επικεφαλής, μεταδίδει ένα μήνυμα-ανακοίνωση σε ολόκληρο δίκτυο. Τα άλλα σωματίδια ακούνε τις ανακοινώσεις από όλους τους επικεφαλείς, και επιλέγουν τον επικεφαλής της ομάδας που θα ανήκουν βασισμένα στην ισχύ του σήματος που έλαβαν. Όταν ένα σωματίδιο αποφασίσει σε ποια ομάδα θα ανήκει, διαβιβάζει μια απάντηση πίσω στον επικεφαλής της αντίστοιχης ομάδας. Αυτό γίνεται πιθανώς χρησιμοποιώντας κάποιο πρωτόκολλο **MAC** με **CSMA** για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις. Ο επικεφαλής μετά την πάροδο ενός χρονικού διαστήματος αποφασίζει ότι έχει ακούσει όλες τις απαντήσεις από τα σωματίδια που ανήκουν στην ομάδα του και οργανώνει έπειτα ένα πρόγραμμα **TDMA** για τις μεταδόσεις. Έπειτα μεταδίδει αυτό το πρόγραμμα στα σωματίδια στην ομάδα του.

Αυτή τη στιγμή, το επόμενο επίπεδο ιεραρχίας μπορεί να σχηματιστεί. Επεκτείνουμε το αρχικό πρωτόκολλο **TEEN** με το ακόλουθο αλγόριθμο για την ιεραρχική οργάνωση των ομάδων. Οι κόμβοι που έχουν γίνει επικεφαλείς, αποφασίζουν σχετικά με εάν πρέπει να συμμετέχουν σαν επικεφαλείς στο επόμενο επίπεδο ιεραρχίας με κριτήριο την ίδια πιθανότητα P_h (στις προ-

σομοιώσεις μας είναι $P_h = 0.1$). Ένα δεύτερο κριτήριο είναι εάν ο αριθμός ανακοινώσεων των επικεφαλών στο προηγούμενο επίπεδο ιεραρχίας που ελήφθησαν είναι λιγότερες από οκτώ, δηλαδή σε κάθε επίπεδο ιεραρχίας προσπαθούμε να έχουμε τουλάχιστον οκτώ επικεφαλές. Εάν ένα σωματίδιο αποφασίσει να συμμετέχει στο επόμενο επίπεδο ιεραρχίας μεταδίδει ένα μήνυμα-ανακοίνωση, ενώ μόνο οι επικεφαλές του προηγούμενου επιπέδου αποφασίζουν σε πια ομάδα του επόμενου επιπέδου ανήκουν, και αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τα επόμενα επίπεδα. Στην προσομοίωσή μας έχουμε χρησιμοποιήσει τέσσερα επίπεδα ιεραρχίας ενώ ο επικεφαλής όλων αυτών των επιπέδων είναι φυσικά το κέντρο ελέγχου.

5.3.2 Φάση διάδοσης δεδομένων

Αφότου έχουν οργανωθεί όλα τα επίπεδα ομαδοποίησης, οι πραγματικές μεταδόσεις δεδομένων από τα σωματίδια μπορούν να αρχίσουν. Οι μεταδόσεις από τα σωματίδια στους επικεφαλές των ομάδων γίνονται σύμφωνα με το πρόγραμμα **TDMA** κάθε ομάδας. Προκειμένου να ελαττωθούν οι παρεμβολές μεταξύ των διαφορετικών γειτονικών ομάδων, οποιοσδήποτε επικεφαλής επιλέγει τυχαία έναν κώδικα από έναν προκαθορισμένο κατάλογο και έτσι τα σωματίδια σε κάθε ομάδα, χρησιμοποιούν διαφορετικούς κώδικες **CDMA**. Τέλος, αφού τα σωματίδια παρακολουθούν συνεχώς την περιοχή του δικτύου, υπάρχουν δύο κατώτατα όρια, το «αυστηρό» και το «ελαστικό» κατώτατο όριο, που καθορίζουν πότε ένα σωματίδιο πρέπει να διαβιβάσει τα δεδομένα που αφορούν ένα γεγονός στο κέντρο ελέγχου. Το πρώτο όριο είναι μια τιμή πέρα από την οποία το σωματίδιο μπαίνει σε κατάσταση «επιφυλακής». Το δεύτερο ορίζει την ελάχιστη αλλαγή που πρέπει να παρατηρηθεί στην τιμή των συνθηκών υπό παρακολούθηση.

Πιο συγκεκριμένα, την πρώτη φορά που μία υπό παρακολούθηση συνθήκη λάβει την τιμή που ορίζει το αυστηρό κατώτατο όριο, το σωματίδιο αποθηκεύει αυτή την τιμή και διαβιβάζει την πληροφορία στο κέντρο ελέγχου. Εάν το επόμενο δείγμα διαφέρει από την αποθηκευμένη τιμή περισσότερο από το ποσό που ορίζει το ελαστικό κατώτατο όριο, πληροφορία για την τιμή της συνθήκης διαβιβάζεται πίσω στο κέντρο ελέγχου. Ένα παράδειγμα λειτουργίας αυτών των κατώτατων ορίων είναι για μετρούμενη συνθήκη τη θερμοκρασία, να θέσουμε το αυστηρό κατώτατο όριο στους 30° βαθμούς και το ελαστικό κατώτατο όριο οποιαδήποτε αλλαγή άνω των 0.5°. Στις προσομοιώσεις μας χρησιμοποιήσαμε την έννοια ενός γεγονότος, δηλαδή θεωρήσαμε ότι όταν συμβαίνει ένα γεγονός πληρούνται τα κριτήρια που θέτουν τα όρια και τα σωματίδια πρέπει να μεταδώσουν πληροφορία που αφορά τις μετρούμενες συνθήκες στο κέντρο ελέγχου.

5.4 Λεπτομέρειες υλοποίησης

Με σκοπό τη συγκριτική μελέτη των πρωτοκόλλων που περιγράψαμε, χρησιμοποιούμε έναν νέο προσομοιωτή, τον **simDust**², που υλοποιήθηκε σε περιβάλλον **GNU/Linux** στη γλώσσα προγραμματισμού **C++** και με χρήση της βιβλιοθήκης αλγορίθμων και δομών δεδομένων **LEDA**. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό γνώρισμα του **simDust**, που τον διαφοροποιεί από

²Ο προσομοιωτής αναπτύχθηκε από τους Θανάση Αντωνίου, Γιώργο Μυλωνά και Ιωάννη Χατζηγιαννάκη, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για τη συνεργασία.

τους ήδη υπάρχοντες προσομοιωτές, είναι η δυνατότητα να εκτελεί πειράματα με δίκτυα με πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων. Η πολυπλοκότητα της επέκτασης των υπάρχοντων προσομοιωτών δικτύων, και η αργή χρονική εκτέλεση προσομοιώσεων μεγάλων δικτύων, ήταν δύο σημαντικοί λόγοι για τους οποίους αναπτύχθηκε ο **simDust**. Το **simDust** παράγει όλες τις απαραίτητες, για τη μελέτη των δικτύων έξυπνης σκόνης, στατιστικές στο τέλος κάθε προσομοίωσης, που αφορούν μια μεγάλη ποικιλία μετρικών απόδοσης των δικτύων, όπως το ποσοστό παράδοσης, την κατανάλωση ενέργειας, τη καθυστέρηση παράδοσης, κ.α..

Δύο από τα βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του **simDust** είναι ότι η λειτουργία του γίνεται σε γύρους και ότι υλοποιεί αφαιρετικά το επίπεδο του **MAC**. Συγκεκριμένα, η λειτουργία του προσομοιωτή γίνεται σε διακριτούς γύρους, με ένα γύρο να αντιπροσωπεύει ένα χρονικό διάστημα στο οποίο ένα σωματίδιο μπορεί να διαβιβάσει ή να λάβει ένα μήνυμα και να το επεξεργαστεί σύμφωνα με το πρωτόκολλο που εκτελεί. Προσέξτε ότι ο γύρος του προσομοιωτή αντιπροσωπεύει ένα στοιχειώδες χρονικό διάστημα και δεν πρέπει να συγχέεται με το γύρο του πρωτοκόλλου **H-TEEN** που αποτελείται από μία φάση αυτοοργάνωσης και μία φάση διάδοσης δεδομένων (δείτε 5.3). Επίσης, στο **simDust** οι συγκρούσεις κατά τη μετάδοση θεωρείται ότι αντιμετωπίζονται από τα χαμηλότερα στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλων δικτύωσης, επομένως δε λαμβάνονται υπόψη κατά την επικοινωνία των σωματιδίων μεταξύ τους. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν την προσομοίωση ενός πολύ μεγάλου πλήθους σωματιδίων και παρόλο που δε επιτρέπουν την προσομοίωση όλων των λεπτομερειών της λειτουργίας των δίκτυα έξυπνης σκόνης, τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι αξιόπιστα και ενδεικτικά της συμπεριφοράς και απόδοσης των πρωτοκόλλων διάδοσης.

Η λειτουργία των πρωτοκόλλων που παρουσιάσαμε αξιολογείται έχοντας κάνει κάποιες συγκεκριμένες υποθέσεις όσον αφορά την υλοποίησή τους στο **simDust**.

Κατανάλωση ενέργειας. Η υλοποίηση έρχεται σε συμφωνία με το μοντέλο που παρουσιάσαμε στην παράγραφο 5.1. Συγκεκριμένα, και για τα δύο πρωτόκολλα, έχουμε υποθέσει ότι ένα σωματίδιο καταναλώνει ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας E_{elec} ανά γύρο όσο βρίσκεται στην κατάσταση εγρήγορσης και ανιχνεύει γεγονότα. Θεωρούμε, ότι η μετάβαση από κατάσταση εγρήγορσης σε κατάσταση νάρκης, και αντίστροφα, γίνεται ακαριαία στην αρχή ενός γύρου, αλλά το κόστος της μετάβασης από την κατάσταση νάρκης στην κατάσταση εγρήγορσης σε ενέργεια είναι $3 \cdot E_{elec}$.

Πολυπλοκότητα επικοινωνίας. Όσον αφορά το κόστος επικοινωνίας μετρούμενο σε bit που διαβιβάζονται ανά μήνυμα, υποθέτουμε ότι τα μηνύματα πληροφοριών απαιτούν 1Kbyte, συν μια επικεφαλίδα 40bit, που περιέχει το μοναδικό αριθμό ταυτοποίησης μεγέθους 32bit του σωματιδίου αποστολέα και έναν κώδικα 8 bit που καθορίζει τον τύπο του μηνύματος.

Συγκεκριμένες υποθέσεις για το SW-PFR. Υποθέτουμε ότι πριν την εκτέλεση του πρωτοκόλλου εκτελείται μια φάση αρχικοποίησης, όπου κάθε σωματίδιο ανακαλύπτει όλα τα γειτονικά σωματίδια που είναι μέσα στην εμβέλεια μετάδοσης και στον κυκλικό τομέα που ορίζεται από μια προκαθορισμένη τιμή της γωνίας $\alpha = 40^\circ$. Η ακτίνα μετάδοσης της συσκευής αποστολής σημάτων κάθε σωματιδίου τίθεται σε μία τιμή σημαντικά μικρότερη από τη διάμετρο του δικτύου. Τα γεγονότα που μπορούν να προκαλέσουν τη διάδοση δεδομένων στο δίκτυο μπορούν να εμφανιστούν σε οποιοδήποτε γύρο. Επιπλέον, για τον καθορισμό του χρονοπρογράμματος μετάβασης στις καταστάσεις νάρκης-εγρήγορσης του πρωτοκόλλου **SW-PFR**, έχουμε χρη-

σιμοποιήσει δύο μεταβλητές που καθορίζουν την αναλογία μεταξύ της διάρκειας της περιόδου νάρκης και εγρήγορσης. Τέλος, η απαραίτητη μνήμη όπου κάθε σωματίδιο αποθηκεύει τα γεγονότα που έχει λάβει προηγουμένως, θεωρείται άπειρης χωρητικότητας για λόγους απλοποίησης της πολυπλοκότητας υλοποίησης.

Συγκεκριμένες υποθέσεις για το H-TEEN. Η ιεραρχική εφαρμογή μας χρησιμοποιεί τέσσερα επίπεδα ιεραρχίας. Η διάρκεια ενός γύρου τέθηκε σε ένα σχετικά μεγάλο διάστημα 24 γύρων προσομοίωσης μεταξύ των διαδοχικών φάσεων αυτοοργάνωσης των ομάδων. Τέλος, έχουμε υπολογίσει το κόστος μετάδοσης του χρονοπρογράμματος **TDMA** που χρησιμοποιείται από μία ομάδα. Αποτελείται από τη μετάδοση από κάθε επικεφαλή ενός μηνύματος με επικεφαλίδα 40 bit που ακολουθούνται από 32 bit (δηλαδή το μέγεθος του αριθμού ταυτότητας ενός σωματιδίου) επί τον αριθμό των σωματιδίων που συμμετέχουν στην συγκεκριμένη ομάδα.

5.5 Μετρικές απόδοσης

Σε κάθε εκτέλεση ενός πειράματος, θεωρούμε ότι K είναι ο συνολικός αριθμός κρίσιμων γεγονότων ($\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_K$) και k ο αριθμός γεγονότων που αναφέρθηκαν επιτυχώς στο κέντρο ελέγχου \mathcal{S} . Κατόπιν, καθορίζουμε το ποσοστό επιτυχίας ως εξής:

Ορισμός 1 Το ποσοστό επιτυχίας, \mathbb{P}_s , είναι το πηλίκο του αριθμού των γεγονότων που διαδίδονται επιτυχώς στο κέντρο ελέγχου δια του συνολικού αριθμού γεγονότων, δηλαδή $\mathbb{P}_s = \frac{k}{K}$.

Ένα άλλο κρίσιμο μέτρο αποδοτικότητας είναι η μέση διαθέσιμη ενέργεια κάθε σωματιδίου στο δίκτυο κατά τη διάρκεια του χρόνου

Ορισμός 2 Έστω E_i είναι η διαθέσιμη ενέργεια για το σωματίδιο. Θεωρούμε $E_{avg} = \frac{\sum_i^n E_i}{n}$ ότι είναι η μέση ενέργεια ανά σωματίδιο στο δίκτυο έξυπνης σκόνης, όπου το n είναι ο συνολικός αριθμός σωματιδίων που αναπτύσσονται.

Τέλος, θεωρούμε τον αριθμό ενεργών σωματιδίων (δηλαδή σωματιδίων που δεν έχουν εξαντλήσει τα ενεργειακά τους αποθέματα) ως μέτρο της αποδοτικότητας των πρωτοκόλλων και της ικανότητας επιβίωσης του δικτύου σε κάθε περίπτωση. Όσο περισσότερα σωματίδια είναι ενεργά τόσο το καλύτερο. Μια πηγή πολύτιμων πληροφοριών για την ανάλυση της συμπεριφοράς των πρωτοκόλλων είναι επίσης ο ιδιαίτερος τρόπος με τον οποίο τα σωματίδια «πεθαίνουν» κατά τη διάρκεια του χρόνου.

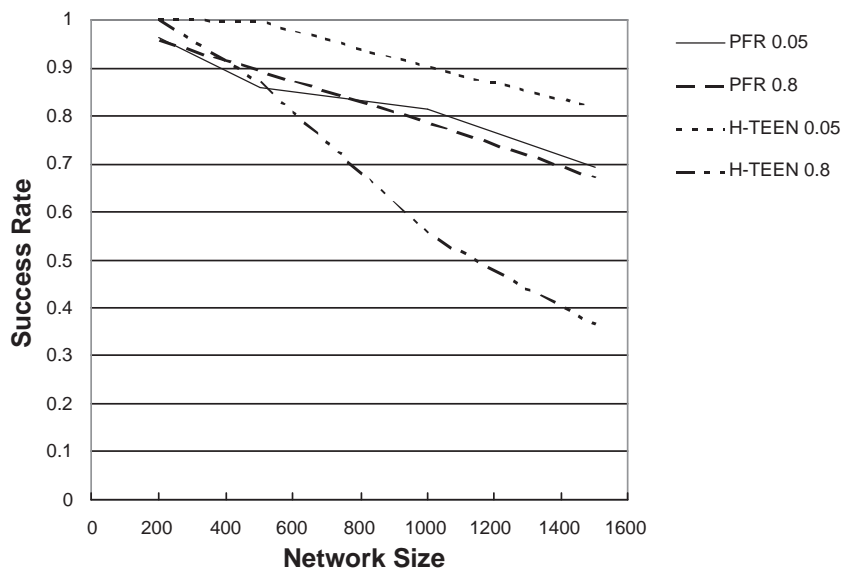
Ορισμός 3 Συμβολίζουμε με h_A τον αριθμό «ενεργών» σωματιδίων που συμμετέχουν στο δίκτυο έξυπνης σκόνης.

Δίνουμε επίσης έναν ακόμα ορισμό σχετικά με τον τρόπο που τα γεγονότα παράγονται στο δίκτυο. Αυτή η παράμετρος επηρεάζει σημαντικά τις υπόλοιπες μετρικές αποδοτικότητας που ορίσαμε παραπάνω.

Ορισμός 4 Συμβολίζουμε με I_s το ρυθμό δημιουργίας νέων γεγονότων, που μετρείται ως πιθανότητα της δημιουργίας ενός κρίσιμου γεγονότος κατά τη διάρκεια ενός γύρου προσομοίωσης.

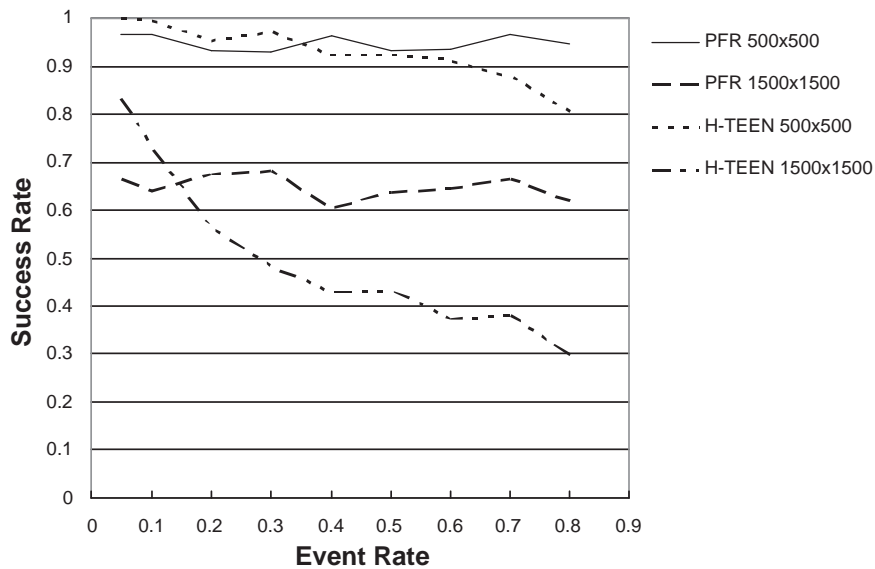
5.6 Πειραματική αξιολόγηση

Αξιολογούμε την απόδοση των δύο πρωτοκόλλων διεξάγοντας μια αναλυτική συγκριτική πειραματική μελέτη. Στα πειράματά μας, παράγουμε διάφορες κατηγορίες δικτύων αισθητήρων. Το μέγεθος της περιοχής κάλυψης του δικτύου κυμαίνεται από $200m \times 200m$ ως $1500m \times 1500m$. Σημειώνουμε ότι αυτές οι περιπτώσεις μεγεθών δικτύων είναι σημαντικά μεγαλύτερες από εκείνες που ερευνώνται συνήθως στη σχετική βιβλιογραφία και επιτρέπουν τη μελέτη της προσαρμοστικότητας των πρωτοκόλλων. Σε αυτές τις περιοχές, «ρίχνουμε» $n \in [500, 3000]$ σωματίδια, που διανέμονται τυχαία και ομοιόμορφα στο επίπεδο του δικτύου έξυπνης σκόνης. Αρχίζουμε με την εξέταση του ποσοστού επιτυχίας των πρωτοκόλλων σε συνάρτηση με το μέγεθος του δικτύου, για δύο διαφορετικούς ρυθμούς παραγωγής γεγονότων I_s , τα ποσοστά είναι 0,05 και 0.8. Εστιάζουμε σε δύο ακραίες τιμές για να ερευνήσουμε τη διαφορετική συμπεριφορά των πρωτοκόλλων σε ακραίες συνθήκες.



Σχήμα 5.5: Ποσοστό επιτυχίας για διάφορα μεγέθη δικτύων και ρυθμούς παραγωγής γεγονότων 0.05 και 0.8.

Στο σχήμα 5.5 το ποσοστό επιτυχίας των πρωτοκόλλων απεικονίζεται σε σχέση με την αύξηση του μεγέθους του δικτύου. Είναι σαφές ότι για μικρές διαστάσεις ($200m \times 200m$, $500m \times 500m$) και τα δύο πρωτόκολλα επιτυγχάνουν υψηλή απόδοση (0.85), ενώ η απόδοση μειώνεται όσο το μέγεθος του δικτύου αυξάνεται. Εντούτοις, το ποσοστό επιτυχίας του **SW-PFR** παραμένει αρκετά υψηλό (κοντά στο 0.7) ακόμη και για πολύ μεγάλα δίκτυα ($1500m \times 1500m$), ενώ το **SW-PFR** φαίνεται να συμπεριφέρεται καλά και στην περίπτωση χαμηλών και υψηλών ρυθμών παραγωγής γεγονότων. Αντίθετα, το **H-TEEN** δεν πετυχαίνει καλή απόδοση στην περίπτωση υψηλών ρυθμών παραγωγής γεγονότων, αφού το ποσοστό επιτυχίας του πέφτει στο 0.3 σε αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 5.6: Ποσοστό επιτυχίας για διάφορους ρυθμούς παραγωγής γεγονότων και μεγέθη δικτύων 500×500 , 1500×1500 .

Συνεχίζουμε, με την εξέταση του ποσοστού επιτυχίας των πρωτοκόλλων σε σχέση με το ρυθμό παραγωγής γεγονότων I_s δύο διαφορετικά μεγέθη δικτύου (σχήμα 5.6). Αρχικά, για χαμηλούς ρυθμούς παραγωγής γεγονότων, στα μικρά δίκτυα ($500m \times 500m$), και τα δύο πρωτόκολλα συμπεριφέρονται σχεδόν βέλτιστα επιτυγχάνοντας ένα ποσοστό επιτυχίας κοντά στο ένα και μειώνονται καθώς ο ρυθμός παραγωγής γεγονότων αυξάνεται. Εντούτοις, για το μεγαλύτερο μέγεθος δικτύου ο αντίκτυπος του ρυθμού παραγωγής γεγονότων φαίνεται να είναι σημαντικότερος. Ειδικότερα, το ποσοστό επιτυχίας του **H-TEEN** ελαττώνεται από 85% σε σχεδόν 30%, ενώ το **SW-PFR**, παρόλο που το αρχικό ποσοστό επιτυχίας του είναι περίπου 70%, φαίνεται να επηρεάζεται λιγότερο από την αύξηση στο ρυθμό παραγωγής γεγονότων.

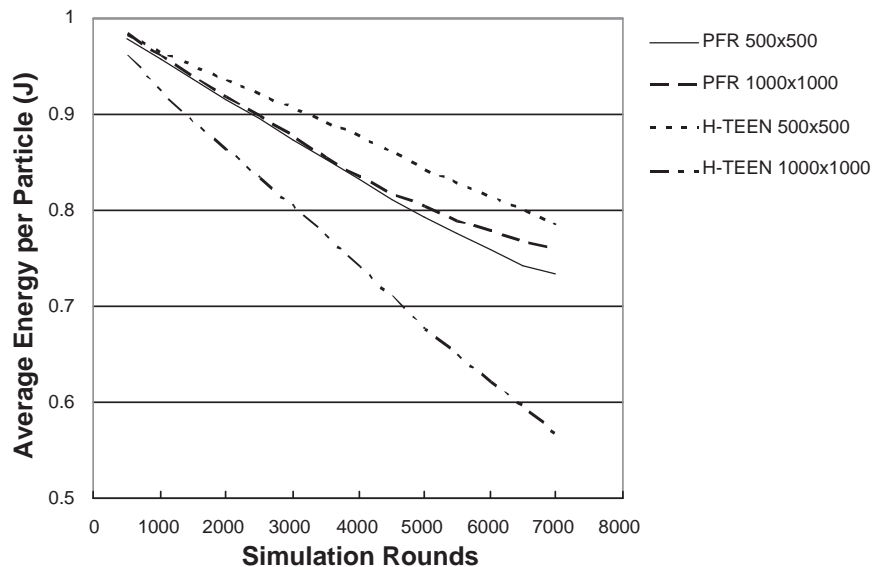
Η προφανής εξάρτηση της απόδοσης του πρωτοκόλλου **H-TEEN** από το ρυθμό παραγωγής γεγονότων, οφείλεται στην ομαδοποίηση που υλοποιεί το πρωτόκολλο. Δεδομένου ότι ο ρυθμός παραγωγής γεγονότων αυξάνεται, οι επικεφαλές των ομάδων είναι αρμόδιοι για την παράδοση περισσότερων γεγονότων, κατά συνέπεια καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια κατά τη διάρκεια της θητείας τους. Εάν ο ρυθμός παραγωγής γεγονότων γίνει πολύ υψηλός, οι επικεφαλές των ομάδων είναι πιθανότερο να εξαντλήσουν τα αποθέματα ενέργειάς τους προτού να εκλεγεί ένας νέος επικεφαλής για την ομάδα τους. Όταν οι επικεφαλές σταματήσουν να λειτουργούν, η ομάδα παύει να εξυπηρετεί τη διάδοση δεδομένων και όλα τα γεγονότα που εμφανίζονται στην περιοχή κάλυψης της ομάδας χάνονται έως ότου εκλεγεί ένας νέος επικεφαλής. Επιπλέον, τα μεγάλα μεγέθη δικτύων επιδεινώνουν αυτό το φαινόμενο επειδή απαιτείται περισσότερη ενέργεια για τη διάδοση ενός γεγονότος στο S , δεδομένου ότι η ενέργεια που ξοδεύεται σε έναν βήμα είναι της τάξης του τετραγώνου της απόστασης μετάδοσης).

Το πρωτόκολλο **SW-PFR** παραμένει σχετικά ανεπηρέαστο από τον υψηλό ρυθμό παρα-

γωγής γεγονότων, αλλά επηρεάζεται από τα μεγαλύτερα μεγέθη δικτύων. Αυτό οφείλεται στη διάδοση πολλαπλών βημάτων, δεδομένου ότι περισσότερα βήματα απαιτούνται για τη διάδοση ενός γεγονότος όσο μεγαλώνει το μέγεθος του δικτύου.

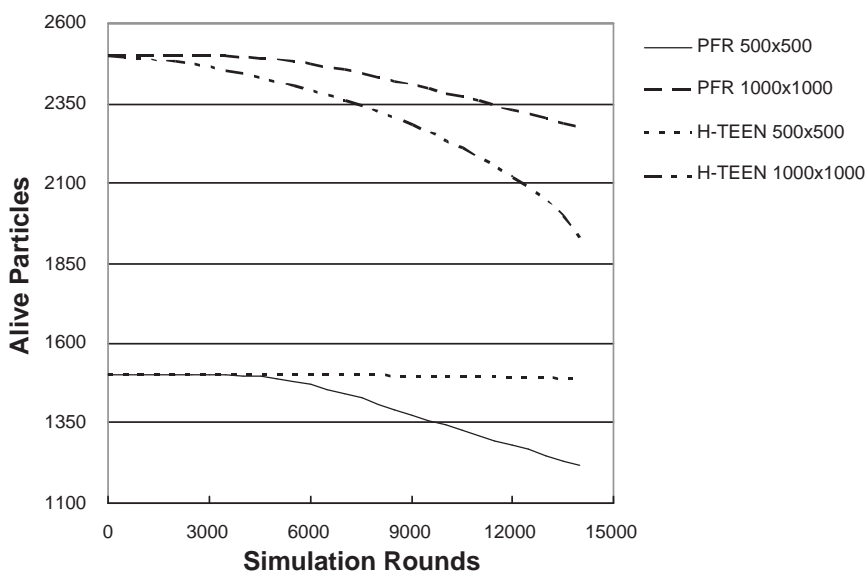
Προχωράμε με την εξέταση της μέσης ενέργειας που καταναλώνεται ανά σωματίδιο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του δικτύου. Υπενθυμίζουμε στον αναγνώστη ότι κάθε σωματίδιο που τοποθετείται στη περιοχή του δικτύου, διαθέτει 1Joule ενέργειας. Το σχήμα 5.7 απεικονίζει το μέσο ποσό ενέργειας που έχει διαθέσιμο κάθε σωματίδιο σε κάθε γύρο προσομοίωσης, για μεγέθη δικτύων $500m \times 500m$ και $1000m \times 1000m$ και για ρυθμό παραγωγής δεδομένων $I_s = 0.05$. Σημειώνουμε ότι και στις δύο περιπτώσεις το ποσοστό επιτυχίας P_s , είναι πάνω από 80%. Για την περίπτωση του μικρού δικτύου το **H-TEEN** καταναλώνει λιγότερη ενέργεια απ' ό τι το **SW-PFR**, ενώ στο μεγαλύτερο δίκτυο, το **SW-PFR** φαίνεται πιο οικονομικό.

Για να εξηγήσουμε αυτό το φαινόμενο πρέπει να εξετάσουμε τη μέθοδο διάδοσης γεγονότων που χρησιμοποιούν τα δύο πρωτόκολλα. Το πρωτόκολλο **H-TEEN** χρησιμοποιεί έναν σταθερό αριθμό βημάτων για να διαδώσει τα μηνύματα, που εξαρτάται από τα επίπεδα ιεραρχίας που χρησιμοποιούνται. Αντίθετα, το **SW-PFR** χρησιμοποιεί πολλαπλές μεταδόσεις μικρής εμβέλειας για να παραδώσει το μήνυμα στο κέντρο ελέγχου. Όταν η περιοχή του δικτύου είναι αρκετά μικρή οι μεταδόσεις των επικεφαλών των ομάδων κοστίζουν λιγότερο από τις πολλαπλές μεταδόσεις του **SW-PFR**. Εντούτοις, όταν αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου, οι επικεφαλές πρέπει να αυξήσουν σημαντικά την ισχύ μετάδοσης τους κατά μία τάξη R^2 , για ακτίνα μετάδοσης R , σε αντίθεση με το **SW-PFR** όπου οι μεταδόσεις πολλαπλών βημάτων αυξάνονται γραμμικά. Έτσι, για την περίπτωση των δικτύων που καλύπτουν μεγάλη περιοχής το **SW-PFR** φαίνεται πιο κατάλληλο από το **H-TEEN**.



Σχήμα 5.7: Μέση ενέργεια ανά σωματίδιο για $I_s = 0.05$ και μέγεθος δικτύου 500×500 και 1000×1000 .

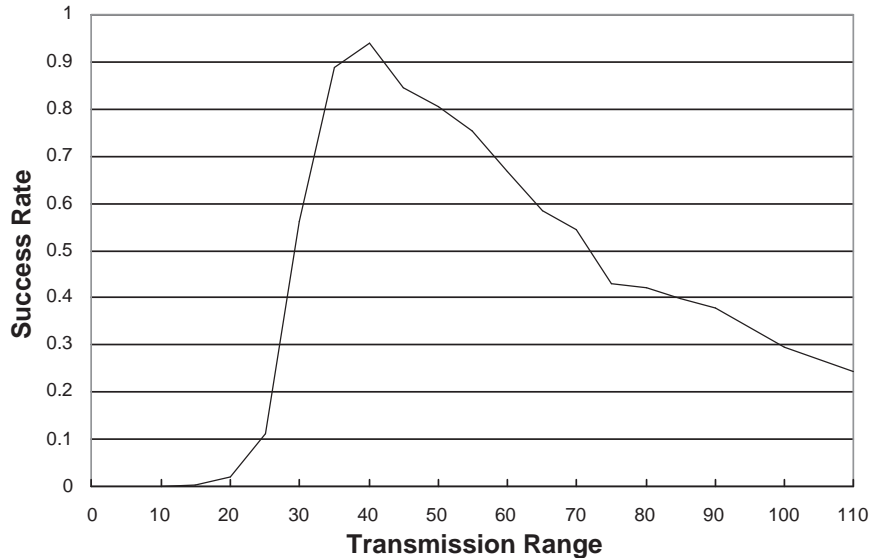
Τέλος, εξετάζουμε τον τρόπο που ο αριθμός «ζωντανών» σωματιδίων μεταβάλλεται με το χρόνο. Στο σχήμα 5.8 ο αριθμός ζωντανών σωματιδίων παρουσιάζεται για μεγέθη δικτύου 500×500 και 1000×1000 , για ρυθμό παραγωγής γεγονότων $I_s = 0.05$, σημειώστε ότι περισσότερα σωματίδια αναπτύσσονται στο 1000×1000 δίκτυο, ώστε σε κάθε περίπτωση η πυκνότητα να είναι περίπου η ίδια. Παρατηρούμε ότι για το πρωτόκολλο **H-TEEN** και για τα δύο μεγέθη δικτύων ο αριθμός ζωντανών κόμβων μειώνεται με ένα σταθερό ρυθμό, ενώ για το πρωτόκολλο **SW-PFR** υπάρχει μια ξαφνική μείωση στον αριθμό ζωντανών σωματιδίων. Αυτή η παρατήρηση απεικονίζει την ιδιότητα του πρωτοκόλλου **H-TEEN** να καταναίμει ομοιόμορφα την κατανάλωση ενέργειας σε όλα τα σωματίδια στο δίκτυο. Αντίθετα, το πρωτόκολλο **SW-PFR** εξαντλεί περισσότερο τα μόρια που τοποθετούνται πιο κοντά στο κέντρο ελέγχου, έτσι σε ένα χρονικό σημείο αυτά τα σωματίδια αρχίζουν «να πεθαίνουν». Από την άλλη, στη μεγαλύτερη περιοχή δικτύων ($1000m \times 1000m$) τα σωματίδια στο πρωτόκολλο **H-TEEN** «πεθαίνουν» γρηγορότερα από εκείνα στο **SW-PFR**. Αυτό αναμενόταν επειδή στο πρωτόκολλο **H-TEEN** τα σωματίδια αναγκάζονται να διαβιβάσουν δεδομένα σε μεγαλύτερες αποστάσεις απ' ότι στο **SW-PFR**, έτσι καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια και εξαντλούνται γρηγορότερα. Πρέπει επίσης να παρατηρήσουμε ότι το **SW-PFR** συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο.



Σχήμα 5.8: Αριθμός ενεργών σωματιδίων για $I_s = 0.05$ και μέγεθος δικτύου 500×500 , 1000×1000 .

Για το πρωτόκολλο **SW-PFR** εξετάσαμε μερικές πρόσθετες παραμέτρους όπως η ακτίνα μετάδοσης (R) και τον παράγοντα εξοικονόμησης ενέργειας (en), προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση για μια σταθερή πυκνότητα κόμβων στο δίκτυο. Αντίθετα το **H-TEEN** είναι λιγότερο παραμετροποιήσιμο και οι τιμές των παραμέτρων τέθηκαν όπως περιγράφονται στην παράγραφο 5.4. Η επιλογή κατάλληλων τιμών για το πρωτόκολλο **SW-PFR** είναι πολύ κρίσιμη για την απόδοσή του. Στο σχήμα 5.9 δίνουμε ένα παράδειγμα για το πώς μεταβάλλεται

το ποσοστό επιτυχίας του πρωτοκόλλου για διαφορετικές τιμές της ακτίνας μετάδοσης σε ένα δίκτυο διαστάσεων 500×500 με 1500 σωματίδια. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία συγκεκριμένη περιοχή τιμών της ακτίνας μετάδοσης όπου το πρωτόκολλο συμπεριφέρεται καλά, ενώ έξω από αυτήν την περιοχή η απόδοσή του μειώνεται γρήγορα. Κατά συνέπεια, έχουμε μια ένδειξη για το πώς να ρυθμίσουμε την ακτίνα μετάδοσης για να πάρουμε το καλύτερο δυνατό ποσοστό επιτυχίας (δηλαδή για ποσοστό επιτυχίας τουλάχιστον 0.8, πρέπει να είναι μεταξύ 35 και 60 μέτρα, στην συγκεκριμένη περίπτωση).



Σχήμα 5.9: Ποσοστό επιτυχίας του **SW-PFR** για διαφορετικές τιμές τις ακτίνας μετάδοσης.

5.7 Συζήτηση και συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάσαμε δύο εκτεταμένες εκδόσεις των πρωτοκόλλων **PFR** και **TEEN**, το **SW-PFR** και το **H-TEEN**. Υλοποιήσαμε τα πρωτόκολλα και αξιολογήσαμε μέσω προσομοίωσης διάφορες μετρικές τις απόδοσής τους. Συνολικά, για το πρωτόκολλο **H-TEEN** η προσομοίωση δείχνει ότι για δίκτυα με μεγάλη περιοχή κάλυψης και όταν ο αριθμός επιπέδων ιεραρχίας είναι μικρός, τείνει να καταναλώσει πολλή ενέργεια, λόγω των μεγάλης απόστασης μεταδόσεων. Αφ' ετέρου, όταν αυξάνεται ο αριθμός επιπέδων ιεραρχίας, οι μεταδόσεις γίνονται σε πιο κοντινές αποστάσεις, όμως υπάρχουν σημαντικά γενικά έξοδα, σε χρόνο και ενέργεια, στη φάση οργάνωσης καθώς επίσης και τη λειτουργία του δικτύου. Κατά συνέπεια, το **H-TEEN** παρουσιάζει έναν ορισμένο συμβιβασμό όσον αφορά τον αριθμό των επιπέδων στην ιεραρχική δομή που δημιουργεί, έστω c αυτός ο αριθμός. Στα πειράματα που διεξήγαμε έχουμε αξιολογήσει τη συμπεριφορά του **H-TEEN** με (τη μάλλον ενδιάμεση) τιμή $c = 4$.

Τα κύρια συμπεράσματα αυτής της εργασίας συνοψίζονται στα εξής:

1. Το **SW-PFR** φαίνεται να είναι πιο αποδοτικό ενεργειακά σε δίκτυα που καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Σε αυτές τις περιπτώσεις το **H-TEEN** είναι λιγότερο αποδοτικό.
2. Το **H-TEEN** τείνει να είναι αποδοτικότερο σε δίκτυα που καλύπτουν μικρές περιοχές και επίσης τείνει να καταναίμει πιο ομοιόμορφα την κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των σωματιδίων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δύο συμπεράσματα, προτείνουμε έναν πιθανό υβριδικό συνδυασμό των πρωτοκόλλων σε δίκτυα που καλύπτουν μεγάλες περιοχές. Αυτό το υβριδικό πρωτόκολλο πρέπει έχει τρεις ευδιάκριτες φάσεις (παραθέτουμε τελευταία τη φάση 2, για να συζητήσουμε καλύτερα πώς λειτουργεί αυτή η ενδιάμεση φάση).

Φάση 1: Αρχικά, και για ένα αρκετά μεγάλο μέρος της περιοχής του δικτύου, το **SW-PFR** χρησιμοποιείται για να διαδώσει τα δεδομένα.

Φάση 3: Όταν τα δεδομένα φτάσουν αρκετά κοντά στο κέντρο ελέγχου, εφαρμόζεται το **H-TEEN** για την περαιτέρω διάδοσή τους.

Φάση 2: Δεδομένου ότι η κατανάλωση ενέργειας του **H-TEEN** εξαρτάται σημαντικά από την χωρική κατανομή των γεγονότων, και δεδομένου ότι ο **H-TEEN** αποδίδει καλύτερα στην περίπτωση της πραγματοποίησης γεγονότων σε όλη την περιοχή κάλυψης, εισάγουμε μια ενδιάμεση φάση μεταξύ της φάσης 1 (**SW-PFR**) και της φάσης 3 (**H-TEEN**). Αυτή η φάση μπορεί να χρησιμοποιεί μια «τεχνική» εξισορρόπησης φορτίου, όπως π.χ. η χρήση στοχαστικών τεχνικών, προκειμένου να διαδοθούν τα στοιχεία, με ομοιόμορφο τρόπο διαμέσου των ομάδων του **H-TEEN**. Δηλαδή, στη φάση 2 τα διαδιδόμενα γεγονότα «εξαπλώνονται» σε όλες τις ομάδες που βρίσκονται στην περιοχή μετάβασης από το **SW-PFR**. Έτσι αποφεύγουμε να υπερφορτώσουμε τους επικεφαλές ομάδων που βρίσκονται κοντά στη βέλτιστη διαδρομή, όπως αυτή ορίζεται από το **SW-PFR**.

Σημειώνουμε ότι οι λεπτομέρειες αυτών των υβριδικών πρωτοκόλλων όπως σε ποιο τομέα του δικτύου πρέπει να εφαρμόζεται κάθε μια από τις 3 φάσεις, τι τιμή παίρνουν παράμετροι όπως η γωνία και η ακτίνα μετάδοσης στη φάση τυχαιοποίησης κλπ., είναι αρκετά περίπλοκη και μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο έρευνας.

Κεφάλαιο 6

Πρωτόκολλα Αποφυγής Συγκρούσεων σε Ασύρματα Δίκτυα Μικροαισθητήρων για Μετάδοση Δεδομένων Μέσω Πολλαπλών Μονοπατιών

Σε αυτό το κεφάλαιο¹ εξετάζουμε την περίπτωση της μετάδοσης πληροφορίας μέσω πολλαπλών μονοπατιών, εντοπίζουμε την ανάγκη για αποδοτικά πρωτόκολλα αποφυγής συγκρούσεων και προτείνουμε ενεργειακά οικονομικά πρωτόκολλα αποφυγής συγκρούσεων.

Η μετάδοση δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων μπορεί να γίνει είτε με χρήση επικοινωνίας μέσω ενός μονοπατιού είτε με την ταυτόχρονη μετάδοση της πληροφορίας σε πολλαπλά μονοπάτια. Στα πλεονεκτήματα της πρώτης μεθόδου συγκαταλέγονται η δυνατότητα για την επιλογή βέλτιστων μονοπατιών, η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και η δυνατότητα επιβεβαίωσης της παράδοσης των δεδομένων. Η δεύτερη μέθοδος ξεχωρίζει για την απλότητα της και την ευκολία υλοποίησής της καθώς και για την ανοχή της διαδικασίας μετάδοσης δεδομένων σε αποτυχία μεμονωμένων συσκευών μικροαισθητήρων.

6.1 Μετάδοση Πληροφορίας Μέσω Πολλαπλών Μεταδόσεων

Μία από τις μεθόδους ανταλλαγής δεδομένων που χρησιμοποιείται συνήθως ανάμεσα σε δύο κόμβους ενός ασύρματου δικτύου μικροαισθητήρων είναι η μεταφορά των δεδομένων με τη βοή-

¹Το παρόν κεφάλαιο είναι προϊόν συνεργασίας με τους Σωτήρη Νικολετσέα και Ιωάννη Χατζηγιαννάκη, παρουσιάστηκε στο First ACM Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor and Ubiquitous Networks, δείτε [8] για λεπτομέρειες. Επίσης, είναι υπό κρίση στο Performance Evaluation: An International Journal, Special Issue on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor and Ubiquitous Networks.

θεια πολλών ενδιάμεσων κόμβων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται διότι συχνά η απευθείας επικοινωνία δύο κόμβων είναι αδύνατη αφού η συσκευές μικροαισθητήρων διαθέτουν περιορισμένη ισχύ εκπομπής ενώ απαιτείται αρκετή ενέργεια για τη μετάδοση πληροφορίας σε μεγάλη απόσταση.

Ο προφανής τρόπος μεταφοράς πληροφορίας μέσω πολλαπλών βημάτων είναι η μετάδοση δεδομένων από ένα κόμβο i του δικτύου σε έναν άλλο j , κοντινό στον i , μέχρι την άφιξη των δεδομένων στον τελικό προορισμό (δείτε [12, 16, 18]). Κατ' αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται ένα μονοπάτι μέσα στο δίκτυο μέσω του οποίου μεταφέρονται τα δεδομένα χρησιμοποιώντας διαδοχικές μεταδόσεις. Η μέθοδος αυτή διαθέτει αρκετά πλεονεκτήματα όπως την εξοικονόμηση ενέργειας αφού μόνο ένα μικρό μέρος του συνόλου των συσκευών λαμβάνει μέρος στη μετάδοση των δεδομένων. Ακόμα, μπορούν να επιλεγούν μονοπάτια που εξασφαλίζουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ή που παρακάμπτουν προβληματικές περιοχές του δικτύου. Επιπλέον η μικρή ενέργεια μεταδόσεις βοηθούν στην ασφάλεια του δικτύου αφού είναι δυσκολότερο να ανιχνευθούν. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής συγκαταλέγεται το ότι η διαδικασία σχηματισμού του μονοπατιού είναι απαιτητική σε πόρους αφού χρειάζεται μια φάση ανακάλυψης των γειτόνων προκειμένου να επιλεγεί ο επόμενος ενδιάμεσος κόμβος, ενώ η διαδικασία πρέπει να επαναλαμβάνεται όταν ενδιάμεσοι κόμβοι που συμμετέχουν σε ένα μονοπάτι σταματούν να λειτουργούν.

Μία διαφορετική προσέγγισή στη μέθοδο πολλαπλών βημάτων αποτελεί η παράδοση μέσω πολλαπλών μονοπατιών, δείτε [7, 6]. Ο κόμβος-πηγή της πληροφορίας εκπέμπει ένα μήνυμα σε πολλούς διαφορετικούς κόμβους-παραλήπτες. Δηλαδή κάθε ενδιάμεσος κόμβος i παραδίδει το μήνυμα σε ένα σύνολο κόμβων j_k . Έπειτα οι κόμβοι-παραλήπτες εκπέμπουν ξανά το μήνυμα. Έτσι δημιουργούνται πολλά μονοπάτια μέσω των οποίων κινείται το μήνυμα προς τον τελικό προορισμό του. Η μέθοδος αυτή είναι μία παραλλαγή του κλασικού αλγόριθμου πλημμυρίδας (flooding), με τη διαφορά ότι συμμετέχει μόνο ένα μέρος των συσκευών του δικτύου. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα απλή στην υλοποίηση αφού δε χρειάζεται να επιλεγεί ένας συγκεκριμένος κόμβος-παραλήπτης για το επόμενο βήμα, ενώ οι αποτυχιές ενδιάμεσων κόμβων δεν χρειάζεται να ανιχνευθούν αφού τα πρωτόκολλα αρκεί να εξασφαλίσουν τουλάχιστον ένα παραλήπτη. Έτσι επιτυγχάνεται ανοχή σε σφάλματα με τίμημα επιπλέον κατανάλωση ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αυτής της μεθόδου είναι το πρωτόκολλο **SW-PFR** που είδαμε στην παράγραφο 5.2.

6.2 Η ανάγκη για αποδοτικά πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης μέσου

Είδαμε (στη παράγραφο 2) ότι έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία αρκετά πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης μέσου (Medium Access Control – **MAC**) ειδικά σχεδιασμένα για ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων. Ο στόχος αυτών των πρωτοκόλλων είναι να μειώσουν τις συγκρούσεις κατά την επικοινωνία των συσκευών μικροαισθητήρων, να εξοικονομήσουν ενέργεια και να μεγιστοποιήσουν την μεταφορά δεδομένων.

Κατά την ασύρματη επικοινωνία υπάρχουν τέσσερις κύριες αιτίες που προκαλούν σπατάλη

της ενέργειας των συσκευών μικροαισθητήρων:

- Συγκρούσεις
- Αδρανείς κόμβοι
- Άκυρες λήψεις
- Κόστος πρωτοκόλλου

Είναι φανερό ότι τα **MAC** πρωτόκολλα παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματική λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου μικροαισθητήρων και μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την αποδοτικότητα των υπερκείμενων πρωτοκόλλων δρομολόγησης της πληροφορίας. Για την περίπτωση της διάδοσης πληροφορίας μέσω πολλαπλών μονοπατιών οι απαιτήσεις είναι διαφορετικές αν και οι αιτίες σπατάλης ενέργειας είναι παρόμοιες με αυτές της διάδοσης πληροφορίας μέσω ενός μονοπατιού.

Είδαμε ότι τα περισσότερα **MAC** πρωτόκολλα χρησιμοποιούν ένα μηχανισμό ανταλλαγής μηνυμάτων ελέγχου ανάμεσα στο πομπό και το δέκτη ώστε να αποφευχθούν συγκρούσεις πριν προχωρήσουν στην εκπομπή της πληροφορίας. Στη διάδοση από ένα προς πολλούς αυτή η λύση είναι ανεφάρμοστη αφού θα χρειαζόταν μία πληθώρα από μηνύματα ελέγχου ανάμεσα στο πομπό και όλους τους πιθανούς δέκτες.

Άλλες λύσεις όπως η χρήση διαμοιρασμού με κωδικοποίηση του μέσου για πολλαπλή πρόσβαση (Code Division Multiple Access – CDMA) και ο διαμοιρασμός συχνοτήτων (Frequency Division Multiple Access – FDMA) απαιτούν πολύπλοκα κυκλώματα υλοποίησης που συνήθως δεν είναι διαθέσιμα στις συσκευές έξυπνης σκόνης και καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια. Ακόμα λύσεις όπως ο χρονικός διαμοιρασμός του μέσου (Time Division Multiple Access – TDMA) απαιτούν τόσο τον συγχρονισμό των συσκευών όσο και την ανάθεση ενός χρονοπρωγράμματος από ένα κεντροποιημένο σύστημα ελέγχου που συνήθως δεν υπάρχει στα δίκτυα έξυπνης σκόνης.

Ακόμα το πρόβλημα των άκυρων λήψεων δεν είναι τόσο σημαντικό στα πρωτόκολλα διάδοσης πολλαπλών μονοπατιών, αφού ένα μήνυμα συνήθως απευθύνεται σε όλους τους κόμβους που θα το ακούσουν, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι κάποιος θα το επαναπροωθήσει.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζουμε μία οικογένεια πρωτοκόλλων που αντιμετωπίζει το πρόβλημα των συγκρούσεων για εφαρμογές που χρησιμοποιούν διάδοση μέσω πολλαπλών μονοπατιών. Τα πρωτόκολλά μας δεν αποτελούν αυτοτελή **MAC** πρωτόκολλα αλλά είναι σχεδιασμένα ώστε να μπορούν να υλοποιηθούν είτε σαν τμήμα κάποιου **MAC** πρωτοκόλλου είτε σαν κομμάτι κάποιας εφαρμογής. Τα πρωτόκολλά μας βασίζονται στην τήρηση ενός τυχαίου χρόνου αναμονής πριν την μετάδοση ενός μηνύματος. Με αυτό το τρόπο αποτρέπονται γειτονικοί κόμβοι από το να εκπέμπουν πληροφορία ταυτόχρονα. Επιπλέον τα πρωτόκολλά μας καταγράφουν συνεχώς πληροφορίες που αφορούν την κατάσταση του δικτύου στην περιοχή ενός κόμβου, όπως είναι η πυκνότητα των κόμβων σε αυτή τη περιοχή και ρυθμός άφιξης μηνυμάτων. Έτσι ανιχνεύονται καταστάσεις του δικτύου που οδηγούν σε αύξηση των συγκρούσεων, όπως είναι η μεγάλη πυκνότητα κόμβων ή η υψηλή κίνηση. Τα πρωτόκολλά μας προσαρμόζουν την συμπεριφορά κάθε κόμβου αλλάζοντας το τυχαίο διάστημα αναμονής, ώστε να αντιμετωπίζονται

καλύτερα οι επιπτώσεις αυτών των αντίξων για τη λειτουργία του δικτύου συνθηκών. Υπό αυτή την έννοια, τα πρωτόκολλα μας ενεργούν προληπτικά αφού αντιδρούν στις καταστάσεις εκείνες του δικτύου που προκαλούν αύξηση των συγκρούσεων. Επομένως, διαφοροποιούνται ριζικά από τα MAC πρωτόκολλα που περιγράψαμε που ανιχνεύουν τότε συμβαίνει μια σύγκρουση και τηρούν τότε χρόνο αναμονής.

Αξιολογούμε τα πρωτόκολλα μας μέσω εκτεταμένων σεναρίων προσομοίωσης και διαπιστώνουμε ότι επιτυγχάνουν να περιορίσουν σημαντικά των αριθμό των συγκρούσεων και να αυξήσουν έτσι το ποσοστό επιτυχών παραδόσεων δεδομένων. Ακόμα δείχνουμε ότι επιτυγχάνουν καλούς συμβιβασμούς της κατανάλωσης ενέργειας ως προς το ποσοστό παράδοσης μηνυμάτων.

6.3 Το μοντέλο

Περιγράφουμε το μοντέλο ενός δικτύου έξυπνης σκόνης που ακολουθήσαμε κατά την διεξαγωγή της εργασίας μας. Το μοντέλο είναι αντίστοιχο με αυτό που παρουσιάσαμε στο 5.1 πλην όμως διαφοροποιείται σε κάποια σημεία οπότε το παραθέτουμε ολόκληρο για λόγους πληρότητας. Υποθέτουμε ότι μία συσκευή έξυπνης σκόνης (που θα αναφέρουμε και σαν σωματίδιο ή κόκκο) είναι μία αυτόνομη υπολογιστική οντότητα που διαθέτει όργανα μέτρησης διάφορων περιβαλλοντικών συνθηκών (αισθητήρες) π.χ. για τη μέτρηση θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτεινότητας κ.α. Επίσης, κάθε σωματίδιο είναι εξοπλισμένο με μια παροχή ηλεκτρικού ρεύματος (π.χ. μπαταρία), η οποία προσφέρει έναν μηχανισμό που παρέχει μετρήσεις των εναπομείναντων αποθεμάτων ενέργειάς του. Συμβολίζουμε με $E_{(i)}$ τα διαθέσιμα αποθέματα ενέργειας του σωματιδίου i σε μία δεδομένη στιγμή.

Κάθε σωματίδιο έχει έναν κύκλωμα ραδιοηλεκτρονικής που χαρακτηρίζεται από την εμβέλεια του R . Θεωρούμε ότι το κύκλωμα του δέκτη κάθε σωματιδίου έχει την ικανότητα να μετρά την ισχύ του εισερχόμενου σήματος. Έτσι, αφού το μοντέλο εξασθένησης του σήματος είναι γνωστό δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού της απόστασης του πομπού από το δέκτη, με κάποιο ποσοστό αβεβαιότητας που εξαρτάται από την ακρίβεια που παρέχει η τεχνολογία του δέκτη. Συμβολίζουμε με $d(i, j)$ την Ευκλείδεια απόσταση των σωματιδίων i και j , ενώ θεωρούμε με $d_{es}(i, j)$ την εκτίμηση της απόστασης ανάμεσα στα δύο σωματίδια που υπολογίζεται μέσω του μηχανισμού μετρήσεων που περιγράψαμε.

Το δίκτυο έξυπνης σκόνης σχηματίζεται με την τοποθέτηση n σωματιδίων σε μία τετράγωνη επίπεδη περιοχή A , ονομάζουμε d την πυκνότητα των σωματιδίων στο δίκτυο μετρούμενη σε αριθμό σωματιδίων ανά m^2 . Τα σωματίδια παραμένουν ακίνητα μετά την αρχική τοποθέτησή τους. Στην περιοχή του δικτύου υπάρχει ένα μοναδικό σημείο S που αντιπροσωπεύει το κέντρο ελέγχου προς το οποίο πρέπει να προωθηθεί η πληροφορία που συγκεντρώνουν τα σωματίδια.

Οποιαδήποτε στιγμή, κάθε σωματίδιο μπορεί να είναι σε μία από τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις κατανάλωσης ενέργειας: (α) μετάδοση ενός μηνύματος, (β) λήψη ενός μηνύματος, (γ) αντίληψη των γεγονότων και (δ) νάρκωση. Κατά τη διάρκεια της κατάστασης νάρκωσης, το σωματίδιο παύει 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 νάρκωσης 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 ένα μήνυμα μήκους k bit, ο πομπός χρησιμοποιεί ενέργεια $E_T(k) = \epsilon_{trans} \cdot k$ Watt και για να λάβει ένα μήνυμα k bit, το κύκλωμα λήψης χρησιμοποιεί ενέργεια $E_R(k) = \epsilon_{recv} \cdot k$ Watt όπου $\epsilon_{trans}, \epsilon_{recv}$, είναι σταθερές που εξαρτώνται από το ραδιοκύκλωμα και την ακτίνα μετάδοσης των κόκκων.

Καταλήγουμε στο 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 αδράνειας. Για την κατάσταση αδράνειας, 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** [21]. Τέλος, υποθέτουμε ότι μια συγκεκριμένη, υψηλού επιπέδου, εφαρμογή εκτελείται από τα σωματίδια που απαρτίζουν το δίκτυο (δείτε [11]). Τα γεγονότα για τα οποία «ενδιαφέρεται» η εφαρμογή, πραγματοποιούνται σε όλη τη περιοχή του δικτύου, ενώ κάθε γεγονός «συλλαμβάνεται» από ένα μόνο σωματίδιο το οποίο δημιουργεί τα μηνύματα προκειμένου να διαδοθεί η πληροφορία στο κέντρο ελέγχου. Η εφαρμογή χαρακτηρίζεται από την ποσότητα \mathcal{I} , που εκφράζει το ολικό ποσοστό παραγωγής μηνυμάτων του δικτύου έξυπνης σκόνης, το οποίο μετρείται σε αριθμό μηνυμάτων ανά χρονικό διάστημα.

6.4 Simple Random Backoff Protocol (SRBP)

Το πρωτόκολλο **SRBP** είναι βασισμένο στην παρατήρηση ότι στην πολλαπλών διαδρομών διάδοση δεδομένων, τα σωματίδια λειτουργούν χωρίς οποιοδήποτε συντονισμό στις ραδιοφωνικές μεταδόσεις μηνυμάτων. Επομένως, όποτε περισσότερα από ένα σωματίδια που βρίσκονται σε κοντινή μεταξύ του απόσταση, λαμβάνουν ένα μήνυμα \mathcal{M} , η προσπάθειά τους να διαδώσουν περαιτέρω το \mathcal{M} ανεξάρτητα το ένα από το άλλο θα οδηγήσει σε έναν υψηλό αριθμό συγκρούσεων. Οι συγκρούσεις οφείλονται στο ότι εξαιτίας της γεωγραφικής εγγύτητας των σωματιδίων η λήψη του μηνύματος θα γίνει περίπου την ίδια χρονική στιγμή, αφού τα ραδιοκύματα διαδίδονται με περίπου την ταχύτητα του φωτός. Όμως αφού τα σωματίδια έχουν τις ίδιες υπολογιστικές δυνατότητες και εκτελούν το ίδιο πρωτόκολλο επικοινωνίας η αναμετάδοση του μηνύματος θα ξεκινήσει περίπου την ίδια χρονική στιγμή σε όλα τα σωματίδια που έλαβαν το μήνυμα.

Ένας χαρακτηριστικός και απλός στην υλοποίηση τρόπος για να αποφευχθούν τέτοιες περιπτώσεις των ταυτόχρονων πολλαπλών ραδιοφωνικών μεταδόσεων είναι να υιοθετηθεί μία μέθοδος χρονικής αναμονής, στην οποία η ραδιοφωνική μετάδοση των δεδομένων καθυστερεί κατά ένα τυχαίο χρονικό διάστημα t_b . Η χρήση μιας τέτοιας περιόδου αναμονής θα αναγκάσει τις ραδιοφωνικές μεταδόσεις «εξαπλωθούν» στο χρόνο. Μια τέτοια διάδοση πολλαπλών μονοπατιών με χρονοκαθυστέρηση θα μειώσει τον αριθμό συγκρούσεων μηνυμάτων. Τα συμβατικά πρωτόκολλα συμπεριλαμβανομένων του Ethernet και του IEEE802.11 χρησιμοποιούν μια εκθετικά αυξανόμενη χρονική καθυστέρηση για τον έλεγχο της συμφόρησης του μέσου. Σε αυτά τα πρωτόκολλα, ο πομπός καθυστερεί τη μετάδοση του μηνύματος, αφού ελέγξει την κατάσταση του καναλιού και βρει ότι το κανάλι είναι κατειλημμένο.

Στο **SRBP** ο χρόνος αναμονής t_b επιλέγεται ομοιόμορφα τυχαία από ένα συνεχές διάστημα αριθμών που καλούμε \mathcal{T}_b και ορίζεται ως:

$$\mathcal{T}_b = [\mathcal{T}_{bmin}, \mathcal{T}_{bmax}]$$

Τα πρωτόκολλα τυχαίας αναμονής είναι πολύ απλά στην υλοποίηση, απαιτούν μόνο γνώση τοπικών συνθηκών και τοπικούς υπολογισμούς και τείνουν να καταναείμουν ομοιόμορφα το φόρτο επικοινωνίας, αποφεύγοντας την κακή απόδοση στην περίπτωση αντίξωων καταστάσεων του δικτύου ή την περίπτωση παρεμβολής εξωγενών παραγόντων που προσπαθούν να καταστρέψουν το δίκτυο. Παρατηρούμε εντούτοις ότι το μέγεθος της περιόδου \mathcal{T}_b έχει επιπτώσεις στο μέγιστο φορτίο που μπορεί κάθε σωματίδιο να προσφέρει στο κανάλι και να οδηγήσει σε μείωση του ρυθμού μεταφοράς δεδομένων ανά σωματίδιο, αλλά αυξάνει και τον αριθμό των σωματιδίων που μπορούν να προσπελάσουν το κανάλι πριν παρουσιαστεί συμφόρηση. Σαφώς, η περίοδος \mathcal{T}_b αντιπροσωπεύει διαφορετικούς συμβιβασμούς μεταξύ της ανοχής σε σφάλματα (αποφυγή συγκρούσεων) και της αποδοτικότητας (χρόνος διάδοσης, κατανάλωση ενέργειας).

Στο **SRBP** οι τιμές των \mathcal{T}_{bmin} , \mathcal{T}_{bmax} , ενσωματώνονται σε κάθε κόκκο στην αρχή της εκτέλεσης των δικτύων, δηλαδή κατά τη διάρκεια της φάσης οργάνωσης και αρχικοποίησης του δικτύου, και παραμένουν σταθερές σε ολόκληρη τη διάρκεια της εκτέλεσης του πρωτοκόλλου. Προσέξτε ότι αφού κάθε σωματίδιο αποφασίζει για την περίοδο αναμονής t_b τυχαία και ανεξάρτητα από τα άλλα σωματίδια, κανένας συντονισμός μεταξύ των σωματιδίων μέσω της ανταλλαγής μηνυμάτων δεν απαιτείται. Επίσης σημειώστε ότι η εφαρμογή του **SRBP** είναι πολύ απλή και μπορεί να είναι μέρος των χαμηλών επιπέδων της στοίβας πρωτοκόλλων δικτύωσης.

6.5 Adaptive Random Backoff Protocol (ARBP)

Το πρωτόκολλο **SRBP** είναι βασισμένο στην υπόθεση ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν τον αριθμό πολλαπλών μεταδόσεων (π.χ. πυκνότητα του δικτύου, ο ρυθμός παραγωγής μηνυμάτων) είναι (λίγο πολύ) γνωστές εκ των προτέρων, κατά συνέπεια η τιμές \mathcal{T}_{bmin} και \mathcal{T}_{bmax} μπορούν να ρυθμιστούν αναλόγως. Παραδείγματος χάριν, στα αραιά δίκτυα (δηλαδή χαμηλή πυκνότητα d) ο αριθμός κόκκων που θα προσπαθήσει ταυτόχρονα να προωθήσει ένα μήνυμα \mathcal{M} θα είναι μικρός, κατά συνέπεια μια μικρή περίοδος T_b θα αρκέσει για εξασφαλίσουμε ότι οι πολλαπλές ραδιοφωνικές μεταδόσεις «εξαπλώνονται» στο χρόνο. Αφ' ετέρου, στα πυκνά δίκτυα (δηλαδή με υψηλή πυκνότητα d) ο αριθμός κόκκων που διαδίδουν ένα μήνυμα \mathcal{M} θα είναι μεγαλύτερος, κατά συνέπεια μια μεγαλύτερης διάρκειας περίοδος T_b θα απαιτηθεί ώστε η διασπορά στο χρόνο των ραδιοφωνικών μεταδόσεων να είναι αρκετή και να μην προκύψουν συγκρούσεις. Ομοίως, στα δίκτυα με το υψηλό ρυθμό \mathcal{I} παραγωγής μηνυμάτων, δεδομένου ότι οι κόκκοι θα χρειαστεί να διαδώσουν έναν αυξημένο αριθμό λαμβανόμενων μηνυμάτων, μια μεγαλύτερη περίοδος T_b θα απαιτηθεί, ενώ για τα δίκτυα του χαμηλού ποσοστού παραγωγής μηνυμάτων ένα μικρότερο διάστημα μπορεί να αρκέσει.

Εντούτοις, σε πραγματικές συνθήκες, ο υπολογισμός της πυκνότητας των σωματιδίων του δικτύου έξυπνης σκόνης μπορεί να είναι ένας ιδιαίτερα δύσκολος στόχος, ειδικά εάν εξετάζουμε τις περιπτώσεις όπου τα σωματίδια πέφτουν (τοποθετούνται) τυχαία στον τομέα ενδιαφέροντος. Επιπλέον, όπως το δίκτυο εξελίσσεται κατά τη διάρκεια του χρόνου, και λόγω των περιορισμένων

πόρων ενέργειας των αισθητήρων, η πυκνότητα του δικτύου υποβιβάζεται κατά τη διάρκεια του χρόνου δεδομένου ότι τα μύρια ξοδεύουν την ενέργειά τους ή/και εμφανίζονται βλάβες. Ομοίως, η παραγωγή μηνυμάτων (που πρέπει να αναφερθούν στο \mathcal{S}) εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες του τομέα ανάπτυξης του δικτύου έξυπνης σκόνης. Μπορεί να υπάρξουν περιοχές όπου τα μηνύματα παράγονται με υψηλές συχνότητες (σε σχέση με το υπόλοιπο του δικτύου) ή άλλες περιοχές που, λόγω της κεντρικής θέσης τους, δέχονται μεγάλο αριθμό των μηνυμάτων που διαδίδονται μέσω του συγκεκριμένου τομέα του δικτύου προκειμένου να επιτευχθεί η αναφορά τους στο \mathcal{S} (π.χ. τα σωματίδια που είναι πλησίον στο ς).

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, θέλουμε το πρωτόκολλο να είναι ικανό να αντιλαμβάνεται αλλαγές στις τοπικές συνθήκες και να τις διαχειρίζεται κατάλληλα, δηλαδή να τροποποιεί κατάλληλα την περίοδο \mathcal{T}_b . Διαφορετικά, εάν οι τιμές \mathcal{T}_bmin και \mathcal{T}_bmax παραμείνουν σταθερές κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πρωτοκόλλου, οποιαδήποτε αλλαγή στις τοπικές συνθήκες του δικτύου που ξεπερνά τα προβλεπόμενα όρια θα προκαλέσει αναστάτωση στη λειτουργία του δικτύου, δηλαδή αύξηση των συγκρούσεων και κατά συνέπεια μείωση της απόδοσης.

Το πρωτόκολλο **ARBP** διορθώνει αυτές τις αδυναμίες του **SRBP** χρησιμοποιώντας μετρήσεις των τοπικών συνθηκών για να ρυθμίσει κατάλληλα την περίοδο \mathcal{T}_b . Προκειμένου να μετρηθεί η πυκνότητα των γειτονικών σωματιδίων και ο τοπικός ρυθμός κυκλοφορίας μηνυμάτων, το **ARBP**, χρησιμοποιεί τα ακόλουθα υποπρωτόκολλα.

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

Καλούμε d_{local} το μέσο αριθμό γειτονικών σωματιδίων που αντιλαμβάνεται ένα σωματίδιο 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) 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 $t_{inactive}$ (π.χ. $t_{inactive} = 1hr$). 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 το σωματίδιο αντιλαμβάνεται ως ενεργούς δίνεται από το πλήθος των καταχωρήσεων στο πίνακα. Προσέξτε ότι για τη μέτρηση αυτή χρησιμοποιούμε μόνο τα μηνύματα που μεταφέρουν πληροφορία και όχι επιπλέον μηνύματα ελέγχου.

6.5.2 Το υποπρωτόκολλο παρακολούθησης κυκλοφορίας μηνυμάτων ($P_{traffic}$)

Καλούμε \mathcal{I}_{local} το μέσο αριθμό διακριτών μηνυμάτων που παραλαμβάνονται ανά χρονική περίοδο από ένα σωματίδιο, δηλαδή τον τοπικό ρυθμό κυκλοφορίας μηνυμάτων. Αρχικά $\mathcal{I}_{local} = \mathcal{I}_{init}$, όπου \mathcal{I}_{init} τίθεται από το διαχειριστή του δικτύου με σκοπό να απεικονίσει τις (αναμενόμενες) συνθήκες του δικτύου. Στην πραγματικότητα, ο αναμενόμενος ρυθμός άφιξης μηνυμάτων που λαμβάνει ένα σωματίδιο συσχετίζεται με τον καθολικό ρυθμό εμφάνισης νέων γεγονότων στο δίκτυο \mathcal{I} , δηλαδή $\mathcal{I}_{init} \propto \mathcal{I}$. Το $P_{traffic}$ διατηρεί μια μεταβλητή που χρησιμοποιείται για να μετρήσει το συνολικό αριθμό λαμβανόμενων μηνυμάτων μέσα σε μία χρονική περίοδο, δηλαδή περιοδικά, π.χ. κάθε 10sec, ο μετρητής αναρρυθμίζεται.

6.5.3 Προσαρμογή της χρονικής αναμονής

Παρατηρούμε ότι ο υπολογισμός του d_{local} και του \mathcal{I}_{local} εκτελείται δυναμικά και υπόκειται σε αλλαγές κατά τη διάρκεια του χρόνου. Επομένως, εισάγουμε την έννοια του $d_{local}(t)$ και του $\mathcal{I}_{local}(t)$ που αντικατοπτρίζουν τις τιμές που μετρούν τα $P_{density}$ και $P_{traffic}$ στη χρονική στιγμή t , αρχικά έχουμε $d_{local}(0) = d_{init}$ και $\mathcal{I}_{local}(0) = \mathcal{I}_{init}$.

Καθορίζουμε την τιμή του \mathcal{T}_{bmin} να είναι λίγο μεγαλύτερη από το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να διαβιβαστεί ένα πακέτο. Από την άλλη, η τιμή του \mathcal{T}_{bmax} θα αλλάξει μόλις ξεκινήσει τη λειτουργία του το δίκτυο, προκειμένου να ρυθμιστεί το διάστημα \mathcal{T}_b , και για αυτόν τον λόγο πάλι χρησιμοποιούμε την έννοια της χρονικά μεταβαλλόμενης τιμής $\mathcal{T}_{bmax}(t)$. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να υπολογιστεί μια νέα τιμή για το \mathcal{T}_{bmax} παρουσιάζουμε εδώ την αλλαγή ως συνάρτηση των διαδοχικών μετρήσεων της τοπικής πυκνότητας, του τοπικού ρυθμού κυκλοφορίας μηνυμάτων και της τρέχουσας τιμής της \mathcal{T}_{bmax} :

$$C_{density}(t) = \mathcal{T}_{bmax}(t-1) \cdot \frac{d_{local}(t) - d_{local}(t-1)}{d_{local}(t) + d_{local}(t-1)} \quad (6.1)$$

$$C_{traffic}(t) = \mathcal{T}_{bmax}(t-1) \cdot \frac{\mathcal{I}_{local}(t) - \mathcal{I}_{local}(t-1)}{\mathcal{I}_{local}(t) + \mathcal{I}_{local}(t-1)} \quad (6.2)$$

Έπειτα βασισμένοι στα $C_{density}(t)$ και $C_{traffic}(t)$, το $\mathcal{T}_{bmax}(t)$ υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\mathcal{T}_{bmax}(t) = \mathcal{T}_{bmax}(t-1) + \alpha \cdot C_{density}(t) + \beta \cdot C_{traffic}(t) \quad (6.3)$$

όπου $\alpha \in [0, 1]$ και $\beta \in [0, 1]$ είναι δύο παράμετροι που ρυθμίζουν το τρόπο που υπολογίζεται το $\mathcal{T}_{bmax}(t)$ και την εξάρτησή του από τους δύο ρυθμιστικούς παράγοντες. Έτσι μπορεί να επιτευχθεί ακριβής έλεγχος της διαδικασίας προσαρμογής για τις διαφορετικές απαιτήσεις κάθε εφαρμογής. Για τις εφαρμογές με σταθερό ρυθμό παραγωγής δεδομένων, θέτωντας $\beta = 0$ η εξάρτηση από το ρυθμό κυκλοφορίας δε λαμβάνεται υπόψη και το **ARBP** προσαρμόζεται μόνο βασισμένο στη μετρούμενη τοπική αλλαγή της πυκνότητας. Επιπλέον, καθορίζεται πόσο δραστικά αντιδρά το πρωτόκολλο στις αλλαγές. Για τιμές κοντά στο 0 η διαδικασία προσαρμογής κάνει μικρά βήματα, ενώ για τιμές κοντά στο 1 επιτρέπεται πιο δραστική προσαρμογή.

6.6 Range Adaptive Random Backoff Protocol (RARBP)

Παρουσιάζουμε τώρα το **RARBP**, το οποίο χρησιμοποιεί την υπολογισμένη απόσταση $d_{es}(i, j)$ μεταξύ του σωματιδίου i από το οποίο ένα μήνυμα \mathcal{M} παραλήφθηκε στο j προκειμένου να ρυθμιστεί η τυχαία περίοδος αναμονής t_b . Η διαίσθηση εδώ είναι ότι στα πρωτόκολλα διάδοσης δεδομένων πολλαπλών διαδρομών, όπως το πρωτόκολλο **PFR**, είναι θεμιτό τα σωματίδια που αποφασίζουν να διαδώσουν περαιτέρω ένα μήνυμα \mathcal{M} να είναι αυτά που είναι τα πιο απόμακρα από τον αποστολέα. Δηλαδή, εάν δύο σωματίδια p_1, p_2 λάβουν ένα μήνυμα \mathcal{M} που στέλνεται από το μόριο p_s και $d(p_1, p_s) < d(p_2, p_s)$, τότε θέλουμε οι τυχαίοι χρόνοι αναμονής $\mathcal{T}_b^{p_1}, \mathcal{T}_b^{p_2}$ που θα επιλέξουν τα σωματίδια p_1, p_2 να είναι τέτοιοι ώστε

$$\mathbb{E}(t_b^{p_1}) > \mathbb{E}(t_b^{p_2})$$

όπου $E(\cdot)$ είναι η αναμενόμενη τιμή των τυχαίων μεταβλητών που καθορίζουν το χρόνο αναμονής.

Ο λόγος που θέτουμε αυτή τη συνθήκη είναι επειδή θέλουμε τα σωματίδια που βρίσκονται απόσταση περίπου R μακριά από την πηγή να επιλέξουν μια μικρή τιμή t_b , έτσι μεγιστοποιείται η απόσταση που διανύεται σε κάθε βήμα. Δηλαδή, έτσι αυξάνουμε την προτεραιότητα των μηνυμάτων που διανύουν μεγάλη απόσταση, αφού τα πρώτα μηνύματα που θα προωθηθούν στους επόμενους κόμβους θα είναι αυτά των πιο απομακρυσμένων κόμβων από την αρχική πηγή του μηνύματος. Έτσι ένα μέρος των μηνυμάτων φτάνουν γρήγορα βελτιώνοντας κατά συνέπεια την αποδοτικότητα, ενώ τα υπόλοιπα πιο αργά για λόγους ανοχής σε σφάλματα.

Επιπλέον, η καθυστέρηση στην αναφορά των γεγονότων που εισάγεται από το μηχανισμό χρονικής καθυστέρησης μειώνεται με αυτό τον τρόπο. Επίσης σημειώστε ότι είναι δυνατό να μειωθεί περαιτέρω ο αριθμός κόμβων που διαβιβάζουν το μήνυμα, δεδομένου ότι η εφαρμογή μπορεί να ανιχνεύσει εάν ένα μήνυμα έχει διαβιβαστεί ήδη από ένα άλλο σωματίδιο αν λάβει μία αναμετάδοση από ένα γείτονα. Για αυτόν τον λόγο, σχεδιάζουμε το **RARBP** με έναν τρόπο έτσι ώστε το διάστημα t_b να επιλέγεται από το \mathcal{T}_b κατά τρόπο ανομοιόμορφο. Χρησιμοποιούμε την απόσταση από τον αποστολέα του μηνύματος για να παραγάγουμε μια νέα τυχαία μεταβλητή για κάθε μήνυμα χωριστά. Κατά συνέπεια, μόλις υποβάλλεται σε επεξεργασία ένα μήνυμα \mathcal{M} , το σωματίδιο i υπολογίζει έναν αριθμό $\mathcal{T}_b sl(\mathcal{M})$, ως ακολούθως:

$$\mathcal{T}_b sl(\mathcal{M}) = \mathcal{T}_b min + (\mathcal{T}_b max - \mathcal{T}_b min) \cdot \frac{d_{es}(i, j)}{R} \quad (6.4)$$

όπου j είναι ο αποστολέας του \mathcal{M} .

Η τυχαία τιμή του t_b παράγεται από μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την κανονική τυχαία κατανομή με $\mu = \mathcal{T}_b sl$ και $\sigma = \frac{1}{d_{local}(t)}$. Αυτή η μέθοδος δημιουργεί ψευδο-χρονοθυρίδες μετάδοσης μηνυμάτων ανάλογα με τη χωρική διανομή των σωματιδίων. Δεδομένου ότι τα σωματίδια που βρίσκονται στην ίδια απόσταση από την πηγή μηνυμάτων παίρνουν τις ίδιες ψευδο-χρονοθυρίδες, επιτρέπουμε στην τυχαία τιμή t_b να διαφέρει σε έναν περιορισμένο βαθμό βασισμένο στην τοπική πυκνότητα. Μεγαλύτερη πυκνότητα σημαίνει τα πιο στενά όρια, αποτρέποντας έτσι τους κόμβους που είναι σχεδόν στην ίδια απόσταση από την πηγή, από την επιλογή των ίδιων τιμών t_b .

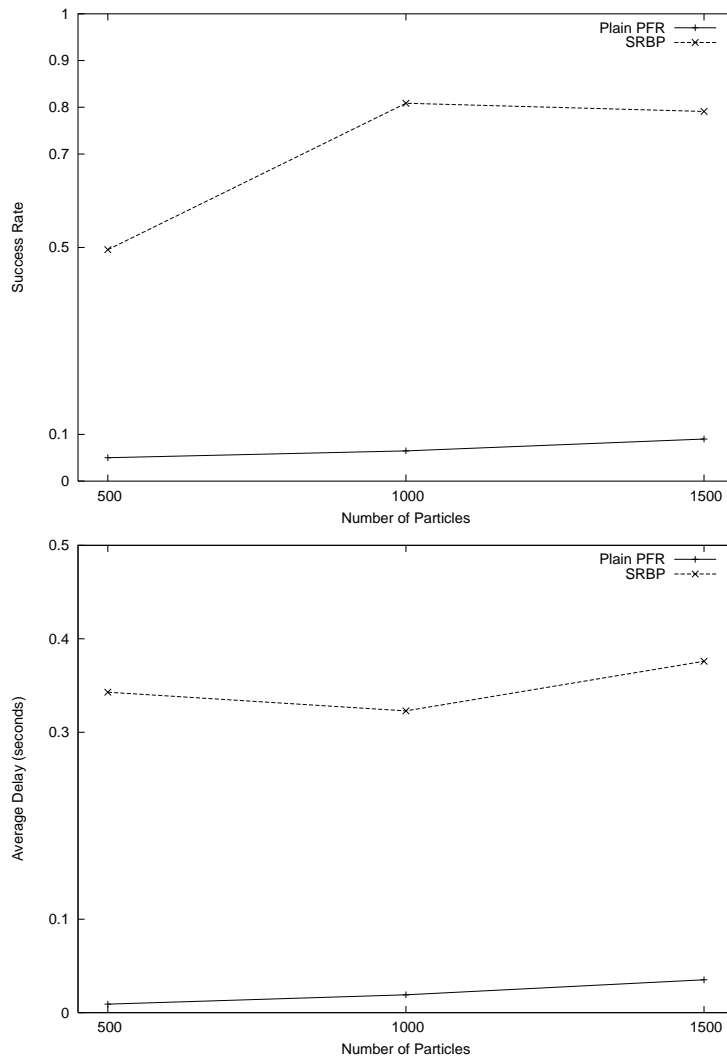
Παρατηρήστε ότι αφού τα σωματίδια δεν μπορούν να υπολογίσουν ακριβώς πόσο μακριά είναι ο αποστολέας ενός μηνύματος, εργαζόμαστε χρησιμοποιώντας την εκτίμηση της απόστασης, όπως υποτίθεται στο 6.3. Επίσης σημειώστε ότι το **RARBP** μπορεί να λειτουργήσει σε συνδυασμό με το **ARBP**. Αφού το **ARBP** υπολογίζει το T_{bmax} ενώ το **RARBP** καθορίζει την τυχαία επιλογή της χρονικής καθυστέρησης t_b και τα δύο πρωτόκολλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κοινού.

6.7 Πειραματική αξιολόγηση

Για να αξιολογήσουμε την απόδοση των προτεινόμενων πρωτοκόλλων διεξήγαμε μια εκτενή ανάλυση μέσω προσομοίωσης. Σε αντίθεση με την προηγούμενη εργασία που παραθέσαμε (δείτε κεφ. 5.6 και δείτε [6, 7, 11, 12, 24]) όπου χρησιμοποιούσαμε το ελαφρύ περιβάλλον της LEDA για να είμαστε σε θέση να μελετήσουμε δίκτυα με μεγάλο αριθμό κόμβων, σε αυτήν την εργασία επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε τον προσομοιωτή δικτύων **ns-2** (έκδοση 2.26, δείτε [25]). Όπως είδαμε ο **ns-2** είναι ένας λεπτομερής προσομοιωτής δικτύων που μπορεί να προσομοιώσει ακριβέστερα διάφορα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων. Ο προσομοιωτής **ns-2** παρέχει μια αρκετά λεπτομερή υλοποίηση του φυσικού και του **MAC** στρώματος και επιτρέπει τις λεπτομερείς μετρήσεις πολλών μεταβλητών (όπως η κατανάλωση ενέργειας) στις προσομοιώσεις των ασύρματων δικτύων.

Αρχίζουμε την πειραματική αξιολόγησή μας ερευνώντας την επίδραση της εφαρμογής του απλού πρωτοκόλλου τυχαίας καθυστέρησης **SRBP** στο ποσοστό επιτυχίας του πρωτοκόλλου **PFR**. Εξετάζουμε διάφορες περιπτώσεις δικτύων ασύρματης σκόνης, θεωρούμε τετράγωνη περιοχή διαστάσεων $500m \times 500m$ και ρίχνουμε n σωματίδια $n \in \{500, 1000, 1500\}$ που διανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το δίκτυο. Το κέντρο ελέγχου τοποθετείται πάντα στο σημείο $(0, 0)$ και η ακτίνα μετάδοσης R κάθε σωματιδίου τέθηκε στα $50m$. Σε κάθε εκτέλεση, παράγουμε σε τυχαίους χρόνους 1000 γεγονότα, για κάθε γεγονός επιλέγουμε τυχαία ένα σωματίδιο και θεωρούμε ότι μόνο αυτό ανιχνεύει το συγκεκριμένο γεγονός. Ο ρυθμός παραγωγής νέων γεγονότων τίθεται $\mathcal{I} = 5$ (δηλαδή δημιουργούνται 5 γεγονότα κάθε 1sec). Η διάρκεια προσομοίωσης υπολογίζεται σύμφωνα με το ρυθμό παραγωγής γεγονότων και είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επιτρέπει σε όλα τα μηνύματα να παραχθούν. Άλλα 15 δευτερόλεπτα επιπλέον χρόνου προσομοίωσης προστίθενται για να επιτρέψουν την άφιξη τυχόν καθυστερημένων μηνυμάτων. Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων παρουσιάζονται στο σχήμα 6.7.

Το πρώτο πείραμά μας δείχνει σαφώς τον αντίκτυπο ενός κοινού στρώματος **MAC** στην απόδοση του πρωτοκόλλου **PFR**, το πρωτόκολλο είναι μία παραλλαγή του IEEE802.11 και διατίθεται από τον **ns-2**. Η ανικανότητα αυτού του **MAC** να αντιμετωπίσει την ταυτόχρονη ραδιοφωνική μετάδοση των μηνυμάτων οδηγεί σε καταστάσεις όπου τα περισσότερα μηνύματα απορρίπτονται λόγω συγκρούσεων. Το μέγεθος αυτής της επίδρασης στο ποσοστό επιτυχίας του **PFR** γίνεται πιο φανερό εάν εξετάσουμε τη θεωρητική ανάλυση που παρουσιάζεται στο [7], όπου οι συγγραφείς αποδεικνύουν ότι το πρωτόκολλο πετυχαίνει πάντα την αποστολή των πληροφοριών στο κέντρο ελέγχου όταν αντιμετωπίζονται κατάλληλα όλες οι συγκρούσεις στο στρώμα του **MAC**. Αυτή η εξάρτηση του **PFR** από ένα κατάλληλο πρωτόκολλο **MAC** απεικονίζεται στο σχήμα 6.7. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι το ποσοστό επιτυχίας του

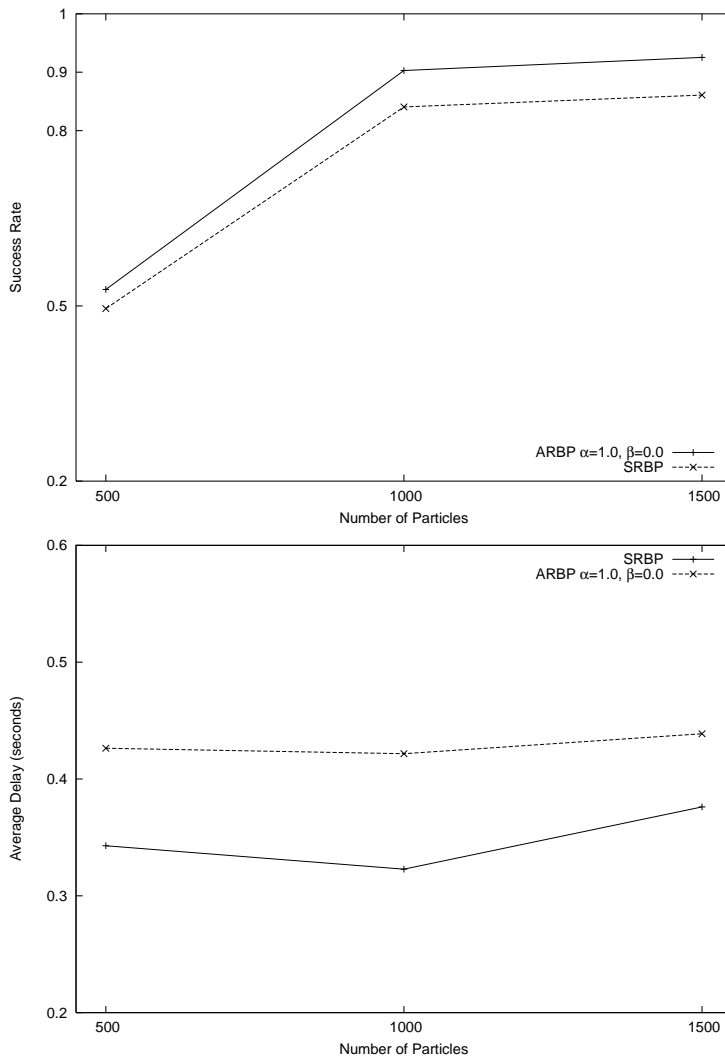


Σχήμα 6.1: Ποσοστό επιτυχίας και μέση καθυστέρηση των **PFR**, **SRBP** για διάφορες πυκνότητες σωματιδίων ($n \in [500, 1500]$) και σταθερό ρυθμό παραγωγής γεγονότων ($\lambda = 5$)

πρωτοκόλλου είναι λιγότερο από 10% όταν το πρωτόκολλο **MAC** δεν χειρίζεται τις συγκρούσεις κατάλληλα. Από την άλλη, όταν εφαρμόζουμε το **SRBP**, το ποσοστό επιτυχίας βελτιώνεται δραστηρικά και φθάνει περίπου στο 80%. Καθορίζουμε εδώ ως επιτυχία την άφιξη ενός μηνύματος που μεταφέρει πληροφορίες για κάποιο γεγονός στο κέντρο ελέγχου.

Η ανωτέρω αξιολόγηση της απόδοσης των πρωτοκόλλων είναι ελλιπής όταν εξετάζεται μεμονωμένα δεδομένου ότι το ποσοστό επιτυχίας της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την καθυστέρηση της παράδοσης των μηνυμάτων. Ο συμβιβασμός μεταξύ της αποφυγής συγκρούσεων (αύξησης ποσοστού παράδοσης) και της αύξησης της καθυστέρησης (μείωση χρονικής αποδοτικότητας) παρουσιάζεται σαφώς στο σχήμα 6.7.

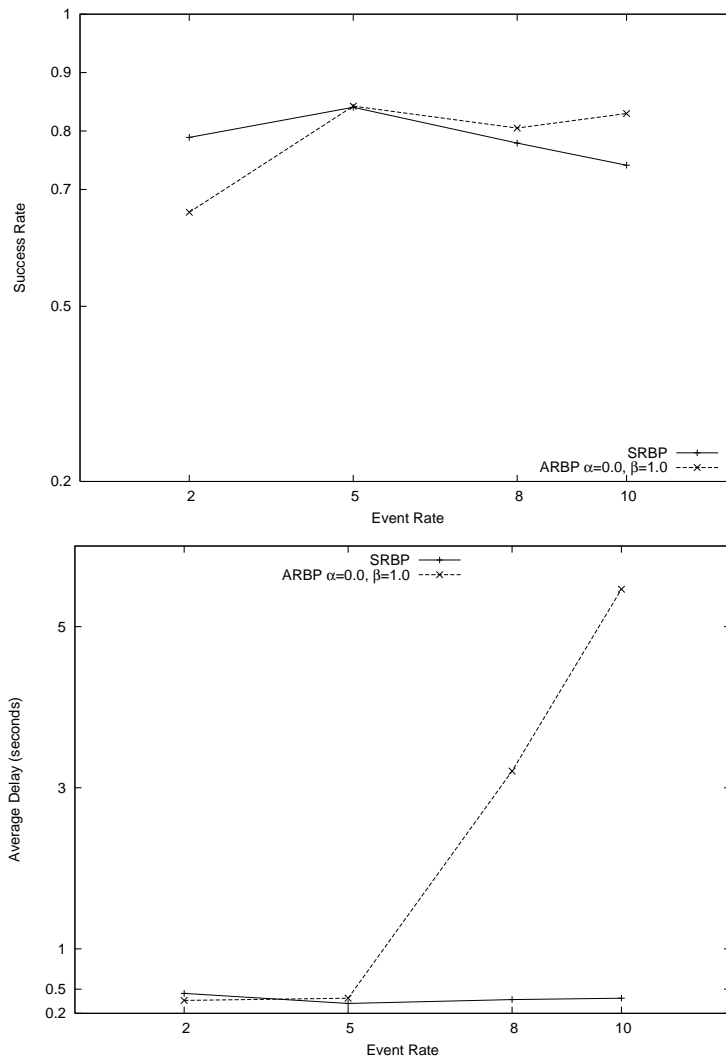
Στο επόμενο σύνολο πειραμάτων αξιολογούμε την απόδοση του πρωτοκόλλου **PFR** κατά



Σχήμα 6.2: Ποσοστό επιτυχίας και μέση καθυστέρηση του **SRBP**, **ARBP** (με $\alpha = 1.0, \beta = 0.0$) για διάφορες πυκνότητες σωματιδίων ($n \in [500, 1500]$) και σταθερό ρυθμό παραγωγής γεγονότων ($\lambda = 5$)

εφαρμογή του προσαρμοστικού πρωτοκόλλου τυχαίας αναμονής **ARBP** σε σχέση με την εφαρμογή του απλού πρωτοκόλλου τυχαίας αναμονής **SRBP**. Αρχίζουμε με τη ρύθμιση $\alpha = 1.0$ και $\beta = 0.0$ έτσι ώστε η προσαρμογή να γίνεται μόνο βάσει της μέτρησης της πυκνότητας. Το σχήμα 6.7 δείχνει καθαρά τη βελτίωση στο ποσοστό επιτυχίας όταν προσαρμόζεται το χρονικό διάστημα T_b με βάση την πυκνότητα που «αισθάνονται» τα σωματίδια. Στην πραγματικότητα, καθώς η πυκνότητα αυξάνεται, το **ARBP** φαίνεται να αυξάνει το ποσοστό επιτυχίας του **PFR** σε τιμές υψηλότερες από 90%. Αυτό το αποτέλεσμα είναι πολύ ελπιδοφόρο υπό την έννοια ότι η απόδοση είναι κοντά στο θεωρητικό μέγιστο όπως υποδεικνύεται στο [6]. Όμως, η βελτίωση στο ποσοστό επιτυχίας υποσκελίζει τη χρονική αποδοτικότητα του **ARBP**, εντούτοις, η

πρόσθετη καθυστέρηση στην διάδοση της πληροφορίας είναι το πολύ 20%.



Σχήμα 6.3: Ποσοστό επιτυχίας και μέση καθυστέρηση των **SRBP**, **ARBP** ($\alpha = 0.0, \beta = 1.0$) για σταθερή πυκνότητα ($n = 1000$) και διάφορους ρυθμούς παραγωγής γεγονότων ($\lambda \in [2, 10]$)

Θέτουμε τώρα $\alpha = 0.0$ και $\beta = 1.0$ έτσι ώστε η προσαρμογή να γίνεται μόνο βάσει της μέτρησης του ρυθμού κυκλοφορίας πακέτων. Σε αυτήν την περίπτωση, αναπτύσσουμε ένα σταθερό αριθμό αισθητήρων ($n = 1000$) και μεταβάλλουμε το ρυθμό παραγωγής νέων γεγονότων $\mathcal{I} \in 2, 5, 8, 10$. Το σχήμα 6.7 δείχνει ότι για χαμηλό ρυθμό παραγωγής γεγονότων, το ποσοστό επιτυχίας του **PFR** φαίνεται να είναι καλύτερο κατά εφαρμογή του απλού πρωτοκόλλου τυχαίας χρονικής καθυστέρησης **SRBP**. Εντούτοις, καθώς ο ρυθμός παραγωγής γεγονότων αυξάνεται, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο μηχανισμός προσαρμογής βελτιώνει το ποσοστό επιτυχίας του **ARBP** και φαίνεται να παραμένει αμετάβλητο από τις περαιτέρω αυξήσεις του ρυθμού παραγωγής γεγονότων και να είναι πάντα υψηλότερο από αυτό του **SRBP**.

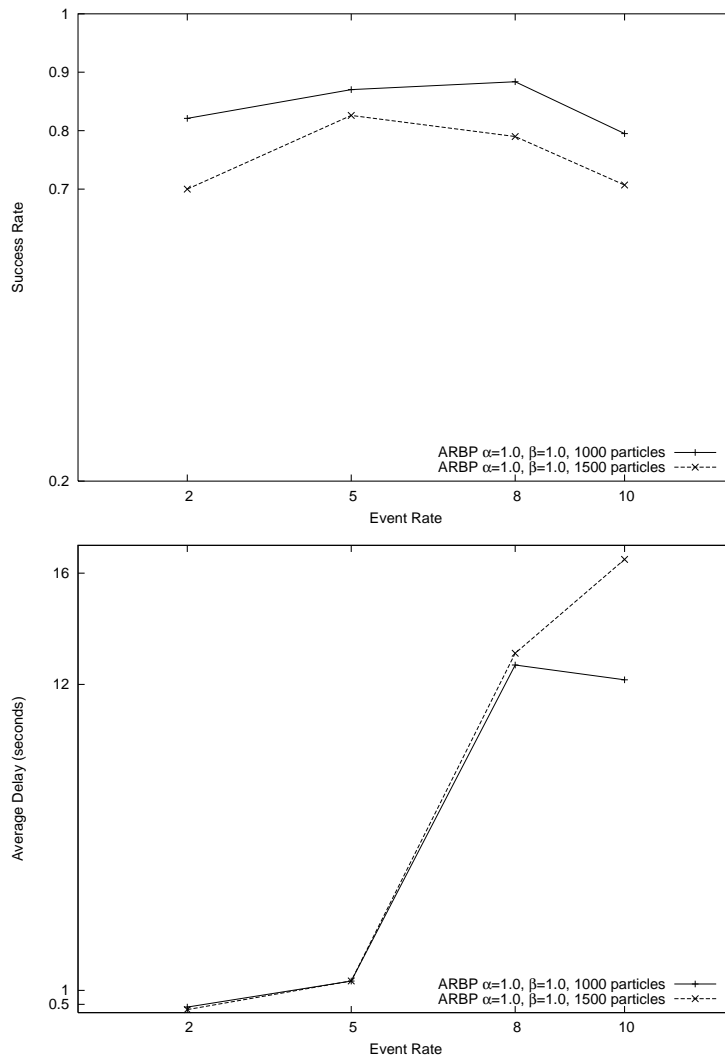
Αυτή η ανικανότητα του **ARBP** να προσαρμοστεί επιτυχώς στην περίπτωση του χαμηλού ρυθμού παραγωγής γεγονότων, μπορεί να εξηγηθεί μερικώς από το γεγονός ότι αρχικά, μπορεί κάθε σωματίδιο να μετρήσει ένα ρυθμό κυκλοφορίας μηνυμάτων που είναι χαμηλότερος από τον πραγματικό επειδή τα γεγονότα που παράγονται περιορίζονται τοπικά σε έναν συγκεκριμένο τομέα του δικτύου. Εντούτοις, καθώς η λειτουργία του δικτύου εξελίσσεται με το χρόνο, περισσότερα μονοπάτια διάδοσης χρησιμοποιούνται, κατά συνέπεια ο μετρούμενος ρυθμός κυκλοφορίας μηνυμάτων φτάνει πιο κοντά στο πραγματικό. Με βάση αυτήν την παρατήρηση, και με την προσεκτική παρατήρηση της εξίσωσης 6.2, βλέπουμε ότι όταν μειώνεται το χρονικό διάστημα T_{bmax} εξαιτίας μιας μείωσης, έστω μ , του μετρούμενου ρυθμού κυκλοφορίας, τότε η αύξηση του T_{bmax} που προκαλεί μία αντίστοιχη αύξηση μ του μετρούμενου ρυθμού δεν εξουδετερώνει την προηγούμενη μείωση, δηλαδή δεν επιστρέφει η τιμή του T_{bmax} στα αρχικά επίπεδα. Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, γίνεται φανερό ότι παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον να διερευνηθούν και άλλες μέθοδοι προσαρμογής (δηλ. διαφορετικές τιμές α , β και διαφορετικές συναρτήσεις προσαρμογής ως προς τις παραμέτρους του δικτύου).

Στο σχήμα 6.4 ενεργοποιούμε και τα δύο συστατικά προσαρμογής του **ARBP** (δηλ. θέτουμε $\alpha = 1.0, \beta = 1.0$) και αξιολογούμε την απόδοση του πρωτοκόλλου για διαφορετικούς ρυθμούς παραγωγής γεγονότων και διαφορετικές πυκνότητες σωματιδίων. Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στα σχήματα 6.7 και 6.7 κατά κάποιο τρόπο συνδυάζονται όταν και τα δύο συστατικά είναι ενεργά. Προσέξτε ότι στην περίπτωση 1500 σωματιδίων επιτυγχάνει χαμηλότερα ποσοστά επιτυχίας από ότι με 1000 σωματίδια (λόγω περισσότερων συγκρούσεων), σε αντίθεση με το σχήμα 6.7. Επίσης παρατηρήστε την καμπύλη του σχήματος 6.4, η οποία αυξάνεται αρχικά, φθάνει σε ένα μέγιστο και έπειτα φθίνει. Αυτή η πορεία είναι ανάλογη με τα αποτελέσματα του σχήματος 6.7. Παρόμοιες παρατηρήσεις ισχύουν και για μετρική της καθυστέρησης διάδοσης.

Αυτή η συμπεριφορά φαίνεται πολύ ενδιαφέρουσα, αφού δείχνει ότι ο τρόπος που θα συνδυαστεί το υποπρωτόκολλο μέτρησης πυκνότητας ($P_{density}$) και το υποπρωτόκολλο μέτρησης του ρυθμού κυκλοφορίας ($P_{traffic}$), δεν είναι ένα απλό ζήτημα. Αντίθετα, πρέπει να γίνει με έναν πολύ προσεκτικό τρόπο προκειμένου να υπάρξει η επιθυμητή προσαρμογή σε κάθε συνθήκη που θα παρουσιαστεί σε ένα δίκτυο. Στο μέλλον, σχεδιάζουμε να ερευνήσουμε νέους πιο αποδοτικούς συνδυασμούς.

Ολοκληρώνουμε την αξιολόγησή μας διερευνώντας την απόδοση του προσαρμοστικού πρωτοκόλλου **RARBP** σε συνδυασμό με το **ARBP**, μαζί με τα άλλα δύο πρωτόκολλα τυχαίας χρονοκαθυστέρησης. Το σχήμα 6.5 απεικονίζει την περίπτωση όπου δημιουργούμε δίκτυα σταθερού αριθμού αισθητήρων ($n = 1000$) και μεταβάλλουμε το ρυθμό παραγωγής γεγονότων $\lambda \in [2, 10]$. Σε αυτό το πείραμα και οι δύο μέθοδοι προσαρμογής του **ARBP** είναι ενεργεί (δηλαδή $\alpha = 1.0, \beta = 1.0$).

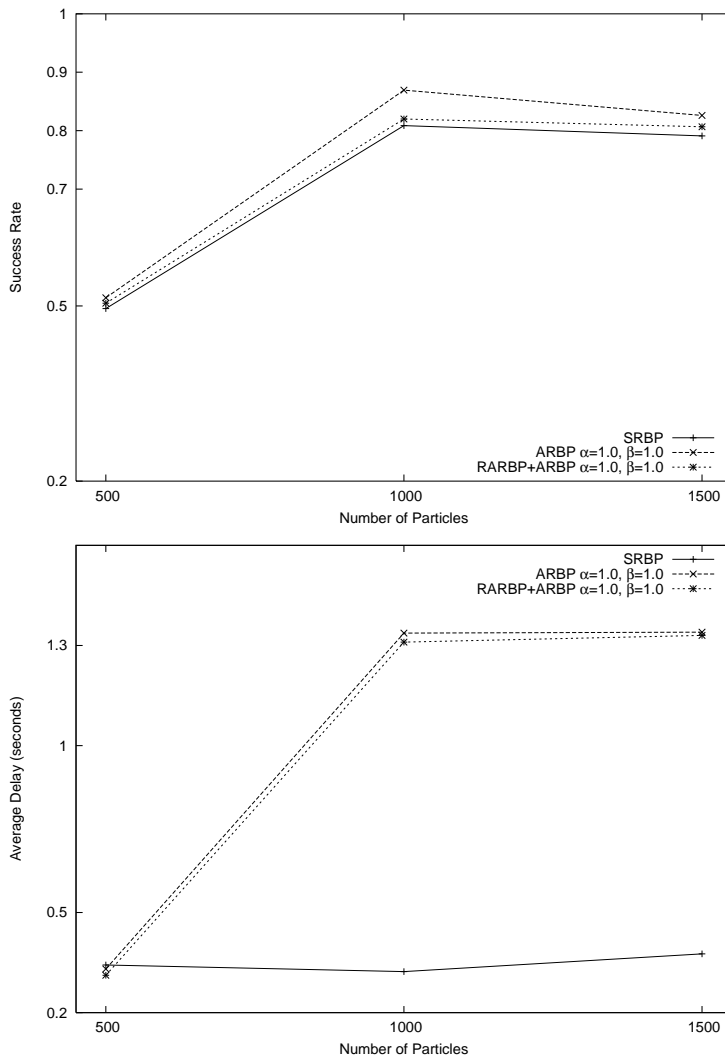
Προκειμένου να αποκτήσουμε καλύτερη αντίληψη της σχετικής απόδοσης των τριών πρωτοκόλλων, στα σχήματα 6.6, 6.7 και 6.8 περιλαμβάνουμε τρεις πρόσθετες μετρικές: το μέσο αριθμό αναμεταδόσεων που απαιτείται ώστε ένα μήνυμα να φθάσει στο κέντρο ελέγχου, τη μέση ενέργεια που καταναλώνεται από το δίκτυο έξυπνης σκόνης (δηλαδή από όλα τα σωματίδια συνολικά) ανά τη διάδοση ενός μηνύματος και τον αριθμό πακέτων που έχουν απορριφθεί, δηλαδή πακέτα που χάνθηκαν ως αποτέλεσμα των συγκρούσεων κατά τη διάδοση κάθε κάθε



Σχήμα 6.4: Ποσοστό επιτυχίας και μέση καθυστέρηση του **ARBP** ($\alpha = 1.0, \beta = 1.0$) για διάφορους ρυθμούς παραγωγής γεγονότων ($\lambda \in [2, 10]$) και διάφορες πυκνότητες σωματιδίων ($n \in 1000, 1500$)

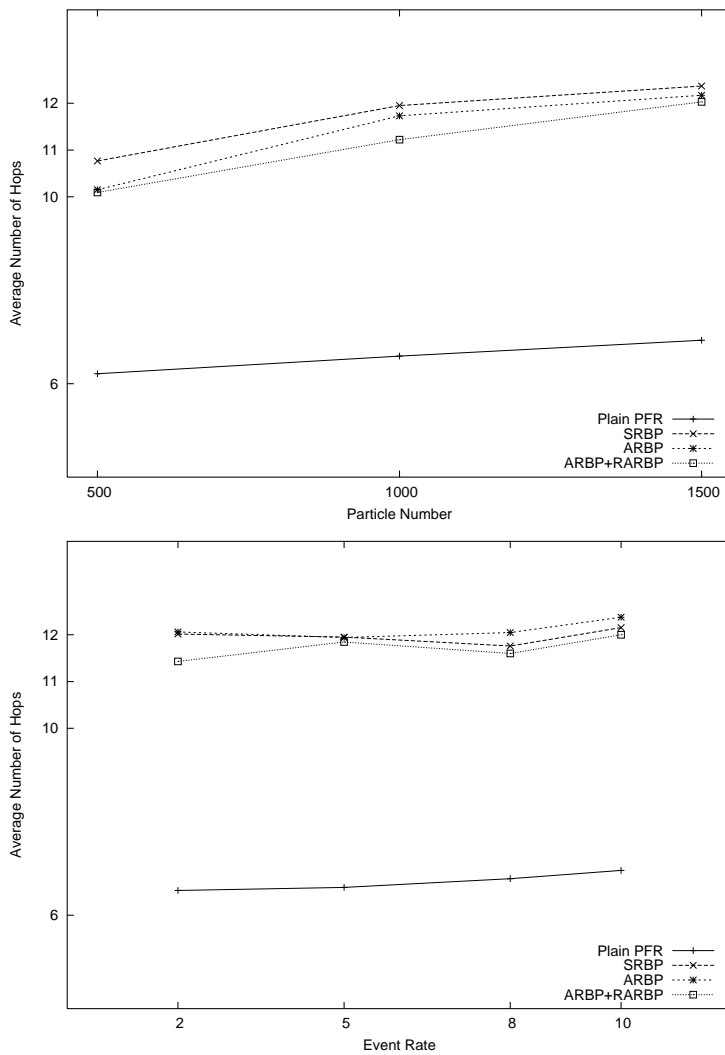
μηνύματος προς το κέντρο ελέγχου. Σε αυτά τα πειράματα εξετάζουμε περιπτώσεις δικτύων όπου μεταβάλλουμε τον αριθμό των σωματιδίων και διατηρούμε σταθερό το ρυθμό παραγωγής γεγονότων ($\lambda = 5$) και περιπτώσεις που διατηρούμε σταθερό αριθμό σωματιδίων ($n = 1000$) και μεταβάλλουμε το ρυθμό παραγωγής γεγονότων $\lambda \in [2, 10]$.

Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων δείχνουν ότι το προσαρμοστικό πρωτόκολλο **RARBP** μειώνει το μέσο αριθμό βημάτων που απαιτείται για να φθάσει ένα μήνυμα στο κέντρο ελέγχου (δείτε το σχήμα 6.6). Εντούτοις, σε σχέση με το **ARBP** πετυχαίνει μειωμένο ποσοστό αναφοράς γεγονότων, γεγονός που δείχνει ότι μέθοδος υψηλής προτεραιότητας των απομακρυσμένων κόμβων αυξάνει ελαφρά τον αριθμό των συγκρούσεων. Παρόλα αυτά σε σχέση με το



Σχήμα 6.5: Ποσοστό επιτυχίας και μέση καθυστέρηση των **SRBP**, **ARBP**, **RARBP** για διάφορες πυκνότητες σωματιδίων ($n \in [500, 1500]$) και σταθερό ρυθμό παραγωγής γεγονότων ($\lambda = 5$)

SRBP και τα δύο προσαρμοστικά πρωτόκολλα αποδίδουν καλύτερα. Επίσης αυτή η παρατήρηση της μείωσης του μέσου αριθμού βημάτων ισχύει και για τις δύο περιπτώσεις, δηλαδή και όταν μεταβάλλουμε τον αριθμό των σωματιδίων και όταν μεταβάλλουμε το ρυθμό παραγωγής γεγονότων. Επιπλέον, εξετάζοντας των αριθμό των πακέτων που απορρίφθηκαν (αυτή η μετρική έμμεσα μετρά τον πραγματικό αριθμό συγκρούσεων), μπορούμε σαφώς να δούμε τη βελτίωση στην απόδοση του πρωτοκόλλου **PFR** όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την οικογένεια πρωτοκόλλων τυχαίας χρονοκαθυστέρησης για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις. Αυτή η παρατήρηση ισχύει επίσης για τη μετρική της κατανάλωσης ενέργειας, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.7 τα προσαρμοστικά πρωτόκολλα ξοδεύουν λιγότερη ενέργεια για την παράδοση ενός μηνύ-

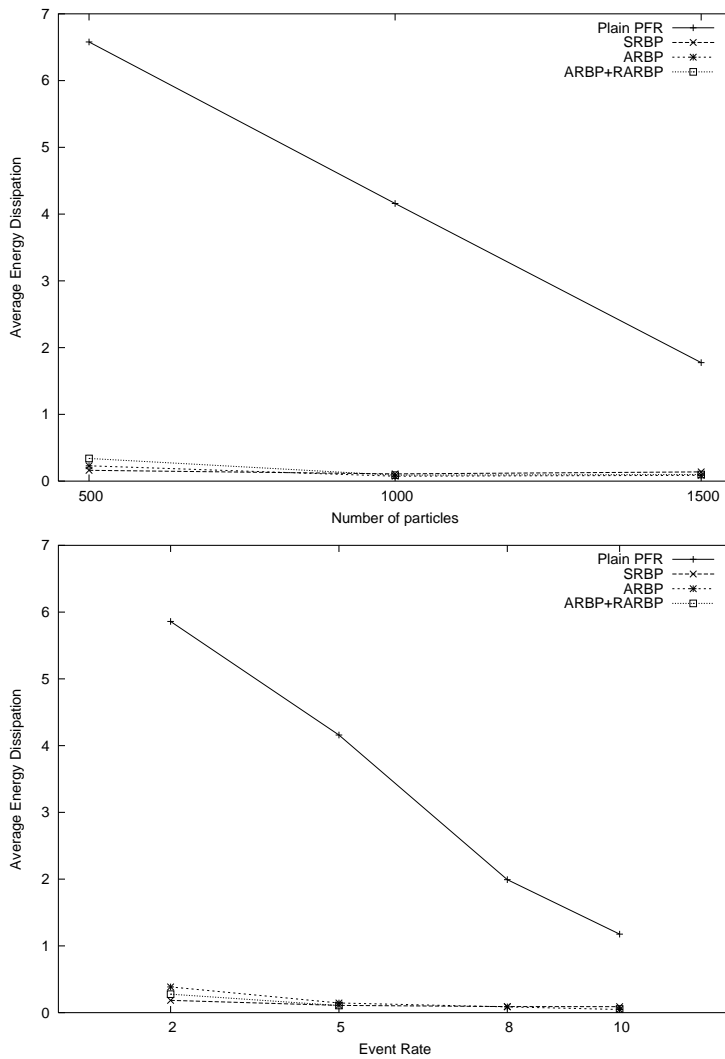


Σχήμα 6.6: Μέσος αριθμός αναμεταδόσεων **PFR**, **SRBP**, **ARBP**, **RARBP** για διάφορες πυκνότητες σωματιδίων ($n \in [500, 1500]$) διάφορους ρυθμούς παραγωγής γεγονότων ($\lambda \in [2, 10]$)

ματος. Δεδομένου ότι ο αριθμός συγκρούσεων μειώνεται, ο συνολικός αριθμός μηνυμάτων που παραδίδονται στο κέντρο ελέγχου αυξάνει. Επομένως η ενέργεια που ξοδεύουν τα σωματίδια καταναλώνεται αποτελεσματικότερα.

6.8 Συμπεράσματα

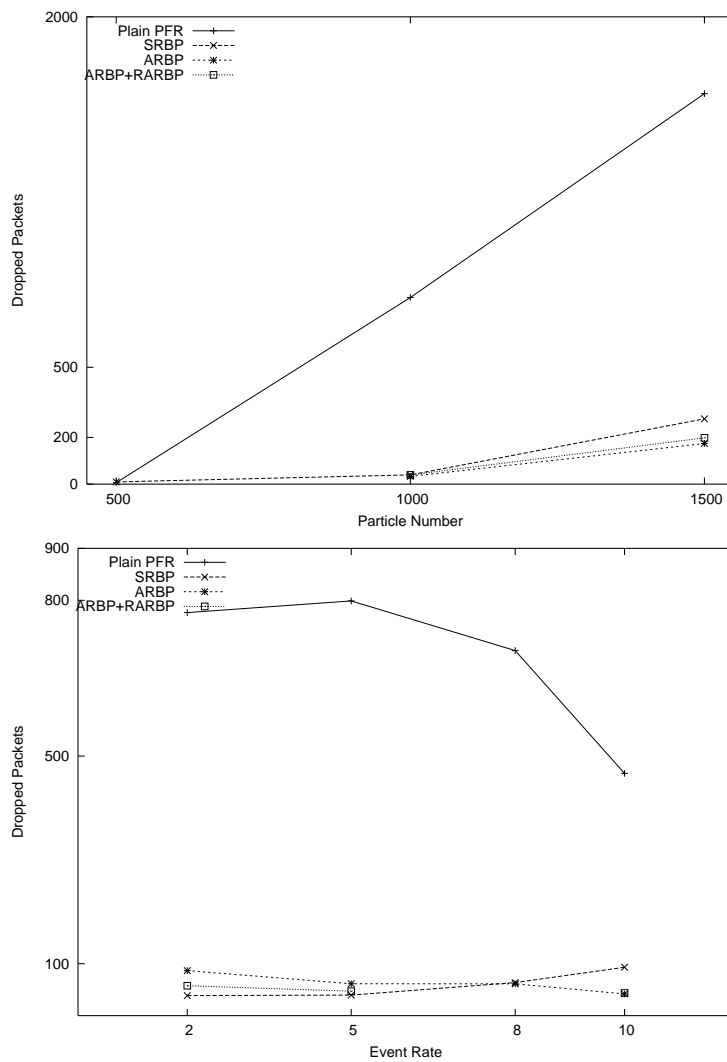
Είδαμε ότι για την τεχνική διάδοσης πληροφορίας πολλαπλών μονοπατιών, τα πρωτόκολλα **MAC** που έχουν εμφανιστεί στη διεθνή βιβλιογραφία είναι ανεπαρκή. Με την απλή παρατήρηση



Σχήμα 6.7: Μέση κατανάλωση ενέργειας ανά παραδοτέο μήνυμα **PFR**, **SRBP**, **ARBP**, **RARBP** για διάφορες πυκνότητες σωματιδίων ($n \in [500, 1500]$) διάφορους ρυθμούς παραγωγής γεγονότων ($\lambda \in [2, 10]$)

ότι ο αριθμός των συγκρούσεων στα δίκτυα μικροαισθητήρων αυξάνει από κάποιες συνθήκες λειτουργίας του δικτύου, όπως είναι η μεγάλη πυκνότητα κόμβων και η αυξημένη κυκλοφορία μηνυμάτων, προτείναμε νέα πρωτόκολλα αποφυγής συγκρούσεων τα οποία ενεργούν προληπτικά προσαρμόζοντας τη λειτουργία τους ανάλογα με τις συνθήκες, σε αντίθεση με τα κλασσικά πρωτόκολλα που αντιδρούν στην εμφάνιση των συγκρούσεων.

Τα πρωτόκολλά μας βασίζονται στην τυχαία χρονική καθυστέρηση των μηνυμάτων. Επιπλέον, παρατηρούν τις συνθήκες που περιγράψαμε και ρυθμίζουν ανάλογα την διάρκεια της καθυστέρησης ώστε να προσαρμοστούν στις εκάστοτε συνθήκες. Η πειραματική αξιολόγηση δείχνει ότι χάρη στην προσαρμοστικότητά τους τα πρωτόκολλα καταφέρνουν να ανταπεξέλθουν



Σχήμα 6.8: Αριθμός πακέτων που απορρίφθηκαν από τα **PFR**, **SRBP**, **ARBP**, **RARBP** για διάφορες πυκνότητες σωματιδίων ($n \in [500, 1500]$) και διάφορους ρυθμούς παραγωγής γεγονότων ($\lambda \in [2, 10]$)

σε διάφορες δύσκολες συνθήκες, επιτυγχάνοντας αύξηση του ποσοστού παράδοσης μηνυμάτων. Το τίμημα για αυτή τη βελτίωση είναι η αύξηση της καθυστέρησης παράδοσης, αυτός ο συμβιβασμός είναι εγγενής στο σχεδιασμό του πρωτοκόλλου και, όπως φαίνεται από την πειραματική ανάλυση, είναι ικανοποιητικός στις περισσότερες περιπτώσεις.

Κεφάλαιο 7

Πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας για αποδοτική διάδοση δεδομένων σε ετερογενή δίκτυα αισθητήρων

Σε αυτό το κεφάλαιο¹ ασχολούμαστε με το καίριο πρόβλημα της εξοικονόμησης ενέργειας. Μια κρίσιμη πτυχή στο σχεδιασμό και την αποδοτική λειτουργία των ασύρματων δικτύων μικροαισθητήρων είναι να εξοικονομηθεί ενέργεια και να διατηρηθεί το δίκτυο σε λειτουργία για όσο το δυνατό μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. 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. Θέματα εξοικονόμησης ενέργειας καλύπτονται διεξοδικά στα [4, 3]

Ένα πιθανό σενάριο για να αντιμετωπιστεί μια τέτοια κατάσταση είναι να προστεθούν επιπλέον συσκευές αισθητήρων οι οποίες θα «αντικαταστήσουν» τους δυσλειτουργώντας κόμβους ενώ το δίκτυο είναι σε λειτουργία (δείτε [1]), προκειμένου να επεκταθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου αισθητήρων. Σε αυτή την περίπτωση, αναμένεται ότι οι νέες συσκευές θα έχουν διαθέσιμα πιο υψηλά επίπεδα συνολικής ενέργειας από τις συσκευές που αναπτύχθηκαν αρχικά στην περιοχή.

Πρόσφατα, ένα άλλο σενάριο παρουσιάστηκε (δείτε [19]) στο οποίο συσκευές αισθητήρων με διαφορετικές «ικανότητες» χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν ένα δίκτυο αισθητήρων. Η έννοια είναι απλή: ένα δίκτυο που αποτελείται από μικρό αριθμό υψηλών επιδόσεων κόμβων

¹Το παρόν κεφάλαιο είναι προϊόν συνεργασίας με τους Σωτήρη Νικολετσέα και Ιωάννη Χατζηγιαννάκη, παρουσιάστηκε στο 38th Annual Simulation Symposium, δείτε [10] για λεπτομέρειες.

με βελτιωμένες ικανότητες επικοινωνίας αναπτύσσεται σε συνδυασμό με ένα δίκτυο κοινών αισθητήρων. Μια ιεραρχική δομή διαμορφώνεται και τα σωματίδια αισθητήρων προωθούν τα δεδομένα στους κόμβους υψηλών επιδόσεων 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 λύση είναι να μην εισαχθούν κόμβοι υψηλών επιδόσεων στο δίκτυο αλλά αντ' αυτών να χρησιμοποιηθούν κόμβοι αισθητήρων που έχουν περισσότερους ενεργειακούς πόρους διαθέσιμους ή ακόμα και κόμβοι αισθητήρων που τροφοδοτούνται από ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, π.χ. είναι συνδεδεμένοι με δίκτυο ηλεκτροδότησης. Πολλά ερωτήματα γεννούνται από αυτή την προσέγγιση. Πώς βελτιώνεται η απόδοση δικτύων; Θα βοηθούσε το δίκτυο να επιζήσει περισσότερο η μετατόπιση του φορτίου της αποστολής των πακέτων σε «ισχυρούς» κόμβους από τους κόμβους με χαμηλά ενεργειακά αποθέματα; Πώς μια τέτοια βελτίωση συγκρίνεται με αυτήν της τοποθέτησης από την αρχή ενός μεγαλύτερου αριθμού ομοιογενών αισθητήρων;

Η οικογένεια των πρωτοκόλλων που παρουσιάζουμε σε αυτό το κεφάλαιο είναι βασισμένη στη μέθοδο «νάρκωσης-εγρήγορσης» των αισθητήρων (την οποία και επεκτείνει σημαντικά), για την εξοικονόμηση ενέργειας που παρουσιάζεται στο [11] (δείτε και την παράγραφο 5.2). Η κύρια ιδέα των πρωτοκόλλων μας είναι ότι οι κόμβοι περνούν από εναλλασσόμενες περιόδους «νάρκης» (δηλαδή κατάστασης πολύ χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας) και «εγρήγορσης» (κατάσταση φυσιολογικής λειτουργίας), ενώ η καινοτομία που εισάγουμε είναι ότι κάθε πρωτόκολλο καθορίζει έναν διαφορετικό τρόπο με τον οποίο αποφασίζεται πότε και πώς κάθε κόμβος θα «ναρκωθεί» και πότε θα λειτουργεί κανονικά. 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, τα πρωτόκολλά μας ελέγχουν τις τοπικές συνθήκες του δικτύου και ρυθμίζουν δυναμικά τα προγράμματα νάρκης-εγρήγορσης 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 [11] 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.

Τα πρωτόκολλά μας δεν χρησιμοποιούν μηνύματα ελέγχου για να συγχρονίσουν τους αισθητήρες, αλλά αντίθετα, λειτουργούν με ένα σύνολο απλών κανόνων που είναι βασισμένοι μόνο στις τοπικά μετρούμενες συνθήκες.

7.1 Το μοντέλο

Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από έναν πολύ μεγάλο αριθμό εξαιρετικά-μικρών ομοιογενών αισθητήρων, τους οποίους καλούμε εδώ κόκκους ή σωματίδια (δείτε επίσης [12, 11]).

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. Τέτοια σωματίδιο (στο μοντέλο μας) δεν κινούνται. Έστω n ο αριθμός έξυπνων σωματιδίων σκόνης που αναπτύσσονται σε μια περιοχή A . Υπάρχει ένα μοναδικό σημείο στην περιοχή του δικτύου \mathcal{S} , που αντιπροσωπεύει ένα κέντρο ελέγχου όπου πρέπει να μεταδοθούν τα δεδομένα. Τα σωματίδια είναι εξοπλισμένα με ένα σύνολο οργάνων μέτρησης διάφορων συνθηκών (αισθητήρες) για το φως, την πίεση, τη θερμοκρασία κ.λπ. Κάθε σωματίδιο έχει έναν πομπό μετάδοσης ραδιοκυμάτων που χαρακτηρίζεται από την εμβέλειά του R . Κάθε σωματίδιο είναι εξοπλισμένο με μια παροχή ηλεκτρικού ρεύματος (π.χ. μπαταρία), η οποία προσφέρει έναν μηχανισμό που παρέχει μετρήσεις των υπόλοιπων αποθεμάτων ενέργειάς του.

Συμβολίζουμε με $E_{(i)}$ τα διαθέσιμα αποθέματα ενέργειας του σωματιδίου i σε μία δεδομένη στιγμή. Οποιαδήποτε στιγμή, κάθε σωματίδιο μπορεί να είναι σε μία από τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις κατανάλωσης ενέργειας: (α) μετάδοση ενός μηνύματος, (β) λήψη ενός μηνύματος, (γ) αντίληψη των γεγονότων και (δ) νάρκωση. Κατά τη διάρκεια της κατάστασης νάρκωσης, το σωματίδιο παύει 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 νάρκωσης 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 ένα μήνυμα μήκους k bit, ο πομπός χρησιμοποιεί ενέργεια $E_T(k) = \epsilon_{trans} \cdot k \text{ Watt}$ και για να λάβει ένα μήνυμα k bit, 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 αδράνειας. Για την κατάσταση αδράνειας, υποθέτουμε ότι καταναλώνεται ενέργεια για τη λειτουργία των κυκλωμάτων η οποία είναι 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 $\epsilon_{trans}, \epsilon_{recv}$ και E_{idle} επιλέχθηκαν ώστε να ταιριάζουν όσο είναι δυνατόν με τις προδιαγραφές της πλατφόρμας **mica** [21]. 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 σωματίδιο το οποίο δημιουργεί τα μηνύματα προκειμένου να διαδοθεί η πληροφορία στο κέντρο ελέγχου. Η εφαρμογή χαρακτηρίζεται από την ποσότητα \mathcal{I} , που εκφράζει το ολικό ποσοστό παραγωγής μηνυμάτων του δικτύου έξυπνης σκόνης, το οποίο μετριέται σε αριθμό μηνυμάτων ανά χρονικό διάστημα.

7.2 Οικογένεια πρωτοκόλλων για εξοικονόμηση ενέργειας

7.3 Sleep-Awake Protocol (SWP)

Η οικογένεια πρωτοκόλλων που παρουσιάζουμε σε αυτό το κεφάλαιο, βασίζεται στο πρωτόκολλο **SWP** (Sleep-Awake Protocol–**SWP**). Σύμφωνα με το πρωτόκολλο **SWP**, κάθε σωματίδιο εναλλάσσει περιοδικά την κατάσταση λειτουργίας σε περιόδους «νάρκης» και «εγρήγορσης». Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου νάρκης, 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 το κανονικό ποσό ενέργειας, όπως περιγράψαμε στο μοντέλο. Υποθέτουμε ότι τα χρονικά διαστήματα νάρκης/εγρήγορσης εναλλάσσονται στοχαστικά ανεξάρτητα σε κάθε σωματίδιο και έχουν διάρκειες T_s , T_w αντίστοιχα, αυτό μπορεί να επιτευχθεί εύκολα εάν κατά τη διάρκεια της φάσης αρχικοποίησης του δικτύου, κάθε σωματίδιο διατηρεί ένα χρονόμετρο, το οποίο θέτει σε μία τυχαία χρονική στιγμή που επιλέγεται από το χρονικό πλαίσιο T των περιόδων νάρκης/εγρήγορσης.

Η μέθοδος νάρκης/εγρήγορσης ορίζει μία καθολική τιμή γ που εκφράζει την αναλογία μεταξύ των διαρκειών των περιόδων της νάρκης και της εγρήγορσης, 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

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

, η αναλογία αυτή ποσοτικοποιεί την εξοικονόμηση ενέργειας, που συμβολίζουμε με en , που πετυχαίνει το πρωτόκολλο στα σωματίδια έξυπνης σκόνης, 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 νάρκης και μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας.

Κάθε σωματίδιο μετρά το χρονικό διάστημα που βρίσκεται σε μία κατάσταση, ώστε η διάρκεια μίας περιόδου να μην ξεπεράσει το καθορισμένο χρονοπρόγραμμα. Η λήξη μίας 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 νάρκης και της χρονικής διάρκειας στην κατάσταση εγρήγορσης, δηλαδή $T = T_s + T_w$, το χρονοπρόγραμμα καθορίζεται από διαδοχικά χρονικά πλαίσια T . Αφού το χρονόμετρο κάθε σωματιδίου αρχικοποιείται σε μία τυχαία στιγμή του χρονικού πλαισίου, τα χρονοπρογράμματα των σωματιδίων θα είναι διαφορετικά. Επομένως, εξασφαλίζεται ότι οι μεταβάσεις περιόδων νάρκης και εγρήγορσης 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 νάρκης και εγρήγορσης 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.

Στο [11], παρουσιάζονται μερικά πρώτα αναλυτικά αποτελέσματα για την αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των παραμέτρων. Εντούτοις σημειώνουμε ότι μέχρι τώρα το πρωτόκολλο **SWP** έχει μελετηθεί στις περιπτώσεις που δεν σημειώνεται καμία σύγκρουση κατά την επικοινωνία των συσκευών (δηλ. κάτω από ένα ιδανικό πρωτόκολλο **MAC**). Επιπλέον, οι παράμετροι λειτουργίας της μεθόδου νάρκης–εγρήγορσης είναι στατικές, δηλαδή δεν προσαρμόζονται στις αλλαγές των παραμέτρων (π.χ. πυκνότητα) του δικτύου.

7.4 Density Adaptive Sleep–Awake Protocol (DA-SWP)

Υποθέτοντας ότι τα σωματίδια κατανέμονται τυχαία και ομοιόμορφα στο χώρο του δικτύου έξυπνης σκόνης, η πυκνότητα σωματιδίων μπορεί να υπολογιστεί, όπως προτείνεται στο [7], ως

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

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

Προφανώς, εάν οι παράμετροι που έχουν επιπτώσεις στην απόδοση των πρωτοκόλλων διάδοσης (όπως η πυκνότητα του δικτύου, η ακτίνα ραδιοφωνικής μετάδοσης, δείτε την παράγραφο 7.3), 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 $\mu(R)$) η τιμή en πρέπει να είναι μικρή έτσι ώστε αρκετά σωματίδια να συμμετέχουν στη διάδοση των μηνυμάτων. Αφ' ετέρου, στα πυκνά δίκτυα (δηλαδή με μεγάλο $\mu(R)$) ένας μεγαλύτερος αριθμός σωματιδίων μπορεί να τεθεί σε κατάσταση νάρκης 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 $\mu_a(R)$ λαμβάνοντας υπόψη το αναμενόμενο $\mu(R)$.

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 (π.χ. διερχόμενα ζώα) ή εξαιτίας της αποτυχίας του χαμηλού κόστους εξοπλισμού. Λόγω αυτού του γεγονότος, αναμένουμε ότι το $\mu(R)$ (και κατέπέκταση το $\mu_a(R)$) 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 $\mu_a(R)$, 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 [1], είναι δυνατό να ανακατανομήσουμε πρόσθετα σωματίδια ενώ το δίκτυο είναι σε λειτουργία, προκειμένου «να αντικαταστήσουμε» τα δυσλειτουργώδη σωματίδια ή λόγω αλλαγής των απαιτήσεων της εφαρμογής (π.χ. αύξηση της κάλυψης της περιοχής για πιο λεπτομερή παρακολούθηση). Κατ' αυτό τον τρόπο ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να επαναφέρει το $\mu(R)$ στα επιθυμητά επίπεδα. Ακόμα, η φύση της διαδικασίας ανακατανομής είναι τέτοια που ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης των συσκευών αισθητήρων (και επομένως της «τοπικής» πυκνότητας) είναι αδύνατος. Αυτό μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ανομοιομορφών κατανομών των συσκευών αισθητήρων.

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

Καλούμε d_{local} το μέσο αριθμό γειτονικών σωματιδίων που αντιλαμβάνεται ένα σωματίδιο 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) 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 $t_{inactive}$ (π.χ. $t_{inactive} = 1hr$). 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 το σωματίδιο αντιλαμβάνεται ως ενεργούς δίνεται από το πλήθος των καταχωρήσεων στο 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 $d_{local}(0) = d_{init}$.

7.4.2 Προσαρμογή με βάση την πυκνότητα

Με βάση το υποπρωτόκολλο $P_{density}$ και την τιμή του d_{init} που τίθεται από τον διαχειριστή του δικτύου ώστε να απεικονίζει τις επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου, ο παράγοντας εξοικονόμησης ενέργειας En σε κάθε σωματίδιο, ρυθμίζεται ως εξής:

$$dSW = T_s \cdot \frac{d_{local}(t)}{d_{init}} - T_s \quad (7.1)$$

$$T_s = T_s + dSW, T_w = T_w - dSW \quad (7.2)$$

Αυτή η συνάρτηση προσαρμογής επιτρέπει στα σωματίδια να τεθούν σε κατάσταση νάρκης 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. Αντίθετα, όταν η μετρούμενη τοπική πυκνότητα είναι μικρότερη από το d_{init} , τα σωματίδια βρίσκονται στην κατάσταση εγρήγορσης περισσότερη ώρα.

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 την εξίσωση 7.2, η ποσότητα $ts + T_w$ 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 νάρκης ή εγρήγορσης για εξαιρετικά μακριές χρονικές περιόδους.

7.5 Energy Adaptive Sleep–Awake Protocol (EA-SWP)

Το προσαρμοστικό πρωτόκολλο με βάση την πυκνότητα μόνο έμμεσα λαμβάνει υπόψη την ενέργεια με τον έλεγχο του ενεργού αριθμού γειτόνων. Καθώς η λειτουργία του δικτύου εξελίσσεται, μερικοί κόμβοι θα εξαντλήσουν την ενέργειά τους και θα αποσυνδεθούν, γεγονός που έχει επιπτώσεις στον αριθμό ενεργών γειτόνων. Σε αντίθεση με αυτήν την προσέγγιση, το προσαρμοστικό πρωτόκολλο με βάση την ενέργεια (**EA-SWP**) προσπαθεί να διανείμει ομοιόμορφα την κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των σωματιδίων με την αύξηση του χρονικού διαστήματος νάρκωσης των εξαντλημένων μορίων.

Η εξισορρόπηση της κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ των συσκευών αισθητήρων στο δίκτυο, αποτρέπει την πρόωρη μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων ορισμένων αισθητήρων και αυξάνει έτσι τη διάρκεια ζωής του συστήματος παρεμποδίζοντας την πρόωρη αποσύνδεση τμημάτων του δικτύου. Προκειμένου να ανιχνευθεί ότι ένα σωματίδιο καταναλώνει την ενέργειά του γρηγορότερα από άλλα, χρειάζεται μια εκτίμηση της μέσης ενέργειας των κοντινών σωματιδίων. Ουσιαστικά, αυτό επιτυγχάνεται με την παροχή μιας εκτίμησης των ενεργειακών επιπέδων κάθε κόμβου στους γειτονικούς του κάθε φορά που αποστέλλει ένα μήνυμα. Συγκεκριμένα, προκειμένου να ανιχνευθεί η ενέργεια των γειτονικών μορίων, το **EA-SWP** χρησιμοποιεί το υποπρωτόκολλο μέτρησης της μέσης ενέργεια (P_{energy}) που λειτουργεί ως εξής.

7.5.1 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 ενέργειας 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.

Με βάση αυτόν τον πίνακα που αποθηκεύονται ενεργειακοί καταχωρητές, το P_{energy} υπολογίζει σε κάθε σωματίδιο 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 $E_{avg}(t)$ και $E_{avg}(0) = E_{(i)}$.

7.5.2 Προσαρμογή με βάση τα ενεργειακά αποθέματα

Αρχικά, όλα τα σωματίδια επιλέγουν ένα τυχαίο χρονοπρόγραμμα περιόδων νάρκης και εγρήγορσης με τη διάρκεια του T_s και του T_w να καθορίζονται από το διαχειριστή του δικτύου. Με την πάροδο του χρόνου, κάθε μόριο πριν μεταπηδήσει στην κατάσταση ύπνου υπολογίζει μια νέα τιμή για το T_s και το T_w χρησιμοποιώντας στον υπολογισμό τη μέση ενέργεια E_{avg} που υπολογίζεται από το P_{energy} .

$$dSW = T_s \cdot \frac{E_{avg}(t)}{E_{(i)}} - T_s \quad (7.3)$$

$$T_s = T_s - dSW, T_w = T_w + dSW \quad (7.4)$$

Με αυτή τη συνάρτηση προσαρμογής θέτει ένα σωματίδιο σε κατάσταση νάρκης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα όταν η ανιχνευμένη από το P_{energy} μέση ενέργεια στη γειτονία του σωματιδίου είναι υψηλότερη από τα ενεργειακά αποθέματά του. Αντίθετα, όταν η μετρούμενη τοπική μέση διαθέσιμη ενέργεια είναι μικρότερη από τα ενεργειακά αποθέματα ενός σωματιδίου, τότε αυξάνεται η διάρκεια της κατάστασης εγρήγορσης.

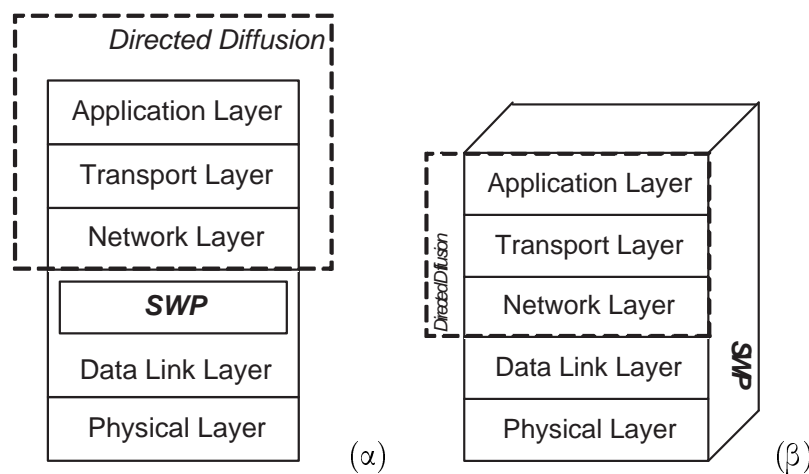
7.6 Αρχιτεκτονική υλοποίησης των πρωτοκόλλων

Μια σημαντική πρόκληση κατά το σχεδιασμό πρωτοκόλλων, όπως η οικογένεια των πρωτοκόλλων νάρκης-εγρήγορσης 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 τα πρωτόκολλά μας στη στοίβα πρωτοκόλλων δικτύου μιας γενικής συσκευής μικροαισθητήρων.

Η πρώτη προσέγγιση, που παρουσιάζεται στον σχήμα 7.1α, τοποθετεί τα πρωτόκολλα 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 τα νάρκης-εγρήγορης πρωτόκολλα είναι απομονωμένα από το υπόλοιπο της στοίβας πρωτοκόλλων δικτύωσης, απαγορεύει την αλληλεπίδραση με εφαρμογές που συμβάλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας. Αναφερόμαστε σε αυτήν την προσέγγιση ως «απόλυτη» υλοποίηση των πρωτοκόλλων νάρκης-εγρήγορης.

Στη δεύτερη προσέγγιση, που παρουσιάζεται στον σχήμα 7.1β, τα πρωτόκολλα νάρκης-εγρήγορης εκτίθενται σε όλα τα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων δικτύωσης και η αλληλεπίδραση επιτρέπεται μεταξύ των πρωτοκόλλων νάρκης-εγρήγορης, της εφαρμογής και του επιπέδου **MAC**. Όπως προτείνεται στο [1], 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 των πρωτοκόλλων νάρκης-εγρήγορης.



Σχήμα 7.1: Δύο διαφορετικές μέθοδοι ενσωμάτωσης του Directed Diffusion και του **SWP** στη στοίβα πρωτοκόλλων δικτύωσης μίας συσκευής έξυπνης σκόνης

7.7 Υλοποίηση των πρωτοκόλλων

Η υλοποίηση των πρωτοκόλλων έγινε στον προσομοιωτή **ns-2** ([25]). Αρχίζοντας από την υψηλού επιπέδου εφαρμογή αντίληψης γεγονότων, υλοποιήσαμε την εφαρμογή που περιγράψαμε στο μοντέλο (δείτε 7.1, σαν μια εφαρμογή του **Directed Diffusion**). Αυτή η εφαρμογή αρχικοποιεί κατάλληλα το μηχανισμό *interest* που περιγράψαμε στην παράγραφο 3.1, και είναι επίσης αρμόδια για την παραγωγή των γεγονότων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Τα πρωτόκολλα νάρκης-εγρήγορης υλοποιήθηκαν σαν τμήματα του μοντέλου κατανάλωσης ενέργειας του **ns-2**. Το $P_{density}$ και το P_{energy} ενσωματώθηκαν επίσης σαν τμήματα του μοντέλου

κατανάλωσης ενέργειας έχοντας έτσι πρόσβαση στο **MAC** για να μπορούν να εκτελούν τις απαραίτητες μετρήσεις.

Υλοποιήθηκαν και οι δύο αρχιτεκτονικές που περιγράψαμε ως εξής: η «αυστηρή» προσέγγιση δεν επιτρέπει σε κανένα πακέτο να σταλεί ούτε να παραληφθεί. Αυτό έχει επιπτώσεις στη λειτουργία του **Directed Diffusion** αφού τα περιοδικά μηνύματα ανακάλυψης γειτόνων και αναφοράς δεδομένων δεν στέλνονται. Η «ενσωματωμένη» προσέγγιση επιτρέπει στο σωματίδιο να περιέλθει σε κατάσταση εγρήγορσης όταν υπάρχει προγραμματισμένη η αποστολή ενός πακέτου. Μετά την αποστολή του πακέτου το σωματίδιο συνεχίζει να βρίσκεται στην κατάσταση εγρήγορσης για χρόνο tw . Αυτή η προσέγγιση παρεμβάλλεται στη λειτουργία των πρωτοκόλλων εξοικονόμησης ενέργειας.

7.8 Πειραματική αξιολόγηση

7.8.1 Οργάνωση των πειραμάτων

Το ενεργειακό μοντέλο που παρουσιάζεται στο 7.1 υλοποιείται από τον **ns-2**, οι ακριβείς τιμές των ϵ_{trans} , ϵ_{recv} και E_{idle} , τέθηκαν ώστε προσομοιώνουν όσο το δυνατόν πιο κοντά στις προδιαγραφές των συσκευών Mica [21], ενώ η ακτίνα μετάδοσης κάθε σωματιδίου τέθηκε $R = 50m$. Το δίκτυο αισθητήρων εξαπλώνεται σε μία ορθογώνια περιοχή διαστάσεων $\mathcal{A} = 500 \times 500m$, στην οποία διανέμονται τυχαία ένας αριθμός σωματιδίων. Εξετάζουμε περιπτώσεις με διαφορετικούς αριθμούς σωματιδίων, $n = 300, 400, 500, 600$ με πυκνότητες (που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση 7.4) $\mu(R) = \{9.424, 12.566, 15.707, 18.849\}$. Εδώ σημειώνουμε ότι στην πειραματική μελέτη που διεξήχθη στο [18], εξετάστηκαν δίκτυα των διαφορετικών μεγεθών και με ποικίλο αριθμό σωματιδίων, αλλά με μια σχεδόν σταθερή πυκνότητα σωματιδίων $R = 9.817$. Το κέντρο ελέγχου τοποθετείται πάντα στο σημείο $(0, 0)$. Υποθέτουμε ότι μία εφαρμογή παρακολούθησης περιβαλλοντικών συνθηκών εκτελείται με τη βοήθεια του πρωτοκόλλου **Directed Diffusion**, και «ανακαλύπτει» (παράγει) $\lambda = 2$ γεγονότα ανά δευτερόλεπτο.

Κάθε γεγονός συλλαμβάνεται από ένα τυχαία επιλεγμένο σωματίδιο και στην προσομοίωσή μας [1000, 2000] γεγονότα παράγονται. 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 είναι περίπου αρκετή, υπό βέλτιστες συνθήκες, για την διάδοση 1000 γεγονότων αλλά όχι 2000 γεγονότων. Κάναμε αυτήν την επιλογή προκειμένου να παρατηρήσουμε εάν και για πόσο καιρό η οικογένεια πρωτοκόλλων νάρκης–εγρήγορσης κατορθώνει να παρατείνει τη διάρκεια ζωής της διαδικασίας διάδοσης.

7.8.2 Πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση

Η πειραματική αξιολόγησή μας ερευνά την απόδοση του **Directed Diffusion** όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με κάθε ένα από τα πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας που παρου-

σιάσαμε στις παραγράφους 7.3,7.4, 7.5. Εστιάζουμε

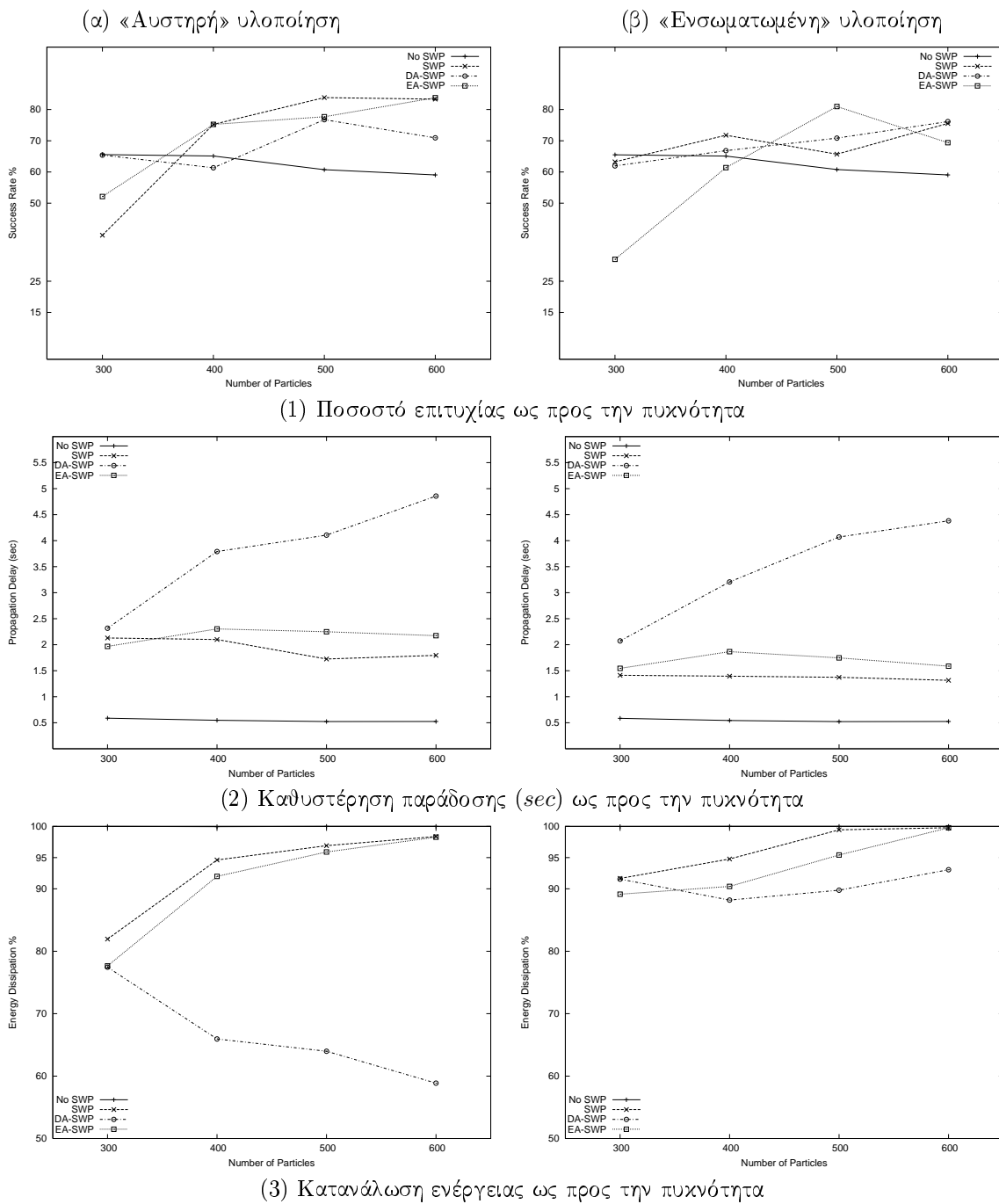
1. στο ποσοστό επιτυχίας που επιτυγχάνεται από το δίκτυο, ως το ποσοστό των γεγονότων που αναφέρονται στο κέντρο ελέγχου σε σχέση με το συνολικό αριθμό γεγονότων που παράγονται στο δίκτυο,
2. η καθυστέρηση διάδοσης, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζονται τα αναφερόμενα γεγονότα για να φθάσουν στο κέντρο ελέγχου και
3. η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται από τις συσκευές αισθητήρων, ως το ποσοστό της αρχικά διαθέσιμης ενέργειας

Αρχίζουμε με την αξιολόγηση του αντίκτυπου της σημαντικής παραμέτρου της πυκνότητας των σωματιδίων στην απόδοση του δικτύου στην περίπτωση της διάδοσης 1000 γεγονότων. Στο σχήμα 7.2, απεικονίζεται η μετρημένη απόδοση για τη «αυστηρή» υλοποίησή των πρωτοκόλλων (όπως φαίνεται στο 7.2α) ενώ η δεξιά στήλη απεικονίζει τις αντίστοιχες μετρήσεις για τη «ενσωματωμένη» υλοποίηση (όπως φαίνεται στο σχήμα 7.2β). Αρχικά παρατηρούμε ότι το **Directed Diffusion** επιτυγχάνει ένα ποσοστό επιτυχίας 70% για τις χαμηλές πυκνότητες και έπειτα αργά υποβιβάζει σε 60% καθώς η πυκνότητα δικτύων αυξάνεται. Αυτή η συμπεριφορά δείχνει ότι το **Directed Diffusion** δεν μπορεί να εκμεταλλευθεί τους περιττούς κόμβους για να βελτιώσει το ποσοστό επιτυχίας του δικτύου. Όταν χρησιμοποιούμε τα πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας στο δίκτυο, αυτή η μετρική απόδοσης βελτιώνεται. Η απόδοση του **Directed Diffusion** αυξάνεται όσο περισσότερες συσκευές αισθητήρων αναπτύσσονται στο δίκτυο και σε μερικές περιπτώσεις (π.χ. **SWP**, **EA-SWP** στο σχήμα) επιτυγχάνει ποσοστά επιτυχίας πάνω από 80%.

Σαφώς, το ποσοστό επιτυχίας είναι μια σημαντική μετρική απόδοσης, όμως πρέπει να εξεταστεί σε συνδυασμό με την καθυστέρηση στη διάδοση. Η χρονική αποδοτικότητα είναι επίσης ένα σημαντικό ζήτημα στα δίκτυα αισθητήρων. Στην πραγματικότητα, στο σχήμα 7.2.2 φαίνεται πώς αυτές οι δύο πτυχές συσχετίζονται αφού ο εξαναγκασμός των σωματιδίων στην κατάσταση νάρκης αναγκάζει τα γεγονότα να ταξιδέψουν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα έως ότου φθάσουν στο κέντρο ελέγχου. Αυτός ο συμβιβασμός μεταξύ του ποσοστού επιτυχίας και της καθυστέρησης διάδοσης είναι αξιοπρόσεχτος για όλα τα πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας στη «αυστηρή» υλοποίηση (δείτε το σχήμα 7.2α2) και ακόμη και για τα πρωτόκολλα **SWP** και **EA-SWP** στην «ενσωματωμένη» υλοποίηση (σχήμα 7.2β2).

Τα παρόμοια συμπεράσματα μπορούμε να εξάγουμε από το σχήμα 7.2.3. Τα πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας και βελτιώνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου, δηλαδή το δίκτυο μπορεί να διαδώσει έναν μεγαλύτερο αριθμό γεγονότων. Σημειώστε ότι χωρίς χρήση ενός πρωτοκόλλου νάρκης-εγρήγορσης, το **Directed Diffusion** καταναλώνει όλη την ενέργεια στο δίκτυο και έτσι η καμπύλη του βρίσκεται πάνω στο πλαίσιο των σχημάτων 7.2.3.

Εξετάσαμε επίσης την επίδραση του παράγοντα εξοικονόμησης ενέργειας ως παράμετρο στην απόδοση του δικτύου. Ειδικότερα, ρυθμίζουμε το T_s σε διαφορετικές αρχικές τιμές ενώ το T_w παραμένει σταθερό. Βέβαια μετά την έναρξη της λειτουργίας των πρωτοκόλλων, το **DA-SWP** και **EA-SWP** ρυθμίζουν όπως περιγράψαμε το en . Αυτά τα πειράματα υποδεικνύουν ένα



Σχήμα 7.2: Ποσοστό επιτυχίας, κατανάλωση ενέργειας και καθυστέρηση παράδοσης (σε sec) του Directed Diffusion σε συνδυασμό με τα **SWP**, **DA-SWP** και **EA-SWP**, για την «αυστηρή» (αριστερά) και «ενσωματωμένη» (δεξιά) υλοποίηση, για διαφορετικές πυκνότητες ($n \in [300, 600]$), με $s = 5sec$ και $w = 10sec \rightarrow en = 0.33$

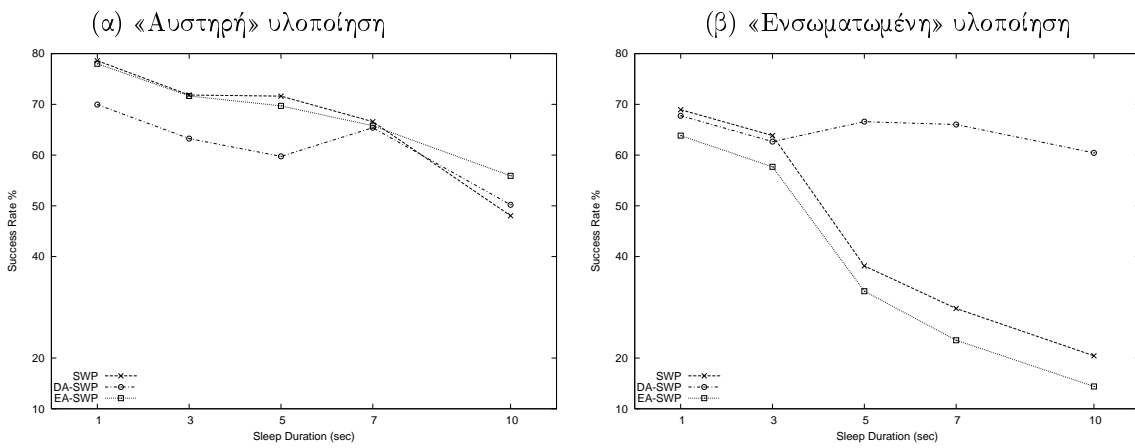
συμβιβασμό μεταξύ της διάρκειας ύπνου (δηλαδή κατανάλωση ενέργειας) και του ποσοστού επιτυχίας.

Αναλυτικότερα, στο σχήμα 7.3 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνουμε την διάρκεια της περιόδου νάρκης, το ποσοστό παράδοσης δεδομένων ελαττώνεται, ενώ όπως είναι αναμενόμενο μειώνεται και η κατανάλωση ενέργειας. Η μόνη εξαίρεση σε αυτή τη συμπεριφορά είναι το **DA-SWP** που διατηρεί το ποσοστό επιτυχίας περίπου σταθερό. Αυτό οφείλεται στο ότι το **DA-SWP** ανιχνεύει το μικρό αριθμό ενεργών γειτόνων και μειώνει τη διάρκεια της περιόδου νάρκης. Έτσι αποδεικνύεται ότι τα πρωτόκολλα μας επιτυχώς προσαρμόζονται κάτω από αντίξοες συνθήκες ή όπως σε αυτή την περίπτωση από λανθασμένες επιλογές. Για την χρονική καθυστέρηση τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά του σχήματος 7.2.2. Στο σχήμα 7.3.2 φαίνεται ότι το ενσωματωμένο πρωτόκολλο πετυχαίνει χαμηλότερη καθυστέρηση αυξάνοντας όμως έτσι τη κατανάλωση ενέργειας όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3.3.

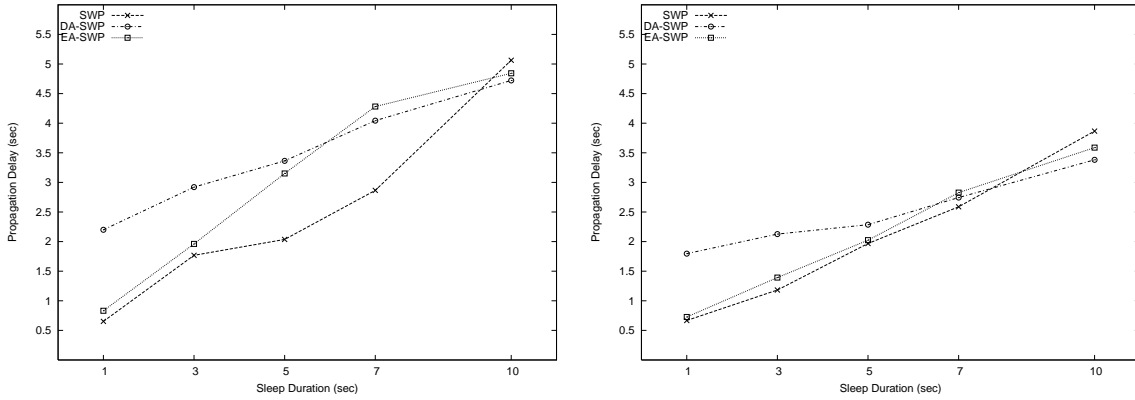
Στο επόμενο σύνολο πειραμάτων εξετάζουμε σενάρια διάδοσης 2000 γεγονότων, όπου ένας αριθμός σωματιδίων προστίθεται στο δίκτυο, όταν είναι σε λειτουργία. Εξετάζουμε δύο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο τοποθετούμε αρχικά 300 σωματίδια στη χρονική στιγμή $t = 0$ sec και έπειτα, στη χρονική στιγμή $t = 400$ sec, καταθέτουμε 300 πρόσθετα σωματίδια. Στο δεύτερο σενάριο αναπτύσσουμε αρχικά 300 σωματίδια στη χρονική στιγμή $t = 0$ sec και έπειτα δημιουργούμε 2 φάσεις κατανομής 150 σωματιδίων σε κάθε μία, στις χρονικές στιγμές $t = 300$ sec και $t = 600$ sec. Συγκρίνουμε τα αποτελέσματα αυτών των δύο σεναρίων με τις περιπτώσεις που αναπτύσσονται 300 ή 600 σωματίδια από την έναρξη της λειτουργίας του δικτύου.

Για να αξιολογήσουμε την απόδοση των διάφορων πρωτοκόλλων, μελετάμε το ποσοστό επιτυχίας και την κατανάλωση ενέργειας καθώς το δίκτυο εξελίσσεται κατά τη διάρκεια του χρόνου. Δηλαδή από την αρχή λειτουργίας του δικτύου παρουσιάζουμε σε κάθε χρονική στιγμή τις τιμές των παραπάνω μετρικών. Οι επόμενες σειρές σχημάτων περιλαμβάνουν μόνο τη γραφική παράσταση για τη «ενσωματωμένη» εφαρμογή των πρωτοκόλλων.

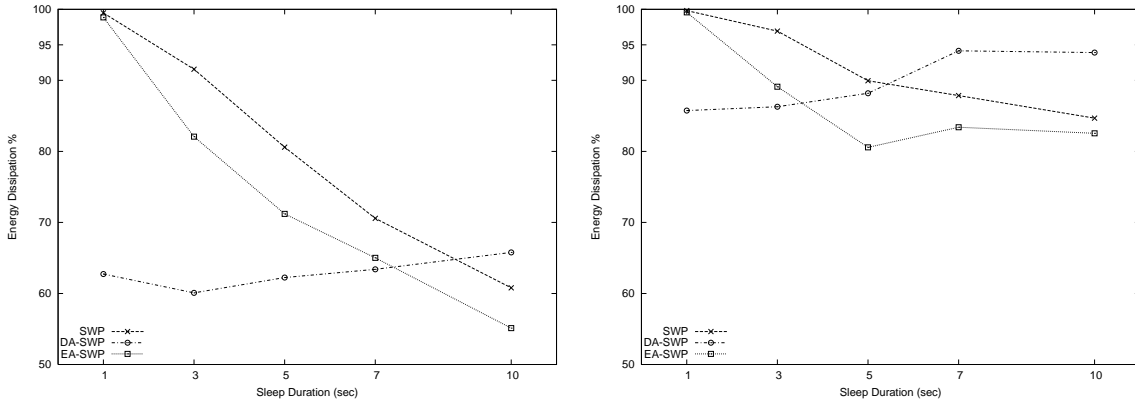
Η μέση καθυστέρηση διάδοσης που επιτυγχάνεται από κάθε συνδυασμό πρωτοκόλλου απεικονίζεται στο πίνακα 7.1. Το κύριο συμπέρασμα που εξάγουμε από αυτό το σύνολο πειραμάτων είναι ότι όλα τα πρωτόκολλα ωφελούνται από τη χρήση μιας φάσης ανακατανομής σωματιδίων έναντι στην απλή αύξηση του συνολικού αριθμού συσκευών που τοποθετούνται από την έναρξη λειτουργίας του δικτύου. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής. Με βάση την περίπτωση του σχήματος 7.4α, που αναπτύσσονται 300 σωματίδια το δίκτυο επιτυγχάνει υψηλά ποσοστά επιτυχίας, ενώ ρίχνοντας πρόσθετους κόμβους από την αρχή δεν βελτιώνει την απόδοση του δικτύου, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.4γ. Στην πραγματικότητα, όλα τα σωματίδια αρχίζουν να ξοδεύουν την ενέργειά τους από την ίδια στιγμή, την έναρξη της λειτουργίας του δικτύου. Επομένως, η ενέργειά τους εξαντλείται περίπου ταυτόχρονα. Ακόμη, και για τις δύο περιπτώσεις (δηλαδή όπου $n = 300$ και $n = 600$), παρατηρούμε ότι η απόδοση του δικτύου αρχίζει να επιδεινώνεται, δηλαδή να σταματά η παράδοση δεδομένων στο κέντρο ελέγχου, περίπου στο χρόνο $t = 400$ sec. Εντούτοις, με την καθυστέρηση της κατανομής των 300 κόμβων για μια περίοδο 400sec, κατορθώνουμε να αντικαταστήσουμε τους εξαντλημένους κόμβους, με νέους κόμβους που έχουν μεγάλο απόθεμα ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, η διάρκεια ζωής των δικτύων επεκτείνεται. Κατά συνέπεια, το τελικό ποσοστό επιτυχίας που επιτυγχάνεται στην περίπτωση της ανακατανομής (δείτε το σχήμα 7.4β) είναι υψηλότερο από,τι στην περίπτωση της διανομής ακριβώς 300



(1) Ποσοστό επιτυχίας

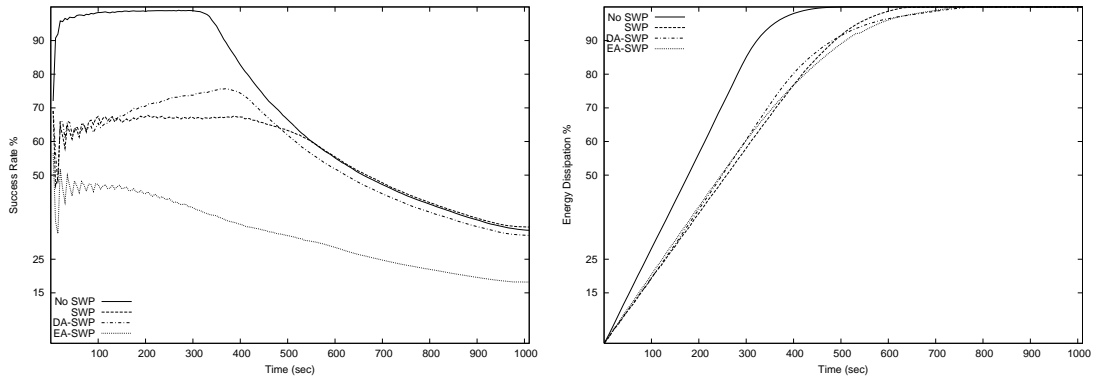


(2) Καθυστέρηση διάδοσης (sec)

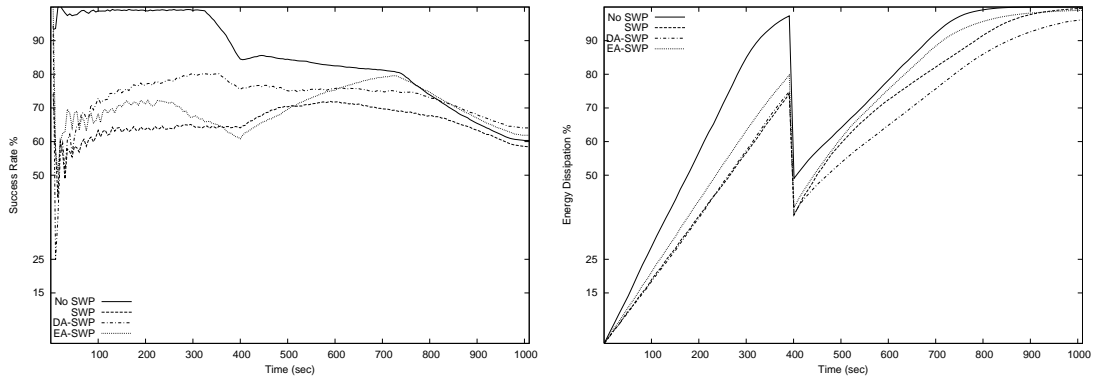


(3) Κατανάλωση ενέργειας

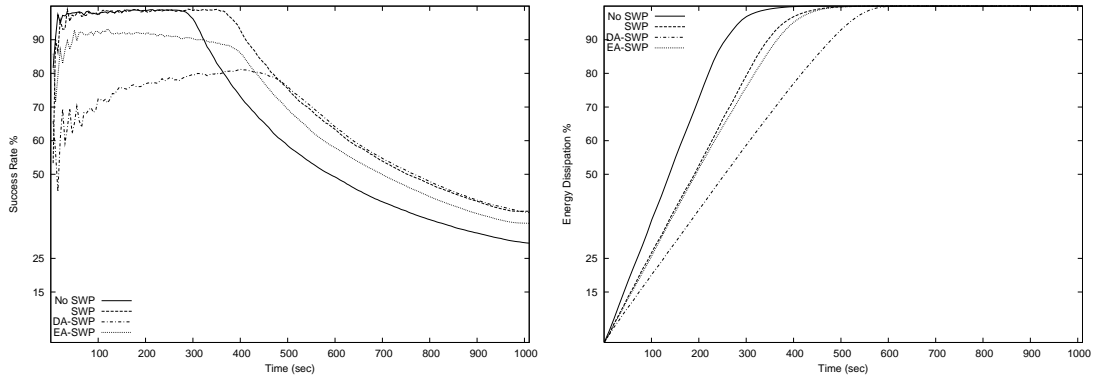
Σχήμα 7.3: Ποσοστό επιτυχίας, κατανάλωση ενέργειας και καθυστέρηση παράδοσης (σε sec) του Directed Diffusion σε συνδυασμό με τα **SWP**, **DA-SWP** και **EA-SWP**, για την «αυστηρή» (αριστερά) και «ενσωματωμένη» (δεξιά) υλοποίηση, για σταθερή πυκνότητα ($n = 400$), με $s \in [1, 10]sec$ και $w = 10sec \rightarrow en = (0.09, 0.5]$



(α) $n = 300, t = 0sec$



(β) $n = 300, t = 0sec, n' = 300, t' = 400sec$

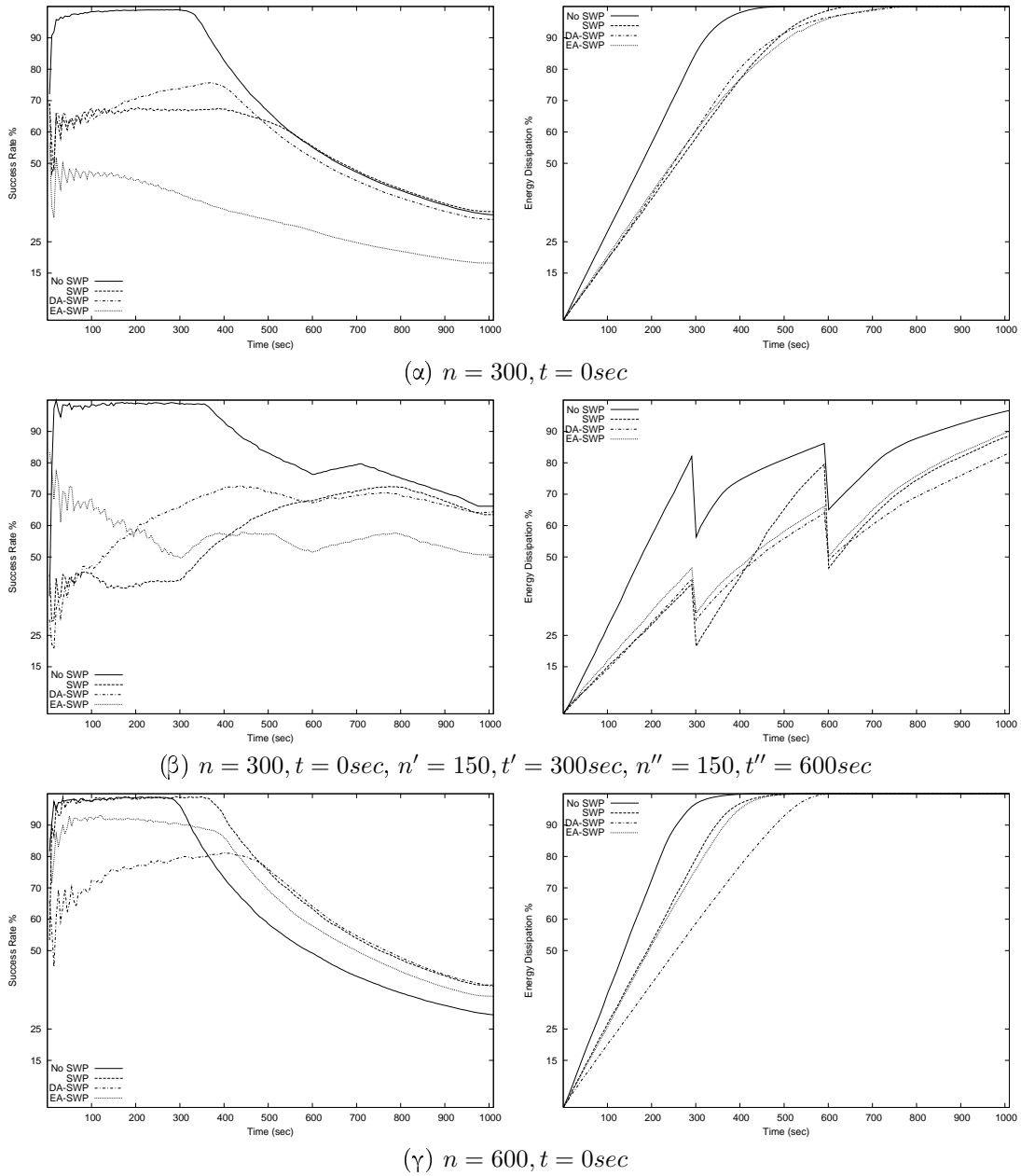


(γ) $n = 600, t = 0sec$

Σχήμα 7.4: Ποσοστό επιτυχίας και κατανάλωση ενέργειας του Directed Diffusion σε συνδυασμό με τα **SWP**, **DA-SWP** και **EA-SWP**, ως προς το χρόνο (*sec*), για διαφορετικές πυκνότητες ($n \in [300, 600]$), με μία ($t' = 400sec$) φάση αναδιανομής σωματιδίων, με $s = 5sec$ και $w = 10sec \rightarrow en = 0.33$

σωματιδίων (σχήμα 7.4α) ή 600 σωματιδίων (σχήμα 7.4γ) από την αρχή.

Επεκτείνουμε αυτήν την ιδέα (σχήμα 7.5) με την αξιολόγηση της δυνατότητας δύο, μικρότερων, φάσεων ανακατανομής. Ανακαταναίμουμε έναν μικρότερο αριθμό σωματιδίων $n = 150$



Σχήμα 7.5: Ποσοστό επιτυχίας και κατανάλωση ενέργειας του Directed Diffusion σε συνδυασμό με τα **SWP**, **DA-SWP** και **EA-SWP**, ως προς το χρόνο (*sec*), για διαφορετικές πυκνότητες ($n \in [300, 600]$), με δύο φάσεις ($t' = 300sec$ και $t'' = 600sec$) αναδιανομής σωματιδίων, με $s = 5sec$ και $w = 10sec \rightarrow en = 0.33$

στο χρόνο $t = 300sec$, όταν λειτουργεί ακόμα το δίκτυο με υψηλά ποσοστά επιτυχίας (δείτε το σχήμα 7.5β). Κατόπιν καταλείμουμε επιπλέον $n = 150$ σωματίδια στο χρόνο $t = 600sec$. Σε αυτήν την περίπτωση, αν και το γενικό ποσοστό επιτυχίας είναι σχεδόν το ίδιο με την

Αρχική διανομή	300	600	300	300
Αναδιανομή 1	0	0	300	150
Αναδιανομή 2	0	0	0	150
Χωρίς SWP	0.555	0.532	0.567	0.551
SWP	1.415	1.315	1.411	1.384
DA-SWP	1.966	4.380	2.925	3.298
EA-SWP	1.427	1.586	2.191	2.709

Πίνακας 7.1: Καθυστέρηση διάδοσης (σε *sec*) του Directed Diffusion σε συνδυασμό με το **SWP**, **DA-SWP** και **EA-SWP**, για διαφορετικές πυκνότητες ($n \in \{300, 600\}$), με μία ($t' = 400sec$) και δύο φάσεις ($t' = 300sec$ και $t'' = 600sec$) αναδιανομής σωματιδίων, με $s = 5sec$ και $w = 10sec \rightarrow en = 0.33$

προηγούμενη περίπτωση της μίας φάσης ανακατανομής, παρατηρούμε ότι η επιδείνωση προς το τέλος του χρόνου λειτουργίας του δικτύου, είναι ηπιότερη. Αυτή η παρατήρηση γίνεται πιο εμφανή στο σχήμα για την κατανάλωση ενέργειας όπου φαίνεται ότι οι δύο φάσεις ανακατανομής πραγματοποιούνται προτού να καταναλωθεί στο δίκτυο όλη η διαθέσιμη ενέργεια.

Όσον αφορά την καθυστέρηση διάδοσης των μηνυμάτων στο δίκτυο, εξετάζοντας τον πίνακα 7.1, μπορούμε ακίνδυνα να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι το Directed Diffusion δεν υφίσταται οποιαδήποτε πρόσθετη καθυστέρηση. Αυτό το συμπέρασμα έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα του πρώτου συνόλου πειραμάτων, δείτε το σχήμα 7.2, όπου η καθυστέρηση διάδοσης του Directed Diffusion παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την πυκνότητα των σωματιδίων στο δίκτυο. Παρατηρούμε ότι ακόμα κι αν τα πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας δεν κατορθώνουν να βελτιώσουν αρκετά το ποσοστό επιτυχίας του Directed Diffusion φαίνεται ότι κατορθώνουν να μειώσουν το αρκετά την κατανάλωση ενέργειας. Από αυτή την άποψη, πιστεύουμε ότι η διάρκεια ζωής δικτύων επεκτείνεται αρκετά και για την περίπτωση που παράγονται περισσότερα από 2000 γεγονότα, τα πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας θα μπορούσαν να ξεπεράσουν το απλό Directed Diffusion.

Στο τελικό σύνολο πειραμάτων μας ερευνούμε την απόδοση του Directed Diffusion σε συνδυασμό με την οικογένεια πρωτοκόλλων μας, στα ετερογενή δίκτυα αισθητήρων. Ειδικότερα διαιρούμε τις συσκευές αισθητήρων σε δύο ομάδες (A και B) βασισμένοι στους αρχικούς ενεργειακούς τους πόρους: κόμβοι αισθητήρων με αρχική ενέργεια $0.5J$ ανήκουν στην ομάδα A ενώ εκείνοι με αρχική ενέργεια $1.0J$ στην ομάδα B. Το σχήμα 7.6β απεικονίζει το ποσοστό επιτυχίας και την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο που αποτελείται από $n_A = 400$ σωματίδια (που ανήκουν στην ομάδα A) και $n_B = 100$ σωματίδια (που ανήκουν στην ομάδα B). Επομένως, αρχικά η συνολική διαθέσιμη ενέργεια όλων των σωματιδίων του δικτύου είναι $300J$.

Διατηρώντας τη συνολική αρχική ενέργειας στο ίδιο επίπεδο, επαναλαμβάνουμε το πείραμα με τη χρήση ομάδων A και B με διαφορετικό αριθμό σωματιδίων. 7.7β απεικονίζει το ποσοστό επιτυχίας και την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο που αποτελείται από $n_A = 200$ σωματίδια (που ανήκουν στην ομάδα A) και $n_B = 200$ σωματίδια (που ανήκουν στην ομάδα B). Ένας πιθανός τρόπος να συγκριθεί με έναν δίκαιο τρόπο η απόδοση του ετερογενούς δικτύου με τα ομοιογενή δίκτυα που εξετάζονται στα προηγούμενα πειράματα είναι να συγκριθούν με βάση την ίδια συνολική αρχική ενέργεια, δηλαδή $\sum_1^n E_{(i)}$ σε κάθε περίπτωση. Το σχήμα 7.6γ παρουσιάζει

Ομάδα 1- $E_{(i)} = 0.5J$	400	500	600	400	200
Ομάδα 2- $E_{(i)} = 1J$	0	0	0	100	200
Χωρίς SWP	0.543	0.504	0.532	0.478	0.536
SWP	1.407	1.373	1.315	1.325	1.410
DA-SWP	2.869	4.028	4.380	3.495	3.326
EA-SWP	1.717	1.670	1.586	3.634	2.450

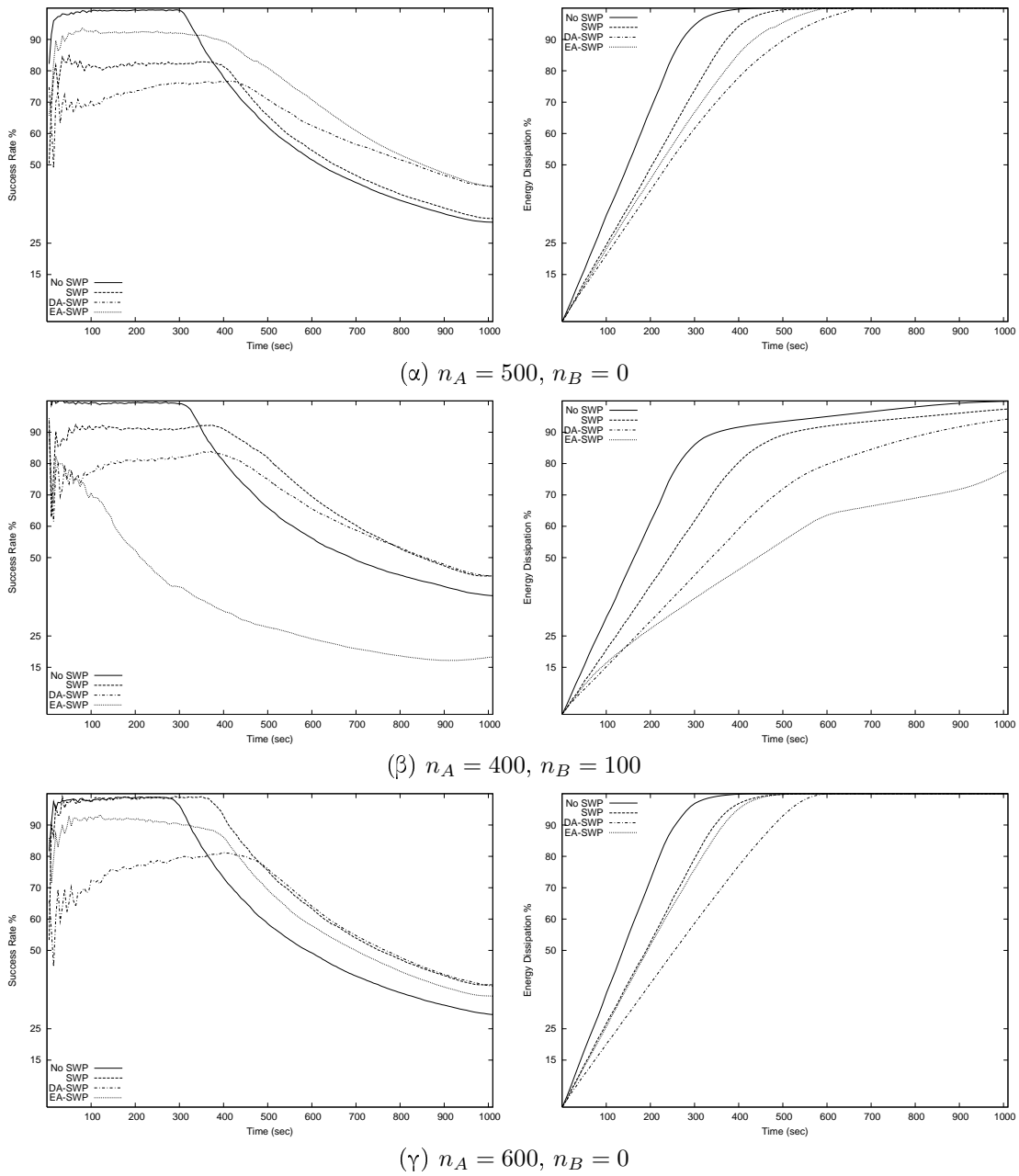
Πίνακας 7.2: Καθυστέρηση διάδοσης (σε *sec*) του **Directed Diffusion** σε συνδυασμό με τα **SWP**, **DA-SWP** και **EA-SWP** για διαφορετικές πυκνότητες σωματιδίων ($n \in [400, 600]$) με δύο διαφορετικές ομάδες σωματιδίων με διαφορετική αρχική ενέργεια ($s = 5sec$, $w = 10sec \rightarrow en = 0.33$)

τις μετρικές απόδοσης για ένα ομοιογενές δίκτυο με συνολική αρχική ενέργεια $300J$. Ένας άλλος τρόπος να συγκριθεί η απόδοση του ετερογενούς δικτύου με τα ομοιογενή δίκτυα είναι να συγκριθούν με βάση την πυκνότητα των σωματιδίων. Το σχήμα 7.6α παρουσιάζει τις ίδιες μετρικές απόδοσης για ένα ομοιογενές δίκτυο που αποτελείται από $n = 500$ κόμβους, ενώ το σχήμα 7.7α για $n = 400$ κόμβους .

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όλα τα πρωτόκολλα ωφελούνται από τη χρήση σωματιδίων υψηλής ενέργειας που μπορούν να εξυπηρετήσουν περισσότερο φορτίο. Με τη χρήση της πυκνότητας των σωματιδίων ως κριτήριο σύγκρισης μεταξύ των ετερογενών και ομοιογενών δικτύων (με $n = 500$), μόνο μια μικρή βελτίωση στο ποσοστό επιτυχίας παρατηρείται. Εντούτοις βασισμένοι στο κριτήριο της συνολικής αρχικής ενέργειας (δηλαδή με $n = 600$) είναι εμφανές ότι το ετερογενές δίκτυο ξεπερνά το ομοιογενές δίκτυο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι για την περίπτωση όπου $n_B = n_B = 200$ τα αποτελέσματα είναι σημαντικά καλύτερα. Επίσης, τα πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας φαίνεται να επιτυγχάνουν μια σχεδόν σταθερή συμπεριφορά, όσον αφορά το ποσοστό επιτυχίας, σε ολόκληρη τη διάκριση λειτουργίας των δικτύων.

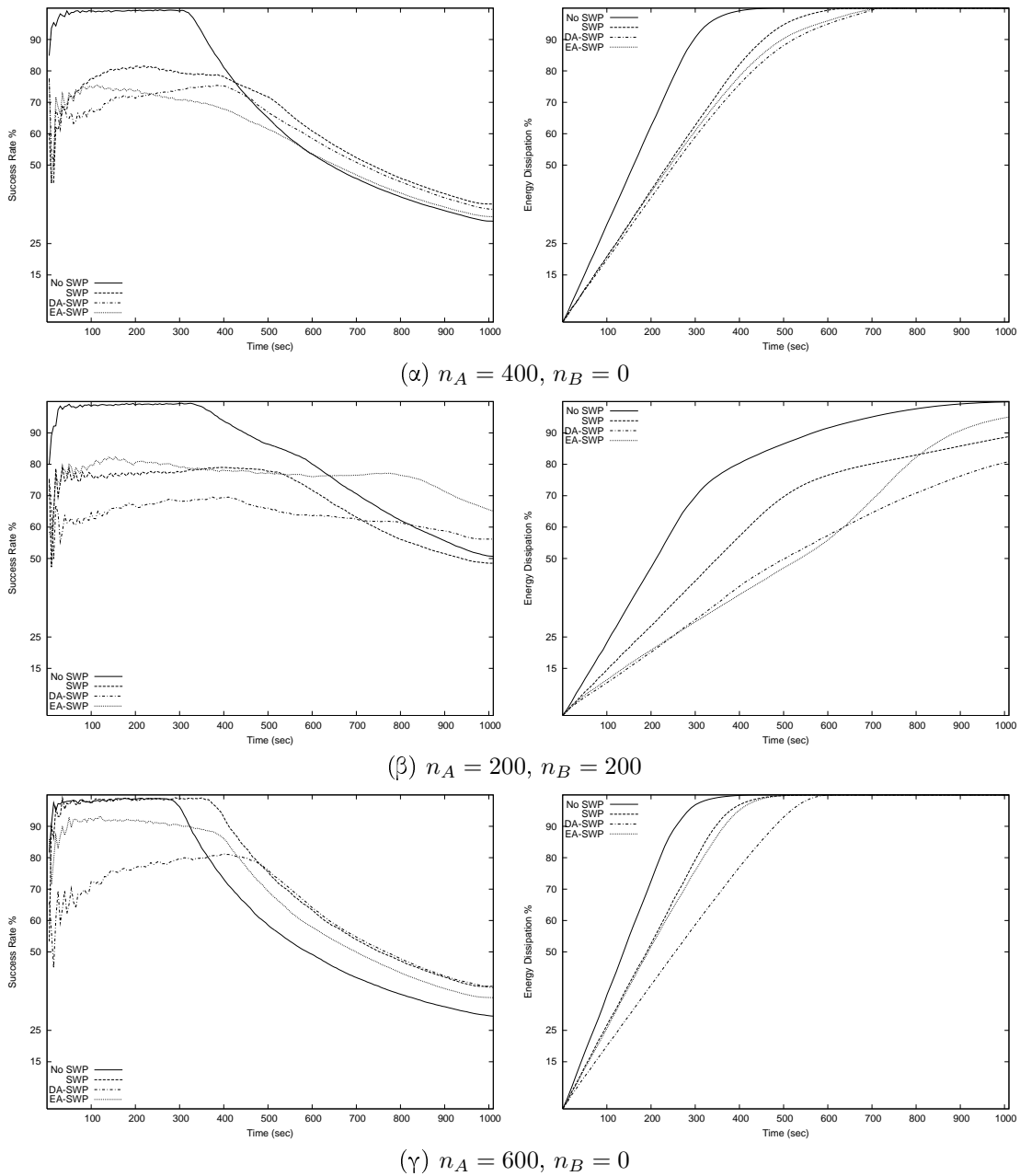
Αξίζει να αναφέρουμε την ιδιαίτερη συμπεριφορά του **EA-SWP** που επιτυγχάνει τα χαμηλότερα ποσοστά επιτυχίας όταν εκτελείται στην περίπτωση με $n_B = 400, n_B = 100$, αλλά τα καλύτερα από όλα τα άλλα πρωτόκολλα στην περίπτωση με $n_B = 200, n_B = 200$. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να εξηγηθεί από τη συνάρτηση προσαρμογής. Στην πρώτη περίπτωση, οι κόμβοι της ομάδας A ανιχνεύουν τους κόμβους της ομάδας B με τα υψηλά αποθέματα ενέργειας και επιλέγουν ένα χρονοπρόγραμμα με μεγάλη διάρκεια της κατάστασης νάρκης. Οι κόμβοι της ομάδας B επιλέγουν ένα χρονοπρόγραμμα με μεγάλη διάρκεια της κατάστασης εγρήγορσης, όμως είναι πολύ λίγοι για να χειριστούν το φορτίο. Τελικά όταν οι κόμβοι της ομάδας B αρχίσουν να εξαντλούνται οι κόμβοι στην ομάδα A αποτυγχάνουν να ανταποκριθούν γρήγορα σε αυτή την αλλαγή στην ενέργεια των γειτόνων τους επειδή η ομάδα B έχει πολύ λίγα μέλη. Εντούτοις, στη δεύτερη περίπτωση, οι κόμβοι στην ομάδα B αρχικά μπορούν να χειριστούν το φορτίο και όταν εξαντλούνται οι κόμβοι στην ομάδα A προσαρμόζουν κατάλληλα το πρόγραμμά τους και αναλαμβάνουν το φόρτο της διάδοσης μηνυμάτων.

Όσον αφορά την καθυστέρηση διάδοσης των μηνυμάτων στο δίκτυο, εξετάζοντας τον πίνακα 7.2, πάλι παρατηρούμε ότι η κατευθυνόμενη διάχυση δεν υφίσταται οποιαδήποτε πρόσθετη καθυστέρηση όπως στην περίπτωση της εφαρμογής μιας ή περισσότερων φάσεων ανακατανομής.



Σχήμα 7.6: Ποσοστό επιτυχίας και κατανάλωση ενέργειας του Directed Diffusion σε συνδυασμό με τα **SWP**, **DA-SWP** και **EA-SWP**, ως προς το χρόνο (*sec*), για διαφορετικές πυκνότητες ($n \in [500, 600]$), με δύο ομάδες σωματιδίων διαφορετικών ενεργειακών πόρων, με $s = 5sec$ και $w = 10sec \rightarrow en = 0.33$

Η καθυστέρηση διάδοσης του Directed Diffusion παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την πυκνότητα των σωματιδίων στο δίκτυο και την ετερογενή σύνθεσή τους. Τέλος, βασισμένοι στη



Σχήμα 7.7: Ποσοστό επιτυχίας και κατανάλωση ενέργειας του Directed Diffusion σε συνδυασμό με τα **SWP**, **DA-SWP** και **EA-SWP**, ως προς το χρόνο (*sec*), για διαφορετικές πυκνότητες ($n \in [400, 600]$), με δύο ομάδες σωματιδίων διαφορετικών ενεργειακών πόρων, με $s = 5sec$ και $w = 10sec \rightarrow en = 0.33$

γραφική παράσταση κατανάλωσης ενέργειας, πιστεύουμε ότι με τη χρησιμοποίηση των πρωτοκόλλων εξοικονόμησης ενέργειας η διάρκεια ζωής των δικτύων έξυπνης σκόνης μπορεί να

επεκταθεί. Αυτό είναι βασισμένο στην παρατήρηση ότι και στο σχήμα 7.6β και στο σχήμα 7.7β η συνολική κατανάλωση ενέργειας είναι λιγότερο από 100%. Από αυτή την άποψη, εάν επεκτείνουμε το συνολικό αριθμό γεγονότων σε περισσότερα από 2000 θα μπορούσαμε να ωφεληθούμε περαιτέρω από την υπολειπόμενη ενέργεια στις συσκευές αισθητήρων.

7.9 Συμπεράσματα

Τα πρωτόκολλα που προτείνουμε σε αυτό το κεφάλαιο εκμεταλλεύονται την κίνηση των πακέτων στο δίκτυο για να αποκτήσουν μία γνώση για τις τοπικές συνθήκες πυκνότητας σωματιδίων και ενεργειακών αποθεμάτων στη γειτονία τους. Τα πρωτόκολλά μας εκμεταλλεύονται αυτή την πληροφορία για να προσαρμόσουν την διαδικασία εξοικονόμησης ενέργειας χωρίς να μειώσουν την 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 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 προσαρμοστικά μας πρωτόκολλα. Σημειώνουμε ότι, απότι γνωρίζουμε, αυτή είναι η πρώτη εργασία που αξιολογεί τέτοιες σχεδιαστικές επιλογές.

Κλείνοντας, θα θέλαμε να σημειώσουμε ότι η έρευνα στις τεχνικές προσαρμοστικότητας συνεχίζεται και συναντά την αποδοχή της επιστημονικής κοινότητας, αφού μία σημαντική επέκταση της παρούσης εργασίας δημοσιεύτηκε πρόσφατα στο 17th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures, δείτε [9] για λεπτομέρειες. Συγκεκριμένα, επεκτείνουμε την μέθοδο προσαρμογής ώστε να λαμβάνει υπόψη και την πυκνότητα και την μέση ενέργεια στην περιοχή ενός κόμβου ταυτόχρονα. Αυτός ο συνδυασμός μπορεί να ελεγχθεί λεπτομερώς με την ανάθεση συγκεκριμένων βαρών σε καθεμία από τις παραμέτρους προσαρμογής. Ακόμα, επεκτείνουμε τις τεχνικές επαναδιανομής κόμβων με μη ομοιόμορφες κατανομές και τις ετερογένειες σε ευρύτερης κλίμακας δίκτυα. Τέλος, παρουσιάσαμε μία πρώιμη μέθοδο για την ποιοτική και ποσοτική μελέτη των συμβιβασμών που πετυχαίνουν τα πρωτόκολλά μας. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας αναδεικνύουν την αξία της προσαρμοστικότητας, ειδικά όταν αυτή εξετάζεται σε συνδυασμό με τις τεχνικές επαναδιανομής κόμβων και ετερογένειας στο σχεδιασμό των δικτύων. Στοιχείο μελλοντικής έρευνας θα αποτελέσει η διερεύνηση σε βάθος των συμβιβασμών και η επιβολή ορίων στην προσαρμογή προκειμένου να επιτευχθούν συγκεκριμένες εγγυήσεις στην καθυστέρηση παράδοσης, ποσοστό επιτυχίας κλπ.

Βιβλιογραφία

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Journal of Computer Networks*, Volume 38:393–422, 2002.
- [2] 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 Annual ACM/IEEE Simulation Symposium (ANSS 2004)*, pages 43–52, 2004.
- [3] A. Boukerche, X. Cheng, and J. Linus. Energy-aware data-centric routing in microsensor networks. In *ACM Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM 2003)*, pages 42–49, Paris, France, 2003.
- [4] A. Boukerche and S. Nikolettseas. *Energy Efficient Algorithms in Wireless Sensor Networks*. Springer Verlag, 2005. Chapter in book, to appear.
- [5] David Cavin, Yoav Sasson, and Andre Schiper. On the accuracy of manet simulators. In *POMC '02: Proceedings of the second ACM international workshop on Principles of mobile computing*, pages 38–43, New York, NY, USA, 2002. ACM Press.
- [6] I. Chatzigiannakis, T. Dimitriou, M. Mavronicolas, S. Nikolettseas, and P. Spirakis. A comparative study of protocols for efficient data propagation in smart dust networks. In *9th International Conference on Parallel and Distributed Computing (EUROPAR 2003)*, pages 1003–1016, 2003. Distinguished Paper. Also in the Parallel Processing Letters (PPL) Journal, Volume 13, Number 4, pp. 615-627, December 2003.
- [7] I. Chatzigiannakis, T. Dimitriou, S. Nikolettseas, and P. Spirakis. A probabilistic forwarding protocol for efficient data propagation in sensor networks. In *5th European Wireless Conference on Mobile and Wireless Systems beyond 3G (EW 2004)*, pages 344–350, 2004. Also, accepted in the Journal of Ad Hoc Networks, 2005.
- [8] I. Chatzigiannakis, A. Kinalis, and S. Nikolettseas. Wireless sensor networks protocols for efficient collision avoidance in multi-path data propagation. In *ACM Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (PE-WASUN'04)*, pages 8–16, Venice, Italy, October 2004. Also, invited paper in the

Performance Evaluation: An International Journal, Special Issue on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor and Ubiquitous Networks, under review, to appear in 2005.

- [9] I. Chatzigiannakis, A. Kinalis, and S. Nikolettseas. An adaptive power conservation scheme for heterogeneous wireless sensor networks with node redeployment. In *SPAA'05: Proceedings of the 17th annual ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures*, pages 96–105, New York, NY, USA, 2005. ACM Press. Also, invited paper to a Special Issue of the Theory of Computing Systems (TOCS) Journal, devoted to the best papers of SPAA'05, under review.
- [10] I. Chatzigiannakis, A. Kinalis, and S. Nikolettseas. Energy efficient protocols for sensing multiple events in smart dust networks. In *38th Annual ACM/IEEE Simulation Symposium (ANSS 2005)*, pages 60–71, San Diego, USA, 2005.
- [11] 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.
- [12] 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 2002)*, pages 9–16, 2002.
- [13] I. Chatzigiannakis, S. Nikolettseas, and P. Spirakis. Efficient and robust protocols for local detection and propagation in smart dust networks. *ACM Mobile Networks (MONET) Journal, Special Issue on Algorithmic Solutions for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks*, 2003.
- [14] C. Efthymiou, J. Rolim, and S. Nikolettseas. Energy balanced data propagation in wireless sensor networks. In *4th International Workshop on Mobile, Ad-hoc and Sensor Networks (WMAN 2004)*, 2004. 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)”, to appear.
- [15] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *33rd Hawaii International Conference on System Sciences – HICSS*, 2000.
- [16] W. R. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In *5th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing – MOBICOM*, 1999.
- [17] C. Intanagonwiwat, D. Estrin, R. Govindan, and J. Heidemann. Impact of network density on data aggregation in wireless sensor networks. Technical Report Techni-

- [18] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *6th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing (MOBICOM 2000)*, pages 56–67, 2000.
- [19] Exploratory research: Heterogeneous sensor networks. Intel Technology Journal: Research & Development at Intel. www.intel.com/research/exploratory/heterogeneous.htm.
- [20] A. Manjeshwar and D.P. Agrawal. Teen: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In *2nd International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, satellite workshop of 16th Annual International Parallel & Distributed Processing Symposium – IPDPS*, 2002.
- [21] Crossbow technology inc., mica motes. <http://www.xbow.com/Products/>.
- [22] The cmu monarch project’s wireless and mobility extensions to ns, 1998. <http://www.monarch.cs.cmu.edu>.
- [23] Moteiv corporation. <http://www.moteiv.com/>.
- [24] 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 ACM/IEEE Simulation Symposium (ANSS 2004)*, pages 15–24, Washington, USA, 2004.
- [25] The network simulator – ns2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [26] C.E. Perkins. *Ad Hoc Networking*. Addison-Wesley, Boston, 2001.
- [27] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *SenSys '04: Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 95–107, New York, NY, USA, 2004. ACM Press.
- [28] T. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practices*. Prentice Hall, 1996.
- [29] The real network simulator. <http://www.cs.cornell.edu/skeshav/real/overview.html>.
- [30] A.S. Tanenbaum. *Computer Networks*. Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [31] Tijs van Dam and Koen Langendoen. An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *SenSys '03: Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 171–180, New York, NY, USA, 2003. ACM Press.

- [32] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies (INFOCOM)*, New York, USA, 2002.
- [33] Tinyos: A component-based os for the network sensor regime. <http://webs.cs.berkeley.edu/tos/>, October 2002.