



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Π.Μ.Σ. “ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ”

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Συγκριτική Ανάλυση των Πρωτοκόλλων Ενεργειακά Αποδοτικής
Δρομολόγησης σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων**

Παναγιώτης Τσέλιος

Εισηγητής: Διονύσης Κανδρής

ΑΘΗΝΑ 2019

(Κενό φύλλο)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Συγκριτική Ανάλυση των Πρωτοκόλλων Ενεργειακά Αποδοτικής
Δρομολόγησης σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων**

**Παναγιώτης Γ. Τσέλιος
ais-0122**

Εισηγητής: Διονύσης Κανδρός

Εξεταστική Επιτροπή: Ιωάννης Έλληνας
Αναστασία Βελώνη

(Κενό φύλλο)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία δεν θα ήταν δυνατόν να ολοκληρωθεί χωρίς την πολύτιμη βοήθεια και συμπαράσταση του επιβλέποντα καθηγητή κ. Διονύση Κανδρή τον οποίο και ευχαριστώ θερμά.

(Κενό φύλλο)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη συγκριτική ανάλυση των πρωτοκόλλων ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (ΑΔΑ).

Τα ΑΔΑ παρουσιάζουν πολλές ιδιαιτερότητες και διαφορές σε σχέση με τα κλασικά ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα. Ίσως η μεγαλύτερη ιδιαιτερότητά τους είναι το γεγονός ότι οι κόμβοι τους διαθέτουν περιορισμένα αποθέματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιβάλλει την προσεκτική διαχείριση των αποθεμάτων αυτών. Είναι σημαντικό λοιπόν να επιλέγεται ανά περίπτωση το καταλληλότερο πρωτόκολλο δρομολόγησης δικτύου που θα παρέχει την απαιτούμενη αποτελεσματικότητα στην μεταφορά των δεδομένων ενώ ταυτόχρονα θα περιορίζει όσο το δυνατόν περισσότερο την κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους του δικτύου αποτρέποντας την εκτέλεση περιττών λειτουργιών. Προς την κατεύθυνση αυτή έχουν προταθεί πολλές στρατηγικές ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης και πρωτόκολλα δρομολόγησης που υλοποιούν τις στρατηγικές αυτές. Για κάθε περίπτωση, ανάλογα με τη γεωγραφική τοπολογία του κάθε ΑΔΑ, τον όγκο, τη συχνότητα και το είδος των δεδομένων που διακινούνται σε αυτό και το είδος της εφαρμογής στην οποία αυτό χρησιμοποιείται θα πρέπει να επιλέγεται το καταλληλότερο πρωτόκολλο δρομολόγησης. Στην εργασία αυτή προτείνεται μια κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων με βάση την προσέγγιση που αυτά ακολουθούν ως προς την ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση και γίνεται μια συγκριτική παρουσίαση των πρωτοκόλλων που έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό. Στόχος της εργασίας αυτής είναι να αποτελέσει ένα χρήσιμο οδηγό για την επιλογή μιας συγκριμένης κατηγορίας πρωτοκόλλων καθώς και ειδικότερα ενός συγκεκριμένου πρωτοκόλλου που θα είναι το καταλληλότερο ανά περίπτωση, σύμφωνα με τα ειδικά χαρακτηριστικά και την υλοποίηση του κάθε ΑΔΑ και σύμφωνα με τις ανάγκες της εφαρμογής που αυτό καλείται να υποστηρίξει.

ABSTRACT

This thesis concerns the comparative analysis of the most popular protocols that have been proposed for energy efficient routing in Wireless Sensor Networks (WSNs). WSNs have many particularities and differences from the classic wired

and wireless networks. Perhaps their biggest particularity is the fact that their nodes have limited electrical energy resources. This fact imposes the careful management of the energy resources. Thus, is very important to select in every case the most suitable routing protocol that provides the required effectiveness in data transfer and in the same time minimizes as much as possible the energy consumption by preventing the use of unnecessary functionalities. Various energy efficient routing strategies have been proposed for this purpose, and a lot of routing protocols that use these strategies have been proposed as well. The most suitable routing protocol must be selected in every case, according to the geographical topology of the WSN, to the data volume and frequency and to the application that utilizes the WSN. In the present thesis, a protocol categorization is proposed, based on the approach of the protocols towards the energy efficient routing, along with a comparative presentation of the protocols.

The aim of this thesis is to become a useful guide for the selection of the most suitable protocol category and for the selection of the most suitable protocol in specific, according to the characteristics and the implementation of a WSN and according to the application that this WSN supports.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων – ΑΔΑ (Wireless Sensor Networks – WSNs)

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Δρομολόγηση (Routing), Πρωτόκολλο (Protocol), Ενέργεια (Energy), Αποδοτικότητα (Efficiency), Σύγκριση (Comparison).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	11
1.2 Περιγραφή του αντικείμενου της διπλωματικής εργασίας	12
1.3 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	12
2. Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΔΙΚΤΥΑΚΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΑ ΑΔΑ	15
2.1 Η κρισιμότητα της κατανάλωσης ενέργειας στα ΑΔΑ	15
2.2 Η κατανάλωση ενέργειας στο επίπεδο δικτυακής δρομολόγησης.....	15
2.3 Οι ιδιαιτερότητες της δικτυακής επικοινωνίας των ΑΔΑ	16
2.4 Η κατανάλωση ενέργειας στα υποσυστήματα ενός κόμβου ΑΔΑ	18
2.5 Στρατηγικές ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης	21
2.5.1 Ιεραρχική δόμηση του ΑΔΑ	21
2.5.2 Επιλεκτική μετάδοση υποσυνόλου των διαθέσιμων δεδομένων	22
2.5.3 Δρομολόγηση βασισμένη στη γεωγραφική θέση των κόμβων	22
2.5.4 Διαμοιρασμός του φορτίου (<i>Load balancing</i>)	23
2.5.5 Συσσωμάτωση δεδομένων (<i>Data aggregation</i>)	24
2.5.6 Συγχώνευση δεδομένων (<i>Data fusion</i>)	24
3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΤΑ ΑΔΑ	27
3.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τη Δομή του Δικτύου	28
3.1.1 Επίπεδα πρωτόκολλα	28
3.1.2 Ιεραρχικά πρωτόκολλα	29
3.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τον τρόπο επιλογής των επιθυμητών δεδομένων	31
3.2.1 Πρωτόκολλα βασισμένα στο ερώτημα (<i>query-based protocols</i>)	31
3.2.2 Πρωτόκολλα βασισμένα στη διαπραγμάτευση (<i>negotiation-based protocols</i>)	32
3.3 Κατηγοριοποίηση με βάση την τοπολογία: Πρωτόκολλα βασισμένα στη γεωγραφική θέση των κόμβων	33
3.4 Κατηγοριοποίηση με βάση τη την αξιοπιστία της μετάδοσης	33

3.4.1 Πρωτόκολλα πολλαπλών παράλληλων διαδρομών	34
3.4.2 Πρωτόκολλα ποιότητας υπηρεσίας (<i>Quality of Service, QoS</i>)	34

4. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ

ΑΠΟΔΟΤΙΚΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΤΑ ΑΔΑ	37
4.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τη Δομή του Δικτύου	38
4.1.1 Επίπεδα πρωτόκολλα	38
4.1.1.1 WRP	38
4.1.1.2 TBRPF	39
4.1.1.3 TORA	40
4.1.1.4 Flooding	41
4.1.1.5 Gossiping	41
4.1.1.6 Rumor Routing	42
4.1.1.7 E-TORA	43
4.1.1.8 ZRP	43
4.1.2 Ιεραρχικά πρωτόκολλα	44
4.1.2.1 LEACH	45
4.1.2.2 LEACH-C	46
4.1.2.3 TEEN	46
4.1.2.4 APTEEN	48
4.1.2.5 PEGASIS	49
4.1.2.6 VGA	49
4.1.2.7 BCDCP	50
4.1.2.8 HPAR	51
4.1.2.9 Sleep/Wake Scheduling Protocol	51
4.1.2.10 GBDD	52
4.1.2.11 ELCH	52
4.1.2.12 NHRPA	53
4.1.2.13 SHPER	54
4.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τον τρόπο επιλογής των επιθυμητών δεδομένων	57
4.2.1 Πρωτόκολλα βασισμένα στο ερώτημα (<i>query-based protocols</i>)	57
4.2.1.1 Directed Diffusion	57
4.2.1.2 COUGAR	58

4.2.1.3 ACQUIRE	59
4.2.2 Πρωτόκολλα βασισζόμενα στη διαπραγμάτευση (<i>negotiation-based protocols</i>)	60
4.2.2.1 SPIN	60
4.2.2.2 SPIN-PP	61
4.2.2.3 SPIN-EC	62
4.2.2.4 SPIN-BC	62
4.2.2.5 SPIN-RL	63
4.3 Πρωτόκολλα βασισζόμενα στη γεωγραφική θέση των κόμβων.....	64
4.3.1 GEAR	64
4.3.2 DREAM	65
4.3.3 GEM	65
4.3.4 SELAR	66
4.3.5 MERR	67
4.4 Κατηγοριοποίηση με βάση την αξιοπιστία της μετάδοσης	68
4.4.1 Πρωτόκολλα πολλαπλών παράλληλων διαδρομών	68
4.4.1.1 GRAB	68
4.4.1.2 CBMPR	69
4.4.1.3 DGR	70
4.4.2 Πρωτόκολλα ποιότητας υπηρεσίας (<i>Quality of Service, QoS</i>)	70
4.4.2.1 SAR	71
4.4.2.2 SPEED	71
4.4.2.3 MGR	72
5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ	75
5.1 Σύνοψη	75
5.2 Συμπεράσματα	75
5.3 Προοπτικές	77
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	79

(Κενό φύλλο)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (*Wireless Sensor Networks (WSN)*) που στη συνέχεια της εργασίας αυτής θα αναφέρονται με τη συντομογραφία “ΑΔΑ”, περιγράφεται το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας και γίνεται η ανασκόπηση των κεφαλαίων που περιλαμβάνει η εργασία αυτή.

1.1 Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (ΑΔΑ) είναι ένα σύνολο αισθητήρων που επικοινωνούν μεταξύ τους ασύρματα. Οι αισθητήρες αυτοί ή “κόμβοι (*nodes*)” σύμφωνα με τη δικτυακή ορολογία, μπορούν να είναι στατικοί ή κινούμενοι. Η αποστολή ενός ΑΔΑ είναι να συλλέγει δεδομένα από το χώρο στον οποίο βρίσκεται και να τα αποστέλλει σε έναν κεντρικό σταθμό βάσης (*base station* ή “*sink*”, όπως αναφέρεται συνήθως στη διεθνή βιβλιογραφία).

Τα ΑΔΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση κάποιου φυσικού μεγέθους σε μία περιοχή (πχ. θερμοκρασία, υγρασία, παρουσία διάφορων χημικών ενώσεων) και βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς όπως για παράδειγμα στην παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στην ανίχνευση πυρκαγιών, στη γεωργία και σε εφαρμογές φυσικής ασφάλειας για την ανίχνευση της παρουσίας ατόμων σε προστατευόμενους χώρους.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για την εγκατάσταση των ΑΔΑ είναι η απουσία καλωδίωσης, πράγμα που καθιστά εξαιρετικά εύκολη, ευέλικτη, γρήγορη και οικονομική την υλοποίησή τους ακόμη και σε χώρους που τα συμβατικά ενσύρματα δίκτυα είναι αδύνατο να εγκατασταθούν, όπως για παράδειγμα σε δύσβατα εδάφη εκτός αστικών περιοχών. Ταυτόχρονα όμως, η απουσία καλωδίωσης θέτει και έναν πολύ σημαντικό περιορισμό αναφορικά με την ηλεκτρική τροφοδότηση των συσκευών του δικτύου, η οποία αναγκαστικά επιτυγχάνεται με την κατασκευή ενεργειακά αυτόνομων αισθητήρων (κόμβων) που ο καθένας τους τροφοδοτείται ηλεκτρικά από το δικό του ηλεκτρικό συσσωρευτή (μπαταρία). Γίνεται έτσι ορατό το πόσο σημαντική είναι η

προσπάθεια για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε κάθε κόμβο, αφού αυτό έχει σαν άμεση συνέπεια την παράταση λειτουργίας του ΑΔΑ, δηλαδή τη χρονική επιμήκυνση της ύπαρξής του.

1.2 Περιγραφή του αντικειμένου της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συγκριτική ανάλυση των πρωτοκόλλων ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, θα εξηγηθεί το πόσο καθοριστικής σημασίας για την εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα ΑΔΑ είναι η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου δρομολόγησης δικτύου, θα παρουσιαστούν οι παράμετροι που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας και οι τεχνικές που εφαρμόζονται για την εξοικονόμηση ενέργειας. Θα προταθεί μια κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων με βάση την προσέγγιση που αυτά ακολουθούν ως προς την ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση και θα γίνει μια συγκριτική παρουσίαση των πρωτοκόλλων που έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό.

1.3 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία ακολουθεί την εξής δομή:

Στο κεφάλαιο 2, αναλύεται η ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση στα ΑΔΑ. Εξηγείται το πόσο καθοριστικής σημασίας για την εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα ΑΔΑ είναι η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου δρομολόγησης δικτύου. Παρουσιάζονται οι ιδιαιτερότητες της δικτυακής επικοινωνίας των ΑΔΑ σε σύγκριση με τα κλασικά δίκτυα και το πώς οι ιδιαιτερότητες αυτές λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό των πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Αναλύεται και συγκρίνεται η κατανάλωση ενέργειας στα επιμέρους υποσυστήματα ενός ΑΔΑ. Παρουσιάζονται οι στρατηγικές ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης που εφαρμόζονται από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ΑΔΑ.

Στο κεφάλαιο 3 προτείνεται μια κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων σύμφωνα με τη βασική στρατηγική ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης που αυτά ακολουθούν. Σύμφωνα με αυτή την κατηγοριοποίηση, παρουσιάζονται οι κατηγορίες στις οποίες εντάσσονται τα πρωτόκολλα και αναλύεται η στρατηγική δρομολόγησης που εφαρμόζεται σε κάθε κατηγορία. ενώ παρουσιάζονται ταυτόχρονα και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε κατηγορίας. Αυτή η κατηγοριοποίηση είναι το πρώτο βήμα για την επιλογή του κατάλληλου

πρωτοκόλλου δρομολόγησης ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί το ΑΔΑ.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η συγκριτική ανάλυση των πρωτοκόλλων ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης σε ΑΔΑ ανά κατηγορία, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που προτείνεται στο κεφάλαιο 3. Προτείνεται η ενδεχόμενη χρήση της κάθε κατηγορίας πρωτοκόλλων σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τα χαρακτηριστικά του ΑΔΑ και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε πρωτοκόλλου με στόχο αυτή η συγκριτική παρουσίαση να είναι ένας οδηγός για τη βέλτιστη επιλογή του πρωτοκόλλου δρομολόγησης που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα ΑΔΑ.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προοπτικές που προκύπτουν από την παρούσα εργασία.

(Κενό φύλλο)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΔΙΚΤΥΑΚΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΑ ΑΔΑ

2.1 Η κρίσιμότητα της κατανάλωσης ενέργειας στα ΑΔΑ

Τα ΑΔΑ είναι ενεργειακά αυτόνομα και δεν τροφοδοτούνται από εξωτερικές πηγές ενέργειας. Κατά την έναρξη της λειτουργίας ενός ΑΔΑ, ο κάθε κόμβος του, διαθέτει κάποια αποθέματα ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τη λειτουργία του κόμβου. Νομοτελειακά κάποια στιγμή τα αποθέματα αυτά θα εξαντληθούν και τότε ο κόμβος θα πάψει να λειτουργεί. Το ίδιο θα συμβεί κάποια στιγμή σε όλους τους κόμβους του ΑΔΑ. Η ίδια η ύπαρξη του ΑΔΑ λοιπόν, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τα αποθέματα ενέργειας που αυτό διαθέτει και με τη διαχείριση των αποθεμάτων αυτών. Η τελική ενεργειακή εξάντληση ενός ΑΔΑ και η παύση της λειτουργίας του είναι απολύτως αναμενόμενη. Με αυτό το δεδομένο, διεξάγεται εκτενής έρευνα με στόχο την εύρεση μεθόδων που αυξάνουν την ενεργειακή αποδοτικότητα και συντείνουν στην αύξηση της διάρκειας ζωής των ΑΔΑ. Η έρευνα που σχετίζεται με το φυσικό επίπεδο (επίπεδο OSI 1) και το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (επίπεδο OSI 2) είναι κοινή για όλα τα ΑΔΑ, ανεξάρτητη από την εφαρμογή για την οποία αυτά χρησιμοποιούνται και εστιάζει σε θέματα όπως η χαμηλή κατανάλωση των συστημάτων εκπομπής και λήψης και τα πρωτόκολλα MAC (Media Access Control) χαμηλής κατανάλωσης. Η έρευνα που γίνεται στο επίπεδο δικτύου (επίπεδο OSI 3) είναι πολύ πιο εκτενής [1], [2] και σε αυτή εστιάζεται η παρούσα εργασία.

2.2 Η κατανάλωση ενέργειας στο επίπεδο δικτυακής δρομολόγησης

Κύριος στόχος της έρευνας στο επίπεδο δικτυακής δρομολόγησης (επίπεδο δικτύου ή επίπεδο OSI 3) είναι η εύρεση ενεργειακά αποδοτικών μεθόδων δρομολόγησης για την αξιόπιστη μεταφορά των δεδομένων από τους κόμβους των αισθητήρων στο σταθμό βάσης (*sink*). Η προσέγγιση της έρευνας στο επίπεδο αυτό θα πρέπει να είναι ολιστική και να εξετάζει με προσοχή όλα τα υποσυστήματα και όλες τις λειτουργίες των κόμβων που προκαλούν κατανάλωση

ενέργειας. Στόχος της έρευνας είναι η εύρεση μεθόδων δρομολόγησης που αποτρέπουν την σύντομη εξάντληση της ενέργειας σε κάποιο υποσύνολο του ΑΔΑ αφού κάτι τέτοιο θα μπορούσε να θέσει εκτός παραγωγικής λειτουργίας ολόκληρο το ΑΔΑ. Η βέλτιστη επιλογή της στρατηγικής της δρομολόγησης δεν είναι πάντα προφανής. Στη σχεδίαση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης θα πρέπει να εντοπίζεται και να αποφεύγεται η ύπαρξη ενεργειακά “αδύναμων κρίκων” που θα μπορούσαν να θέσουν εκτός λειτουργίας όλο ή σημαντικό μέρος του ΑΔΑ. Χρειάζεται πολλή προσοχή στην επιλογή της ενεργειακά βέλτιστης μεθόδου δρομολόγησης διότι μια φαινομενικά “οικονομική” ενεργειακά μέθοδος δρομολόγησης μπορεί τελικά να μην είναι η καλύτερη αν αυτή οδηγεί στην ταχύτερη ενεργειακή εξάντληση κάποιου μέρους ενός ΑΔΑ και θέτει έτσι εκτός λειτουργίας ακόμη και ολόκληρο το ΑΔΑ. Για παράδειγμα, έστω ότι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης ΑΔΑ εφαρμόζει τη συνεχή δρομολόγηση των δεδομένων μέσω της συντομότερης διαδρομής έτσι ώστε να καταναλώνεται ενέργεια στον κατά το δυνατόν μικρότερο αριθμό κόμβων. Στην περίπτωση αυτή, οι κόμβοι της συγκεκριμένης διαδρομής που έχει επιλεγεί, θα χρησιμοποιούνται συνεχώς για τη μεταφορά των δεδομένων με αποτέλεσμα να εξαντληθούν ενεργειακά και ενδεχομένως το ΑΔΑ να καταρρεύσει. Την ίδια στιγμή θα υπάρχουν άλλοι κόμβοι του ΑΔΑ που δεν είχαν χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά δεδομένων οι οποίοι θα διαθέτουν ακόμη μεγάλα ενεργειακά αποθέματα. Γίνεται λοιπόν κατανοητή η πολυπλοκότητα της βέλτιστης επιλογής του κατάλληλου δικτυακού πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Κατά την επιλογή αυτή, πολλοί παράγοντες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, όπως ο χώρος στον οποίο βρίσκεται το ΑΔΑ, το είδος της εφαρμογής για την οποία αυτό χρησιμοποιείται, το πόσο συχνή, πόσο ακριβής και πόσο γρήγορη μετάδοση δεδομένων απαιτείται σε κάθε περίπτωση, το κατά πόσον είναι ανεκτή η απώλεια μέρους των δεδομένων. Πολλές φορές θα πρέπει να γίνουν συμβιβασμοί και να βρεθεί η χρυσή τομή ανάμεσα στη διάρκεια ζωής ενός ΑΔΑ και την ταχύτητα, τον όγκο, την ακρίβεια και την πληρότητα των μεταδιδόμενων δεδομένων.

2.3 Οι ιδιαιτερότητες της δικτυακής επικοινωνίας των ΑΔΑ

Η δικτυακή επικοινωνία των ΑΔΑ παρουσιάζει αρκετές ιδιαιτερότητες λόγω της διαφορετικής υλοποίησης και διασύνδεσής τους σε σχέση με τα κλασικά

ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα καθώς και λόγω των εφαρμογών για τις οποίες αυτά χρησιμοποιούνται.

Η σημαντικότερη ιδιαιτερότητα, όπως αναλύθηκε παραπάνω, είναι τα πεπερασμένα αποθέματα ενέργειας που διαθέτει ο κάθε κόμβος του ΑΔΑ.

Μια άλλη πολύ σημαντική ιδιαιτερότητα είναι η ανυπαρξία καλωδιακής σύνδεσης μεταξύ όλων κόμβων. Η μετάδοση είναι ασύρματη και το μέσο μετάδοσης είναι ο αέρας ή το νερό σε κάποιες περιπτώσεις υποβρυχίων ΑΔΑ. Το μέσο μετάδοσης θέτει αντίστοιχους περιορισμούς στην επικοινωνία των κόμβων ως προς το διαθέσιμο εύρος ζώνης (*bandwidth*) και την απόσταση μεταξύ τους. Οι περιορισμοί αυτοί κάνουν αδύνατη τη χρήση πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούν την τεχνική του *broadcasting*, δηλαδή τη δυνατότητα αποστολής από έναν κόμβο ενός μηνύματος που να μπορούν να το λαμβάνουν ταυτόχρονα όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι. Η τεχνική του *broadcasting* χρησιμοποιείται σε όλα τα ενσύρματα δίκτυα τόσο σε επίπεδο OSI 2 όσο και σε επίπεδο OSI 3 και τα αντίστοιχα πρωτόκολλα προβλέπουν διευθύνσεις *broadcast* στο σχήμα διευθυνσιοδότησής τους. Όμως στα ΑΔΑ ένα μήνυμα που είναι επιθυμητό να μεταδοθεί σε όλους τους κόμβους, θα πρέπει να μεταδοθεί από κόμβο σε κόμβο. Στην περίπτωση αυτή είναι άνευ ουσίας η εφαρμογή ενός καθολικού σχήματος διευθυνσιοδότησης (*global addressing scheme*). Για παράδειγμα, το κλασικό πρωτόκολλο IP λοιπόν που εφαρμόζεται σε όλα τα ενσύρματα δίκτυα δεν θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε ένα ΑΔΑ.

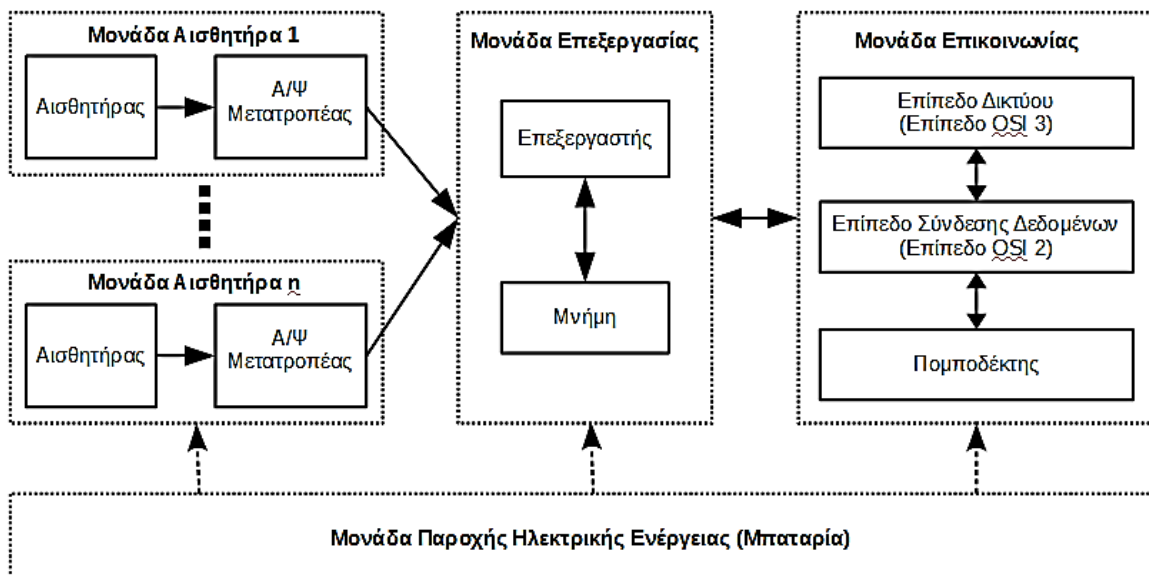
Μια άλλη ιδιαιτερότητα, που λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό όλων των πρωτοκόλλων δρομολόγησης των ΑΔΑ, είναι η ασύμμετρη ροή της κίνησης των δεδομένων προς μια κατεύθυνση, δηλαδή από όλους τους κόμβους αισθητήρων προς ένα κεντρικό σταθμό βάσης. Αντίθετα, η κίνηση από το σταθμό βάσης προς τους κόμβους είναι περιστασιακή και μικρή σε όγκο.

Στα ΑΔΑ συναντάται και μια ιδιαιτερότητα σε σχέση με τα δεδομένα που κατέχουν οι κόμβοι. Πολύ συχνά, γειτονικοί κόμβοι που μετρούν τα ίδια φυσικά μεγέθη διαθέτουν τα ίδια ή παραπλήσια δεδομένα. Αυτή η ομοιότητα των δεδομένων, είναι επιθυμητό να γίνεται αντιληπτή από το πρωτόκολλο δρομολόγησης με στόχο την αποφυγή της επανάληψης της μετάδοσης όμοιων δεδομένων άρα και την αποφυγή της άσκοπης χρήσης του δικτύου που συνεπάγεται άσκοπη κατανάλωση ενέργειας και δέσμευση του μέσου μετάδοσης

Τέλος, μια ιδιαιτερότητα που παίζει καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό των πρωτοκόλλων ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης στα ΑΔΑ είναι τα επιμέρους υποσυστήματα που διαθέτει ο κάθε κόμβος και οι ενεργειακές ανάγκες του καθενός από αυτά τα υποσυστήματα. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης θα πρέπει να φροντίζει για τον βέλτιστο συνδυασμό χρήσης των επιμέρους υποσυστημάτων του κάθε κόμβου με στόχο την ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας σε κάθε κόμβο. Η κατανάλωση της ενέργειας στα υποσυστήματα ενός κόμβου ΑΔΑ, θα παρουσιαστεί στην επόμενη παράγραφο.

2.4 Η κατανάλωση ενέργειας στα υποσυστήματα ενός κόμβου ΑΔΑ

Για το σωστό σχεδιασμό ενός πρωτοκόλλου ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης θα πρέπει να είναι εκ των προτέρων γνωστή η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την καθεμιά λειτουργία που μπορεί να υλοποιήσει ο κάθε κόμβος. Θα πρέπει λοιπόν να προηγηθεί η ανάλυση όλων των υποσυστημάτων που διαθέτει ένας κόμβος και να έχει αξιολογηθεί η κατανάλωση ενέργειας σε καθένα από τα υποσυστήματα αυτά. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, ένας κόμβος ΑΔΑ περιλαμβάνει μία ή περισσότερες μονάδες αισθητήρα, μία μονάδα επεξεργασίας και μια μονάδα επικοινωνίας.



Σχήμα 2.1: Οι μονάδες ενός κόμβου ΑΔΑ

Αναλυτικότερα, η κάθε μονάδα αισθητήρα διαθέτει έναν αισθητήρα για τη μέτρηση της τιμής ενός φυσικού μεγέθους και έναν μετατροπέα αναλογικό-σε-ψηφιακό (*A/D converter*) ο οποίος μετατρέπει σε ψηφιακές τις αναλογικές μετρήσεις του αισθητήρα. Η έξοδος του *A/D converter* στέλνει τα δεδομένα στη μονάδα επεξεργασίας.

Η μονάδα επεξεργασίας είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της λειτουργίας όλων των υπόλοιπων μονάδων του κόμβου, για την παραλαβή, επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων, για την εκτέλεση όλων των υπολογισμών που αφορούν την ελαχιστοποίηση του όγκου των δεδομένων που θα πρέπει να αποσταλούν για μετάδοση και για την εκτέλεση των υπολογισμών του πρωτοκόλλου δρομολόγησης και την αποθήκευση των αντίστοιχων δεδομένων.

Η μονάδα επικοινωνίας είναι υπεύθυνη για την αποστολή και την λήψη των δεδομένων από και προς τους υπόλοιπους κόμβους σύμφωνα με τις αντίστοιχες εντολές της μονάδας επεξεργασίας. Υλοποιεί τις λειτουργίες των επιπέδων OSI 2 και 3.

Ένας κόμβος ΑΔΑ μπορεί συχνά να περιλαμβάνει και μια μονάδα εντοπισμού θέσης (GPS) ή και μια μονάδα κίνησης που δίνει τη δυνατότητα στον κόμβο να μετακινείται. Για λόγους απλότητας αυτές οι προαιρετικές μονάδες δεν απεικονίζονται στο παραπάνω σχήμα.

Στους κόμβους των ΑΔΑ θα πρέπει να παρέχεται κατασκευαστικά η δυνατότητα απενεργοποίησης όποιων μονάδων των κόμβων δεν χρησιμοποιούνται σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, ενώ ταυτόχρονα το πρωτόκολλο δρομολόγησης θα πρέπει να λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εκμεταλλεύεται αυτή τη δυνατότητα.

Η έρευνα στο πεδίο της ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης έχει σαν στόχο τον περιορισμό της κατανάλωσης της ενέργειας των κόμβων, με το σχεδιασμό κατάλληλων πρωτοκόλλων δρομολόγησης που αναθέτουν σε κάποιους κόμβους ή υποσυστήματα των κόμβων την εκτέλεση συγκεκριμένων επικοινωνιών και υπολογισμών ενώ ταυτόχρονα αποτρέπουν άλλους κόμβους από το να κάνουν περιττές επικοινωνίες και υπολογισμούς που καταναλώνουν ενέργεια.

Για να αξιολογηθεί σωστά η ενεργειακή αποδοτικότητα ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης, θα πρέπει κατ' αρχήν να έχει υπολογισθεί η κατανάλωση ενέργειας στις επιμέρους μονάδες των κόμβων που παρουσιάστηκαν παραπάνω και με βάση αυτούς τους υπολογισμούς να αξιολογηθεί στη συνέχεια η ενεργειακή αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου. Στα πλαίσια της έρευνας για τον υπολογισμό

της κατανάλωσης ενέργειας από τις επιμέρους μονάδες ενός κόμβου ΑΔΑ έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής, η μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας καταναλώνεται από τη μονάδα επικοινωνίας ενός κόμβου. Για το λόγο αυτό η έρευνα για την ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση στα ΑΔΑ επικεντρώνεται κυρίως στο σχεδιασμό πρωτοκόλλων που καταναλώνουν τη λιγότερη δυνατή ενέργεια για την επικοινωνία των κόμβων. Είναι λοιπόν καθοριστικής σημασίας η σχεδίαση πρωτοκόλλων δρομολόγησης που περιορίζουν στην απολύτως απαραίτητη την ανάγκη μετάδοσης δεδομένων, άρα και τη διάρκεια λειτουργίας της μονάδας επικοινωνίας του κάθε κόμβου.

Ένα ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης θα πρέπει να φροντίζει λοιπόν ώστε να υπάρχει ο βέλτιστος συνδυασμός χρήσης όλων των επιμέρους μονάδων των κόμβων με στόχο τη μέγιστη αξιοποίηση των αποθεμάτων ενέργειας και κατά συνέπεια τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του ΑΔΑ. Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα της έρευνας για την κατανάλωση της ενέργειας στα επιμέρους υποσυστήματα ενός ΑΔΑ, επιχειρείται να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος λειτουργίας του δικτύου, ώστε αυτό να είναι στο σύνολό του όσο το δυνατόν αποδοτικότερο ενεργειακά. Η μέχρι στιγμής εκτενής έρευνα δεν έχει αναδείξει ένα πρωτόκολλο “πανάκεια” που να είναι το καταλληλότερο για όλες τις περιπτώσεις. Ανάλογα με το τύπο της εφαρμογής για την οποία χρησιμοποιείται ένα ΑΔΑ θα πρέπει να επιλέγεται και το κατάλληλο πρωτόκολλο που για τη συγκεκριμένη περίπτωση επιτυγχάνει τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση. Έτσι εξηγείται η ανάπτυξη δεκάδων πρωτοκόλλων δρομολόγησης καθώς και η μεγάλης έκτασης έρευνα που διεξάγεται στον τομέα αυτό.

Με στόχο την εύρεση του βέλτιστου από ενεργειακή άποψη συνδυασμού των λειτουργιών επικοινωνιών και υπολογισμών των κόμβων και την εύρεση μιας ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης, πολλά πρωτόκολλα δρομολόγησης εφαρμόζουν κάποιου είδους κατηγοριοποίηση των κόμβων των ΑΔΑ. Στις περιπτώσεις αυτές, οι κόμβοι κατηγοριοποιούνται είτε με βάση τα δεδομένα που κατέχουν είτε με βάση τη θέση τους σε μια προκαθορισμένη από το πρωτόκολλο ιεραρχία είτε με βάση τη θέση τους στο χώρο είτε με βάση διάφορους συνδυασμούς των κριτηρίων αυτών, όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα στη συνέχεια. Για παράδειγμα, οι κόμβοι που βρίσκονται σε κοντινή γεωγραφική απόσταση μεταξύ τους, είναι αναμενόμενο να συλλέγουν ίδια ή παρεμφερή

δεδομένα. Κατηγοριοποιώντας λοιπόν τους κόμβους είτε με βάση την παραπλήσια θέση στην οποία αυτοί βρίσκονται, είτε με βάση τα παραπλήσια δεδομένα που αυτοί κατέχουν και ελαχιστοποιώντας ανάλογα τις λειτουργίες τους (επικοινωνίες, υπολογισμούς) επιτυγχάνεται η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας χωρίς να προκαλείται συνολική απώλεια στα δεδομένα που το ΑΔΑ έχει αναλάβει ως αποστολή να συλλέξει. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε την αύξηση του χρόνου ζωής του ΑΔΑ και κατά συνέπεια τη δυνατότητα συλλογής δεδομένων για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Συμπερασματικά λοιπόν, μπορούμε να πούμε ότι τα πρωτόκολλα ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης στα ΑΔΑ προσπαθούν να εφαρμόσουν μια στρατηγική που συναντάται σε πάμπολλους τομείς της τεχνολογίας, της διοίκησης και της ζωής γενικότερα, και αυτή η στρατηγική είναι ο καταμερισμός των εργασιών και η αποφυγή της εκτέλεσης περιττών εργασιών με στόχο τη βέλτιστη αξιοποίηση των συνολικά διαθέσιμων πόρων. Για το σκοπό αυτό έχουν προταθεί και εφαρμόζονται, κατά περίπτωση, από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ΑΔΑ διάφορες στρατηγικές, από τις οποίες οι σημαντικότερες αναφέρονται στη συνέχεια.

2.5 Στρατηγικές ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης

2.5.1 Ιεραρχική δόμηση του ΑΔΑ

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που εφαρμόζουν τη στρατηγική της ιεραρχικής δόμησης του ΑΔΑ, δεν θεωρούν όλους τους κόμβους ισότιμους αλλά επιλέγουν κάποιους κόμβους τους οποίους θέτουν πιο ψηλά στην ιεραρχία και αναθέτουν σε αυτούς να συγκεντρώνουν τα δεδομένα από τους ιεραρχικά χαμηλότερους τους κόμβους που βρίσκονται υπό την επίβλεψή τους. Το πρωτόκολλο διαχωρίζει το δίκτυο σε συστάδες (*clusters*). Σε κάθε συστάδα επιλέγεται ένας κόμβος στον οποίο ανατίθεται ο ρόλος του επικεφαλής συστάδας (*cluster head*). Ο επικεφαλής συστάδας είναι υπεύθυνος για το συντονισμό των δραστηριοτήτων όλης της συστάδας, τη συγκέντρωση των δεδομένων από τους κόμβους που ανήκουν στη συστάδα αυτή και την επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων με άλλους επικεφαλής συστάδας με στόχο την προώθηση των δεδομένων στο σταθμό βάσης.

2.5.2 Επιλεκτική μετάδοση υποσυνόλου των διαθέσιμων δεδομένων

Σε πολλές περιπτώσεις και ανάλογα με την εφαρμογή, δεν είναι απαραίτητη η συνεχής αποστολή δεδομένων από τους κόμβους προς το σταθμό βάσης. Ενδεχομένως σε μια δεδομένη χρονική στιγμή οι κόμβοι να έχουν συλλέξει και να έχουν στη διάθεσή τους πλήθος δεδομένων για τα οποία όμως δεν υπάρχει αντίστοιχο ενδιαφέρον από την εφαρμογή. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί πρωτόκολλα δρομολόγησης που φροντίζουν για την αποστολή δεδομένων από τους κόμβους μόνο όταν εκδηλώνεται σχετικό ενδιαφέρον από το σταθμό βάσης. Η στρατηγική αυτή μπορεί να υλοποιείται με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος είναι η αποστολή ερωτημάτων (*queries*) από το σταθμό βάσης προς τους κόμβους όταν η βάση επιθυμεί να συλλέξει κάποια συγκεκριμένα δεδομένα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί τα ερωτήματα αυτά να αποστέλλονται από το σταθμό βάσης προς συγκεκριμένες τοποθεσίες μόνο. Επίσης μπορεί τα ερωτήματα να αφορούν μόνο ένα συγκεκριμένο είδος δεδομένων για τα οποία υπάρχει ενδιαφέρον και που τα δεδομένα αυτά αποτελούν ένα μικρό υποσύνολο των δεδομένων που έχουν στη διάθεσή τους οι κόμβοι. Ένας άλλος τρόπος υλοποίησης αυτής της στρατηγικής είναι το να “διαφημίζουν” οι κόμβοι τα δεδομένα που κατέχουν. Έτσι, σε πρώτη φάση, οι κόμβοι προωθούν στο δίκτυο μόνο τις πληροφορίες σχετικά με το είδος των δεδομένων που υπάρχουν διαθέσιμα. Ο όγκος των πληροφοριών αυτών είναι πολύ μικρότερος από τον όγκο των καθαυτό δεδομένων που κατέχουν οι κόμβοι. Σε δεύτερη φάση, με κατάλληλες λειτουργίες που υλοποιεί το πρωτόκολλο δρομολόγησης, ο σταθμός βάσης συλλέγει μόνο τα δεδομένα για τα οποία υπάρχει σχετικό ενδιαφέρον, γνωρίζοντας από πριν σε ποιους κόμβους θα πρέπει να απευθυνθεί για να τα συλλέξει.

2.5.3 Δρομολόγηση βασισμένη στη γεωγραφική θέση των κόμβων

Πολλά πρωτόκολλα δρομολόγησης ΑΔΑ χρησιμοποιούν την πληροφορία σχετικά με τη γεωγραφική θέση των κόμβων ως βασικό κριτήριο για την επιλογή των κατάλληλων διαδρομών δρομολόγησης. Αφού, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, στα ΑΔΑ δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ένα σχήμα διευθυνσιοδότησης των κόμβων όπως αυτό που χρησιμοποιείται στα κλασικά δίκτυα IP, η δρομολόγηση με βάση τη γεωγραφική θέση των κόμβων μπορεί να είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος δρομολόγησης. Όπως είναι γνωστό, η ποσότητα της

ενέργειας που απαιτείται να καταναλωθεί για την επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων, αυξάνεται γεωμετρικά όταν αυξάνεται η απόσταση μεταξύ τους. Έτσι, τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν αυτή τη στρατηγική δρομολόγησης, υπολογίζουν τις αποστάσεις μεταξύ των κόμβων και επιλέγουν τις βέλτιστες διαδρομές δρομολόγησης με στόχο τον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας.

Η πληροφορία για τη θέση των κόμβων στο χώρο μπορεί επίσης να χρησιμοποιείται και για την άντληση δεδομένων μόνο από μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή που ενδιαφέρει την εφαρμογή και για την αποφυγή της άσκοπης μετάδοσης δεδομένων στο δίκτυο από περιοχές για τις οποίες κάποια δεδομένη χρονική στιγμή δεν υπάρχει σχετικό ενδιαφέρον.

2.5.4 Διαμοιρασμός του φορτίου (*Load balancing*)

Η στρατηγική του διαμοιρασμού του φορτίου (*load balancing*) εφαρμόζεται από πολλά πρωτόκολλα, με στόχο την αποφυγή της ενεργειακής εξάντλησης μιας διαδρομής, που θα είχε ως πιθανή συνέπεια τον κατακερματισμό του ΑΔΑ. Σύμφωνα με αυτή τη στρατηγική, το πρωτόκολλο δρομολόγησης διαμοιράζει τη δικτυακή κίνηση χρησιμοποιώντας πολλαπλές παράλληλες διαδρομές για τη μεταφορά των δεδομένων. Ο διαμοιρασμός του φορτίου εκτός από το πλεονέκτημα της ισορροπημένης κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους του ΑΔΑ, προσφέρει και άλλα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την ποιότητα της επικοινωνίας. Πιο συγκεκριμένα, επιτυγχάνεται πιο αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων αφού σε περίπτωση που η επικοινωνία μέσω μιας διαδρομής διακοπεί για οποιοδήποτε λόγο, υπάρχουν ήδη σε λειτουργία εναλλακτικές παράλληλες διαδρομές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα. Επίσης, αυξάνεται η ταχύτητα μετάδοσης από άκρο σε άκρο αφού τα δεδομένα διαμοιράζονται και αποστέλλονται ταυτόχρονα μέσω πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Η στρατηγική του *load balancing* εφαρμόζεται με ένα διαφορετικό τρόπο και σε κάποια πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν τη στρατηγική της ιεραρχικής δόμησης του δικτύου, που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στις περιπτώσεις αυτές, το πρωτόκολλο επιβάλλει την εναλλαγή των κόμβων που επιλέγονται ως επικεφαλής της συστάδας. Έτσι αποφεύγεται η πρόωρη ενεργειακή εξάντληση των κόμβων που όταν λειτουργούν ως επικεφαλής της συστάδας καταναλώνουν περισσότερη

ενέργεια από τους υπόλοιπους κόμβους λόγω των περισσότερων λειτουργιών που εκτελούν.

2.5.5 Συσσωμάτωση δεδομένων (*Data aggregation*)

Συσσωμάτωση δεδομένων (*data aggregation*) είναι η διαδικασία που ακολουθείται για τη μείωση του όγκου των προς αποστολή δεδομένων τα οποία έχουν συλλεχθεί από διαφορετικές πηγές. Η συσσωμάτωση δεδομένων υλοποιείται με τη χρήση διάφορων υπολογιστικών διεργασιών όπως η εξάλειψη των αντιγράφων (*suppression*), ο υπολογισμός του ελάχιστου, του μέγιστου και του μέσου όρου. Αυτές οι διεργασίες μπορούν να υλοποιούνται μερικά ή ολικά σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο των διαδρομών από τους αισθητήρες προς το σταθμό βάσης, επιτρέποντας στο ΑΔΑ να επιτυγχάνει μια συνολική μείωση του όγκου των μεταδιδόμενων δεδομένων χωρίς απώλεια στη μεταδιδόμενη πληροφορία. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι υπολογιστικές διεργασίες καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια από τις λειτουργίες της μετάδοσης [11], μπορεί με αυτή την τεχνική να επιτευχθεί ουσιαστική μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Η στρατηγική αυτή εφαρμόζεται σε διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης [12], [13], [14], [15], [16], [17]. Σε κάποιες αρχιτεκτονικές δικτύου όλες οι λειτουργίες συσσωμάτωσης δεδομένων ανατίθενται σε κόμβους με επαυξημένη υπολογιστική δυνατότητα και εξειδίκευση [18].

2.5.6 Συγχώνευση δεδομένων (*Data fusion*)

Η συσσωμάτωση δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί και με τεχνικές επεξεργασίας σήματος. Στις περιπτώσεις αυτές, ένας κόμβος έχει τη δυνατότητα να παράγει ένα περισσότερο ακριβές σήμα χρησιμοποιώντας τεχνικές μείωσης του θορύβου και άλλες τεχνικές, όπως την τεχνική *beamforming* για τον συνδυασμό των σημάτων [11]. Σε αυτές τις τεχνικές συσσωμάτωσης δεδομένων αναφερόμαστε με τον όρο συγχώνευση δεδομένων (*data fusion*).

Οι στρατηγικές που παρουσιάστηκαν παραπάνω, αποτελούν τα βασικά αρχιτεκτονικά εργαλεία που έχει στη διάθεσή του ο σχεδιαστής ενός πρωτοκόλλου και που μπορεί να τις χρησιμοποιήσει με διάφορους συνδυασμούς προκειμένου να αναπτύξει ένα πρωτόκολλο ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης. Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι πολλά από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν

προταθεί κατά καιρούς, δεν εφαρμόζουν μόνο μια από τις στρατηγικές αυτές, αλλά συχνά εφαρμόζουν ταυτόχρονα διάφορους συνδυασμούς αυτών των στρατηγικών με στόχο πάντα την ενεργειακά αποδοτικότερη δρομολόγηση στο ΑΔΑ.

(Κενό φύλλο)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΤΑ ΑΔΑ

Η δικτυακή δρομολόγηση στα ΑΔΑ προσελκύει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον και αντίστοιχη προσπάθεια. Λόγω των ιδιομορφιών που παρουσιάζουν τα ΑΔΑ σε σχέση με τα κλασικά δίκτυα και λόγω των πολλών και διαφορετικών απαιτήσεων των εφαρμογών στις οποίες αυτά χρησιμοποιούνται, έχουν προταθεί κατά καιρούς πολλές και διαφορετικές προσεγγίσεις της δρομολόγησης σε επίπεδο δικτύου. Όλες οι προσεγγίσεις έχουν ως βασικό στόχο την ενεργειακά αποδοτικότερη λειτουργία του ΑΔΑ και τη βέλτιστη αξιοποίηση των ενεργειακών αποθεμάτων που αυτό διαθέτει.

Μια κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης με βάση την προσέγγιση που αυτά ακολουθούν ως προς τη δρομολόγηση, είναι εξαιρετικά χρήσιμη στο σχεδιασμό ενός ΑΔΑ προκειμένου αυτός να επιλέξει το κατάλληλο πρωτόκολλο. Κατά την επιλογή του πρωτοκόλλου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά, η αρχιτεκτονική και οι δυνατότητες του κάθε ΑΔΑ καθώς και οι ανάγκες της εφαρμογής στην οποία αυτό θα χρησιμοποιηθεί. Αυτή η επιλογή είναι κρίσιμη για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την αύξηση της διάρκειας ζωής του ΑΔΑ.

Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί διάφορες κατηγοριοποιήσεις των πρωτοκόλλων ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης στα ΑΔΑ. Οι σημαντικότερες και πιο ολοκληρωμένες εργασίες στον τομέα αυτό είναι οι [1], [2] και [19].

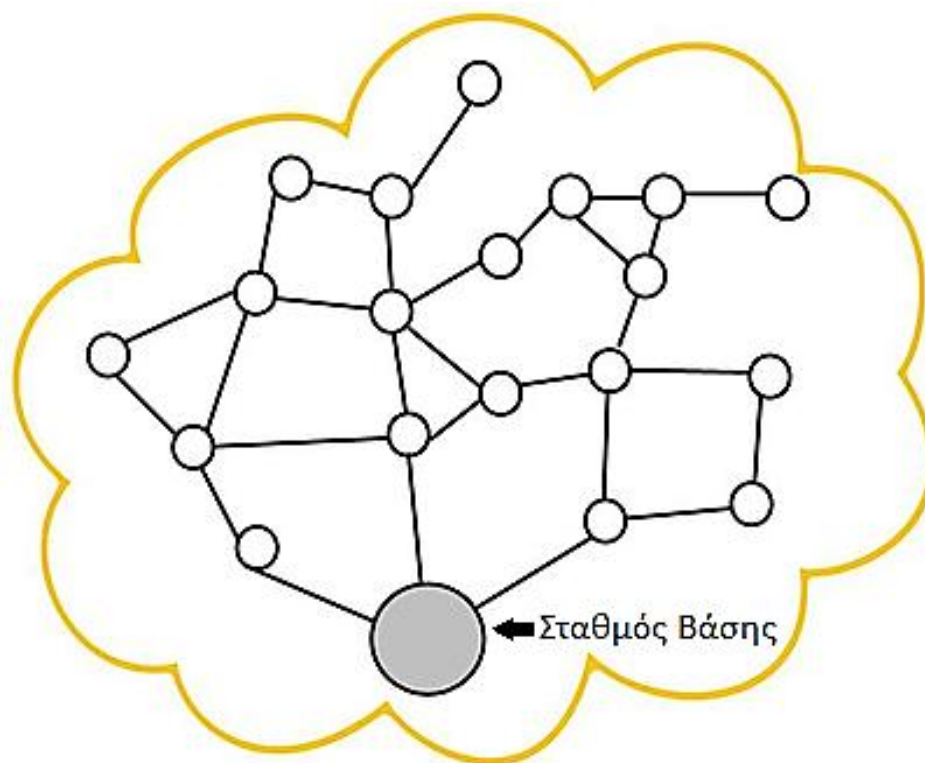
Στην παρούσα εργασία επιχειρείται ένας συγκερασμός των κατηγοριοποιήσεων που έχουν προταθεί μέχρι στιγμής και προτείνεται μία κατηγοριοποίηση σύμφωνα με τη βασική στρατηγική ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης που ακολουθούν τα διάφορα πρωτόκολλα των ΑΔΑ. Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε κατηγορίας έτσι ώστε η κατηγοριοποίηση αυτή να είναι ένας χρήσιμος οδηγός στην επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου δρομολόγησης ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία θα χρησιμοποιηθεί το ΑΔΑ.

3.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τη Δομή του Δικτύου

Η κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων με βάση τη δομή του δικτύου έχει ως κριτήριο την ιεράρχηση που ακολουθείται για την επικοινωνιακή λειτουργία των κόμβων. Σύμφωνα με κάποια πρωτόκολλα όλοι οι κόμβοι θεωρούνται ισότιμοι και επικοινωνούν μεταξύ τους με τον ίδιο τρόπο ενώ άλλα πρωτόκολλα εφαρμόζουν μια ιεράρχηση των κόμβων και με βάση αυτή την ιεράρχηση γίνεται η δρομολόγηση των δεδομένων. Έτσι λοιπόν, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση αυτή προκύπτουν δύο κατηγορίες πρωτοκόλλων: τα επίπεδα πρωτόκολλα και τα ιεραρχικά πρωτόκολλα.

3.1.1 Επίπεδα πρωτόκολλα

Στα πρωτόκολλα που εντάσσονται στην κατηγορία των επίπεδων πρωτοκόλλων, όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι ισότιμοι και δεν διαφοροποιούνται ως προς τις λειτουργίες που εκτελούν.



Σχήμα 3.1: Επίπεδο Πρωτόκολλο

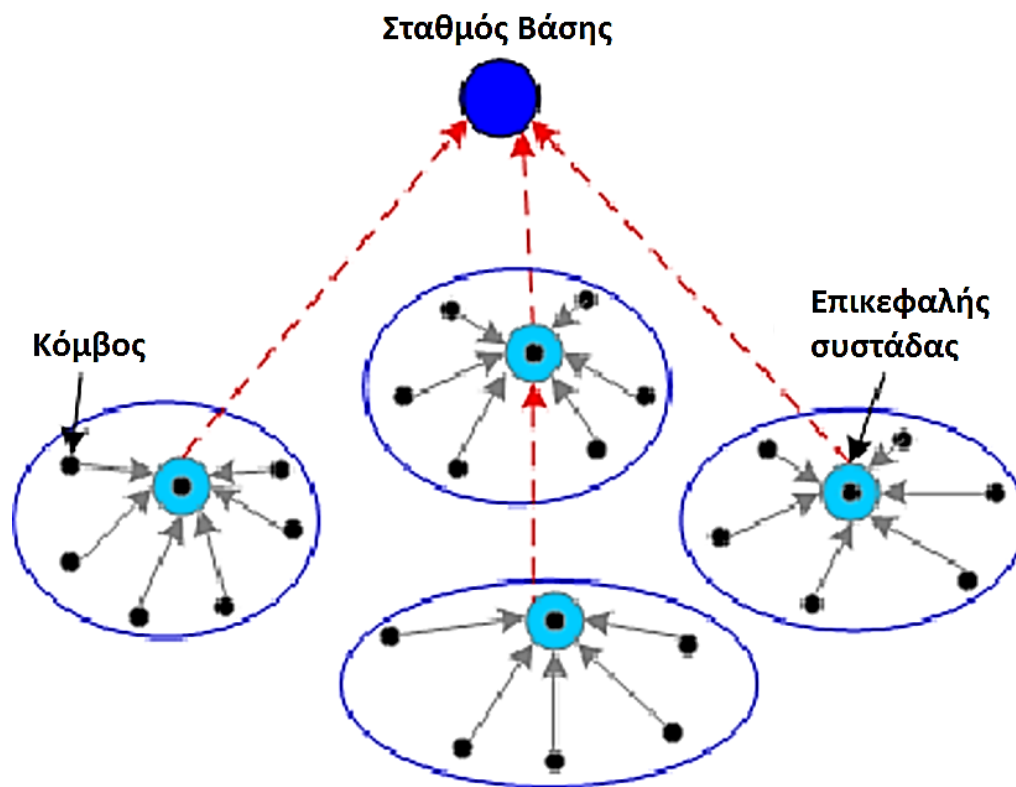
Το βασικό πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής αυτής είναι η απλότητα στη σχεδίαση και το ότι δεν απαιτούνται κάποιοι ιδιαίτεροι υπολογισμοί και λειτουργίες για την ιεραρχική δόμηση και λειτουργία των κόμβων του ΑΔΑ. Όμως αυτή η μονοεπίπεδη αρχιτεκτονική μπορεί να οδηγήσει στη γρήγορη ενεργειακή εξάντληση του σταθμού βάσης και των κόμβων που βρίσκονται κοντά σε αυτόν, ειδικά όταν το ΑΔΑ διαθέτει μεγάλο αριθμό κόμβων. Επίσης μπορεί να επιφέρει μη αποδεκτές καθυστερήσεις στη λήψη των δεδομένων λόγω της συμφόρησης που μπορεί να δημιουργηθεί κοντά στο σταθμό βάσης. Η αρχιτεκτονική αυτή δεν παρέχει επεκτασιμότητα και δεν προτείνεται για ΑΔΑ μεγάλης κλίμακας, μπορεί όμως να είναι ιδανική για μικρά δίκτυα με περιορισμένο αριθμό κόμβων.

3.1.2 Ιεραρχικά πρωτόκολλα

Τα πρωτόκολλα που εντάσσονται στην κατηγορία αυτή, εφαρμόζουν τη στρατηγική της ιεραρχικής δόμησης του ΑΔΑ που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με στόχο την καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα, και τη μεγαλύτερη σταθερότητα και επεκτασιμότητα του δικτύου. Οι κόμβοι οργανώνονται σε συστάδες και σε κάθε συστάδα επιλέγεται ένας κόμβος που αναλαμβάνει το ρόλο του επικεφαλής της συστάδας. Ο επικεφαλής της κάθε συστάδας είναι υπεύθυνος για το συντονισμό των δραστηριοτήτων της συστάδας του και για τη δρομολόγηση των δεδομένων από και προς τους επικεφαλής των υπόλοιπων συστάδων με τελικό προορισμό το σταθμό βάσης. Οι απλοί κόμβοι εντός της κάθε συστάδας επικοινωνούν μόνο με κόμβους που ανήκουν στην ίδια συστάδα.

Αυτή η αρχιτεκτονική θυμίζει την αρχιτεκτονική των υποδικτύων (*subnetting*) που εφαρμόζεται στα κλασικά IP δίκτυα, με τον επικεφαλής της συστάδας ενός ΑΔΑ να έχει το ρόλο της προεπιλεγμένης πύλης (*default gateway*) για το υποδίκτυο-συστάδα του και να είναι ένας είδος δρομολογητή (*router*) που αναλαμβάνει τη δρομολόγηση των δεδομένων εκτός της συστάδας. Με αυτή την πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική, επιτυγχάνεται μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του ΑΔΑ. Επιτυγχάνεται επίσης μεγαλύτερη αξιοπιστία και σταθερότητα στη μετάδοση των δεδομένων καθώς και καλύτερη επεκτασιμότητα του ΑΔΑ. Τα κριτήρια για την επιλογή του κόμβου που θα αναλάβει το ρόλο του επικεφαλής συστάδας είναι η εγγύτητα του κόμβου με τους υπόλοιπους κόμβους της συστάδας, που έχει σαν συνέπεια τη μικρότερη

κατανάλωση ενέργειας για την επικοινωνία του επικεφαλής συστάδας με τους υπόλοιπους κόμβους της συστάδας του, καθώς και τα ενεργειακά αποθέματα ενός κόμβου αφού ο επικεφαλής συστάδας καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από τους απλούς κόμβους λόγω των περισσότερων λειτουργιών που εκτελεί.



Σχήμα 3.2: Ιεραρχικό Πρωτόκολλο

Τα ιεραρχικά πρωτόκολλα συνήθως εφαρμόζουν στους επικεφαλής συστάδας και τις στρατηγικές της συσσωμάτωσης δεδομένων (*data aggregation*) και της συγχώνευσης δεδομένων (*data fusion*) που έχουν περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συχνά εφαρμόζεται και η στρατηγική του διαμοιρασμού του φορτίου (*load balancing*), σύμφωνα με τη οποία το πρωτόκολλο επιβάλλει την εναλλαγή των κόμβων που επιλέγονται ως επικεφαλής της συστάδας. Έτσι αποφεύγεται η πρόωρη ενεργειακή εξάντληση όσων κόμβων λειτουργούν ως επικεφαλής συστάδας και καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια από τους υπόλοιπους κόμβους. Οι απαραίτητοι υπολογισμοί που πρέπει να εκτελούνται από ένα ιεραρχικό πρωτόκολλο για τη δημιουργία και τη διατήρηση της ιεραρχικής δομής καθώς και οι υπολογισμοί δρομολόγησης είναι περισσότεροι και πιο περίπλοκοι

από τους υπολογισμούς που εκτελεί ένα επίπεδο πρωτόκολλο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την κατανάλωση περισσότερης ενέργειας για αυτούς τους υπολογισμούς. Όμως, συνήθως το ενεργειακό όφελος που προκύπτει από τον περιορισμό του όγκου των δεδομένων που μεταδίδονται και από τη μείωση της απόστασης μετάδοσης από κόμβο σε κόμβο, καθιστά τα ιεραρχικά πρωτόκολλα ενεργειακά αποδοτικότερα από τα επίπεδα πρωτόκολλα. Τα ιεραρχικά πρωτόκολλα είναι κατάλληλα για ΑΔΑ με μεγάλο αριθμό κόμβων που καλύπτουν μεγάλες περιοχές και μεταφέρουν μεγάλο όγκο δεδομένων.

3.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τον τρόπο επιλογής των επιθυμητών δεδομένων

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που εντάσσονται σε αυτή την κατηγοριοποίηση, λειτουργούν «δεδομένο-κεντρικά», εξετάζοντας το είδος των δεδομένων που κατέχουν οι κόμβοι καθώς και το είδος των δεδομένων για το οποίο υπάρχει ενδιαφέρον από το σταθμό βάσης. Κύρια λειτουργία των πρωτοκόλλων αυτών είναι η επιλογή των δεδομένων που θα μεταδοθούν από τους κόμβους προς το σταθμό βάσης. Αυτή η λειτουργία υλοποιείται με τη χρήση κατάλληλων αρχιτεκτονικών δρομολόγησης που έχουν σαν στόχο την ενεργειακά αποδοτικότερη εκμετάλλευση του δικτύου για τη συλλογή των δεδομένων από την εφαρμογή. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα πρωτόκολλα εφαρμόζουν τη γενική στρατηγική της επιλεκτικής μετάδοσης ενός υποσυνόλου των διαθέσιμων δεδομένων που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αναμενόμενο είναι, τα πρωτόκολλα αυτά να αποδίδουν καλύτερα στις εφαρμογές που δεν απαιτείται συνεχής, σταθερή ροή δεδομένων από τους κόμβους προς το σταθμό βάσης. Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση αυτή, τα πρωτόκολλα ανάλογα με την υλοποίηση που εφαρμόζουν, μπορούν να ενταχθούν στις εξής δύο κατηγορίες: πρωτόκολλα βασιζόμενα στο ερώτημα (*query-based protocols*) και πρωτόκολλα βασιζόμενα στη διαπραγμάτευση (*negotiation-based protocols*).

3.2.1 Πρωτόκολλα βασιζόμενα στο ερώτημα (*query-based protocols*)

Στα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας, ένα ερώτημα (*query*) για τη συλλογή ενός συγκριμένου είδους δεδομένων διαδίδεται στο δίκτυο από το σταθμό βάσης προς τους κόμβους. Ο κάθε κόμβος που έχει στην κατοχή του τα αντίστοιχα δεδομένα τα στέλνει στον κόμβο από τον οποίο έλαβε το ερώτημα με τελικό

προορισμό το σταθμό βάσης. Αυτή η αρχιτεκτονική μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την παράλληλη μετάδοση των ίδιων δεδομένων μέσω πολλών παράλληλων διαδρομών, πράγμα που αυξάνει την αξιοπιστία της μετάδοσης των δεδομένων από τους κόμβους προς το σταθμό βάσης, με τίμημα την άσκοπη χρήση των πόρων του δικτύου για τη μετάδοση της ίδιας πληροφορίας μέσω διαφορετικών παράλληλων διαδρομών.

3.2.2 Πρωτόκολλα βασιζόμενα στη διαπραγμάτευση (*negotiation-based protocols*)

Τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν διαπραγματεύσεις μεταδεδομένων με στόχο τον περιορισμό της περιττής κίνησης στο δίκτυο. Σύμφωνα με την υλοποίηση αυτή, τα δεδομένα που έχουν στην κατοχή τους οι κόμβοι περιγράφονται με τη βοήθεια αντίστοιχων μεταδεδομένων. Τα μεταδεδομένα έχουν σημαντικά μικρότερο όγκο από τα δεδομένα που περιγράφουν, οπότε από ενεργειακής άποψης είναι προτιμότερο να διακινούνται στο δίκτυο μεταδεδομένα και να περιορίζεται η διακίνηση των κανονικών δεδομένων στην απολύτως απαραίτητη μόνο. Εδώ το πρωτόκολλο δρομολόγησης υλοποιεί σε πρώτη φάση μια διαδικασία διαπραγμάτευσης μεταξύ των κόμβων, χρησιμοποιώντας μεταδεδομένα μόνο. Το αποτέλεσμα αυτής της διαπραγμάτευσης οδηγεί, σε δεύτερη φάση, στην επιλογή και μετάδοση μόνο των απαραίτητων δεδομένων. Πιο αναλυτικά, όταν ένας κόμβος έχει στην κατοχή του κάποια δεδομένα, στέλνει στους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου ένα διαφημιστικό μήνυμα μεταδεδομένων που περιγράφουν τα δεδομένα αυτά. Στη συνέχεια, αν κάποιος κόμβος έχει ενδιαφέρον για τα δεδομένα που διαφημίζονται, στέλνει ένα μήνυμα αιτήματος στον κόμβο που τα κατέχει, ζητώντας να του αποσταλούν τα δεδομένα αυτά. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται πολύ καλή ενεργειακή εκμετάλλευση του ΑΔΑ. Ένα μειονέκτημα των πρωτοκόλλων της κατηγορίας αυτής είναι η μη εγγυημένη μετάδοση των δεδομένων από τους κόμβους που τα κατέχουν στο σταθμό βάσης ειδικά όταν μεταξύ τους παρεμβάλλονται κόμβοι που δεν έχουν αντίστοιχο ενδιαφέρον για τα δεδομένα αυτά.

Αξίζει να αναφερθεί ότι τόσο τα πρωτόκολλα βασιζόμενα στο ερώτημα όσο και τα πρωτόκολλα βασιζόμενα στη διαπραγμάτευση, συνήθως εφαρμόζουν και

διάφορες μεθόδους συσσωμάτωσης ή και συγχώνευσης δεδομένων σε διάφορα σημεία της διαδρομής από τους κόμβους προς το σταθμό βάσης, με στόχο την περαιτέρω μείωση του όγκου των μεταδιδόμενων δεδομένων και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του ΑΔΑ.

3.3 Κατηγοριοποίηση με βάση την τοπολογία: Πρωτόκολλα βασιζόμενα στη γεωγραφική θέση των κόμβων

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που εντάσσονται σε αυτή την κατηγορία, θέτουν ως βασικό κριτήριο των αποφάσεων δρομολόγησης τη γεωγραφική θέση των κόμβων του ΑΔΑ. Μπορούν να εφαρμοσθούν σε ΑΔΑ που οι κόμβοι τους διαθέτουν μονάδα εντοπισμού θέσης. Βασική τους λειτουργία είναι η εκτέλεση υπολογισμών που λαμβάνουν ως δεδομένα τη γεωγραφική θέση των κόμβων και υπολογίζουν την απόσταση μεταξύ τους έτσι ώστε στη συνέχεια τα πρωτόκολλα αυτά να συγκρίνουν την κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και να επιλέγουν τη βέλτιστη από ενεργειακή άποψη διαδρομή.

Επίσης η πληροφορία σχετικά με τη θέση των κόμβων μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου ο σταθμός βάσης να αντλήσει δεδομένα μόνο από μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή για την οποία υπάρχει ενδιαφέρον. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη ενεργειακή εκμετάλλευση του δικτύου αφού δεν σπαταλούνται πόροι για μετάδοση δεδομένων από περιοχές για τις οποίες δεν υπάρχει αντίστοιχο ενδιαφέρον από την εφαρμογή.

3.4 Κατηγοριοποίηση με βάση την αξιοπιστία της μετάδοσης

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που εντάσσονται σε αυτή την κατηγοριοποίηση, θέτουν ως προτεραιότητα την αξιοπιστία της μετάδοσης. Κάποια πρωτόκολλα προκειμένου να εξασφαλίσουν ανθεκτικότητα σε τυχόν διακοπές της επικοινωνίας μεταξύ κάποιων κόμβων, εφαρμόζουν τη στρατηγική του διαμοιρασμού φορτίου που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο κάνοντας χρήση πολλαπλών παράλληλων διαδρομών για τη μετάδοση των δεδομένων. Άλλα πρωτόκολλα φροντίζουν να παρέχουν εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας (*Quality of Service, QoS*) ικανοποιώντας συγκεκριμένες μετρήσιμες απαιτήσεις όπως η μέγιστη επιτρεπτή καθυστέρηση (*delay*) και το εγγυημένο ελάχιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης (*bandwidth*) για τη μετάδοση των δεδομένων από άκρο σε άκρο. Τα πρωτόκολλα

που εντάσσονται σε αυτή την κατηγοριοποίηση παρέχουν τη μέγιστη δυνατή αξιοπιστία στη μετάδοση των δεδομένων. Όμως οι κόμβοι του δικτύου έχουν περισσότερο επεξεργαστικό φόρτο αφού θα πρέπει να εκτελούν περίπλοκους υπολογισμούς για να διατηρούν περίπλοκους πίνακες δρομολόγησης και να εξασφαλίζουν συγκεκριμένα ελάχιστα επίπεδα ποιότητας επικοινωνίας. Με βάση τα παραπάνω, τα πρωτόκολλα που κατηγοριοποιούνται με βάση την αξιοπιστία μετάδοσης μπορούν να ενταχθούν στις εξής δύο κατηγορίες: πρωτόκολλα πολλαπλών παράλληλων διαδρομών και πρωτόκολλα ποιότητας υπηρεσίας (*Quality of Service, QoS*).

3.4.1 Πρωτόκολλα πολλαπλών παράλληλων διαδρομών

Για την υλοποίηση των απαιτήσεων ως προς την αξιοπιστία της επικοινωνίας, τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν διάφορες υλοποιήσεις της στρατηγικής του διαμοιρασμού φορτίου με τη χρήση παράλληλων διαδρομών που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα πρωτόκολλα πολλαπλών παράλληλων διαδρομών, εκτός από αξιοπιστία, προσφέρουν και μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης αφού τα δεδομένα διαμοιράζονται και αποστέλλονται ταυτόχρονα μέσω πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

3.4.2 Πρωτόκολλα ποιότητας υπηρεσίας (*Quality of Service, QoS*)

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που εντάσσονται σε αυτή την κατηγορία, θέτουν ως προτεραιότητα την παροχή εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίας (*Quality of Service, QoS*). Αυτό σημαίνει ότι παρέχεται εγγυημένη μέγιστη καθυστέρηση (*delay*) και εγγυημένο διαθέσιμο εύρος ζώνης (*bandwidth*) για τη μετάδοση των δεδομένων από άκρο σε άκρο. Συνήθως τα πρωτόκολλα αυτά δεσμεύουν εκ των προτέρων συγκεκριμένες αξιόπιστες διαδρομές και αντίστοιχους πόρους του δικτύου που ικανοποιούν τις ελάχιστες απαιτήσεις από πλευράς μέγιστης καθυστέρησης και εύρους ζώνης. Τέτοιου είδους πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (*real-time*) για μετάδοση πολυμέσων (εικόνας, ήχου, βίντεο). Στο σχεδιασμό αυτών των πρωτοκόλλων πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα πρωτόκολλα ποιότητας υπηρεσίας που έχουν προταθεί και εφαρμόζονται στα κλασικά ενσύρματα δίκτυα, δεν βρίσκουν εφαρμογή στα ΑΔΑ, λόγω των

περιορισμών που υπάρχουν στα ΑΔΑ ως προς την κατανάλωση ενέργειας, ως προς το διαθέσιμο εύρος ζώνης και ως προς την απόσταση μεταξύ των κόμβων.

Ολοκληρώνοντας εδώ την παρουσίαση των κατηγοριών των πρωτοκόλλων ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης σε ΑΔΑ, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η επιχειρούμενη κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό, θα ήταν προτιμότερο να ιδωθεί σαν τέσσερεις διαφορετικές προσεγγίσεις της προσπάθειας για την κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων. Οι παραπάνω κατηγορίες δεν έχουν απολύτως σαφή όρια μεταξύ τους. Υπάρχουν πρωτόκολλα που ανάλογα με την προσέγγιση που ακολουθείται για την κατηγοριοποίησή τους, μπορούν να ενταχθούν σε παραπάνω από μια από τις κατηγορίες που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο αυτό.

(Κενό φύλλο)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΤΑ ΑΔΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η συγκριτική ανάλυση των πρωτοκόλλων ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης σε ΑΔΑ ανά κατηγορία, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που προτάθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτή η συγκριτική παρουσίαση των πρωτοκόλλων έχει σαν στόχο να αποτελέσει ένα χρήσιμο οδηγό για την επιλογή του καταλληλότερου πρωτοκόλλου δρομολόγησης που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα ΑΔΑ ανάλογα με την εφαρμογή του. Για κάθε πρωτόκολλο γίνεται μια σύντομη παρουσίασή του και στη συνέχεια αναφέρονται τα **πλεονεκτήματα** και τα **μειονεκτήματά** του καθώς και τα εξής χαρακτηριστικά του:

- **Επεκτασιμότητα (scalability):** Η ικανότητα ενός πρωτοκόλλου να εξακολουθεί να λειτουργεί αποτελεσματικά σε ενδεχόμενη μεγάλη αύξηση του αριθμού των κόμβων του ΑΔΑ, δηλαδή η ικανότητα ενός πρωτοκόλλου να παραμένει αποδοτικό ανεξάρτητα από το μέγεθος του ΑΔΑ.
- **Κινητικότητα (mobility):** Η ικανότητα ενός πρωτοκόλλου να λειτουργεί αποτελεσματικά σε ΑΔΑ των οποίων οι κόμβοι είναι κινούμενοι. Η κινητικότητα των κόμβων είναι απαραίτητη σε κάποιες εφαρμογές των ΑΔΑ, παρά το γεγονός ότι οι περισσότερες αρχιτεκτονικές ΑΔΑ λαμβάνουν ως δεδομένο ότι οι κόμβοι είναι στατικοί.
- **Τρόπος δρομολόγησης:** Ο τρόπος δρομολόγησης που χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο δικτύου για να μεταφέρει πακέτα δεδομένων από τον αποστολέα στον παραλήπτη επιλέγοντας την αποδοτικότερη διαδρομή. Για παράδειγμα, η διαδρομή αυτή μπορεί να είναι η συντομότερη με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους ή μια διαδρομή που μεγιστοποιεί τη συνολική διάρκεια ζωής του ΑΔΑ λαμβάνοντας υπόψη την εναπομείνουσα ενέργεια του κάθε κόμβου.
- **Περιοδικά μηνύματα:** Είναι τα μηνύματα που ανταλλάσσουν οι κόμβοι έτσι ώστε να παραμένουν ενήμεροι σχετικά με το ποιοι κόμβοι του ΑΔΑ εξακολουθούν να λειτουργούν. Στις περιπτώσεις που το πρωτόκολλο

χρησιμοποιεί τέτοιου είδους μηνύματα, θα αναφέρεται και το είδος των μηνυμάτων αυτών.

- **Στιβαρότητα:** Ένα πρωτόκολλο που εξακολουθεί να λειτουργεί αποτελεσματικά ακόμη και όταν προκύπτουν ασυνήθιστες καταστάσεις, όπως για παράδειγμα ξαφνικές αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου, θεωρείται στιβαρό πρωτόκολλο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κάποια από τα πρωτόκολλα που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό, μπορούν να ενταχθούν σε περισσότερες από μία κατηγορίες πρωτοκόλλων σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που προτείνεται. Αυτά τα πρωτόκολλα θα παρουσιαστούν μόνο σε μία κατηγορία, σε αυτή που κυρίως ανήκουν σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους, και θα αναφερθούν εκεί και τα χαρακτηριστικά όποιας άλλης κατηγορίας διαθέτουν.

4.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τη Δομή του Δικτύου

4.1.1 Επίπεδα πρωτόκολλα

Τα επίπεδα πρωτόκολλα, διαθέτουν σχετικά απλή αρχιτεκτονική και μπορούν να αποτελούν την ιδανική λύση για εφαρμογή σε μικρά σε έκταση ΑΔΑ με περιορισμένο αριθμό κόμβων. Δεν παρέχουν επεκτασιμότητα και δεν προτείνονται για εφαρμογή σε ΑΔΑ με μεγάλο αριθμό κόμβων που καλύπτουν μεγάλες περιοχές και μεταφέρουν μεγάλο όγκο δεδομένων. Στις αμέσως επόμενες παραγράφους ακολουθεί η παρουσίαση των επιπέδων πρωτοκόλλων.

4.1.1.1 WRP (Wireless Routing Protocol)

Το WRP [20] είναι ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί πίνακες δρομολόγησης για τη λειτουργία του. Κάθε κόμβος του ΑΔΑ διατηρεί τους εξής πίνακες:

- Πίνακα Αποστάσεων (*Distance Table (DT)*),
- Πίνακα Δρομολόγησης (*Routing Table (RT)*),
- Πίνακα Κόστους Συνδέσεων (*Link Cost Table (LCT)*), και
- Λίστα Αναμετάδοσης Μηνυμάτων (*Message Retransmission List (MRL)*).

Με αυτό τον τρόπο το WRP διατηρεί συνεχώς μια επικαιροποιημένη εικόνα του δικτύου και μπορεί πολύ γρήγορα να παρέχει εναλλακτική δρομολόγηση σε περίπτωση μη λειτουργίας μιας σύνδεσης.

Πλεονεκτήματα: Γρήγορη ανάκαμψη σε περίπτωση μη λειτουργίας μιας σύνδεσης.

Μειονεκτήματα: Απαιτήση για αυξημένη μνήμη και υπολογιστική ισχύ σε κάθε κόμβο του ΑΔΑ για τη διατήρηση πολλών πινάκων δρομολόγησης. Δεν ενδείκνυται για πολύ δυναμικά καθώς και για πολύ μεγάλα σε έκταση δίκτυα.

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Περιορισμένη.

Τρόπος δρομολόγησης: Το κοντύτερο μονοπάτι (*Shortest Path*).

Περιοδικά μηνύματα: Ανταλλαγή πινάκων δρομολόγησης.

Στιβαρότητα: Χαμηλή.

4.1.1.2 TBRPF (The Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding Protocol)

Το πρωτόκολλο TBRPF [21], [22] προκειμένου να ενημερώσει τους κόμβους σχετικά με τη δρομολόγηση, μεταδίδει μόνο τις διαφορές μεταξύ της προηγούμενης και της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μεταδίδονται μικρότερα μηνύματα δρομολόγησης, πράγμα που δίνει τη δυνατότητα να μεταδίδονται πιο συχνά τα μηνύματα αυτά και οι κόμβοι να διαθέτουν πιο επικαιροποιημένη γνώση της κατάστασης του δικτύου. Το TBRPF, όπως υποδεικνύει και το όνομά του, στέλνει εξαγγελίες (*broadcasts*) κατά την αντίθετη φορά της ροής των δεδομένων (δηλαδή από το σταθμό βάσης προς τους ακραίους κόμβους) διαμέσου του δένδρου δρομολόγησης σχετικά με την κατάσταση των συνδέσεων του δικτύου. Η πληροφόρηση αυτή χρησιμοποιείται από τους κόμβους προκειμένου να δρομολογήσουν τα δεδομένα τους από το κοντύτερο μονοπάτι (*shortest path*), δηλαδή από το μονοπάτι με το μικρότερο αριθμό ενδιάμεσων κόμβων (*minimum-hop path*). Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του TBRPF είναι η δυνατότητά του για δρομολόγηση των δεδομένων μέσω πολλαπλών παράλληλων διαδρομών, πράγμα που προσδίδει μεγαλύτερη ταχύτητα και αξιοπιστία.

Πλεονεκτήματα: Γρήγορη ανάκαμψη σε περίπτωση μη λειτουργίας μιας σύνδεσης. Μικρότερος όγκος μεταδιδόμενης πληροφορίας δρομολόγησης.

Ταχύτερη ενημέρωση για την κατάσταση του δικτύου. Δυνατότητα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Μειονεκτήματα: Δεν ενδείκνυται για δίκτυα περιορισμένης κινητικότητας.

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Καλή.

Τρόπος δρομολόγησης: Το κοντύτερο μονοπάτι (*Shortest Path*).

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα "Hello".

Στιβαρότητα: Καλή.

4.1.1.3 TORA (Temporarily Ordered Routing Algorithm)

Ο αλγόριθμος TORA [23] ακολουθεί μια διαφορετική προσέγγιση με στόχο τη μείωση της συνεχούς διακίνησης πληροφοριών δρομολόγησης που καταναλώνει πόρους του δικτύου. Οι κόμβοι δεν διατηρούν πίνακες δρομολόγησης για όλο το δίκτυο αλλά, όπως υποδεικνύει και το όνομα του αλγορίθμου, οι κόμβοι κατατάσσονται σύμφωνα με το "ύψος" τους. Ως "ύψος" (*height*) ορίζεται η απόσταση ενός κόμβου από τον προορισμό των δεδομένων δηλαδή από το σταθμό βάσης. Όσο πιο μακριά από τον προορισμό βρίσκεται ο κόμβος, τόσο μεγαλύτερο "ύψος" έχει. Κάθε κόμβος γνωρίζει το δικό του "ύψος" (*height*), όπως και το "ύψος" των άμεσα συνδεδεμένων γειτονικών του κόμβων. Τα πακέτα δεδομένων προωθούνται πάντα από κόμβους με μεγαλύτερο ύψος προς κόμβους με χαμηλότερο ύψος. Με την αρχιτεκτονική αυτή, όταν προκύπτουν αλλαγές στην τοπολογία των κόμβων, τα μηνύματα ελέγχου της δρομολόγησης περιορίζονται κοντά στη συγκεκριμένη περιοχή και αποφεύγεται η ανταλλαγή μηνυμάτων σε όλο το δίκτυο με την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας που αυτό συνεπάγεται. Το TORA δίνει τη δυνατότητα για δρομολόγηση μέσω πολλαπλών παράλληλων διαδρομών καθώς και για multicasting.

Πλεονεκτήματα: Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας με την αποστολή μηνυμάτων δρομολόγησης σε μικρές περιοχές και μόνο είναι απαραίτητο. Δυνατότητα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών παράλληλων διαδρομών. Υποστήριξη multicasting.

Μειονεκτήματα: Το multicasting δεν είναι ενσωματωμένο στη βασική λειτουργία.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Καλή.

Τρόπος δρομολόγησης: Το κοντύτερο μονοπάτι (*Shortest Path*).

Περιοδικά μηνύματα: Internet MANET Encapsulation Protocol (IMEP).

Στιβαρότητα: Χαμηλή.

4.1.1.4 Flooding

Το Flooding [24] είναι μια παλιά και πολύ απλή τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δρομολόγηση σε ΑΔΑ. Δεν απαιτεί την ύπαρξη αλγορίθμων δρομολόγησης ούτε τη γνώση της τοπολογίας του δικτύου. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων το προωθεί σε όλους τους γείτονές του εκτός αυτού από τον οποίο το έλαβε. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται από κόμβο σε κόμβο μέχρι το πακέτο δεδομένων να φτάσει στον προορισμό του. Το Flooding είναι μια εξαιρετικά στιβαρή τεχνική που παρέχει εγγυημένη μετάδοση των δεδομένων από τον αποστολέα στον παραλήπτη, αν υπάρχει κάποια διαθέσιμη διαδρομή μεταξύ τους. Όμως είναι μια τεχνική που δεν λαμβάνει υπόψη της την ενεργειακή απόδοση του δικτύου καθώς σπαταλά μεγάλα ποσά ενέργειας και δικτυακών πόρων “πλημμυρίζοντας” το δίκτυο, όπως υποδεικνύει και το όνομά της, με την μετάδοση πολλών αντιγράφων των ίδιων πακέτων δεδομένων που αποστέλλονται ταυτόχρονα μέσω διαφορετικών διαδρομών.

Πλεονεκτήματα: Απλή και εξαιρετικά στιβαρή τεχνική. Δεν απαιτείται η ύπαρξη αλγορίθμων δρομολόγησης ούτε η γνώση της τοπολογίας του δικτύου.

Μειονεκτήματα: Μεγάλη κατανάλωση ενέργειας λόγω της μετάδοσης πολλών αντιγράφων των ίδιων πακέτων δεδομένων.

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Χαμηλή.

Τρόπος δρομολόγησης: Το κοντύτερο μονοπάτι (*Shortest Path*).

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Εξαιρετική.

4.1.1.5 Gossiping

Το Gossiping [25] είναι μια επίσης παλιά τεχνική, μια μετεξέλιξη της τεχνικής Flooding που εξαλείφει το πρόβλημα της μετάδοσης πολλών αντιγράφων των ίδιων πακέτων δεδομένων που υπάρχει στο Flooding. Όπως στο Flooding έτσι και εδώ, δεν απαιτείται η ύπαρξη αλγορίθμων δρομολόγησης ούτε τη γνώση της τοπολογίας του δικτύου. Στο Gossiping ο κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο

δεδομένων επιλέγει τυχαία έναν μόνο γειτονικό του κόμβο και προωθεί σε αυτόν το πακέτο δεδομένων που έλαβε. Με την τεχνική αυτή αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της μετάδοσης πολλών αντιγράφων των ίδιων πακέτων δεδομένων, όμως προκαλείται σημαντική καθυστέρηση στη μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων από τον αποστολέα στον παραλήπτη.

Πλεονεκτήματα: Απλή τεχνική. Δεν απαιτείται η ύπαρξη αλγορίθμων δρομολόγησης ούτε η γνώση της τοπολογίας του δικτύου. Αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της μετάδοσης πολλών αντιγράφων των ίδιων πακέτων δεδομένων που υπάρχει στο Flooding.

Μειονεκτήματα: Προκαλείται σημαντική καθυστέρηση στη μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων από τον αποστολέα στον παραλήπτη.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Καλή.

Τρόπος δρομολόγησης: Τυχαία επιλογή του επόμενου κόμβου.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.1.1.6 Rumor Routing (RR)

Το Rumor Routing (RR) [26] είναι ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί την τεχνική του flooding που είδαμε πιο πάνω αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Δηλαδή, αντί να υπάρχουν δεδομένα που ξεκινούν από τους κόμβους που τα παράγουν και “πλημμυρίζουν” το δίκτυο με τελικό προορισμό το σταθμό βάσης, δημιουργούνται ερωτήματα (*queries*) που ξεκινούν από το σταθμό βάσης και με την τεχνική του flooding διαδίδονται σε όλο το δίκτυο επιχειρώντας να ανακαλύψουν τους κόμβους που κατέχουν τα δεδομένα που χρειάζεται ο σταθμός βάσης. Το Rumor Routing είναι ένα πρωτόκολλο που θα μπορούσε να ενταχθεί και στην κατηγορία των πρωτοκόλλων που βασίζονται στο ερώτημα (*query-based protocols*) που θα δούμε στη συνέχεια.

Πλεονεκτήματα: Δυνατότητα ανάκαμψης σε περίπτωση παύσης της λειτουργίας κάποιων κόμβων με αντίστοιχη γραμμική μείωση του ρυθμού μετάδοσης ανάλογα με τον αριθμό κόμβων που παύουν να λειτουργούν.

Μειονεκτήματα: Πιθανή μετάδοση πολλών αντιγράφων των ίδιων πακέτων που αποστέλλονται ταυτόχρονα μέσω διαφορετικών διαδρομών.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Χαμηλή.

Τρόπος δρομολόγησης: Το κοντύτερο μονοπάτι (*Shortest Path*).

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα “Hello”.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.1.1.7 E-TORA (Energy-aware Temporarily Ordered Routing Algorithm)

Το πρωτόκολλο E-TORA [27] είναι μια παραλλαγή του TORA που παρουσιάστηκε παραπάνω. Επικεντρώνεται στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους. Στο κλασσικό TORA επιλέγεται ως διαδρομή δρομολόγησης το κοντύτερο μονοπάτι (*shortest path*), δηλαδή από το μονοπάτι με το μικρότερο αριθμό ενδιάμεσων κόμβων (*minimum-hop path*). Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην ενεργειακή εξάντληση των κόμβων που βρίσκονται κατά μήκος των κεντρικών διαδρομών δρομολόγησης και από τους οποίους διέρχεται μεγάλος όγκος δεδομένων. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει στην πρόωρη κατάρρευση του ΑΔΑ ενώ υπάρχουν ακόμη διαθέσιμοι άλλοι κόμβοι που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά δεδομένων και οι οποίοι διαθέτουν ακόμη μεγάλα ενεργειακά αποθέματα. Για να λύσει αυτό το πρόβλημα, το E-TORA λαμβάνει υπόψη του τα ενεργειακά αποθέματα του κάθε κόμβου και αποφεύγει να χρησιμοποιήσει στη δρομολόγηση κόμβους με χαμηλά ενεργειακά αποθέματα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μια πιο ομοιόμορφη κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους, πράγμα που οδηγεί στην αύξηση της διάρκειας ζωής του ΑΔΑ.

Πλεονεκτήματα: Ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας σε συγκεκριμένους κόμβους. Αύξηση της διάρκειας ζωής του ΑΔΑ.

Μειονεκτήματα: Το multicasting δεν είναι ενσωματωμένο στη βασική λειτουργία.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Καλή.

Τρόπος δρομολόγησης: Επιλογή της ενεργειακά καλύτερης διαδρομής.

Περιοδικά μηνύματα: Internet MANET Encapsulation Protocol (IMEP).

Στιβαρότητα: Χαμηλή.

4.1.1.8 ZRP (Zone Routing Protocol)

Το πρωτόκολλο ZRP [28], όπως υποδεικνύει και το όνομά του, χωρίζει το δίκτυο σε ζώνες. Οι κόμβοι της κάθε ζώνης γνωρίζουν την τοπολογία μόνο των κόμβων εντός της ζώνης τους. Τα μηνύματα ελέγχου της δρομολόγησης δεν

διαδίδονται σε όλη την έκταση του δικτύου αλλά μόνο εντός της κάθε ζώνης με αποτέλεσμα τον περιορισμό της κίνησης αυτής σε μικρότερες περιοχές και την εξοικονόμηση ενέργειας και γενικότερα πόρων του δικτύου. Όταν ένας κόμβος επιθυμεί να αποστείλει ένα πακέτο δεδομένων σε κόμβο που δεν βρίσκεται εντός της ζώνης του, στέλνει ένα πακέτο RREQ (Route REQuest) σε κάθε “συνοριακό” κόμβο των γειτονικών του ζωνών. Οι “συνοριακοί” κόμβοι της κάθε γειτονικής ζώνης αρχικά ελέγχουν αν ο κόμβος προορισμού βρίσκεται εντός της δικής τους ζώνης. Αν ναι, απαντούν με ένα πακέτο RREP (RouteREPlY). Αν όχι, εκτελούν τη διαδικασία αναζήτησης στις δικές τους γειτονικές ζώνες. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τελικά να βρεθεί η διαδρομή για τον κόμβο προορισμού.

Πλεονεκτήματα: Περιορισμός της κίνησης ελέγχου της δρομολόγησης. Μείωση του όγκου των δεδομένων δρομολόγησης που διατηρεί ο κάθε κόμβος.

Μειονεκτήματα: Μεγάλες καθυστερήσεις στη μετάδοση των δεδομένων λόγω της εκτέλεσης της διαδικασίας εύρεσης της διαδρομής για μεταδόσεις δεδομένων εκτός της ζώνης του εκάστοτε κόμβου-αποστολέα.

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Καλή.

Τρόπος δρομολόγησης: Η καλύτερη διαδρομή.

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα “Hello”.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.1.2 Ιεραρχικά πρωτόκολλα

Τα ιεραρχικά πρωτόκολλα είναι κατάλληλα για ΑΔΑ με μεγάλο αριθμό κόμβων που καλύπτουν μεγάλες περιοχές και μεταφέρουν μεγάλο όγκο δεδομένων. Ταυτόχρονα, είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν συνεχή ροή δεδομένων από τους κόμβους προς το σταθμό βάσης, όπως για παράδειγμα εφαρμογές που συλλέγουν συνεχώς μετρήσεις φυσικών μεγεθών από το περιβάλλον. Οι εφαρμογές αυτές παράγουν μεγάλο όγκο επαναλαμβανόμενων δεδομένων με παραπλήσιες τιμές μετρήσεων. Με τη χρήση ιεραρχικών πρωτοκόλλων υλοποιείται συγχώνευση των δεδομένων αυτών σε διάφορα σημεία της πορείας τους προς το σταθμό βάσης, με αποτέλεσμα τη μείωση της κίνησης στο δίκτυο και την εξοικονόμηση ενέργειας χωρίς απώλεια σημαντικής πληροφορίας.

4.1.2.1 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Το πρωτόκολλο LEACH [11], [29] δημιουργεί συστάδες (*clusters*) κόμβων σύμφωνα με την ισχύ του σήματος που λαμβάνει ο κάθε κόμβος από τους γειτονικούς του και χρησιμοποιεί τους τοπικούς επικεφαλής συστάδας (*cluster heads*) σαν δρομολογητές (*routers*) των δεδομένων προς το σταθμό βάσης. Το LEACH είναι εντελώς κατανεμημένο τοπικά και δεν απαιτεί τη γενική γνώση του δικτύου. Ο βέλτιστος αριθμός των επικεφαλής συστάδας εκτιμάται στο 5% του συνολικού αριθμού των κόμβων. Το LEACH χρησιμοποιεί την τεχνική του *Dynamic Clustering* σύμφωνα με την οποία οι επικεφαλής συστάδας εναλλάσσονται χρονικά με στόχο την αποφυγή της ενεργειακής εξάντλησης των κόμβων που αναλαμβάνουν το ρόλο αυτό. Για την επιλογή ενός κόμβου ως του επόμενου επικεφαλής συστάδας εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος τυχαίας επιλογής στον οποίο όμως λαμβάνεται υπόψη και το πόσο πρόσφατα είχε επιλεγεί ξανά ο συγκεκριμένος κόμβος ως επικεφαλής συστάδας. Κάθε κόμβος που δεν είναι επικεφαλής συστάδας, επιλέγει τον κοντινότερο επικεφαλής συστάδας συγκρίνοντας την ισχύ του σήματος που λαμβάνει από τους γειτονικούς του επικεφαλής συστάδας και γίνεται μέλος της συστάδας αυτής. Ο κάθε επικεφαλής συστάδας εκτελεί **συσσωμάτωση** και **συμπύεση** των δεδομένων που λαμβάνει από τους κόμβους της συστάδας του και στη συνέχεια προωθεί τα δεδομένα αυτά στο σταθμό βάσης.

Πλεονεκτήματα: Εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της ιεραρχικής δόμησης και της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής.

Μειονεκτήματα: Λόγω της αρχιτεκτονικής τριών επιπέδων κατά την οποία κάθε απλός κόμβος μπορεί να στείλει τα δεδομένα του μόνο στον επικεφαλής της συστάδας του και ο επικεφαλής συστάδας να τα προωθήσει στο σταθμό βάσης, δεν ενδείκνυται για χρήση σε ΑΔΑ που καταλαμβάνουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Επίσης, η λειτουργία του Dynamic Clustering απαιτεί πρόσθετη κατανάλωση πόρων.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Απαιτείται σταθερός σταθμός βάσης.

Τρόπος δρομολόγησης: Το συντομότερο μονοπάτι (*Shortest Path*).

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.1.2.2 LEACH-C (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy - Centralized)

Το πρωτόκολλο LEACH-C [30] είναι μια παραλλαγή του LEACH. Σε αυτό η ιεραρχική δόμηση του ΑΔΑ αποφασίζεται κεντρικά από το σταθμό βάσης γι αυτό και υπάρχει ο πρόσθετος χαρακτηρισμός “*Centralized*” στο όνομα του πρωτοκόλλου. Ενώ στο LEACH οι κόμβοι αυτο-οργανώνονται σε συστάδες, εδώ ακολουθείται η εξής διαδικασία για την οργάνωση του δικτύου σε συστάδες: Αρχικά ο σταθμός βάσης λαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τη θέση και τα ενεργειακά αποθέματα κάθε κόμβου του ΑΔΑ. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, αποφασίζει έναν προκαθορισμένο αριθμό κόμβων που θα λειτουργήσουν ως επικεφαλής συστάδας και οργανώνει το δίκτυο σε συστάδες. Το κριτήριο για την οργάνωση των συστάδων είναι η ελαχιστοποίηση της ενέργειας που απαιτείται να καταναλώσουν οι απλοί κόμβοι προκειμένου να μεταδώσουν τα δεδομένα τους στους επικεφαλής συστάδας.

Πλεονεκτήματα: Μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από το LEACH διότι εδώ ο σταθμός βάσης έχει την γνώση του όλου του δικτύου και οργανώνει τις συστάδες με τρόπο πιο αποδοτικό ενεργειακά.

Μειονεκτήματα: Επιπλέον κατανάλωση ενέργειας στο σταθμό βάσης για την κεντροποιημένη οργάνωση των συστάδων.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Απαιτείται σταθερός σταθμός βάσης.

Τρόπος δρομολόγησης: Η καλύτερη διαδρομή.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.1.2.3 TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)

Το TEEN [31] είναι ένα ιεραρχικό πρωτόκολλο σχεδιασμένο για εφαρμογές που χρειάζεται να ενημερώνονται άμεσα για ξαφνικές αλλαγές φυσικών μεγεθών που ανιχνεύουν οι κόμβοι, όπως για παράδειγμα ξαφνική αλλαγή της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του, οι πιο απομακρυσμένοι κόμβοι δημιουργούν συστάδες πρώτου επιπέδου με τους αντίστοιχους επικεφαλής συστάδας τους. Στη συνέχεια οι επικεφαλής συστάδας του πρώτου επιπέδου δημιουργούν συστάδες δευτέρου επιπέδου μέχρι να δημιουργηθεί μια διαδρομή επικοινωνίας μέχρι το σταθμό βάσης. Μετά τη δημιουργία των συστάδων οι επικεφαλής συστάδας

στέλνουν στους κόμβους της συστάδας τους δύο κατώφλια: Το “σκληρό κατώφλι” (*hard threshold*) και το “μαλακό κατώφλι” (*soft threshold*). Το σκληρό κατώφλι είναι η ελάχιστη τιμή ενός φυσικού μεγέθους που απαιτείται να ανιχνευθεί σε ένα κόμβο, για να ενεργοποιηθεί η μονάδα μετάδοσης του κόμβου αυτού και να γίνει η αποστολή των αντίστοιχων δεδομένων που ανιχνεύθηκαν στον επικεφαλής συστάδας του. Το μαλακό κατώφλι είναι η ελάχιστη διαφορά που απαιτείται να ανιχνευθεί στην τιμή του φυσικού μεγέθους σε σχέση με την προηγούμενη τιμή για να ενεργοποιηθεί ξανά η μονάδα μετάδοσης του κόμβου αυτού και να γίνει η αποστολή της νέας τιμής που ανιχνεύθηκε στον επικεφαλής συστάδας του. Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική αυτή, ένας κόμβος παίρνει συνεχώς μετρήσεις από το περιβάλλον του. Θα μεταδώσει όμως τα δεδομένα μιας μέτρησης για πρώτη φορά μόνο όταν αυτά θα έχουν τιμή μεγαλύτερη από το σκληρό κατώφλι. Αυτή η τιμή της μέτρησης αποθηκεύεται σε μια εσωτερική μεταβλητή του κόμβου που λέγεται *Sensed Value (SV)*. Στη συνέχεια ο κόμβος θα μεταδώσει εκ νέου την τιμή κάποιας μέτρησης μόνο όταν η διαφορά της σε σχέση με την τιμή της *Sensed Value* υπερβεί το μαλακό κατώφλι. Με τον τρόπο αυτό, επιλέγοντας κατάλληλες τιμές για τα δύο κατώφλια, μειώνεται σημαντικά η κίνηση στο δίκτυο και αυξάνει η ενεργειακή του απόδοση χωρίς να υπάρχει ουσιαστική απώλεια στην πληροφορία που πρέπει να λαμβάνει ο σταθμός βάσης. Στο TEEN οι επικεφαλής συστάδας εκτελούν και **συσσωμάτωση** των δεδομένων που λαμβάνουν από τους κόμβους της συστάδας τους και στη συνέχεια προωθούν τα δεδομένα αυτά στο σταθμό βάσης. Το TEEN θα μπορούσε να αναφερθεί και στην ενότητα της κατηγοριοποίησης των πρωτοκόλλων με βάση τον τρόπο επιλογής των επιθυμητών δεδομένων αφού η λειτουργία του επηρεάζεται άμεσα από τις τιμές των δεδομένων που διαθέτουν οι κόμβοι.

Πλεονεκτήματα: Πολύ καλή απόδοση σε συνθήκες ξαφνικών αλλαγών των μετρούμενων μεγεθών. Σημαντική μείωση της κίνησης του δικτύου.

Μειονεκτήματα: Η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική των συστάδων εισάγει πολυπλοκότητα και απαιτεί επιπλέον κατανάλωση ενέργειας για τη διατήρηση της δομής του δικτύου, ειδικά σε μεγάλης έκτασης δίκτυα.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Απαιτείται σταθερός σταθμός βάσης.

Τρόπος δρομολόγησης: Η καλύτερη διαδρομή.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Περιορισμένη.

4.1.2.4 APTEEN (Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network)

Το πρωτόκολλο APTEEN [32] είναι μια προσπάθεια βελτίωσης του TEEN με στόχους την αποτελεσματική λειτουργία του στην περιοδική συλλογή δεδομένων και την καλή ανταπόκρισή του σε γεγονότα πραγματικού χρόνου. Η αρχιτεκτονική του είναι ίδια με την αρχιτεκτονική του TEEN. Το APTEEN υποστηρίζει τρεις διαφορετικούς τύπους ερωτημάτων (*queries*): ιστορικό (*historical*), για ιστορική ανάλυση των τιμών των μεγεθών που έχουν προηγηθεί, τρέχουσα τιμή (*one-time*) και επίμονο (*persistent*) για συνεχή μέτρηση της τιμής ενός μεγέθους για ένα χρονικό διάστημα. Στο APTEEN οι επικεφαλής συστάδας εκτελούν και **συσσωμάτωση** των δεδομένων που λαμβάνουν από τους κόμβους της συστάδας τους και στη συνέχεια προωθούν τα δεδομένα αυτά στο σταθμό βάσης. Το APTEEN θα μπορούσε να αναφερθεί και στην ενότητα της κατηγοριοποίησης των πρωτοκόλλων με βάση τον τρόπο επιλογής των επιθυμητών δεδομένων αφού η λειτουργία του επηρεάζεται άμεσα από τις τιμές των δεδομένων που διαθέτουν οι κόμβοι.

Πλεονεκτήματα: Πολύ καλή απόδοση σε συνθήκες ξαφνικών αλλαγών των μετρούμενων μεγεθών. Σημαντική μείωση της κίνησης του δικτύου. Μικρότερη κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους σε σχέση με το TEEN.

Μειονεκτήματα: Η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική των συστάδων εισάγει πολυπλοκότητα και απαιτεί επιπλέον κατανάλωση ενέργειας για τη διατήρηση της δομής του δικτύου, ειδικά σε μεγάλης έκτασης δίκτυα. Μεγάλες καθυστερήσεις στη μετάδοση.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Απαιτείται σταθερός σταθμός βάσης.

Τρόπος δρομολόγησης: Η καλύτερη διαδρομή.

Περιοδικά μηνύματα: Internet MANET Encapsulation Protocol (IMEP).

Στιβαρότητα: Καλή.

4.1.2.5 PEGASIS (Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems)

Το πρωτόκολλο PEGASIS [33], είναι μια βελτίωση του πρωτοκόλλου LEACH. Το PEGASIS σχηματίζει αλυσίδες με τους κόμβους και κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνεί μόνο με τους δυο εκατέρωθεν γειτονικούς του κόμβους στην αλυσίδα. Από κάθε αλυσίδα επιλέγεται μόνο ένας κόμβος που αναλαμβάνει να μεταδίδει στο σταθμό βάσης. Σε κάθε κόμβο γίνεται **συσσωμάτωση** των δεδομένων του με τα δεδομένα που λαμβάνει από τους γειτονικούς του κόμβους.

Πλεονεκτήματα: Ενεργειακά αποδοτικότερο από το LEACH λόγω της μείωσης της απόστασης μετάδοσης μεταξύ των κόμβων και της μη χρήσης της λειτουργίας του Dynamic Clustering.

Μειονεκτήματα: Δεν λαμβάνονται υπόψη τα ενεργειακά αποθέματα του κόμβου που επιλέγεται να μεταδίδει στο σταθμό βάσης. Μπορεί να δημιουργηθεί συμφόρηση στον κόμβο αυτόν. Μεγάλη καθυστέρηση στη μετάδοση των δεδομένων από κόμβους που βρίσκονται στα άκρα της αλυσίδας.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Απαιτείται σταθερός σταθμός βάσης.

Τρόπος δρομολόγησης: Greedy routing σε αλυσίδες κόμβων.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.1.2.6 VGA (Virtual Grid Architecture Routing)

Το πρωτόκολλο VGA [34] χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική πολυεπίπεδης συσσωμάτωσης και επεξεργασίας των δεδομένων, στη διαδρομή τους προς το σταθμό βάσης, με στόχο την ενεργειακή αποδοτικότητα και την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Δημιουργεί συστάδες σταθερών κόμβων αφού οι περισσότερες εφαρμογές ΑΔΑ δεν απαιτούν κινούμενους κόμβους. Οι επικεφαλής συστάδας ονομάζονται *Local Aggregators (LA)* και όπως υποδεικνύει και το όνομά τους εκτελούν συσσωμάτωση των δεδομένων που λαμβάνουν από τους κόμβους της συστάδας τους. Ένα υποσύνολο των local aggregators επιλέγεται για συμμετάσχει σε μία καθολική λειτουργία **συσσωμάτωσης** δεδομένων. Αυτοί ονομάζονται *Master Aggregators (MA)*.

Πλεονεκτήματα: Ενεργειακή αποδοτικότητα και την επιμήκυνση της ζωής του δικτύου.

Μειονεκτήματα: Δυσκολία ως προς τη βέλτιστη επιλογή των local aggregators που θα γίνουν master aggregators.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Όχι.

Τρόπος δρομολόγησης: Greedy Routing.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.1.2.7 BCDCP (Base-Station Controlled Dynamic Clustering Protocol)

Το πρωτόκολλο BCDCP [35] δημιουργεί συστάδες με βασικό κριτήριο τα ενεργειακά αποθέματα που διαθέτει ο κάθε κόμβος. Για το σκοπό αυτό, ο σταθμός βάσης πριν δημιουργήσει την αρχιτεκτονική του δικτύου, λαμβάνει πληροφόρηση σχετικά με τα ενεργειακά αποθέματα όλων των κόμβων του δικτύου. Με βάση τα δεδομένα αυτά, υπολογίζει το μέσο όρο του επιπέδου ενέργειας από όλους τους κόμβους. Στη συνέχεια επιλέγει ως επικεφαλής συστάδας κόμβους που τα ενεργειακά τους αποθέματα είναι πάνω από το μέσο όρο. Επίσης φροντίζει να δημιουργήσει ένα ισορροπημένο δίκτυο με περίπου ίδιο αριθμό κόμβων σε κάθε συστάδα. Έτσι αποφεύγεται η ασύμμετρη επιβάρυνση κάποιων επικεφαλής συστάδας, και επιτυγχάνεται η ομοιογενής χωρική κατανομή των επικεφαλής συστάδας σε όλη την έκταση του ΑΔΑ. Οι επικεφαλής συστάδας δρομολογούν τα δεδομένα μεταξύ τους με τελικό προορισμό το σταθμό βάσης. Στο BCDCP λαμβάνεται επίσης μέριμνα ώστε ο σταθμός βάσης να είναι ένας κόμβος με πολύ υψηλά ενεργειακά αποθέματα.

Πλεονεκτήματα: Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του ΑΔΑ.

Μειονεκτήματα: Επιπλέον επικοινωνίες και υπολογισμοί για την αρχική δημιουργία της αρχιτεκτονικής του δικτύου

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Όχι.

Τρόπος δρομολόγησης: Η καλύτερη διαδρομή.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Περιορισμένη.

4.1.2.8 HPAR (Hierarchical Power Aware Routing)

Το πρωτόκολλο HPAR [36] διαιρεί το δίκτυο σε ομάδες κόμβων που ονομάζει ζώνες. Κάθε ζώνη είναι μια ομάδα από γεωγραφικά κοντινούς κόμβους που αντιμετωπίζονται από το πρωτόκολλο ως μία ενότητα. Σε πρώτη φάση το πρωτόκολλο σχηματίζει τις ζώνες – συστάδες. Σε δεύτερη φάση αποφασίζει για τη δρομολόγηση των δεδομένων μεταξύ των ζωνών με στόχο τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση του δικτύου. Για να επιτύχει το στόχο αυτό, εφαρμόζει έναν αλγόριθμο που βρίσκει τα μονοπάτια με τη μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση αλλά και αυτά που προκαλούν τη μικρότερη δυνατή μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων ολόκληρου του δικτύου.

Πλεονεκτήματα: Λαμβάνει υπόψη του τόσο την ενεργειακή κατανάλωση των μονοπατιών δρομολόγησης όσο και τη συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο.

Μειονεκτήματα: Ο αλγόριθμος εύρεσης του ενεργειακά αποδοτικότερου μονοπατιού απαιτεί επιπλέον υπολογισμούς.

Επεκτασιμότητα: Χαμηλή.

Κινητικότητα: Όχι.

Τρόπος δρομολόγησης: Αρχικά επιλογή του μονοπατιού με τη μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση και στη συνέχεια βελτιστοποίηση της δρομολόγησης με κριτήριο τη συνολική ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης στο δίκτυο.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.1.2.9 Sleep/Wake Scheduling Protocol

Το Sleep/Wake Scheduling Protocol [37] εξοικονομεί ενεργειακούς πόρους θέτοντας τη μονάδα επικοινωνίας του κόμβου σε sleep mode και ενεργοποιώντας την μόνο όταν πρέπει να γίνει αποστολή ή λήψη ενός μηνύματος. Το κρίσιμο σημείο εδώ είναι ο συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δέκτη ώστε να “ξυπνούν” ταυτόχρονα προκειμένου να είναι επιτυχής η μετάδοση. Το Sleep/Wake Scheduling Protocol είναι ένα ιεραρχικό πρωτόκολλο που οργανώνει τους κόμβους σε συστάδες. Όμως εδώ ο επικεφαλής συστάδας μπορεί να είναι ταυτόχρονα και μέλος μια ανώτερης ιεραρχικά συστάδας. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μια πολυεπίπεδη ιεραρχική δομή ενός δένδρου αποτελούμενου από συστάδες. Το Sleep/Wake Scheduling Protocol χρησιμοποιεί πολλαπλές

παράλληλες διαδρομές για τη δρομολόγηση των δεδομένων και για το λόγο αυτό θα μπορούσε να αναφερθεί και στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Πλεονεκτήματα: Αναγνωρίζει τη συμφόρηση. Αυξάνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

Μειονεκτήματα: Ο συγχρονισμός για τη μετάδοση από τον πομπό στο δέκτη επηρεάζει τη συνολική απόδοση του δικτύου.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Όχι.

Τρόπος δρομολόγησης: Η καλύτερη διαδρομή.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Περιορισμένη.

4.1.2.10 GBDD (Grid Based Data Dissemination)

Στο πρωτόκολλο GBDD [38] ο σταθμός βάσης δημιουργεί ένα πλέγμα τετράγωνων κελιών μέσα στο οποίο τοποθετούνται οι κόμβοι του δικτύου. Το πρωτόκολλο GBDD χρησιμοποιεί πολλαπλές παράλληλες διαδρομές για τη δρομολόγηση των δεδομένων και για το λόγο αυτό θα μπορούσε να αναφερθεί και στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Πλεονεκτήματα: Εξασφαλίζει συνεχή μετάδοση των δεδομένων από τους κόμβους στο σταθμό βάσης.

Μειονεκτήματα: Καταναλώνει περισσότερη ενέργεια σε μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Περιορισμένη.

Τρόπος δρομολόγησης: Η κοντινότερη γωνία ενός πλέγματος τετράγωνων κελιών.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.1.2.11 ELCH (Extending Lifetime of Cluster Head)

Στο πρωτόκολλο ELCH [39] οι κόμβοι ψηφίζουν για να εκλέξουν τον επικεφαλής συστάδας τους. Το πρωτόκολλο αυτό συνδυάζει την αρχιτεκτονική των συστάδων με τη δρομολόγηση πολλαπλών βημάτων (*multi-hop routing*) μεταξύ των

επικεφαλής συστάδας με προορισμό το σταθμό βάσης επιτυγχάνοντας χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Αρχικά οι κόμβοι ψηφίζουν μεταξύ των γειτονικών τους κόμβων και όποιος κόμβος λάβει τις περισσότερες ψήφους ορίζεται ως επικεφαλής συστάδας. Στη συνέχεια οι επικεφαλής συστάδας οργανώνουν τους κόμβους της συστάδας τους και τον τρόπο που αυτοί θα μεταδίδουν σε συγκεκριμένες σχισμές χρόνου (*time slots*) με τη χρήση της μεθόδου TDMA (*Time-Division Multiple Access*). Οι επικεφαλής συστάδας δημιουργούν ένα δίκτυο κορμού (*backbone*) μέσω του οποίου τα δεδομένα προωθούνται με δρομολόγηση πολλαπλών βημάτων (*multi-hop routing*) στο σταθμό βάσης. Το πρωτόκολλο ELCH χρησιμοποιεί πολλαπλές παράλληλες διαδρομές για τη δρομολόγηση των δεδομένων στο δίκτυο κορμού και για το λόγο αυτό θα μπορούσε να αναφερθεί και στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Πλεονεκτήματα: Ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη μετάδοση. Ενεργειακά ισορροπημένη κατανάλωση σε όλο το δίκτυο.

Μειονεκτήματα: Αν ο αριθμός των μελών των συστάδων ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο αριθμό, επηρεάζεται αρνητικά η λειτουργία του δικτύου.

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Απαιτείται σταθερός σταθμός βάσης.

Τρόπος δρομολόγησης: Επιλογή του κόμβου με το μέγιστο επίπεδο ενέργειας.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.1.2.12 NHRPA (Novel Hierarchical Routing Protocol Algorithm)

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης NHRPA [40] λαμβάνει υπόψη του την απόσταση των κόμβων από το σταθμό βάσης, την πυκνότητα της κατανομής των κόμβων και τα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων προκειμένου να επιτύχει την ενεργειακά βέλτιστη δρομολόγηση.

Πλεονεκτήματα: Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Μειονεκτήματα: Καθυστερήση στη μετάδοση των πακέτων.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Απαιτείται σταθερός σταθμός βάσης.

Τρόπος δρομολόγησης: Η καλύτερη διαδρομή.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.1.2.13 SHPER (Scaling Hierarchical Power Efficient Routing)

Το πρωτόκολλο SHPER [41] υποθέτει την ύπαρξη ενός σταθμού βάσης που μπορεί να βρίσκεται αρκετά μακριά από τους κόμβους και διαθέτει απεριόριστα ενεργειακά αποθέματα που του δίνουν τη δυνατότητα μετάδοσης ισχυρών σημάτων που μπορούν να ληφθούν εύκολα από όλους τους κόμβους του ΑΔΑ. Οι κόμβοι βρίσκονται στο χώρο που επιτηρούν ομοιόμορφα κατανεμημένοι. Τόσο οι κόμβοι όσο και ο σταθμός βάσης υποτίθεται ότι είναι στατικοί. Ο σταθμός βάσης σε πρώτη φάση εκπέμπει προς όλους τους κόμβους ένα χρονοπρογραμματισμό βασισμένο στη μέθοδο TDMA (*Time-Division Multiple Access*) σύμφωνα με την οποία ο κάθε κόμβος έχει τη δική του σχισμή χρόνου (*time slot*) που μπορεί να χρησιμοποιήσει για μετάδοση και ζητά από όλους τους κόμβους να διαφημίσουν τον εαυτό τους. Στη συνέχεια οι κόμβοι απαντούν με την ίδια προκαθορισμένη ισχύ εκπομπής σήματος και από την ισχύ του σήματος των απαντήσεων που λαμβάνουν οι υπόλοιποι κόμβοι, υπολογίζουν τη σχετική απόσταση μεταξύ τους. Κατόπιν ο σταθμός βάσης επιλέγει έναν προκαθορισμένο αριθμό από κόμβους που τους ορίζει ως επικεφαλής συστάδας υψηλού και χαμηλού επιπέδου και εκπέμπει τα στοιχεία αναγνώρισής τους καθώς και τις τιμές του σκληρού κατωφλιού και του μαλακού κατωφλιού που θα εξηγηθούν στη συνέχεια. Οι επικεφαλής συστάδας δεν επιλέγονται τυχαία αλλά με κριτήριο τα ενεργειακά τους αποθέματα. Ως επικεφαλής συστάδας υψηλού επιπέδου ορίζονται οι επικεφαλής συστάδας που βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης και μπορούν να εκπέμψουν κατευθείαν προς το σταθμό βάσης καταναλώνοντας λογικά αποθέματα ενέργειας. Ο σταθμός βάσης αναθέτει το ρόλο του επικεφαλής συστάδας υψηλού επιπέδου σε κάποιους κόμβους από τους οποίους έλαβε απάντηση σύμφωνα με τα προηγούμενα. Ως επικεφαλής συστάδας χαμηλού επιπέδου ορίζονται οι επικεφαλής συστάδας που βρίσκονται μακριά από το σταθμό βάσης. Αυτοί μεταδίδουν τα δεδομένα τους προς τους γειτονικούς τους επικεφαλής συστάδας μέχρι αυτά να φθάσουν σε έναν επικεφαλής συστάδας υψηλού επιπέδου που θα τα προωθήσει τελικά στο σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης αναθέτει το ρόλο του επικεφαλής συστάδας χαμηλού επιπέδου σε κάποιους κόμβους από τους οποίους δεν έλαβε απάντηση. Μετά από τον ορισμό των επικεφαλής συστάδας, οι απλοί κόμβοι επιλέγουν σε ποια συστάδα θα ανήκουν επιλέγοντας ως επικεφαλής

συστάδας τον κόμβο από τον οποίο έλαβαν το ισχυρότερο σήμα στην προηγούμενη φάση της εκπομπής των απαντήσεων από όλους τους κόμβους. Οι κόμβοι ενημερώνουν τους επικεφαλής συστάδας τους ότι θα είναι μέλη της συστάδας αυτής με τη χρήση ενός πρωτοκόλλου CSMA MAC (*Carrier-Sense Multiple Access Media Access Control*). Οι επικεφαλής συστάδας δημιουργούν ένα χρονοπρογραμματισμό βασισμένο στη μέθοδο TDMA μεγέθους ανάλογου των μελών της συστάδας. Στη συνέχεια, οι επικεφαλής συστάδας εκπέμπουν το χρονοπρογραμματισμό αυτό στους κόμβους της συστάδας τους ενημερώνοντάς τους έτσι για το τη σχισμή χρόνου που έχουν στη διάθεσή τους για να μεταδίδουν. Οι επικεφαλής συστάδας χαμηλού επιπέδου επιλέγουν τα ενεργειακά αποδοτικότερα μονοπάτια για τη μετάδοση των δεδομένων στο σταθμό βάσης επιλέγοντας τον επικεφαλής συστάδας υψηλού επιπέδου στον οποίο θα ανήκουν. Η επιλογή γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα ενεργειακά αποθέματα του κάθε κόμβου όσο και τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση του κάθε πιθανού μονοπατιού. Εδώ ολοκληρώνεται η αρχική φάση της δημιουργίας της αρχιτεκτονικής της δρομολόγησης του δικτύου.

Στη συνέχεια, όταν ένας κόμβος πρέπει να μεταδώσει κάποια δεδομένα θέτει σε λειτουργία τη μονάδα επικοινωνίας του. Τα κριτήρια για το αν θα ενεργοποιήσει τη μονάδα επικοινωνίας του στη συγκεκριμένη σχισμή χρόνου που έχει στη διάθεσή του είναι το σκληρό και το μαλακό κατώφλι. Το σκληρό κατώφλι είναι η ελάχιστη τιμή ενός φυσικού μεγέθους που απαιτείται να ανιχνευθεί σε ένα κόμβο, για να ενεργοποιηθεί η μονάδα μετάδοσης του κόμβου αυτού και να γίνει η αποστολή των αντίστοιχων δεδομένων που ανιχνεύθηκαν στον επικεφαλής συστάδας του. Το μαλακό κατώφλι είναι η ελάχιστη διαφορά που απαιτείται να ανιχνευθεί στην τιμή του φυσικού μεγέθους σε σχέση με την προηγούμενη τιμή για να ενεργοποιηθεί ξανά η μονάδα μετάδοσης του κόμβου αυτού και να γίνει η αποστολή της νέας τιμής που ανιχνεύθηκε στον επικεφαλής συστάδας του. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, ένας κόμβος παίρνει συνεχώς μετρήσεις από το περιβάλλον του αλλά θα μεταδώσει τα δεδομένα μιας μέτρησης για πρώτη φορά μόνο όταν αυτά θα έχουν τιμή μεγαλύτερη από το σκληρό κατώφλι. Αυτή η τιμή της μέτρησης αποθηκεύεται σε μια εσωτερική μεταβλητή του κόμβου. Στη συνέχεια ο κόμβος θα μεταδώσει εκ νέου την τιμή κάποιας μέτρησης μόνο όταν η διαφορά της σε σχέση με την προηγούμενη αποθηκευμένη τιμή υπερβεί το μαλακό κατώφλι. Με τον τρόπο αυτό, επιλέγοντας κατάλληλες τιμές για τα δύο κατώφλια, μειώνεται σημαντικά η

κίνηση στο δίκτυο και αυξάνει η ενεργειακή του απόδοση χωρίς να υπάρχει ουσιαστική απώλεια στην πληροφορία που πρέπει να λαμβάνει ο σταθμός βάσης. Μαζί με την τιμή των μεγεθών που έχει ανιχνεύσει, ο κάθε κόμβος μεταδίδει και την τιμή του επιπέδου των ενεργειακών αποθεμάτων που έχει εκείνη τη στιγμή. Ο κάθε επικεφαλής συστάδας συγκεντρώνει όλα τα δεδομένα που λαμβάνει από τους κόμβους της συστάδας του και με κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας σήματος τα συγχωνεύει μαζί με τα δικά του δεδομένα σε ένα σύνθετο μήνυμα. Το μήνυμα αυτό περιέχει το αναγνωριστικό του κόμβου που έχει τα υψηλότερα αποθέματα ενέργειας ανάμεσα στους κόμβους της συστάδας του, τη μέγιστη τιμή του μεγέθους που ανιχνεύθηκε στη συστάδα και το αναγνωριστικό του κόμβου που την ανίχνευσε. Κατόπιν, ο κάθε επικεφαλής συστάδας περιμένει μέχρι να έρθει η σχισμή χρόνου που έχει στη διάθεσή του και τότε μεταδίδει το παραπάνω σύνθετο μήνυμα είτε κατευθείαν στο σταθμό βάσης, αν είναι επικεφαλής συστάδας υψηλού επιπέδου, είτε, αν είναι επικεφαλής συστάδας χαμηλού επιπέδου, διαμέσου άλλων επικεφαλής συστάδας σύμφωνα με την επιλογή του βέλτιστου μονοπατιού που έχει ήδη κάνει, όπως περιγράφηκε νωρίτερα. Ο σταθμός βάσης συγκεντρώνει όλα τα μηνύματα και με βάση τα δεδομένα που περιέχονται σε αυτά σχετικά με τα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων αναπροσαρμόζει ανάλογα τη δομή του δικτύου. Συγκεκριμένα, σε κάθε συστάδα επιλέγεται ως νέος επικεφαλής συστάδας ο κόμβος που έχει τα υψηλότερα αποθέματα ενέργειας. Επίσης ορίζονται νέες τιμές σκληρού και μαλακού κατωφλιού. Στη συνέχεια όλοι οι κόμβοι ενεργοποιούν τους δέκτες τους προκειμένου να λάβουν ταυτόχρονα την εκπομπή του σταθμού βάσης με τα αναγνωριστικά των νέων επικεφαλής συστάδας και τις νέες τιμές του σκληρού κατωφλιού και του μαλακού κατωφλιού. Κατόπιν, οι απλοί κόμβοι επιλέγουν εκ νέου σε ποια συστάδα θα ανήκουν και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς σε όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του ΑΔΑ. Με αυτή την επαναλαμβανόμενη διαδικασία αναπροσαρμογής της δομής του δικτύου που περιλαμβάνει και τη συνδυαστική χρήση της μεθόδου TDMA και των δύο κατωφλιών επιτυγχάνεται σημαντικότερη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο, πράγμα που καθιστά το πρωτόκολλο SHPER ως ένα από τα αποδοτικότερα πρωτόκολλα ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης σε ΑΔΑ.

Πλεονεκτήματα: Κορυφαία ενεργειακή αποδοτικότητα. Ισορροπημένη κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο με συνεχή αναπροσαρμογή και βελτιστοποίηση

της δομής του δικτύου. Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας με τη χρήση της μεθόδου TDMA και του σκληρού και του μαλακού κατωφλιού.

Μειονεκτήματα: Απαιτεί σταθερό σταθμό βάσης με μεγάλα ενεργειακά αποθέματα και δυνατότητα εκπομπής ισχυρών σημάτων.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Απαιτεί σταθερό σταθμό βάσης.

Τρόπος δρομολόγησης: Η καλύτερη διαδρομή.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Καλή.

Εκτός από τα παραπάνω, έχουν προταθεί και άλλα ιεραρχικά πρωτόκολλα ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης σε ΑΔΑ [18], [42], [43], [44], [45].

4.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τον τρόπο επιλογής των επιθυμητών δεδομένων

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που εντάσσονται σε αυτή την κατηγοριοποίηση, αποδίδουν καλύτερα στις εφαρμογές που δεν απαιτείται συνεχής, σταθερή ροή δεδομένων από τους κόμβους προς το σταθμό βάσης αλλά απαιτείται επιλεκτική άντληση δεδομένων από ΑΔΑ που συλλέγουν πολλών και διαφορετικών ειδών δεδομένα.

4.2.1 Πρωτόκολλα βασιζόμενα στο ερώτημα (*query-based protocols*)

Τα πρωτόκολλα της κατηγορίας αυτής ενδείκνυνται για χρήση σε εφαρμογές που απαιτείται επιλεκτική άντληση δεδομένων από ένα ΑΔΑ ενώ ταυτόχρονα απαιτείται και αξιόπιστη παράδοση των δεδομένων στο σταθμό βάσης. Η αξιοπιστία στα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας επιτυγχάνεται με την ενδεχόμενη αποστολή των ίδιων δεδομένων προς το σταθμό βάσης μέσω πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

4.2.1.1 Directed Diffusion

Το Directed Diffusion [12] είναι ένας σημαντικός σταθμός στην έρευνα των πρωτοκόλλων ΑΔΑ που βασίζονται στην επιλογή των επιθυμητών δεδομένων. Στο Directed Diffusion χρησιμοποιούνται ζεύγη χαρακτηριστικών-τιμών (*attribute-value*

pairs) για τα δεδομένα και ερωτήματα (*queries*) προς τους κόμβους, όποτε η εφαρμογή χρειάζεται να αντλήσει δεδομένα. Ένα ερώτημα δημιουργείται με τον ορισμό ενός “*interest*” (ενδιαφέρον) το οποίο περιέχει μια λίστα ζευγών χαρακτηριστικών-τιμών. Το *interest* μεταδίδεται από το σταθμό βάσης μέσω των γειτονικών κόμβων σε όλο το δίκτυο. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα *interest* το αποθηκεύει για μελλοντική χρήση. Τα αποθηκευμένα *interests* συγκρίνονται στη συνέχεια με τα δεδομένα που λαμβάνουν οι κόμβοι. Τα *interests* περιλαμβάνουν επίσης και αρκετά πεδία “*gradient*”. *Gradient* είναι ένας σύνδεσμος που δείχνει τον γειτονικό κόμβο από τον οποίο ήρθε το *interest*. Έχοντας τη γνώση αυτή, οι κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα στο σταθμό βάσης ακολουθώντας την αντίστροφη διαδρομή από την οποία έφθασε το *interest*. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να δημιουργηθούν πολλά παράλληλα μονοπάτια μετάδοσης των δεδομένων πράγμα που κάνει το Directed Diffusion ανθεκτικό σε πιθανή διακοπή της λειτουργίας ενός μονοπατιού. Οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να εκτελέσουν και **συγχώνευση** δεδομένων. Στο Directed Diffusion όλη η επικοινωνία γίνεται από γείτονα σε γείτονα χωρίς την ανάγκη διευθυνσιοδότησης των κόμβων. Το Directed Diffusion λόγω της δυνατότητάς του να δημιουργεί πολλαπλές παράλληλες διαδρομές θα μπορούσε να υπαχθεί και στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Πλεονεκτήματα: Ενεργειακά αποδοτικό. Μετάδοση μόνο κατόπιν σχετικού ερωτήματος. Δεν απαιτείται η συνολική γνώση της τοπολογίας του δικτύου.

Μειονεκτήματα: Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που απαιτούν συνεχή μετάδοση δεδομένων ή σε εφαρμογές που απαιτούν την άμεση ενημέρωσή τους όταν οι κόμβοι ανιχνεύουν κάποια διαφοροποίηση σε κάποιο φυσικό μέγεθος στο περιβάλλον τους.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Περιορισμένη.

Τρόπος δρομολόγησης: Το καλύτερο μονοπάτι.

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα ερωτημάτων (*queries*).

Στιβαρότητα: Χαμηλή.

4.2.1.2 COUGAR

Το πρωτόκολλο COUGAR [14] βλέπει το δίκτυο σαν μια τεράστια καταναεμημένη βάση δεδομένων. Το COUGAR εισάγει ένα νέο επίπεδο, το επίπεδο ερωτήματος

(query layer) μεταξύ του επιπέδου δικτύου (network layer) και του επιπέδου εφαρμογής (application layer). Στο επίπεδο αυτό εκτελούνται όλες οι λειτουργίες των ερωτημάτων στις οποίες περιλαμβάνεται και η εκλογή και η εκλογή ενός κόμβου-αρχηγού (leader node) για το ερώτημα. Ο κόμβος-αρχηγός εκτελεί **συγχώνευση** των δεδομένων πριν τα αποστείλει στο σταθμό βάσης. Το πρωτόκολλο COUGAR χρησιμοποιεί πολλαπλές παράλληλες διαδρομές για τη δρομολόγηση των δεδομένων και για το λόγο αυτό θα μπορούσε να αναφερθεί και στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Πλεονεκτήματα: Ενεργειακή αποδοτικότητα ειδικά όταν υπάρχει τεράστιος αριθμός κόμβων και δεδομένων.

Μειονεκτήματα: Επιπλέον υπολογιστικές διεργασίες και πολυπλοκότητα που εισάγει το επίπεδο ερωτήματος (query layer).

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Όχι.

Τρόπος δρομολόγησης: Το καλύτερο μονοπάτι.

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα ερωτημάτων (queries).

Στιβαρότητα: Χαμηλή.

4.2.1.3 ACQUIRE (Active QUery forwarding In sensoR nEtworks)

Το πρωτόκολλο ACQUIRE [46] βλέπει το δίκτυο σαν μια κατανομημένη βάση δεδομένων όπως και το COUGAR που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Ο μηχανισμός του ερωτήματος λειτουργεί ως εξής: Το ερώτημα προωθείται στο δίκτυο από το σταθμό βάσης και κάθε κόμβος που το λαμβάνει προσπαθεί να απαντήσει μερικώς χρησιμοποιώντας την αποθηκευμένη πληροφορία που έχει και στη συνέχεια το στέλνει σε έναν άλλο κόμβο. Αν η αποθηκευμένη πληροφορία είναι παρωχημένη οι κόμβοι αναζητούν πιο επικαιροποιημένη πληροφορία από τους κόμβους που βρίσκονται έως d βήματα μακριά. Μόλις ανακτηθεί όλη η πληροφορία, στέλνεται πίσω στο σταθμό βάσης είτε μέσω της αντίστροφης διαδρομής είτε μέσω της συντομότερης. Ρυθμίζοντας την παράμετρο d μπορεί κανείς να αλλάξει τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου και να βελτιστοποιήσει την απόδοσή του ανάλογα με το δίκτυο και την εφαρμογή. Το πρωτόκολλο ACQUIRE χρησιμοποιεί πολλαπλές παράλληλες διαδρομές για τη δρομολόγηση των δεδομένων και για το λόγο αυτό θα μπορούσε να αναφερθεί και στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Πλεονεκτήματα: Ιδανικό πρωτόκολλο για περιστασιακά και περίπλοκα ερωτήματα στα οποία η απάντηση μπορεί να δοθεί από πολλούς κόμβους.

Μειονεκτήματα: Μπορεί να δημιουργήσει “πλημμύρα” (*flooding*) στο δίκτυο, ειδικά αν η τιμή της παραμέτρου d είναι μεγάλη.

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Περιορισμένη.

Τρόπος δρομολόγησης: Το συντομότερο μονοπάτι (*Shortest Path*).

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα ερωτημάτων (queries).

Στιβαρότητα: Χαμηλή.

4.2.2 Πρωτόκολλα βασιζόμενα στη διαπραγμάτευση (*negotiation-based protocols*)

Τα πρωτόκολλα που εντάσσονται σε αυτή την κατηγορία είναι κατάλληλα για χρήση σε εφαρμογές που απαιτείται επιλεκτική άντληση δεδομένων από ένα ΑΔΑ ενώ ταυτόχρονα υπάρχει ανοχή ως προς τη μη παράδοση κάποιων δεδομένων στο σταθμό βάσης προς όφελος της ενεργειακής απόδοσης και της μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής του ΑΔΑ. Η χρήση των πρωτοκόλλων αυτών δεν ενδείκνυται σε εφαρμογές στις οποίες είναι επιβεβλημένη η αξιόπιστη και έγκαιρη μετάδοση όλων των γεγονότων που ανιχνεύονται σε ένα ΑΔΑ, όπως για παράδειγμα σε εφαρμογές ασφάλειας χώρων και ανίχνευσης εισβολών.

4.2.2.1 SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation)

Το πρωτόκολλο SPIN [15] είναι από τις πρώτες εργασίες που έγιναν με στόχο τη δημιουργία ενός “δεδομενο-κεντρικού” πρωτοκόλλου ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης σε ΑΔΑ. Χρησιμοποιεί τη διαπραγμάτευση μεταξύ των κόμβων με τη χρήση μεταδεδομένων, με στόχο τον περιορισμό της περιττής κίνησης στο δίκτυο και την εξοικονόμηση ενέργειας. Στο SPIN τα δεδομένα αποκτούν ονόματα με τη χρήση μεταδεδομένων. Όταν ένας κόμβος γίνεται κάτοχος κάποιων δεδομένων, κατ’ αρχήν τα διαφημίζει στο δίκτυο στέλνοντας ένα πακέτο μηνύματος τύπου ADV. Αν κάποιος κόμβος από αυτούς που θα λάβουν το ADV έχει ενδιαφέρον για τα δεδομένα αυτά απαντά στον κόμβο που έστειλε το ADV με ένα πακέτο μηνύματος τύπου REQ (request) ζητώντας να λάβει τα δεδομένα. Στη συνέχεια, ο κόμβος που κατέχει τα δεδομένα τα στέλνει στο κόμβο που τα ζητά με

ένα πακέτο τύπου DATA. Η αρχική ιδέα του πρωτοκόλλου SPIN μετεξελίχθηκε σε μια οικογένεια τεσσάρων πρωτοκόλλων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

Πλεονεκτήματα: Μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας με την αποφυγή μετάδοσης περιττών δεδομένων στο δίκτυο. Απλότητα σχεδίασης. Δεν απαιτείται η ολική γνώση του δικτύου καθώς κάθε κόμβος γνωρίζει μόνο τους γείτονές του.

Μειονεκτήματα: Δεν παρέχεται εγγυημένη παράδοση των δεδομένων αν για παράδειγμα ο κόμβος που χρειάζεται τα δεδομένα βρίσκεται μακριά από τον κόμβο που τα κατέχει και οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν έχουν ενδιαφέρον για τα δεδομένα αυτά. Δεν ενδείκνυται για εφαρμογές που απαιτούν άμεση ενημέρωση του σταθμού βάσης για έκτακτα γεγονότα όπως για παράδειγμα η μη εξουσιοδοτημένη εισβολή σε ένα χώρο.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Ναι.

Τρόπος δρομολόγησης: Κάθε κόμβος στέλνει τα δεδομένα στους γειτονικούς του κόμβους.

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα διαφήμισης (ADV) από τους κόμβους που κατέχουν τα δεδομένα.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.2.2.2 SPIN-PP (SPIN for Point to Point Communication)

Το πρωτόκολλο SPIN-PP [47] είναι μια μετεξέλιξη του πρωτοκόλλου SPIN για βέλτιστη απόδοση στην επικοινωνία από σημείο σε σημείο (point to point). Σύμφωνα με το πρωτόκολλο αυτό, δύο κόμβοι μπορούν να έχουν αποκλειστική επικοινωνία μεταξύ τους χωρίς να παρεμβάλλονται άλλοι κόμβοι στην επικοινωνία αυτή.

Πλεονεκτήματα: Απλότητα. Αποφυγή μετάδοσης περιττών δεδομένων στο δίκτυο. Ελάχιστο κόστος αρχικοποίησης.

Μειονεκτήματα: Δεν παρέχεται εγγύηση παράδοσης των δεδομένων.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Ναι.

Τρόπος δρομολόγησης: Κάθε κόμβος στέλνει τα δεδομένα στους γειτονικούς του κόμβους.

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα διαφήμισης (ADV) από τους κόμβους που κατέχουν τα δεδομένα.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.2.2.3 SPIN-EC (SPIN with Energy Conservation)

Το πρωτόκολλο SPIN-EC [47], [48] είναι μια μετεξέλιξη του πρωτοκόλλου SPIN με στόχο την ακόμη καλύτερη διαχείριση των ενεργειακών αποθεμάτων. Η διαφοροποίησή του έγκειται στο ότι όταν ένας κόμβος πλησιάζει στην ενεργειακή του εξάντληση παύει να στέλνει μηνύματα REQ για να λάβει ο ίδιος δεδομένα αλλά εξακολουθεί να συμμετέχει στην επικοινωνία του πρωτοκόλλου προωθώντας τα μηνύματα ADV και REQ.

Πλεονεκτήματα: Επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του δικτύου όταν οι κόμβοι πλησιάζουν στην ενεργειακή τους εξάντληση.

Μειονεκτήματα: Δεν παρέχεται εγγύηση παράδοσης των δεδομένων.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Ναι.

Τρόπος δρομολόγησης: Κάθε κόμβος στέλνει τα δεδομένα στους γειτονικούς του κόμβους.

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα διαφήμισης (ADV) από τους κόμβους που κατέχουν τα δεδομένα.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.2.2.4 SPIN-BC (SPIN for Broadcast Networks)

Το πρωτόκολλο SPIN-BC [47] είναι μια μετεξέλιξη του πρωτοκόλλου SPIN σχεδιασμένο για εκπομπή σε δίκτυα στα οποία όλοι οι κόμβοι χρησιμοποιούν ένα διαμοιραζόμενο μέσο επικοινωνίας. Στο SPIN-BC ένας κόμβος στέλνει ένα μήνυμα και όλοι οι άλλοι κόμβοι που βρίσκονται στη εμβέλειά του το λαμβάνουν ταυτόχρονα. Ένας κόμβος που έλαβε ένα μήνυμα ADV δεν απαντά αμέσως αλλά περιμένει για κάποιο διάστημα μέχρι να στείλει το μήνυμα REQ. Αν στο μεταξύ δει ότι κάποιος άλλος κόμβος έστειλε μήνυμα REQ για τα ίδια δεδομένα, ακυρώνει τη μετάδοση του δικού του REQ και περιμένει να λάβει και εκείνος ταυτόχρονα με τον κόμβο που έστειλε το REQ τα δεδομένα που θα μεταδώσει ο κόμβος που τα κατέχει.

Πλεονεκτήματα: Καταλληλότερο για δίκτυα εκπομπής στα οποία όλοι οι κόμβοι χρησιμοποιούν ένα διαμοιραζόμενο μέσο για επικοινωνία από έναν σε πολλούς.

Μειονεκτήματα: Ο κόμβος που χρειάζεται τα δεδομένα χρειάζεται να περιμένει για κάποιο διάστημα μέχρι να στείλει το μήνυμα REQ.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Ναι.

Τρόπος δρομολόγησης: Κάθε κόμβος στέλνει τα δεδομένα στους γειτονικούς του κόμβους.

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα διαφήμισης (ADV) από τους κόμβους που κατέχουν τα δεδομένα.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.2.2.5 SPIN-RL (SPIN with Reliability)

Το πρωτόκολλο SPIN-RL [47] είναι μια βελτίωση του πρωτοκόλλου SPIN-BC με στόχο την καλύτερη αξιοπιστία στην επικοινωνία μέσα από ένα διαμοιραζόμενο μέσο επικοινωνίας. Το πρωτόκολλο SPIN-RL προτείνει δύο βελτιώσεις στο πρωτόκολλο SPIN-BC: Πρώτον, ένας κόμβος απομνημονεύει τα πακέτα ADV που λαμβάνει και από ποιους κόμβους και αν δεν λάβει τα δεδομένα μέσα σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, ξαναστέλνει το μήνυμα REQ. Δεύτερον, οι κόμβοι που κατέχουν τα δεδομένα έχουν ένα όριο στη συχνότητα αναμετάδοσης των ίδιων δεδομένων. Μετά την πρώτη αποστολή των δεδομένων, θα περιμένουν για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα προτού τα ξαναστείλουν απαντώντας σε μηνύματα REQ για τα ίδια δεδομένα.

Πλεονεκτήματα: Φροντίζει για την αξιόπιστη αναμετάδοση των δεδομένων σε ένα δίκτυο εκπομπής στο οποίο όλοι οι κόμβοι χρησιμοποιούν ένα διαμοιραζόμενο μέσο για επικοινωνία από έναν σε πολλούς, ακόμη και όταν χαθούν κάποια δεδομένα στο δίκτυο αυτό.

Μειονεκτήματα: Χρονική καθυστέρηση.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Ναι.

Τρόπος δρομολόγησης: Κάθε κόμβος στέλνει τα δεδομένα στους γειτονικούς του κόμβους.

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα διαφήμισης (ADV) από τους κόμβους που κατέχουν τα δεδομένα.

Στιβαρότητα: Καλή.

Εκτός από τα παραπάνω, έχουν προταθεί και άλλα πρωτόκολλα που μπορούν να ενταχθούν στην κατηγοριοποίηση με βάση τον τρόπο επιλογής των επιθυμητών δεδομένων [17], [60], [61].

4.3 Πρωτόκολλα βασιζόμενα στη γεωγραφική θέση των κόμβων

Στα πρωτόκολλα της κατηγορίας αυτής, η αρχιτεκτονική δρομολόγησης βασίζεται στη γεωγραφική τοπολογία των κόμβων του δικτύου. Αυτή η αρχιτεκτονική παρέχει απλότητα χωρίς την ανάγκη συντήρησης πινάκων δρομολόγησης στους κόμβους του δικτύου. Τα πρωτόκολλα που βασίζονται στη γεωγραφική θέση των κόμβων, προσπαθούν να επιτύχουν ενεργειακή απόδοση στοχεύοντας στη μείωση της φυσικής απόστασης μετάδοσης από άκρο σε άκρο, ανεξάρτητα από τον όγκο, τη συχνότητα και το είδος των δεδομένων που διακινούνται στο δίκτυο και ανεξάρτητα από το είδος της εφαρμογής στην οποία χρησιμοποιείται το ΑΔΑ.

Ενδεχομένως τα πρωτόκολλα της κατηγορίας αυτής να αποδίδουν καλύτερα από άλλες κατηγορίες πρωτοκόλλων σε ΑΔΑ με κόμβους που δεν είναι στατικοί αλλά αλλάζουν συνεχώς θέση καθώς και σε εφαρμογές που απαιτούν την επιλεκτική άντληση δεδομένων από συγκριμένες γεωγραφικές περιοχές του ΑΔΑ.

4.3.1 GEAR (Geographic and Energy Aware Routing)

Το πρωτόκολλο GEAR [49] χρησιμοποιεί την πληροφορία για τη γεωγραφική θέση των κόμβων προκειμένου να αποστείλει ερωτήματα σε συγκεκριμένες περιοχές μόνο για τις οποίες υπάρχει ενδιαφέρον από την εφαρμογή. Στο GEAR ο κάθε κόμβος γνωρίζει τη θέση του και τα ενεργειακά αποθέματά του και φροντίζει να μαθαίνει τη θέση και τα ενεργειακά αποθέματα των γειτονικών του κόμβων με τη χρήση απλών μηνυμάτων "Hello". Χρησιμοποιώντας αυτή την πληροφορία, βελτιστοποιείται η ενεργειακή απόδοση του δικτύου και επιμηκύνεται τη διάρκεια ζωής του. Το πρωτόκολλο GEAR χρησιμοποιεί πολλαπλές παράλληλες διαδρομές για τη δρομολόγηση των δεδομένων και για το λόγο αυτό θα μπορούσε να αναφερθεί και στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Πλεονεκτήματα: Βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου και επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του.

Μειονεκτήματα: Η περιοδική ανταλλαγή πινάκων δρομολόγησης.

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Περιορισμένη.

Τρόπος δρομολόγησης: Η καλύτερη διαδρομή.

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα “Hello”.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.3.2 DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility)

Στο πρωτόκολλο DREAM [50] ο κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα με τις θέσεις όλων των άλλων κόμβων του δικτύου. Για τη συντήρηση του πίνακα αυτού, ο κάθε κόμβος μεταδίδει μηνύματα με τα οποία ενημερώνει τους υπόλοιπους κόμβους για τη θέση του. Τα μηνύματα αυτά μεταδίδονται πιο συχνά προς τους κοντινούς κόμβους και με μικρότερη συχνότητα προς τους μακρινούς κόμβους. Με τον τρόπο αυτό όλοι οι κόμβοι γνωρίζουν συνεχώς τη διαδρομή δρομολόγησης από άκρο σε άκρο με αποτέλεσμα να αποφεύγονται οι καθυστερήσεις στη μετάδοση. Το πρωτόκολλο DREAM χρησιμοποιεί πολλαπλές παράλληλες διαδρομές για τη δρομολόγηση των δεδομένων και για το λόγο αυτό θα μπορούσε να αναφερθεί και στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Πλεονεκτήματα: Γρήγορη μετάδοση από άκρο σε άκρο.

Μειονεκτήματα: Σπατάλη πόρων του δικτύου για τη μετάδοση των θέσεων του κάθε κόμβου και τη συντήρηση του πίνακα θέσεων σε κάθε κόμβο.

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Καλή.

Τρόπος δρομολόγησης: Τα μονοπάτια που ελαχιστοποιούν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα ελέγχου.

Στιβαρότητα: Περιορισμένη.

4.3.3 GEM (Graph EMbedding for Routing)

Το πρωτόκολλο GEM [51] χρησιμοποιεί εικονικές συντεταγμένες αντί για τις πραγματικές φυσικές συντεταγμένες των κόμβων. Το GEM τοποθετεί από μια διαφορετική ετικέτα σε κάθε κόμβο του δικτύου. Οι κόμβοι δρομολογούν τα δεδομένα γνωρίζοντας μόνο τις ετικέτες των γειτονικών τους κόμβων. Το

πρωτόκολλο GEM χρησιμοποιεί πολλαπλές παράλληλες διαδρομές για τη δρομολόγηση των δεδομένων και για το λόγο αυτό θα μπορούσε να αναφερθεί και στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Πλεονεκτήματα: Επιτρέπει την αποτελεσματική διακίνηση των δεδομένων στο δίκτυο ενώ κάθε κόμβος χρειάζεται να γνωρίζει μόνο τις ετικέτες των γειτονικών του κόμβων.

Μειονεκτήματα: Πιθανή υπερφόρτωση κάποιων κόμβων.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Περιορισμένη.

Τρόπος δρομολόγησης: Το συντομότερο μονοπάτι (*Shortest Path*).

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.3.4 SELAR (Scalable Energy-efficient Location Aided Routing)

Το πρωτόκολλο SELAR [52] χρησιμοποιεί την πληροφορία σχετικά με τη γεωγραφική θέση των κόμβων αλλά και σχετικά με τα ενεργειακά αποθέματά τους προκειμένου να επιτύχει μια ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση. Κατ' αρχήν ο σταθμός βάσης στέλνει την πληροφορία της θέσης του στους γειτονικούς του κόμβους. Στη συνέχεια όλοι οι κόμβοι στέλνουν την πληροφορία της θέσης τους στους γειτονικούς τους κόμβους, περιλαμβάνοντας και την πληροφορία της θέσης του σταθμού βάσης ως αναφορά. Στη συνέχεια οι κόμβοι ανταλλάσσουν μόνο πληροφορίες σχετικά με τα ενεργειακά τους αποθέματα αφού οι κόμβοι θεωρείται ότι είναι στατικοί. Στο SELAR οι κόμβοι υπολογίζουν στο χώρο την κατεύθυνση προς την οποία βρίσκεται ο σταθμός βάσης και προωθούν τα δεδομένα σε γειτονικούς τους κόμβους που βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην κατεύθυνση αυτή αλλά ταυτόχρονα έχουν και μεγάλα ενεργειακά αποθέματα. Το πρωτόκολλο SELAR χρησιμοποιεί πολλαπλές παράλληλες διαδρομές για τη δρομολόγηση των δεδομένων και για το λόγο αυτό θα μπορούσε να αναφερθεί και στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Πλεονεκτήματα: Επιλογή των κόμβων με τα υψηλότερα ενεργειακά αποθέματα προκειμένου να υπάρχει ομοιογενής κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο.

Μειονεκτήματα: Δεν ενδείκνυται για δίκτυα που οι κόμβοι τους αλλάζουν θέση συχνά.

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Περιορισμένη.

Τρόπος δρομολόγησης: Η διαδρομή της οποίας οι κόμβοι έχουν τα μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα.

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα ελέγχου.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.3.5 MERR (Minimum Energy Relay Routing)

Το πρωτόκολλο MERR [53] βασίζεται στην ιδέα ότι η απόσταση μεταξύ των κόμβων είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την ενεργειακή αποδοτικότητα του δικτύου. Αυτή η απόσταση σχετίζεται άμεσα με τη συνολική ενέργεια που καταναλώνεται κατά μήκος όλου του μονοπατιού από τον αποστολέα στο σταθμό βάσης και το οποίο σε πολλές περιπτώσεις περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό κόμβων. Το MERR λοιπόν επιλέγει τη βέλτιστη διαδρομή προς το σταθμό βάσης με βάση το κριτήριο αυτό. Μόλις κάποιος κόμβος επιλέξει τον γειτονικό του κόμβο στον οποίο θα προωθήσει τα δεδομένα, ρυθμίζει την ισχύ εκπομπής του στην ελάχιστη που απαιτείται προκειμένου ο γειτονικός κόμβος να λάβει τα δεδομένα αυτά. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Το πρωτόκολλο MERR χρησιμοποιεί πολλαπλές παράλληλες διαδρομές για τη δρομολόγηση των δεδομένων και για το λόγο αυτό θα μπορούσε να αναφερθεί και στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Πλεονεκτήματα: Ομοιογενής κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ των κόμβων.

Μειονεκτήματα: Σπατάλη ενέργειας στις περιπτώσεις που οι κόμβοι βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους.

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Χαμηλή.

Τρόπος δρομολόγησης: Τα μονοπάτια που ελαχιστοποιούν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Καλή.

Εκτός από τα παραπάνω, έχουν προταθεί και άλλα πρωτόκολλα βασιζόμενα στη γεωγραφική θέση των κόμβων [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69].

4.4 Κατηγοριοποίηση με βάση την αξιοπιστία της μετάδοσης

Τα πρωτόκολλα που εντάσσονται σε αυτή την κατηγοριοποίηση εστιάζουν στην παροχή της μέγιστης δυνατής αξιοπιστίας στην παράδοση των δεδομένων στο σταθμό βάσης του ΑΔΑ και είναι τα καταλληλότερα για χρήση σε εφαρμογές με αντίστοιχες απαιτήσεις.

4.4.1 Πρωτόκολλα πολλαπλών παράλληλων διαδρομών

Η χρήση πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών ενδείκνυται σε εφαρμογές που απαιτούν αξιοπιστία στην παράδοση των δεδομένων, υψηλή ταχύτητα μετάδοσης και αντοχή σε πιθανή διακοπή της επικοινωνίας μεταξύ κάποιων κόμβων.

Στις υπόλοιπες ενότητες αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται κάποια πρωτόκολλα, στις αντίστοιχες κατηγορίες που εντάσσονται με βάση τα κύρια χαρακτηριστικά τους, που παρέχουν και τη δυνατότητα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών παράλληλων διαδρομών. Αυτά είναι τα πρωτόκολλα: TBRPF, TORA, Sleep/Wake Scheduling Protocol, GBDD, ELCH, Directed Diffusion, COUGAR, ACQUIRE, GEAR, DREAM, GEM, SELAR, MERR, SAR και SPEED. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα πρωτόκολλα που έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τους τη δρομολόγηση μέσω πολλαπλών παράλληλων διαδρομών με στόχο την παροχή της μέγιστης αξιοπιστίας στη μετάδοση.

4.4.1.1 GRAB (GRAdient Broadcast)

Το πρωτόκολλο GRAB [54] έχει σχεδιαστεί με στόχο τη στιβαρή συμπεριφορά και την αξιόπιστη παράδοση των δεδομένων ειδικά σε συνθήκες μη αξιοπιστίας των κόμβων του δικτύου και ασύρματων ζεύξεων που μπορεί να καταρρέουν. Δημιουργεί και συντηρεί ένα πεδίο κόστους μέσω της διάδοσης των διαφημιστικών πακέτων (ADV) στο δίκτυο. Μόλις ένας κόμβος λάβει ένα πακέτο ADV που περιέχει το κόστος του αποστολέα, υπολογίζει το δικό του κόστος προσθέτοντας στο κόστος που διαφημίζει ο αποστολέας το κόστος της σύνδεσής του με τον αποστολέα. Στη συνέχεια συγκρίνει το κόστος που υπολόγισε με το κόστος που είχε αποθηκευμένο ως τώρα και ορίζει ως νέο του κόστος το χαμηλότερο από τα δύο. Αν από τη σύγκριση έχει προκύψει νέο χαμηλότερο κόστος, ο κόμβος εκπέμπει προς όλους τους υπόλοιπους το νέο του κόστος. Το GRAB έχει τη δυνατότητα δέσμευσης του απαιτούμενου εύρους ζώνης επιτρέποντας στον

αποστολέα να ρυθμίσει με τον τρόπο αυτό τη στιβαρότητα της επικοινωνίας. Για το λόγο αυτό θα μπορούσε να ενταχθεί και στα πρωτόκολλα ποιότητας υπηρεσίας που παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

Πλεονεκτήματα: Στηρίζεται στη συλλογική προσπάθεια πολλών κόμβων για την αξιόπιστη παράδοση των δεδομένων χωρίς να εξαρτάται από κάποιους συγκεκριμένους.

Μειονεκτήματα: Μπορεί να υπάρξει σπατάλη πόρων του δικτύου με την πολλαπλή αποστολή των ίδιων δεδομένων.

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Καλή.

Τρόπος δρομολόγησης: Ορισμός διαχωρισμένων μονοπατιών που ικανοποιούν τα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας (QoS).

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Καλή.

4.4.1.2 CBMPR (Cluster-Based Multi-Path Routing)

Το πρωτόκολλο CBMPR [55] συνδυάζει με αποτελεσματικό τρόπο τη δημιουργία συστάδων και τη δρομολόγηση μέσω πολλαπλών παράλληλων διαδρομών. Για το λόγο αυτό θα μπορούσε να αναφερθεί και στην ενότητα των ιεραρχικών πρωτοκόλλων που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Όπως σε όλα τα ιεραρχικά πρωτόκολλα, το CBMPR ορίζει τους επικεφαλής συστάδας και τους κόμβους-μέλη της κάθε συστάδας. Οι κόμβοι στέλνουν μηνύματα “Hello” σε τακτά χρονικά διαστήματα. Ένας κόμβος-μέλος μιας συστάδας προσθέτει τη διεύθυνση του στα μηνύματα αυτά ενώ ένας επικεφαλής συστάδας προσθέτει αυτή τη διεύθυνση στο δικό του μήνυμα “Hello”. Ο κάθε επικεφαλής συστάδας γνωρίζει όλες τις διευθύνσεις των μελών της συστάδας του, τις οποίες καταγράφει στον πίνακα δρομολόγησης που συντηρεί. Επίσης, ο κάθε επικεφαλής συστάδας συντηρεί έναν πίνακα με τους γειτονικούς του επικεφαλής συστάδας. Το CBMPR ως πρωτόκολλο πολλαπλών παράλληλων διαδρομών, διατηρεί πολλαπλά μονοπάτια από τον αποστολέα στον παραλήπτη. Εκτελώντας κατάλληλους υπολογισμούς, γνωρίζει ποιο είναι το συντομότερο μονοπάτι δηλαδή αυτό με τους λιγότερους ενδιάμεσους κόμβους, καθώς και ποια είναι η καθυστέρηση και το παρεχόμενο εύρος ζώνης κάθε μονοπατιού και λαμβάνει τις κατάλληλες αποφάσεις δρομολόγησης για την αξιόπιστη παράδοση των δεδομένων σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Πλεονεκτήματα: Απλότητα σχεδίασης και χαμηλά επίπεδα παρεμβολών στη μετάδοση.

Μειονεκτήματα: Μπορεί να προκύψουν προβλήματα στην ανασύσταση κατατετμημένων πακέτων που έχουν μεταδοθεί μέσω διαφορετικών παράλληλων μονοπατιών.

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Χαμηλή.

Τρόπος δρομολόγησης: Το καλύτερο μονοπάτι.

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα “Hello”.

Στιβαρότητα: Περιορισμένη.

4.4.1.3 DGR (Directional Geographical Routing)

Το DGR [56] είναι ένα νεωτεριστικό πρωτόκολλο που παρέχει μια πολύ ενδιαφέρουσα λύση στο πρόβλημα της μετάδοσης ροής βίντεο πραγματικού χρόνου (real time video streaming) μέσα από ένα ΑΔΑ, με τους σχετικούς περιορισμούς που αυτό θέτει ως προς το παρεχόμενο εύρος ζώνης και τα ενεργειακά του αποθέματα. Στο DGR, οι κόμβοι που εδώ ονομάζονται Video Sensor Nodes (VNs), προωθούν τα πακέτα της ροής βίντεο με τη χρήση κωδικοποίησης Forward Error Correction (FEC) μέσω πολλαπλών παράλληλων μονοπατιών. Το DGR λόγω των χαρακτηριστικών ποιότητας υπηρεσίας που παρέχει, θα μπορούσε να αναφερθεί και στην επόμενη ενότητα των πρωτοκόλλων ποιότητας υπηρεσίας (QoS).

Πλεονεκτήματα: Πολύ ενδιαφέρουσα λύση στο πρόβλημα της μετάδοσης ροής βίντεο πραγματικού χρόνου σε ΑΔΑ.

Μειονεκτήματα: Είναι βελτιστοποιημένο για μετάδοση βίντεο.

Επεκτασιμότητα: Υψηλή.

Κινητικότητα: Όχι.

Τρόπος δρομολόγησης: Το μονοπάτι με διαφορετικό αρχικό άμεσο γείτονα.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Υψηλή.

4.4.2 Πρωτόκολλα ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service, QoS)

Η χρήση πρωτοκόλλων ποιότητας υπηρεσίας είναι απαραίτητη σε εφαρμογές που απαιτούν συγκεκριμένα εγγυημένα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας,

όπως μέγιστη καθυστέρηση (*delay*) και διαθέσιμο εύρος ζώνης (*bandwidth*), για τη μετάδοση των δεδομένων από άκρο σε άκρο. Τέτοιου είδους εφαρμογές είναι οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου (*real-time*) για μετάδοση πολυμέσων (εικόνας, ήχου, βίντεο).

4.4.2.1 SAR (Sequential Assignment Routing)

Το SAR [57] είναι το πρώτο πρωτόκολλο που εισήγαγε τον όρο QoS στις αποφάσεις δρομολόγησης που λαμβάνει. Στο SAR οι αποφάσεις δρομολόγησης εξαρτώνται από τρεις παράγοντες: τα ενεργειακά αποθέματα, την προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσίας QoS σε κάθε μονοπάτι και το επίπεδο προτεραιότητας του κάθε πακέτου προς μετάδοση. Για να αποφεύγεται η διακοπή της επικοινωνίας, το SAR υλοποιεί μια αρχιτεκτονική πολλαπλών παράλληλων μονοπατιών με τη δημιουργία δένδρων που έχουν τη ρίζα τους στους άμεσα γειτονικούς κόμβους του σταθμού βάσης.

Πλεονεκτήματα: Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Αξιόπιστη επικοινωνία με τη συντήρηση πολλαπλών παράλληλων μονοπατιών.

Μειονεκτήματα: Συντήρηση πινάκων και πληροφοριών κατάστασης σε κάθε κόμβο με αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση πόρων ειδικά όταν ο αριθμός των κόμβων του ΑΔΑ είναι μεγάλος.

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Όχι.

Τρόπος δρομολόγησης: Το μονοπάτι που δίνει την καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας σταθμισμένη με τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα “Hello”.

Στιβαρότητα: Χαμηλή.

4.4.2.2 SPEED

Το πρωτόκολλο SPEED [58] παρέχει εγγυημένη μετάδοση σε πραγματικό χρόνο (*real-time*) από άκρο σε άκρο και μπορεί να παρέχει αποφυγή της συμφόρησης σε ένα δίκτυο με συμφόρηση. Η μονάδα δρομολόγησης του SPEED ονομάζεται SNFG (Stateless Geographic Non-Deterministic Forwarding) και φροντίζει για τη παροχή της επιθυμητής ταχύτητας μετάδοσης από τον αποστολέα στον παραλήπτη. Το πρωτόκολλο SPEED χρησιμοποιεί πολλαπλές παράλληλες διαδρομές για τη δρομολόγηση των δεδομένων και για το λόγο αυτό θα μπορούσε

να συμπεριληφθεί και στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών.

Πλεονεκτήματα: Πολύ καλή απόδοση σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και μικρές απώλειες πακέτων.

Μειονεκτήματα: Δεν λαμβάνει υπόψη του την κατανάλωση ενέργειας.

Επεκτασιμότητα: Περιορισμένη.

Κινητικότητα: Όχι.

Τρόπος δρομολόγησης: SNFG (Stateless Geographic Non-Deterministic Forwarding)

Περιοδικά μηνύματα: Μηνύματα “Hello”.

Στιβαρότητα: Χαμηλή.

4.4.2.3 MGR (Multimedia Geographic Routing)

Στο [59] εισάγεται μια αρχιτεκτονική με το όνομα MMSN (Mobile Multimedia Sensor Network) και ένα σχήμα δρομολόγησης με το όνομα MGR (Multimedia Geographic Routing). Στην αρχιτεκτονική αυτή οι κόμβοι ονομάζονται MMN (MultiMedia sensor Node). Το MGR έχει σχεδιαστεί για μετάδοση πολυμέσων, όπως άλλωστε υποδεικνύουν και οι ονομασίες αυτές, έχοντας ως βασικό του στόχο την εγγυημένη μέγιστη καθυστέρηση κάτι που θεωρείται από το πρωτόκολλο ως ο κύριος παράγοντας της παροχής ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Το MGR αφού εξασφαλίσει την εγγυημένη μέγιστη καθυστέρηση, φροντίζει και για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και για τη μεγιστοποίηση της διάρκειας της ζωής του δικτύου, με τη χρήση κατάλληλων υπολογισμών για την εύρεση της ιδανικής θέσης του άμεσα γειτονικού κόμβου σε κάθε κόμβο.

Πλεονεκτήματα: Παρέχει εγγυημένη μέγιστη καθυστέρηση ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση ενέργειας.

Μειονεκτήματα: Θεωρεί την εγγυημένη μέγιστη καθυστέρηση ως παράγοντα πρώτης προτεραιότητας στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας (QoS).

Επεκτασιμότητα: Καλή.

Κινητικότητα: Καλή.

Τρόπος δρομολόγησης: Το μονοπάτι που ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση.

Περιοδικά μηνύματα: Όχι.

Στιβαρότητα: Χαμηλή.

Εκτός από τα παραπάνω, έχουν προταθεί και άλλα πρωτόκολλα που μπορούν να ενταχθούν στην κατηγοριοποίηση με βάση την αξιοπιστία της μετάδοσης [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78]

(Κενό φύλλο)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

5.1 Σύνοψη

Στη διατριβή αυτή, εξηγήθηκε το πόσο καθοριστικής σημασίας για την εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα ΑΔΑ είναι η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου δρομολόγησης δικτύου, παρουσιάστηκαν οι παράμετροι που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας και οι τεχνικές που εφαρμόζονται για την εξοικονόμηση ενέργειας. Προτάθηκε μια κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων με βάση την προσέγγιση που αυτά ακολουθούν ως προς την ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση και έγινε μια συγκριτική παρουσίαση των πρωτοκόλλων που έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό.

Αυτή η ανάλυση μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο οδηγό για την επιλογή μιας συγκριμένης κατηγορίας πρωτοκόλλων καθώς και ειδικότερα ενός συγκεκριμένου πρωτοκόλλου που να είναι το καταλληλότερο σύμφωνα με τα ειδικά χαρακτηριστικά και την υλοποίηση ενός ΑΔΑ και σύμφωνα με τις ανάγκες της εφαρμογής που αυτό καλείται να υποστηρίξει.

5.2 Συμπεράσματα

Καθοριστική σημασία στην ενεργειακή απόδοση ενός ΑΔΑ έχει η επιλογή της κατάλληλης κατηγορίας πρωτοκόλλων δρομολόγησης που θα χρησιμοποιηθεί ανάλογα με την εφαρμογή του ΑΔΑ καθώς και ειδικότερα το συγκεκριμένο πρωτόκολλο που θα επιλεγεί.

Τα επίπεδα πρωτόκολλα διαθέτουν απλότητα σχεδίασης, όμως δεν παρέχουν επεκτασιμότητα και δεν θα ήταν αποτελεσματικό να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλης κλίμακας ΑΔΑ. Αντίθετα, τα ιεραρχικά πρωτόκολλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αποτελεσματικότητα σε ΑΔΑ με μεγάλο αριθμό κόμβων που καλύπτουν μεγάλες περιοχές και μεταφέρουν μεγάλο όγκο δεδομένων. Μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά εφαρμογές που απαιτούν συνεχή ροή δεδομένων από τους κόμβους προς το σταθμό βάσης, όπως για παράδειγμα εφαρμογές που συλλέγουν συνεχώς μετρήσεις φυσικών μεγεθών από το περιβάλλον.

Σε εφαρμογές που απαιτούν επιλεκτική και περιστασιακή άντληση δεδομένων από τους κόμβους ενός ΑΔΑ είναι προτιμότερη η χρήση «δεδομένο-κεντρικών» πρωτοκόλλων που ανήκουν στην κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων με βάση τον τρόπο επιλογής των επιθυμητών δεδομένων. Αν οι εφαρμογές αυτές απαιτούν αξιόπιστη παράδοση των δεδομένων στο σταθμό βάσης θα πρέπει να επιλεγεί η κατηγορία των πρωτοκόλλων που είναι βασιζόμενα στο ερώτημα (*query-based*). Αντίθετα, σε εφαρμογές που παρέχουν ανοχή ως προς τη μη παράδοση κάποιων δεδομένων στο σταθμό βάσης, προς όφελος της ενεργειακής απόδοσης και της μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής του ΑΔΑ, είναι προτιμότερη η χρήση της κατηγορίας των πρωτοκόλλων που βασίζονται στη διαπραγμάτευση (*negotiation based*).

Τα πρωτόκολλα που βασίζονται στη γεωγραφική θέση των κόμβων ενδεχομένως αποδίδουν καλύτερα σε ΑΔΑ με κόμβους που δεν είναι στατικοί αλλά αλλάζουν συνεχώς θέση καθώς και σε εφαρμογές που απαιτούν την επιλεκτική άντληση δεδομένων από συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές του ΑΔΑ. Όμως τα πρωτόκολλα αυτά συνήθως δεν λαμβάνουν υπόψη τους τον όγκο, τη συχνότητα και το είδος των δεδομένων που διακινούνται στο δίκτυο ούτε και το είδος της εφαρμογής στην οποία χρησιμοποιείται το ΑΔΑ.

Σε εφαρμογές που έχουν συγκεκριμένες υψηλές απαιτήσεις από πλευράς αξιοπιστίας στην παράδοση των δεδομένων, είναι προτιμότερη η χρήση πρωτοκόλλων που εντάσσονται στην κατηγοριοποίηση με βάση την αξιοπιστία της μετάδοσης. Εδώ, η κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλών παράλληλων διαδρομών συνιστάται για χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν αξιοπιστία στην παράδοση των δεδομένων, υψηλή ταχύτητα μετάδοσης και αντοχή σε πιθανή διακοπή της επικοινωνίας μεταξύ κάποιων κόμβων. Επιπρόσθετα, αν κάποια εφαρμογή θέτει συγκεκριμένες απαιτήσεις παροχής ποιότητας υπηρεσίας για τη μετάδοση των δεδομένων από άκρο σε άκρο, όπως μέγιστη καθυστέρηση (*delay*) και διαθέσιμο εύρος ζώνης (*bandwidth*), είναι επιβεβλημένη η χρήση ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης που εντάσσεται στην κατηγορία των πρωτοκόλλων ποιότητας υπηρεσίας (*Quality of Service, QoS*). Τέτοιου είδους εφαρμογές είναι οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου (*real-time*) για μετάδοση πολυμέσων (εικόνας, ήχου, βίντεο).

5.3 Προοπτικές

Τα ΑΔΑ αποτελούν μια τεχνολογία αιχμής με διαρκώς αυξανόμενο πλήθος εφαρμογών. Για το λόγο αυτό αναπτύσσονται όλο και περισσότερα πρωτόκολλα που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής τους αποδοτικότητας.

Για τον ίδιο λόγο, αναπτύσσονται πρωτόκολλα που αποσκοπούν στην βελτιστοποίηση άλλων μεμονωμένων χαρακτηριστικών της λειτουργίας τους, καθώς και επίσης υβριδικά πρωτόκολλα για τη βελτιστοποίηση περισσότερων του ενός χαρακτηριστικών.

Η αξιολόγηση της απόδοσης των πρωτοκόλλων αυτών γίνεται ευχερέστερη μέσω της χρησιμοποίησης κατάλληλα διαμορφωμένων πειραματικών διατάξεων ΑΔΑ ή /και λογισμικών προσομοίωσης.

(Κενό φύλλο)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] K. Akkaya, M. Younis, “A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks”, Ad Hoc Network, Elsevier, 2005, Vol. 3, Issue 3, pp 325-349.
- [2] Nikolaos A. Pantazis, Stefanos A. Nikolidakis, Dimitrios D. Vergados, “Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15, No. 2, 2nd quarter 2013, pp. 551-591.
- [3] Q. Wang, M. Hempstead, W. Yang, “A Realistic Power Consumption Model for Wireless Sensor Network Devices,” Proceedings of the 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, Reston, 2006, Vol. 1, pp. 286-295.
- [4] A. Dunkels, F. Osterlind, N. Tsiftes, Z. He, “Software-Based On-Line Energy Estimation for Sensor Nodes,” Proceedings of the 4th workshop on Embedded Networked Sensors, New York, USA, 2007, pp. 28-32.
- [5] S. Kellner, M. Pink, D. Meier, E. Blass, “Towards a Realistic Energy Model for Wireless Sensor Networks,” Proceedings of the 5th Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services, Garmisch, 2008, pp. 97-100.
- [6] Q. Wang, W. Yang, “Energy Consumption Model for Power Management in Wireless Sensor Networks,” Proceedings of the 4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, SanDiego, 2007, pp. 142-151.
- [7] A. Shareef, Y. Zhu, “Energy Modeling of Wireless Sensor Nodes Based on Petri Nets,” Proceedings of the 39th International Conference on Parallel Processing, San Diego, 2010, pp. 101-110.
- [8] H. Zhou, D. Luo, Y. Gao, D. Zuo, “Modeling of Node Energy Consumption for Wireless Sensor Networks,” Wireless Sensor Network, 2011, Vol. 3, Issue 1, pp. 18-23.
- [9] T. Lee, “The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits,” Cambridge University Press, 1998.
- [10] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson, “Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring,” Proceedings of the 1st

- International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Atlanta, 2002, pp. 88-97.
- [11] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks, Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, Hawaii, January 2000.
- [12] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks," Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, Massachusetts, August 2000, pp. 56-67.
- [13] S. Lindsey, C.S. Raghavendra, PEGASIS: power efficient gathering in sensor information systems, Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, March 2002.
- [14] Y. Yao, J. Gehrke, The cougar approach to in-network query processing in sensor networks, SIGMOD Record, September 2002, Vol. 31, Issue 3, pp. 9-18.
- [15] J. Kulik, W. Rabiner, H. Balakrishnan, Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks, Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Massachusetts Institute of Technology, USA, Washington, 1999, pp. 174-185.
- [16] D. Braginsky, D. Estrin, Rumor routing algorithm for sensor networks, Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, GA, October 2002.
- [17] C. Schurgers, M.B. Srivastava, Energy efficient routing in wireless sensor networks, in: The MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force, McLean, VA, 2001.
- [18] L. Subramanian, R.H. Katz, An architecture for building self configurable systems, Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Boston, MA, August 2000.
- [19] Al-Karaki, A. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor networks: A Survey," Security and Networks, 2004, Vol. 11, Issue 6, pp. 6-28.
- [20] S. Murphy, L. Aceves, "An Efficient Routing Protocol for Wireless Networks," Mobile Networks and Applications, ACM Journal, USA, Hingham, 1996, Vol. 1, Issue 2, pp. 183-197.

- [21] B. Bellur, R. Ogier, "A Reliable, Efficient Topology Broadcast Protocol for Dynamic Networks," Proceedings of the IEEE INFOCOM '99, New York, USA, 1999, vol.1, pp.178-186.
- [22] R. Ogier, F. Templin, M. Lewis, "Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)," RFC Editor 2004.
- [23] D. Park, S. Corson, "A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks," Proceedings of the 16th Conference on Computer and Communications Societies, Japan, 1997, pp. 1405-1413.
- [24] H. Lim, C. Kim, "Flooding in Wireless Ad Hoc Networks," Computer Communications, 2001, Vol. 24, Issue 3, pp. 353-363.
- [25] S. Hedetniemi, A. Liestman, "A Survey of Gossiping and Broadcasting in Communication Networks," Networks, 1998, Vol. 18, Issue 4, pp. 319-349.
- [26] D. Braginsky, D. Estrin, "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks," Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, USA, Atlanta, 2002, pp. 22-31.
- [27] F. Yu, Y. Li, F. Fang, Q. Chen, "A New TORA-Based Energy Aware Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Networks," Proceedings of the 3rd IEEE/IFIP International Conference in Central Asia on Internet (ICI), Tashkent, 2007, pp. 1-4.
- [28] Z.J. Haas, "A New Routing Protocol for the Reconfigurable Wireless Networks," Proceedings of the 6th International Conference on Universal Personal Communications Record, San Diego, CA, 1997, Vol. 2, pp. 562-566.
- [29] M. J. Handy, M. Haase, D. Timmermann, "Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-Head Selection," Proceedings of the 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network, USA, 2002, Vol. 1, pp. 368-372.
- [30] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Transactions on Wireless Communicatons, 2002, Vol. 1, Issue 4, pp. 60-70.
- [31] A. Manjeshwar, D. Agrawal, "Teen: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks," Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'01) San Francisco, CA, April 2001, pp. 2009-2015.

- [32] A. Manjeshwar, D. Agrawal, "APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks," Proceedings of the International Parallel and Distributed Processing Symposium, Florida, 2002, pp. 195-202.
- [33] S. Lindsey, C. Raghavendra, "PEGASIS: Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems," Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, USA, Montana, 2002, Vol. 3, pp. 1125-1130.
- [34] J.N. Al-Karaki, R. Mustafa, A. Kamal, "Data Aggregation in Wireless Sensor Networks Exact and Approximate Algorithms," Proceedings of the IEEE Workshop High Performance Switching and Routing 2004, Phoenix, AZ, 2004, pp. 241-245.
- [35] S. Muruganathan, D. Ma, R. Bhasin, A. Fapojuwo, "A Centralized Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," IEEE Communications Magazine, 2005, Vol. 43, Issue 3, pp. 8-13.
- [36] Q. Li, J. Aslam, D. Rus, "Hierarchical Power-aware Routing in Sensor Networks," Proceedings of DIMACS Workshop on Pervasive Networking, California, 2001, pp. 25-27.
- [37] Y. Wu, S. Fahmy, N. Shroff, "Energy Efficient Sleep/Wake Scheduling for Multi-Hop Sensor Networks: non-Convexity and Approximation Algorithm," Proceedings of the 26th Annual IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007), Anchorage, Alaska, 2007, pp. 1568-1576.
- [38] T.P. Sharma, R.C. Joshi, Manoj Misra, "GBDD: Grid Based Data Dissemination in Wireless Sensor Networks," Proceedings of the 16th International Conference on Advanced Computing and Communications (ADCOM 2008), Chennai, India, 2008, pp. 234-240.
- [39] J. Loff, M. Bonab, S. Khorsandi, "A Novel Cluster-based Routing Protocol with Extending Lifetime for Wireless Sensor Networks," Proceedings of the 5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN08), East Java Indonesia, Surabaya, 2008, pp. 1-5.
- [40] H. Cheng, G. Yang, S. Hu, "NHRPA: A Novel Hierarchical Routing Protocol Algorithm for Wireless Sensor Networks," China Universities of Posts and Telecommunications, 2008, Vol. 15, Issue 3, pp. 75-81.

- [41] Kandris D., Tsioumas P., Tzes A., Pantazis N., Vergados D. Hierarchical energy efficient routing in wireless sensor networks. Proceedings of the 16th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation; Ajaccio, France. June 25–27, 2008; pp. 1856–1861.
- [42] M. Younis, M. Youssef, K. Arisha, Energy-aware routing in cluster-based sensor networks, Proceedings of the 10th IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS2002), Fort Worth, TX, October 2002.
- [43] H. Luo, F. Ye, J. Cheng, S. Lu, L. Zhang, “TTDD: Two-Tier Data Dissemination in Large-Scale Wireless Sensor Networks,” Wireless Networks, Springer Netherlands, 2005, Vol. 11, Issue 1, pp. 161-175.
- [44] Y. Yuan, Z. He, M. Chen, “Virtual MIMO-based Cross-layer Design for Wireless Sensor Networks,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, Vol. 55, Issue 3, pp. 856-864.
- [45] C. H. Lung, C. Zhou, “Using Hierarchical Agglomerative Clustering in Wireless Sensor Networks: An Energy-efficient and Flexible Approach,” Ad Hoc Networks, 2010, Vol. 8, Issue 3, pp. 328-344.
- [46] N. Sadagopan, B. Krishnamachari, A. Helmy, “Active Query Forwarding in Sensor Networks (ACQUIRE),” Ad Hoc Networks, 2005, Vol. 3, Issue 1, pp. 91-113.
- [47] C. M. Cordeiro, D. P. Agrawal, Book: “Ad hoc and Sensor Networks: Theory and Applications Edition”, World Scientific, 2006.
- [48] J. Kulik, W. Heinzelman, H. Balakrishnan, “Negotiation-Based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks,” Wireless Networks Journal, 2004, Vol. 8, Issue 2, pp. 169-185.
- [49] Y. Yu, R. Govindan, D. Estrin, “Geographical and Energy Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks,” UCLA Computer Science Department Technical Report, May 2001, pp. 1-11.
- [50] S. Basagni, I. Chlamtac, V. Syrotiuk, B. Woodward, “A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM),” Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, USA, Texas, 1998, pp. 67-84.

- [51] J. Newsome, D. Song, "GEM: Graph EMbedding for Routing and Data-centric Storage in Sensor Networks Without Geographic Information," Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, California, USA, 2003, pp. 76-88.
- [52] G. Lukachan, M. Labrador, "SELAR: Scalable Energy-Efficient Location Aided Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, USA, Florida, 2004, pp. 694-695.
- [53] M. Zimmerling, W. Dargie, J.M. Reason, "Energy-Efficient Routing in Linear Wireless Sensor Networks," Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS 2007), Italy, Pisa, 2007, pp. 1-3.
- [54] F. Ye, G. Zhong, S. Lu, L. Zhang, "GRAdient Broadcast: A Robust Data Delivery Protocol for Large Scale Sensor Networks," Wireless Networks (WINET), 2005, Vol. 11, Issue 3, pp. 285-298.
- [55] J. Zhang, C. Jeong, G. Lee, H. Kim, "Cluster-Based Multi-Path Routing Algorithm for Multi-hop Wireless Network," Future Generation Communication and Networking, Korea, 2007, Vol. 1, Issue 1, pp. 67-75.
- [56] M. Chen, V. Leung, S. Mao, Y. Yuan, "Directional Geographical Routing for Real-Time Video Communications in Wireless Sensor Networks," Computer Communications, 2007, Vol. 30, Issue 17, pp. 1-16.
- [57] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, G. Pottie, "Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network," IEEE Personal Communications, 1999, Vol. 7, Issue 5, pp. 16-27.
- [58] T. He, J. Stankovic, C. Lu, T. Abdelzaher, "SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks," Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems, Toronto, 2003, pp. 46-55.
- [59] M. Chen, M. Guizani, M. Jo, "Mobile Multimedia Sensor Networks: Architecture and Routing," Proceedings of Mobility Management in the Networks of the Future World, Shanghai, 2011, pp. 409-412.
- [60] M. Chu, H. Haussecker, F. Zhao, Scalable information-driven sensor querying and routing for ad hoc heterogeneous sensor networks, The

International Journal of High Performance Computing Applications 16 (3) (2002) pp. 293-313.

- [61] R. Shah, J. Rabaey, Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks, Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Orlando, FL, March 2002.
- [62] V. Rodoplu, T.H. Ming, Minimum energy mobile wireless networks, IEEE Journal of Selected Areas in Communications 17 (8) (1999) pp. 1333–1344.
- [63] L. Li, J. Y Halpern, Minimum energy mobile wireless networks revisited, Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC 01), Helsinki, Finland, June 2001.
- [64] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, Geography-informed energy conservation for ad hoc routing, Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 01), Rome, Italy, July 2001.
- [65] B. Blum, T. He, S. Son, J. Stankovic, “IGF: A State-Free Robust Communication Protocol for Wireless Sensor Networks,” Technical Report CS-2003-11, Department of Computer Science, University of Virginia, USA, 2003.
- [66] B. Leong, B. Liskov, R. Morris, “Geographic Routing Without Planarization,” Proceedings of the 3rd Conference on Networked Systems Design and Implementation, San Jose, CA, 2006, Vol. 3, pp. 25-39.
- [67] D. Chen, P. Varshney, “On-demand Geographic Forwarding for Data Delivery in Wireless Sensor Networks,” Computer Communications, 2007, Vol. 30, Issue 14-15, pp. 2954-2967.
- [68] L. Zou, M. Lu, Z. Xiong, “PAGER-M: A Novel Location-Based Routing Protocol for Mobile Sensor Networks,” Proceedings of the 2007 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, Beijing, China, 2007, pp. 1182-1185.
- [69] M. Chen, V. Leung, S. Mao, Y. Xiao, I. Chlamtac, “Hybrid Geographical Routing for Flexible Energy-Delay Trade-Offs,” IEEE Trans. Vehicular Technology, 2009, Vol. 58, Issue 9, pp. 4976-4988.
- [70] J.-H. Chang, L. Tassiulas, Maximum lifetime routing in wireless sensor networks, Proceedings of the Advanced Telecommunications and

Information Distribution Research Program (ATIRP 2000), College Park, MD, March 2000.

- [71] K. Kalpakis, K. Dasgupta, P. Namjoshi, Maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks, Proceedings of IEEE International Conference on Networking (NETWORKS 02), Atlanta, GA, August 2002.
- [72] K. Akkaya, M. Younis, An energy-aware QoS routing protocol for wireless sensor networks, Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile and Wireless Networks (MWN 2003), Providence, RI, May 2003.
- [73] J. Raju, J. Garcia-Luna-Aceves, "A New Approach to on-Demand Loop-free Multipath Routing," Proceedings of the 8th International Conference on Computer Communications and Networks, Boston, MA, 1999, pp. 522-527.
- [74] X. Hou, D. Tipper, J. Kabara, "Label-based Multipath Routing (LMR) in Wireless Sensor Networks," Proceedings of the 6th International Symposium on Advanced Radio Technologies (ISART), USA, Boulder, 2004, pp. 113-118.
- [75] Y. Wang, C. Tsai, H. Mao, "HMRP: Hierarchy-Based Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," Science and Engineering, 2006, Vol. 9, Issue 3, pp. 255-264.
- [76] M. Chen, V. Leung, S. Mao, "Directional Controlled Fusion in Wireless Sensor Networks," Mobile Network Application, 2009, Vol. 14, Issue 2, pp. 220-229.
- [77] T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, T. Clausen, J. Hui, R. Kelsey, P. Levis, K. Pister, R. Struik, JP. Vasseur," Internet draft, <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-roll-rpl-18>, 2011.
- [78] E. Felemban, C. Lee, E. Ekici, "MMSPEED: Multipath Multi-SPEED Protocol for QoS Guarantee of Reliability and Timeliness in Wireless Sensor Networks," IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, Vol. 5, Issue 6, pp. 738-754.