



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Συνάθροιση Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα
Αισθητήρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνιος Κ. Κοσκινάς

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

Συνάθροιση Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνιος Κ. Κοσκινάς

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24^η Μαρτίου 2016

.....
Π. Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χ. Καψάλης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Φικιώρης

Αν.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

.....
Αντώνιος Κ. Κοσκινάς

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
Ε.Μ.Π.

Copyright © Αντώνιος Κ. Κοσκινάς, Αθήνα 2016

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Περίληψη

Η μεγάλη τεχνολογική πρόοδος έχει καταστήσει εφικτή την ανάπτυξη Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSN). Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από κόμβους-αισθητήρες χαμηλού κόστους και πεπερασμένων ενεργειακών αποθεμάτων. Ένας πολύ σημαντικός στόχος είναι ο σχεδιασμός και η χρήση μεθόδων που επιτυγχάνουν ενεργειακή αποδοτικότητα και επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής των δικτύων αυτών. Μια από τις μεθόδους αυτές είναι και η συνάθροιση δεδομένων (Data Aggregation).

Σκοπός της εργασίας είναι η πρόταση ενός σχήματος λειτουργίας που χρησιμοποιεί συνάθροιση δεδομένων και ταυτόχρονα εξασφαλίζει ότι ικανοποιούνται οι προδιαγραφές της ποιότητας υπηρεσίας που τίθενται. Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στα σημερινά δίκτυα ασύρματων αισθητήρων και στις εφαρμογές που αυτά εξυπηρετούν. Στο Κεφάλαιο 2 επιχειρείται μια ταξινόμηση όλων των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη ενεργειακής αποδοτικότητας στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται εκτενής αναφορά στα πρωτόκολλα λειτουργίας που χρησιμοποιούν συνάθροιση δεδομένων παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται και διατυπώνεται το προτεινόμενο σχήμα λειτουργίας. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 απεικονίζονται διαγράμματα, τα οποία προκύπτουν μετά από προσομοιώσεις σε δίκτυα στο περιβάλλον MATLAB και σχολιάζονται τα αποτελέσματα.

Λέξεις – Κλειδιά

Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, Συνάθροιση Δεδομένων, Ενεργειακή Αποδοτικότητα, Εφαρμογές Παρατήρησης, Δένδρο Συνάθροισης Δεδομένων

Abstract

Recent advancement in electronics has enabled the development of Wireless Sensor Networks (WSN). These networks are composed of low-cost sensors that have limited power resources. One of the main goals in WSN field is the design of energy efficient methods that prolong the network lifetime. One of the most important methods is Data Aggregation.

The purpose of this diploma thesis is the study of an aggregation scheme that guarantees a level of Quality of Service. The first chapter describes the current state of the WSN and mentions applications, in which WSN are used for. The second chapter provides a taxonomy of all the techniques that are used for achieving energy efficiency in WSN. The third chapter provides an overview of the protocols that use Data Aggregation as well as their advantages and disadvantages. The problem under consideration is formulated in the fourth chapter, where also the proposed scheme is presented. Finally, the fifth chapter presents diagrams built from simulations in different networks and results are discussed.

Key Words

Wireless Sensor Networks, Data Aggregation, Energy-efficiency, Monitoring Applications, Tree-based Aggregation

Ευχαριστήριο σημείωμα

Με την ολοκλήρωση της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Ε.Μ.Π και επιβλέποντα της εργασίας, κ. Παναγιώτη Κωττή, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της, καθώς και για την άψογη συνεργασία που είχαμε. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το οικογενειακό και φιλικό μου περιβάλλον για την υποστήριξη και τη συμπαράσταση κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αφιερώνεται στα αδέρφια μου, Μάριο και Σωτήρη

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	13
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ	17
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	18
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	19
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	21
1.1 Εισαγωγή.....	21
1.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	22
1.3 Περιγραφή του ασύρματου κόμβου-αισθητήρα.....	24
1.4 Στοιίβα Πρωτοκόλλων WSN.....	27
1.5 Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	33
1.5.1 Περιβαλλοντικές εφαρμογές	33
1.5.2 Εφαρμογές υγείας.....	33
1.5.3 Οικιακές εφαρμογές.....	34
1.5.4 Βιομηχανικές εφαρμογές.....	34
1.5.5 Στρατιωτικές εφαρμογές.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	36
2.1 Εισαγωγή.....	36
2.2 Προσεγγίσεις κύκλου λειτουργίας.....	36
2.2.1 Πρωτόκολλα ελέγχου τοπολογίας.....	38
2.2.1.1 Πρωτόκολλα καθοδηγούμενα από τη θέση.....	39
2.2.1.1 Πρωτόκολλα καθοδηγούμενα από τη	
συνδεσιμότητα.....	43
2.2.1.3 Σύνοψη.....	45
2.2.2 Πρωτόκολλα ανάπαυσης – αφύπνισης.....	45

2.2.2.1	Πρωτόκολλα κατά παραγγελία συναντήσεων.....	46
2.2.2.2	Πρωτόκολλα προγραμματισμένων συναντήσεων...	50
2.2.2.3	Πρωτόκολλα ασύγχρονων συναντήσεων.....	52
2.2.2.4	Σύνοψη.....	54
2.2.3	Πρωτόκολλα MAC με χαμηλό κύκλο λειτουργίας.....	54
2.2.3.1	Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου.....	55
2.2.3.2	Πρωτόκολλα πρόσβασης ανταγωνισμού.....	56
2.2.3.3	Υβριδικά πρωτόκολλα πρόσβασης.....	57
2.2.3.4	Σύνοψη.....	58
2.3	Προσεγγίσεις καθοδηγούμενες από τα δεδομένα.....	59
2.3.1	Τεχνικές πρόβλεψης δεδομένων.....	60
2.3.1.1	Στοχαστικές προσεγγίσεις.....	61
2.3.1.2	Προσεγγίσεις με χρήση χρονοσειρών.....	61
2.3.1.3	Αλγοριθμικές προσεγγίσεις.....	63
2.3.1.4	Σύνοψη.....	65
2.3.2	Ενεργειακά αποδοτική απόκτηση δεδομένων.....	66
2.3.2.1	Τεχνικές προσαρμοζόμενης δειγματοληψίας.....	67
2.3.2.2	Τεχνικές ιεραρχικής δειγματοληψίας.....	68
2.3.2.3	Τεχνικές δειγματοληψίας που βασίζονται σε μοντέλα περιγραφής του φαινομένου.....	70
2.3.2.4	Σύνοψη.....	71
2.4	Προσεγγίσεις βασισμένες στην κινητικότητα.....	71
2.4.1	Προσεγγίσεις κινητού κόμβου-συλλέκτη.....	73
2.4.2	Προσεγγίσεις κινούμενων κόμβων-αναμεταδοτών....	74
2.4.3	Σύνοψη.....	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ..... 78

3.1	Εισαγωγή.....	78
3.2	Πρωτόκολλα συνάθροισης βασισμένα στην αρχιτεκτονική	

δικτύου.....	79
3.2.1 Επίπεδη αρχιτεκτονική δικτύου.....	79
3.2.2 Ιεραρχική αρχιτεκτονική δικτύου.....	84
3.2.2.1 Συνάθροιση δεδομένων σε δίκτυα που οργανώνονται κατά συστάδες.....	84
3.2.2.2 Συνάθροιση δεδομένων σε δίκτυα που οργανώνονται κατά αλυσίδες.....	89
3.2.2.3 Συνάθροιση δεδομένων σε δίκτυα που οργανώνονται κατά δένδρα.....	91
3.2.2.4 Συνάθροιση δεδομένων σε δίκτυα που οργανώνονται κατά πλέγματα.....	93
3.3 Πρωτόκολλα συνάθροισης δεδομένων σε WSN δίκτυα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών.....	95
3.4 Πρωτόκολλα συνάθροισης δεδομένων για αξιοπιστία από άκρο σε άκρο και έλεγχο συμφόρησης.....	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ..	100
4.1 Περιγραφή του προβλήματος.....	100
4.2 Βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά WSN ειδικού σκοπού.....	100
4.3 Διατύπωση του προβλήματος.....	102
4.3.1 Ορισμός μέγιστης καθυστέρησης σε επίπεδο κόμβου.....	104
4.3.2 Ορισμός της συνάρτησης οφέλους.....	105
4.3.3 Προσδιορισμός του διαστήματος αναμονής.....	107
4.4 Παρουσίαση του αλγορίθμου συνάθροισης και εκπομπής μετρήσεων.....	110
4.5 Αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου.....	114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	115
5.1 Τιμές λειτουργικών παραμέτρων προσομοίωσης.....	115
5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης για διαφορετικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας.....	116

5.2.1	Ενεργειακό όφελος.....	116
5.2.2	Καθυστέρηση απόκρισης.....	117
5.2.3	Συμπεράσματα και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	118
5.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης για διαφορετικές υπηρεσίες.....	119
5.3.1	Ενεργειακό όφελος.....	119
5.3.2	Καθυστέρηση απόκρισης.....	120
5.3.3	Συμπεράσματα και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	121
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		123

Κατάλογος συντμήσεων

WSN	Wireless Sensor Network
WS	Wireless Sensor
WMN	Wireless Mesh Network
MAC	Medium Access Control
TDMA	Time Division Multiple Access
CDMA	Code Division Multiple Access
QoS	Quality of Service
RTS	Request to Send
CTS	Clear to Send
GPS	Global Positioning System
TCP	Transmission Control Protocol

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1.1: Αρχιτεκτονική δικτύων WSN.....	24
Σχήμα 1.2: Δομικά στοιχεία κόμβου-αισθητήρα.....	25
Σχήμα 1.3: Αρχιτεκτονική κόμβου-αισθητήρα.....	26
Σχήμα 1.4: Στοιβά πρωτοκόλλων ενός WSN.....	28
Σχήμα 1.5: Στοιβά Πρωτοκόλλων ενός WSN σύμφωνα με το πρότυπο ZigBee.....	31
Σχήμα 1.6: Αρχιτεκτονική ενός δικτύου WirelessHART.....	32
Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση των τεχνικών κύκλου λειτουργίας.....	37
Σχήμα 2.2: Εικονικά πλέγματα στο πρωτόκολλο GAF.....	39
Σχήμα 2.3: Καταστάσεις μετάβασης στο πρωτόκολλο GAF.....	41
Σχήμα 2.4: Περιοχές προτεραιότητας στο πρωτόκολλο GeRaF.....	43
Σχήμα 2.5: Γραμμική τοπολογία δικτύου για επεξήγηση λειτουργίας πρωτοκόλλου PTW.....	48
Σχήμα 2.6: Αλυσιδωτή διαδικασία αφύπνισης στο πρωτόκολλο PTW.....	49
Σχήμα 2.7: Κλιμακωτό σχήμα αφύπνισης κόμβων.....	51
Σχήμα 2.8: Παράδειγμα ασύγχρονου προγράμματος συναντήσεων.....	53
Σχήμα 2.9: Ταξινόμηση των τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας που καθοδηγούνται από τα δεδομένα.....	59
Σχήμα 2.10: Διαδικασία συλλογής δεδομένων με μηχανισμούς EEDC.....	65
Σχήμα 2.11: Ταξινόμηση των τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας που βασίζονται στην κινητικότητα.....	73
Σχήμα 2.12: Αρχιτεκτονική WSN με κινητούς κόμβους-αναμεταδότες.....	75
Σχήμα 3.1.α: Φάση διάδοσης ενδιαφέροντος στο πρωτόκολλο Directed Diffusion..	82
Σχήμα 3.1.β: Φάση σχηματισμού διαδρομών στο πρωτόκολλο Directed Diffusion..	82
Σχήμα 3.1.γ: Φάση προώθησης δεδομένων κατά μήκος των προτιμητέων διαδρομών στο πρωτόκολλο Directed Diffusion.....	82
Σχήμα 3.2: Μοντέλο ER στο πρωτόκολλο Directed Diffusion.....	83
Σχήμα 3.3 : Μοντέλο RS στο πρωτόκολλο Directed Diffusion.....	84

Σχήμα 3.4: Μοντέλο επικοινωνίας σε WSN δίκτυα οργανωμένα κατά συστάδες.....	85
Σχήμα 3.5: Μοντέλο επικοινωνίας WSN δικτύου στο πρωτόκολλο LEACH.....	87
Σχήμα 3.6: Μοντέλο επικοινωνίας στο πρωτόκολλο PEGASIS.....	90
Σχήμα 3.7: Μορφή ερωτημάτων στο πρωτόκολλο TAG.....	93
Σχήμα 3.8: Τρόπος λειτουργίας σχήματος grid-based data aggregation.....	94
Σχήμα 3.9: Τρόπος λειτουργίας σχήματος In-network data aggregation.....	95
Σχήμα 3.10: Τοπολογία δακτυλίου σε δίκτυο WSN και δρομολόγηση μέσω πολλαπλών διαδρομών στο πρωτόκολλο Synopsis Diffusion.....	97
Σχήμα 3.11: Τρόπος οργάνωσης WSN δικτύου στο υβριδικό πρωτόκολλο Tributaries and Deltas.....	98
Σχήμα 3.12: Αρχιτεκτονική δομή πρωτοκόλλου AIDA.....	98
Σχήμα 4.1: Φάσεις λειτουργίας ενός WSN.....	102
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής προτεινόμενου αλγόριθμου συνάθροισης και μετάδοσης δεδομένων σε WSN.....	113

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 4.1: Σύνοψη χρησιμοποιούμενων συμβόλων.....	109
Πίνακας 5.1: Τιμές παραμέτρων προσομοίωσης	115

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 5.1: Ποσοστιαία μεταβολή του ενεργειακού οφέλους για διάφορες τιμές της παραμέτρου p	117
Διάγραμμα 5.2: Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης μέγιστης καθυστέρησης για διάφορες τιμές της παραμέτρου p	118
Διάγραμμα 5.3: Ποσοστιαία μεταβολή του ενεργειακού οφέλους για διάφορες τιμές της παραμέτρου σ_{τ}	120
Διάγραμμα 5.4: Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης μέγιστης καθυστέρησης για διάφορες τιμές της παραμέτρου σ_{τ}	121

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας και η αυξανόμενη χρήση ασύρματων συσκευών κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει στην αναθεώρηση του τρόπου αντιμετώπισης των ασύρματων δικτύων. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ενσύρματα δίκτυα, τα ασύρματα δίκτυα χαρακτηρίζονται από την έλλειψη κεντρικής διαχείρισης, τη δυσκολία προσέγγισης και φυσικής παρουσίας στο δίκτυο, την αναξιοπιστία του ασύρματου διαύλου, την κινητικότητα και τους περιορισμούς των πόρων των κόμβων. Επομένως, στα ασύρματα δίκτυα εμφανίζεται επιτακτική η ανάγκη για εξασφάλιση αυτόνομης λειτουργίας. Η έννοια των αυτόνομων συστημάτων υπολογιστών και επικοινωνιών θεμελιώθηκε αρχικά από την Πρωτοβουλία Αυτόνομου Υπολογισμού (Autonomic Computing Initiative, ACI). Για να χαρακτηριστεί ένα σύστημα αυτόνομο πρέπει να διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- i. Το σύστημα πρέπει να ελέγχει τις εσωτερικές και εξωτερικές του λειτουργίες, χωρίς εξωτερική παρέμβαση.
- ii. Το σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να προσαρμόζεται στις μεταβολές του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται, κάνοντας τις απαραίτητες τροποποιήσεις για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του.
- iii. Το σύστημα πρέπει να είναι διαρκώς ενήμερο ώστε να είναι σε θέση να αντιλαμβάνεται έγκαιρα τις μεταβολές και να αντιδρά καταλλήλως.

Τα ασύρματα δίκτυα που διαθέτουν αυτόνομη λειτουργία συναντώνται στη βιβλιογραφία ως ασύρματα αυτό-οργανούμενα δίκτυα (Wireless Self-Organizing Networks, WSON).

Στην ευρύτερη κατηγορία των WSON ανήκουν τα ασύρματα ad hoc δίκτυα, δηλαδή δίκτυα τα οποία σχηματίζονται οπουδήποτε και οποτεδήποτε, δίχως την ανάγκη ύπαρξης κάποιας υποδομής. Οι τρεις μεγάλες κατηγορίες WSON δικτύων είναι οι ακόλουθες:

- i. *Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων*
Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks, WSN) αποτελούνται από ένα πλήθος ασύρματων αισθητήρων που είναι επιφορτισμένοι με την παρακολούθηση ενός ή περισσότερων φυσικών φαινομένων πραγματοποιώντας μετρήσεις των κατάλληλων φυσικών μεγεθών. Τα δίκτυα αυτά είναι ομογενή, αφού αποτελούνται από κόμβους με πανομοιότυπες λειτουργίες και δυνατότητες. Οι κόμβοι διαθέτουν περιορισμένους ενεργειακούς και υπολογιστικούς πόρους. Τα δίκτυα αυτά μπορεί να είναι μεγάλης κλίμακας με εκατοντάδες ή χιλιάδες κόμβους. Η παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθεί με αυτήν την κατηγορία δικτύων. Για αυτό θα γίνει εκτενέστερη αναφορά σε αυτά σε επόμενη ενότητα.
- ii. *Ασύρματα χαοτικά δίκτυα*

Τα ασύρματα χαοτικά δίκτυα (Wireless Mesh Networks, WMN) χρησιμοποιούνται για την παροχή υπηρεσιών Διαδικτύου σε δυσμενές περιβάλλον. Ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες: τα δίκτυα υποδομής WMN (infrastructure WMN), τα δίκτυα πελατών WMN (client WMN) και τα υβριδικά δίκτυα WMN (hybrid WMN). Οι κόμβοι των δικτύων υποδομής WMN σχηματίζουν ένα μικρό δίκτυο παροχής υπηρεσιών και πρέπει να ανταποκρίνονται στην υψηλή ζήτηση για εξυπηρέτηση των WMN δικτύων πελατών. Τα WMN δίκτυα πελατών πρέπει να εγγυώνται την εξασφαλισμένη σύνδεση των κόμβων-πελατών τους με το δίκτυο υποδομής, παρά την ετερογένεια στους τρόπους σύνδεσης. Τα υβριδικά δίκτυα WMN αποτελούνται και από κόμβους-υποδομής και από κόμβους-πελάτες.

iii. *Δίκτυα με ανοχή σε καθυστέρηση/αποσύνδεση*

Τα δίκτυα με ανοχή σε καθυστέρηση/αποσύνδεση (Delay/Disruption Tolerant Networks, DTN) αποτελούν μια κατηγορία ασύρματων δικτύων που αναπτύσσονται σε δυναμικό περιβάλλον με αντίξοες συνθήκες. Χαρακτηρίζονται από συχνές διακοπές επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων, ενώ δεν είναι πάντοτε εφικτή η σύνδεση του κόμβου-πηγής με τον κόμβο-προορισμό. Στα δίκτυα αυτά οι κόμβοι διαθέτουν περιορισμένους ενεργειακούς, επεξεργαστικούς και αποθηκευτικούς πόρους.

1.2 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN)

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) είναι μια υποδομή που αποτελείται από στοιχεία αίσθησης (μέτρησης), υπολογισμού και επικοινωνίας και παρέχει τη δυνατότητα στο διαχειριστή του δικτύου να παρατηρεί γεγονότα και φαινόμενα που συμβαίνουν σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον και να αντιδρά καταλλήλως. Ο επιτηρητής του δικτύου είναι συνήθως κάποιος κοινωνικός, κυβερνητικός, εμπορικός ή βιομηχανικός οργανισμός.

Τα σημερινά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από μεγάλο αριθμό φθηνών συσκευών που διασυνδέονται μεταξύ τους με χρήση ασύρματης επικοινωνίας χαμηλής ισχύος. Στόχος ενός WSN δικτύου είναι η παρακολούθηση ενός ή περισσότερων φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα εντός μιας περιοχής ενδιαφέροντος. Καθώς τα WSN αναπτύσσονται σε περιοχές όπου η ανθρώπινη παρέμβαση είναι δύσκολη ή ιδιαίτερα δαπανηρή, η λειτουργία τους πρέπει να είναι αυτόνομη. Σύμφωνα με τις κατευθύνσεις της IBM, για να είναι ένα σύστημα αυτόνομο πρέπει να διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά:

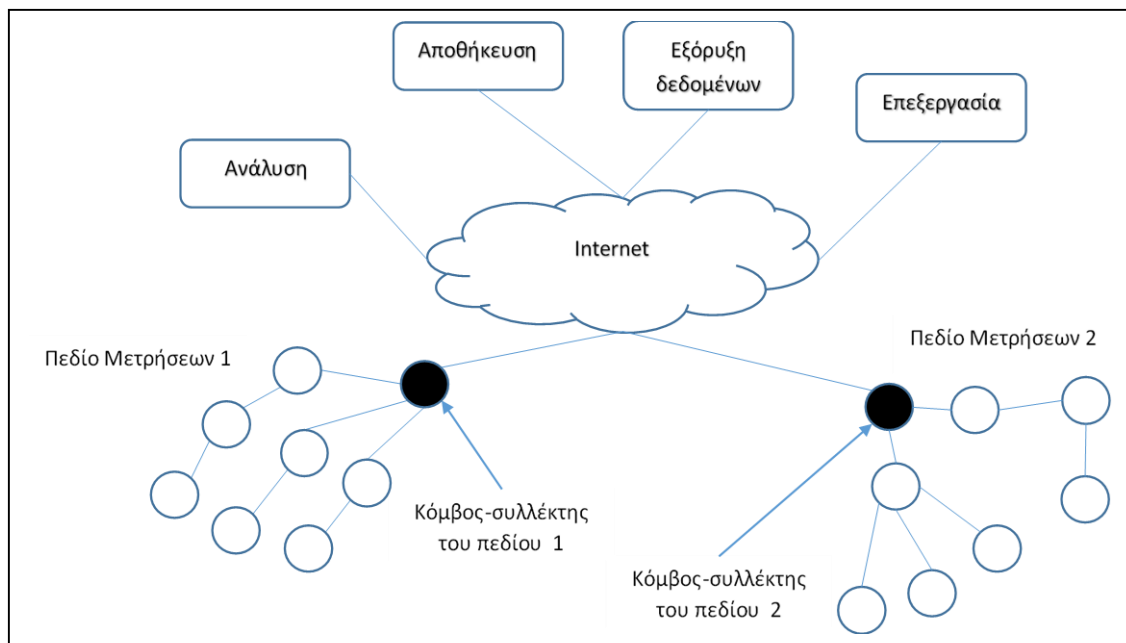
1. Αυτο-ρύθμιση (self-configurable)
2. Αυτο-βελτιστοποίηση (self-optimizing)
3. Αυτο-προστασία (self-protecting)
4. Αυτο-ίαση (self-healing)

Η ιδιότητα της αυτο-ρύθμισης εξασφαλίζει ότι ένα WSN ρυθμίζει δίχως εξωτερική παρέμβαση τις παραμέτρους που απαιτούνται για την ομαλή λειτουργία του. Επιπλέον,

η ιδιότητα της αυτο-βελτιστοποίησης προσδίδει στο WSN την ικανότητα προσαρμογής των παραμέτρων λειτουργίας ώστε η συνολική λειτουργία του δικτύου να παραμένει βέλτιστη. Η ιδιότητα της αυτο-προστασίας συνεπάγεται ότι ένα WSN έχει την ικανότητα να προλαμβάνει και να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά μεταβολές που ενδεχομένως απειλούν την ομαλή λειτουργία του. Τέλος, η ιδιότητα της αυτο-ίασης επιτρέπει σε ένα WSN να διαγνώσει πιθανή διαταραχή της λειτουργίας του, την αιτία που την προκάλεσε αλλά και τρόπους επαναφοράς της βέλτιστης λειτουργίας του.

Η δομή ενός WSN είναι σχετικά απλή. Ένα WSN απαρτίζεται από ένα σύνολο ασύρματων κόμβων-αισθητήρων (Wireless Sensor, WS) έκαστος των οποίων σε κατάλληλες χρονικές στιγμές διεξάγει μετρήσεις των φυσικών μεγεθών που ενδιαφέρουν. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους κόμβους ενός WSN συγκεντρώνονται συνήθως στον κόμβο-συλλέκτη (sink node) του WSN. Συνήθως, ο κόμβος αυτός έχει μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ και ενεργειακούς πόρους από τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Χρησιμοποιώντας τεχνικές ασύρματης επικοινωνίας οι κόμβοι αισθητήρες μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους. Όμως, λόγω των πεπερασμένων ενεργειακών πόρων που διαθέτουν οι κόμβοι ενός WSN, είναι ανέφικτη η απευθείας επικοινωνία όλων των κόμβων του δικτύου με τον κόμβο-συλλέκτη. Για το λόγο αυτό, υιοθετείται συνήθως μια λειτουργία προώθησης των μηνυμάτων πληροφορίας βήμα προς βήμα από τον αρχικό κόμβο-αποστολέα μέχρι τον κόμβο-συλλέκτη. Επομένως, κάθε ασύρματος κόμβος, εκτός από μέτρηση κάποιου ή κάποιων μεγεθών, πρέπει να είναι σε θέση να επεξεργάζεται δεδομένα, να αποθηκεύει δεδομένα και να επικοινωνεί με άλλους κόμβους. Δηλαδή, οι κόμβοι ενός WSN αναλαμβάνουν ένα διπλό ρόλο: αφενός, λειτουργούν ως πηγές πληροφορίας που προέρχεται από τον αισθητήρα τους και, αφετέρου, λειτουργούν ως ενδιάμεσοι κόμβοι-αναμεταδότες μηνυμάτων άλλων κόμβων του δικτύου. Τέλος, μέσω του κόμβου-συλλέκτη επιτυγχάνεται και σύνδεση, συνήθως μέσω του Διαδικτύου, του ασύρματου δικτύου με το διαχειριστή του συστήματος, ο οποίος αξιοποιεί τη λαμβανόμενη πληροφορία.

Η προαναφερθείσα αρχιτεκτονική των δικτύων WSN απεικονίζεται και στο ακόλουθο σχήμα.



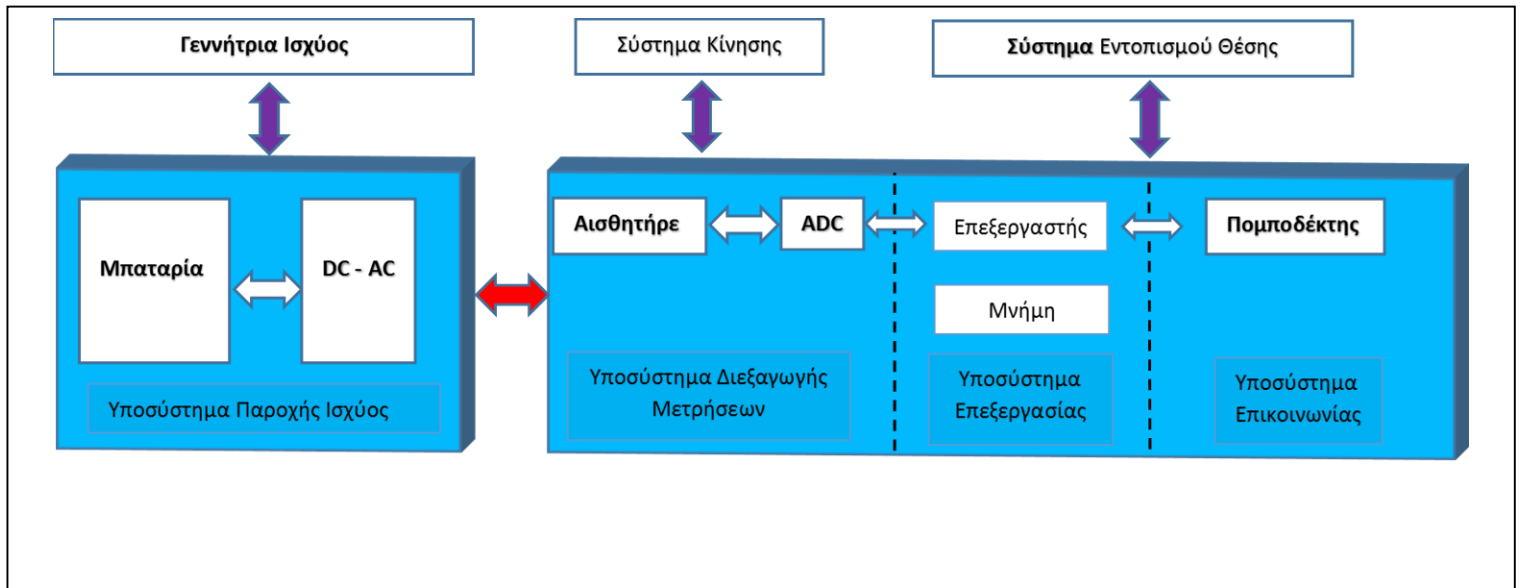
Σχήμα 1.1: Αρχιτεκτονική δικτύων WSN

1.3 Περιγραφή του ασύρματου κόμβου αισθητήρα

Η εξέλιξη της τεχνολογίας της μικροηλεκτρονικής που έχει συντελεστεί κατά τις τελευταίες δεκαετίες επιτρέπει τη σχεδίαση και παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και συσκευών με σχετικά μεγάλες υπολογιστικές δυνατότητες, μικρό όγκο και χαμηλό κόστος παραγωγής. Η κατηγορία των συστημάτων αυτών καλείται MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Μια από τις πλέον αντιπροσωπευτικές χρήσεις των συστημάτων MEMS αφορά τη δημιουργία ασύρματων κόμβων αισθητήρων (Wireless Sensors, WS).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία ενός ασύρματου κόμβου. Προκειμένου κάθε κόμβος-αισθητήρας να πραγματοποιήσει τις απαραίτητες λειτουργίες της μέτρησης φυσικών μεγεθών, της επεξεργασίας δεδομένων και της επικοινωνίας με άλλους κόμβους χρειάζεται μια πηγή ενέργειας. Αυτή η πηγή είναι συνήθως μια μπαταρία, για την οποία συνήθως δεν έχει υπάρξει η δυνατότητα αντικατάστασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι κόμβοι-αισθητήρες να έχουν περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα. Σπανιότερα, ο κόμβος-αισθητήρας διαθέτει ηλιακό πάνελ, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και στη συνέχεια γίνεται επαναφόρτιση της μπαταρίας. Ακόμα, όμως, και σε μια τέτοια περίπτωση, η παράταση της διάρκειας ζωής του κόμβου που επιτυγχάνεται δεν αλλάζει το χαρακτηριστικό της έλλειψης ενεργειακών πόρων των κόμβων-αισθητήρων. Επίσης, καθώς οι κόμβοι συνεργάζονται μεταξύ τους για τη μεταφορά πληροφορίας προς τον κόμβο-συλλέκτη, κάθε κόμβος-συλλέκτης διαθέτει μνήμη για την προσωρινή αποθήκευση δεδομένων, επεξεργαστή για την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων και, επιπλέον, έναν πομποδέκτη περιορισμένης εμβέλειας και κεραία.

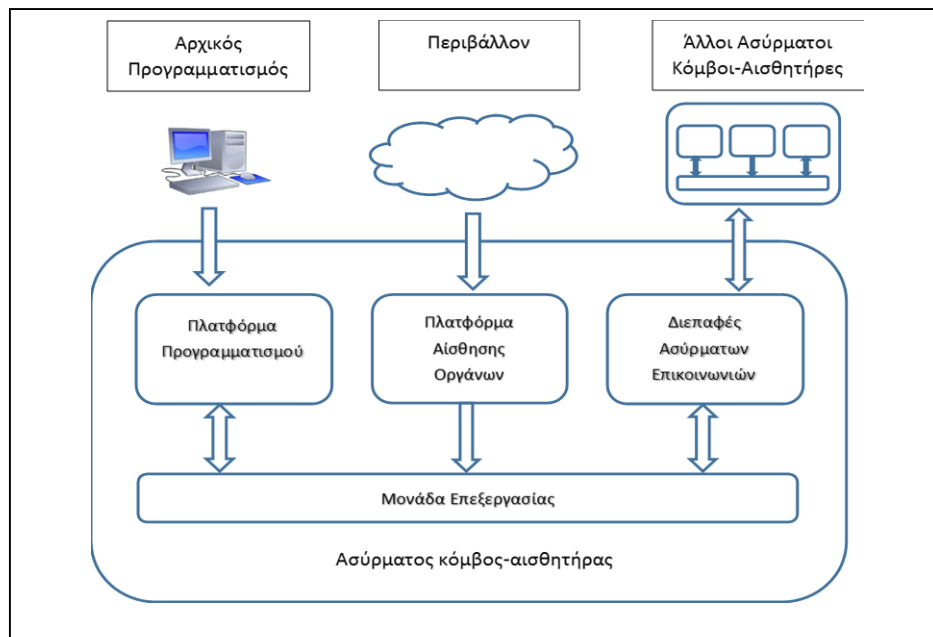
Αντίστοιχα με το είδος της εφαρμογής που εξυπηρετεί το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, οι κόμβοι μπορεί να διαθέτουν πρόσθετες μονάδες. Συγκεκριμένα, είναι πιθανό να διαθέτουν ένα σύστημα εντοπισμού θέσης (Location finding system). Επίσης, μπορεί να διαθέτουν σύστημα κίνησης, ώστε να μπορούν να μετακινηθούν σε μικρές αποστάσεις καθώς και να μεταβάλλουν τον προσανατολισμό τους. Οι μονάδες αυτές, πάντως, είναι προαιρετικές και δεν αποτελούν τη γενική περίπτωση. Όλα τα δομικά στοιχεία ενός κόμβου-αισθητήρα απεικονίζονται στο Σχ. 1.2 .



Σχήμα 1.2: Δομικά στοιχεία κόμβου-αισθητήρα

Η αρχιτεκτονική ενός ασύρματου κόμβου αποτελείται από τέσσερις δομικές μονάδες.

Αυτά είναι (1) η μονάδα προγραμματισμού (2) η μονάδα αισθητήρων (3) η μονάδα διεπαφών ασύρματης επικοινωνίας και (4) η μονάδα επεξεργασίας. Η αντίστοιχη αρχιτεκτονική φαίνεται στο Σχ. 1.3.



Σχήμα 1.3: Αρχιτεκτονική κόμβου-αισθητήρα

Μέσω της πλατφόρμας προγραμματισμού, πραγματοποιείται ο αρχικός προγραμματισμός του ασύρματου κόμβου, αλλά υπάρχει και δυνατότητα αναβάθμισης του λογισμικού του. Η πλατφόρμα αισθητήρων περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα μετρητικά όργανα που ανιχνεύουν το ή τα υπό παρακολούθηση φυσικά φαινόμενα. Τα όργανα αυτά μπορεί να μετρούν φυσικά μεγέθη όπως θερμοκρασία, υγρασία, φωτεινότητα, ένταση υπεριώδους ακτινοβολίας, ηλεκτρομαγνητικά πεδία, ένταση σεισμικών δονήσεων μεταξύ άλλων. Οι διεπαφές ασύρματης επικοινωνίας αποτελούνται συνήθως από πομποδέκτη και ενισχυτή εκπομπής. Μέσω αυτών των διεπαφών καθίσταται εφικτή η επικοινωνία του κόμβου το υπόλοιπο δίκτυο αισθητήρων. Τέλος, η μονάδα επεξεργασίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη λειτουργία του κόμβου, καθώς επεξεργάζεται τις μετρήσεις που λαμβάνονται από άλλους κόμβους και τις μετρήσεις που λαμβάνονται από τον ίδιο τον κόμβο, σύμφωνα με τις εντολές της μονάδας προγραμματισμού. Επίσης, είναι η μονάδα που φροντίζει για την εφαρμογή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας εκτελώντας υπολογισμούς και λαμβάνοντας αντίστοιχες αποφάσεις.

Στη γενική περίπτωση, για τη λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων απαιτείται μεγάλος κατά κανόνα αριθμός ασύρματων κόμβων. Αυτό έχει ως συνέπεια την ανάγκη ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής των κόμβων. Με βάση το σκοπό χρήσης των ασύρματων κόμβων, τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζουν αρκετές διαφοροποιήσεις που οδηγούν στην ένταξή τους σε δύο κατηγορίες με κριτήριο τις δυνατότητές τους.

Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από κόμβους χαμηλών υπολογιστικών δυνατοτήτων. Οι κόμβοι αυτής της κατηγορίας διαθέτουν μικροεπεξεργαστή σχετικά χαμηλής συχνότητας λειτουργίας (4MHz – 16MHz). Διαθέτουν, επίσης, μνήμη τύπου flash χωρητικότητας 8kB έως 512 kB και μνήμη τυχαίας προσπέλασης χωρητικότητας 0.5kB έως 64kB. Πιθανές τιμές της φέρουσας συχνότητας που χρησιμοποιείται για την

επικοινωνία μεταξύ των κόμβων είναι τα 868MHz για την Ευρώπη και τα 915MHz στην Αμερική. Μια ακόμη πιθανή τιμή της φέρουσας συχνότητας είναι τα 2.4GHz, η οποία είναι επιτρεπτή σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι ρυθμοί μετάδοσης που επιτυγχάνουν οι κόμβοι κυμαίνονται μεταξύ 10kbps και 250kbps. Εμπορικοί κόμβοι που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι οι Mica/Mica2/MicaZ, IRIS, Telos/TMode και EYES.

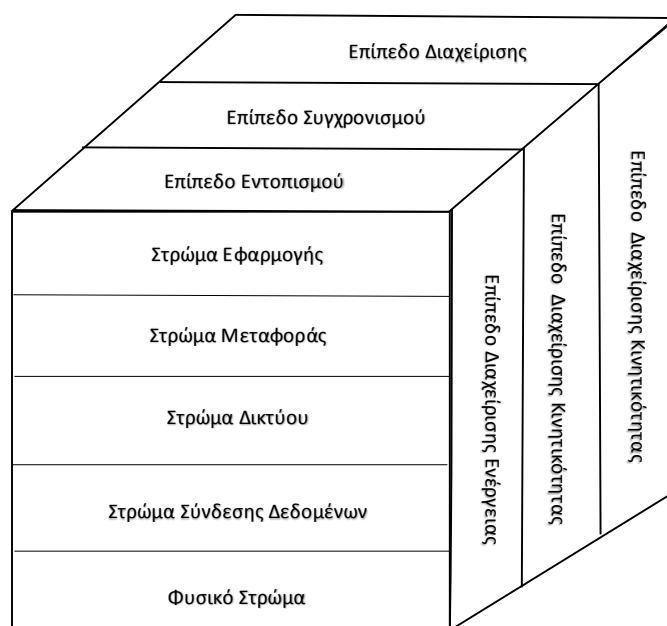
Η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από κόμβους υψηλότερων υπολογιστικών δυνατοτήτων. Οι κόμβοι αυτής της κατηγορίας διαθέτουν επεξεργαστές με συχνότητες που μπορούν να φθάσουν ακόμα και τα 400MHz. Αντίστοιχα, η μνήμη αποθήκευσης των κόμβων αυτών μπορεί να φθάσει μέχρι και τα 32MB και η μνήμη τυχαίας προσπέλασης τα 64MB. Οι φέρουσες συχνότητες και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων κινούνται στο ίδιο εύρος τιμών, σε σχέση με τους κόμβους της προηγούμενης κατηγορίας. Εμπορικοί κόμβοι υψηλών υπολογιστικών δυνατοτήτων είναι οι IMote/IMote2, Stargate και Netbridge NB-100.

Οι ασύρματοι κόμβοι τροφοδοτούνται από μπαταρίες περιορισμένης χωρητικότητας. Ο περιορισμός αυτός διαφοροποιεί τα δίκτυα αισθητήρων από τα υπόλοιπα δίκτυα και πρέπει να λαμβάνεται πολύ σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό πρωτοκόλλων λειτουργίας.

1.4 Στοιβά Πρωτοκόλλων των WSN

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται συνήθως από εκατοντάδες ασύρματους κόμβους και η ανάπτυξή του γίνεται σε περιοχές όπου η ανθρώπινη πρόσβαση είναι δύσκολη ή αδύνατη. Επομένως, οποιαδήποτε παρέμβαση στη λειτουργία των κόμβων μετά την τοποθέτησή τους είναι δύσκολη είτε για οικονομικούς είτε για πρακτικούς λόγους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι κόμβοι του δικτύου να έχουν περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα, χαρακτηριστικό που καθιστά μη αποδοτική τη χρήση πρωτοκόλλων λειτουργίας που χρησιμοποιούνται σε άλλης μορφής δίκτυα. Αντίθετα, απαιτείται η σχεδίαση νέων, ενεργειακά αποδοτικών, πρωτοκόλλων που θα έχουν ως βασικό στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας των κόμβων.

Η στοιβά πρωτοκόλλων που χρησιμοποιείται σε ένα WSN αποτελεί τροποποιημένη εκδοχή της στοιβάς πέντε πρωτοκόλλων του μοντέλου OSI, ακριβώς επειδή το WSN παρουσιάζει ορισμένες ιδιομορφίες που δεν συναντώνται σε άλλα δίκτυα. Συγκεκριμένα, στη στοιβά πρωτοκόλλων του WSN υπάρχουν τα πέντε στρώματα που υπάρχουν στο κλασσικό μοντέλο OSI, δηλαδή το φυσικό στρώμα, το στρώμα σύνδεσης δεδομένων, το στρώμα δικτύου, το στρώμα μεταφοράς και το στρώμα εφαρμογής. Επιπλέον, όμως, ορίζονται και άλλα έξι επίπεδα σχεδιασμού. Τα επίπεδα αυτά είναι το επίπεδο διαχείρισης ενέργειας, το επίπεδο διαχείρισης κινητικότητας, το επίπεδο διαχείρισης εργασιών, το επίπεδο διαχείρισης τοπολογίας, το επίπεδο συγχρονισμού και το επίπεδο συντονισμού. Μια συνολική εικόνα της στοιβάς πρωτοκόλλων ενός WSN δίνεται στο Σχ. 1.4.



Σχήμα 1.4: Στοιβά πρωτοκόλλων ενός WSN

Στη συνέχεια, περιγράφεται πολύ συνοπτικά η λειτουργία των προαναφερθεισών οντοτήτων. Το φυσικό στρώμα είναι υπεύθυνο για την κωδικοποίηση και τη διαμόρφωση των σημάτων επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων. Το στρώμα σύνδεσης δεδομένων φροντίζει για την αξιόπιστη επικοινωνία μέσω του θορυβώδους ασύρματου διαύλου με την εφαρμογή τεχνικών διόρθωσης λαθών αλλά και για την από κοινού πρόσβαση στο κοινό μέσο, εφαρμόζοντας κατάλληλα σχήματα πρόσβασης, ώστε να αποφεύγονται συγκρούσεις μεταδόσεων ανάμεσα στους κόμβους. Το στρώμα δικτύου είναι υπεύθυνο για την εύρεση της κατάλληλης διαδρομής για τη δρομολόγηση των πακέτων του κυκλοφορούν στο δίκτυο. Το στρώμα μεταφοράς φροντίζει για τη διατήρηση της απαιτούμενης ροής δεδομένων στο δίκτυο. Το στρώμα εφαρμογής προδιαγράφει τη συνολική λειτουργία του WSN.

Τα επίπεδα σχεδιασμού είναι εκείνα που ασχολούνται με τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου. Συγκεκριμένα, το επίπεδο διαχείρισης ενέργειας καθορίζει την ενεργειακή συμπεριφορά του κόμβου. Για παράδειγμα, αν ακολουθείται χρονικός προγραμματισμός για τις αποστολές μηνυμάτων, κάθε κόμβος μπορεί να αποφασίζει να ενεργοποιεί τον πομποδέκτη του μόνο σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα προκειμένου να μην σπαταλά ενέργεια. Επίσης, όταν πλησιάζει η εξάντληση των ενεργειακών του αποθεμάτων, κάποιος κόμβος μπορεί να ενημερώσει το υπόλοιπο δίκτυο σχετικά και να λειτουργεί μόνο ως πηγή δεδομένων και όχι ως ενδιάμεσος κόμβος. Το επίπεδο διαχείρισης κινητικότητας ενός κόμβου καταγράφει πιθανές μεταβολές στις θέσεις των γειτονικών του κόμβων, ώστε να αξιοποιήσει τη γνώση αυτή κατά τη δρομολόγηση πακέτων που λαμβάνει. Το επίπεδο διαχείρισης εργασιών συντονίζει και χρονοπρογραμματίζει τη διαδικασία μέτρησης μιας ευρύτερης περιοχής κόμβων, ώστε, όταν δεν υπάρχει κάποιο συμβάν να μη διεξάγουν μετρήσεις όλοι οι κόμβοι της περιοχής παρά μόνο ένα υποσύνολο αυτών.

Τα επίπεδα εντοπισμού, συγχρονισμού και διαχείρισης τοπολογίας λειτουργούν συνεργατικά με τα υπόλοιπα στρώματα του WSN, ώστε να υλοποιήσουν

διαστρωματικές (cross-layer) τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας. Για την αξιολόγηση των λαμβανόμενων μετρήσεων απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ των κόμβων. Το επίπεδο εντοπισμού, επίσης, είναι πολύ σημαντικό για την αξιοποίηση της λαμβανόμενης πληροφορίας, καθώς, εκτός από την τιμή του φυσικού μεγέθους, συχνά απαιτείται και το σημείο όπου έγινε η μέτρηση. Το επίπεδο διαχείρισης τοπολογίας είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις ύπαρξης προδιαγραφών για τη συνεκτικότητα του WSN. Η συνεκτικότητα ενός δικτύου σχετίζεται με το πλήθος δυνατών διαδρομών πληροφορίας από κάποιον κόμβο προς τον κόμβο-συλλέκτη. Έτσι, το επίπεδο διαχείρισης τοπολογίας μπορεί να περιγράψει ένα υποσύνολο κόμβων μιας περιοχής που μπορούν να κλείνουν για κάποιο χρονικό διάστημα τους πομποδέκτες τους, δίχως να κινδυνεύει η συνεκτικότητα του δικτύου.

Το μεγάλο εύρος των εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιούνται τα WSN σε συνδυασμό με την ανάγκη διασύνδεσης δικτύων με διαφορετικά χαρακτηριστικά έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση προβλημάτων συμβατότητας. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση τέτοιων ζητημάτων έχουν διατυπωθεί από διάφορους οργανισμούς συγκεκριμένα πρότυπα λειτουργίας των WSN.

Σχετικό παράδειγμα αποτελεί το πρότυπο IEEE 802.15.4, το οποίο εκδόθηκε από το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (I.E.E.E), στο γενικότερο πλαίσιο της προτυποποίησης των ασύρματων προσωπικών δικτύων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης (Low-Rate Wireless Personal Area Networks, LR-WPANs). Στην κατηγορία των δικτύων αυτών εντάσσονται και τα δίκτυα WSN. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, ορίζονται οι τρεις ζώνες συχνοτήτων στις οποίες επιτρέπεται η εκπομπή σημάτων χωρίς αδειοδότηση. Οι ζώνες αυτές είναι περί τα 868MHz για την Ευρώπη, τα 915MHz για την Αμερική και τα 2.4GHz σε παγκόσμιο επίπεδο. Επιπλέον, το πρότυπο προδιαγράφει και το φυσικό στρώμα προδιαγράφοντας κωδικοποίηση BPSK (Binary Phase Shift Keying) για τις δύο πρώτες ζώνες συχνοτήτων και κωδικοποίηση O-QPSK (Offset-Quadrature Phase Shift Keying) για την Τρίτη ζώνη συχνοτήτων. Επίσης, συστήνονται και άλλες υλοποιήσεις που βασίζονται σε σχήματα κωδικοποίησης όπως το ASK (Amplitude Shift Keying), το CSS (Chirp Spread Spectrum) και το GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying). Στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων, για την πρόσβαση στο κοινό μέσο ορίζονται κατάλληλα σχήματα που επιτρέπουν την αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Τέλος, το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 προδιαγράφει υπηρεσίες σχετικές με εμπιστευτικότητα και αυθεντικότητα δεδομένων.

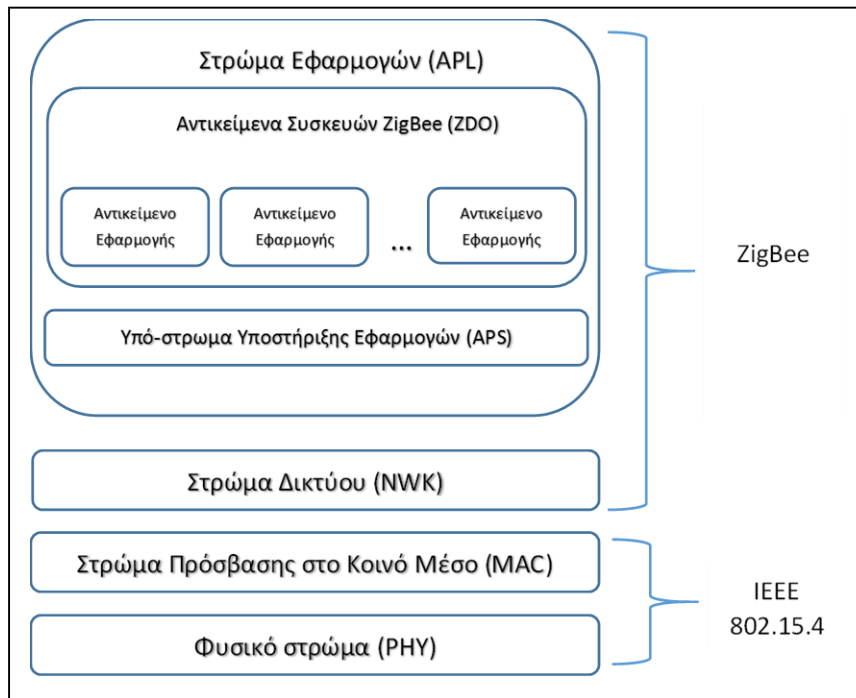
Καίτοι το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 υλοποιείται από την πλειοψηφία των κατασκευαστών ασύρματων κόμβων-αισθητήρων, δεν αναφέρεται αποκλειστικά σε δίκτυα WSN. Για το λόγο αυτό, δε λαμβάνει υπόψη του τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών. Η ανάγκη για ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας που αποτελεί προτεραιότητα για την αποτελεσματική λειτουργία των WSN οδήγησε στην ανάπτυξη νέων προτύπων που προδιαγράφουν τα υπόλοιπα στρώματα επικοινωνίας. Τα σημαντικότερα από αυτά τα πρότυπα είναι το ZigBee, το WirelessHART και το 6LoWPAN, που περιγράφονται συνοπτικά ακολούθως.

Το πρότυπο ZigBee προτάθηκε από τη διεθνή, μη κερδοσκοπική σύμπραξη μεγάλων κατασκευαστών ημιαγωγών και παρόχων τεχνολογίας ZigBee Alliance. Στόχος του

προτύπου αυτού είναι να προσεγγίσει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ενός WSN. Καθώς, όμως, το φάσμα εφαρμογών των WSN είναι ευρύ, το πρότυπο ZigBee υποστηρίζει πέντε βασικές εφαρμογές: i) οικιακό αυτοματισμό ii) αυτοματισμό κατασκευών iii) δίκτυα ευφυούς παροχής ενέργειας iv) τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και v) προσωπική ιατρική φροντίδα.

Σκοπός του προτύπου ZigBee είναι η δημιουργία μιας στοίβας πρωτοκόλλων, που λειτουργεί συνεργατικά με το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4. Συγκεκριμένα, στη στοίβα πρωτοκόλλων του προτύπου ZigBee, το φυσικό στρώμα (PHY) και το στρώμα πρόσβασης στο Κοινό Μέσο (MAC) ορίζονται όπως στο πρωτόκολλο IEEE 802.15.4. Τα υπόλοιπα στρώματα διαφοροποιούνται ελαφρώς, αντίστοιχα με το είδος της εφαρμογής που εξυπηρετείται. Ωστόσο, υπάρχουν κοινά χαρακτηριστικά. Στο στρώμα δικτύου (NWK), για παράδειγμα, η διευθυνσιοδότηση των κόμβων δεν γίνεται με βάση τη μοναδική κατασκευαστική τους ταυτότητα (Unique Identity, UID). Αντίθετα, ο διαχειριστής του δικτύου αποδίδει σε κάθε κόμβο μια μικρότερη αλφαριθμητική ακολουθία, η οποία επέχει θέση μοναδικής ταυτότητας αποκλειστικά στο πλαίσιο του συγκεκριμένου WSN. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το μέγεθος των διακινούμενων μηνυμάτων μειώνεται, με αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης ισχύος των κόμβων. Επίσης, το στρώμα δικτύου παρέχει διαδικασίες συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων καθώς και λειτουργίες δρομολόγησης στο πλαίσιο της λειτουργίας πολλαπλών βημάτων των WSN. Το στρώμα εφαρμογής (APL) στο πρότυπο ZigBee διαχωρίζεται σε δύο υποστρώματα. Το πρώτο υπο-στρώμα ονομάζεται ZDO (ZigBee Device Objects sub-layer) και περιλαμβάνει τα αντικείμενα των εφαρμογών, δηλαδή τα συστατικά τους μέρη. Το υπο-στρώμα αυτό, επίσης, είναι επιφορτισμένο με τον καθορισμό του συνόλου των δυνατών δικτυακών λειτουργιών των κόμβων, προσδιορίζοντας το ρόλο των κόμβων στο πλαίσιο ενός WSN. Το δεύτερο υπο-στρώμα αφορά την υποστήριξη των εφαρμογών (Application Support Sub-layer – APS) και επιτρέπει την ενημέρωση των κόμβων του WSN σχετικά με την εισαγωγή νέων κόμβων στο δίκτυο.

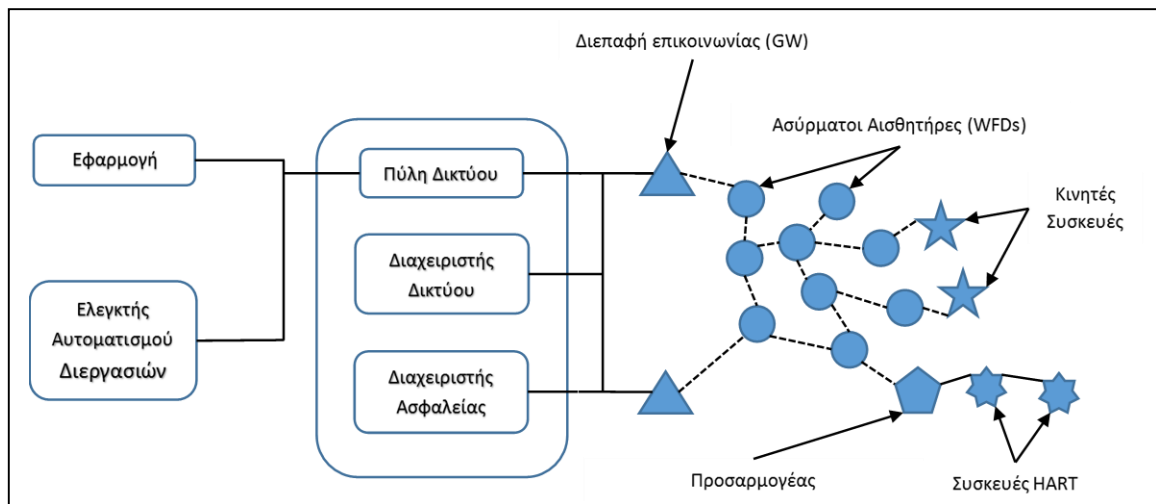
Στο Σχ. 1.5 απεικονίζεται η στοίβας πρωτοκόλλων σύμφωνα με το πρότυπο ZigBee.



Σχήμα 1.5: Στοιβά Πρωτοκόλλων ενός WSN σύμφωνα με το πρότυπο ZigBee

Ένα από τα πλέον διαδεδομένα βιομηχανικά πρότυπα για υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου, το οποίο, όμως, λειτουργεί χρησιμοποιώντας ενσύρματα μέσα μετάδοσης είναι το πρότυπο HART (Highway Addressable Remote Transducer). Η επέκταση του προτύπου αυτού για ασύρματη λειτουργία ονομάζεται WirelessHart. Το πρότυπο αυτό έχει και ενσύρματο και ασύρματο τμήμα και ορίζει τρεις βασικές οντότητες με διακριτούς ρόλους μέσα στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, ορίζονται i) οι συσκευές WFD (WirelessHart Field Devices) ii) ο διαχειριστής του δικτύου (Network Manager, NM) και iii) οι πύλες δικτύου GWs (Gateways). Οι συσκευές WFD είναι εκείνες που διεξάγουν τις απαραίτητες μετρήσεις και αποτελούν τους κόμβους του δικτύου επικοινωνίας. Οι πύλες GW παρέχουν διεπαφές επικοινωνίας μεταξύ του ενσύρματου και του ασύρματου δικτύου. Ο ρόλος του διαχειριστή δικτύου αφορά την εξασφάλιση αποτελεσματικής επικοινωνίας εντός του δικτύου, μέσω κατάλληλων ρυθμίσεων σε θέματα δρομολόγησης και πρόσβασης στο κοινό μέσο. Εκτός των προαναφερθεισών οντοτήτων, προδιαγράφονται και άλλες δύο οντότητες, αυτή του προσαρμογέα και αυτή των φορητών συσκευών. Ο ρόλος του προσαρμογέα έγκειται στην παροχή σύνδεσης μεταξύ των συσκευών WirelessHart και υφιστάμενων συσκευών που ανήκουν στο τμήμα HART του συνολικού δικτύου. Η ύπαρξη φορητών συσκευών (Handhelds), εφοδιασμένων με τον κατάλληλο τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό, καθιστά πιο αποτελεσματική την άμεση επικοινωνία με τμήματα του WirelessHart.

Στο Σχ. 1.6 παρουσιάζεται η τυπική μορφή αρχιτεκτονικής ενός δικτύου WirelessHART.



Σχήμα 1.6: Αρχιτεκτονική ενός δικτύου WirelessHART

Στη στοίβα πρωτοκόλλων του προτύπου WirelessHART, το φυσικό στρώμα ορίζεται όπως στο πρωτόκολλο IEEE 802.15.4. Στο στρώμα πρόσβασης στο κοινό μέσο υιοθετείται σχήμα χρονικής πολυπλεξίας (Time Division Multiple Access, TDMA) που παρέχει και δυνατότητα δυναμικής εκχώρησης εύρους ζώνης, ανάλογα με τις ανάγκες των κόμβων που εισάγονται στο WSN. Στο στρώμα δικτύου ορίζονται τεχνικές δρομολόγησης που βασίζονται στη διατήρηση σχετικών πινάκων σε κάθε κόμβο. Επίσης, για κάθε πιθανή ζεύξη μεταξύ ενός κόμβου WFD και μιας πύλης δικτύου καταγράφονται περισσότερες από μια διαδρομές μετάδοσης, ώστε να υπάρχει εναλλακτική επιλογή σε περίπτωση πιθανής διαταραχής και, κατ' επέκταση, αυξημένος βαθμός αξιοπιστίας. Στο στρώμα μεταφοράς του πρωτοκόλλου WirelessHART υποστηρίζεται μετάδοση μεγάλων πακέτων δεδομένων, χρησιμοποιώντας τεχνικές όμοιες με το πρωτόκολλο TCP. Το επίπεδο εφαρμογής του πρωτοκόλλου WirelessHART υποστηρίζει πλήρως τις εφαρμογές του πρωτοκόλλου HART, καθιστώντας εφικτή τη συνέχιση παροχής υφιστάμενων υπηρεσιών.

Τα πρότυπα ZigBee και WirelessHART αποσκοπούν στην ανάπτυξη στοίβας πρωτοκόλλων, που λαμβάνει υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των WSN και το είδος της υποστηριζόμενης εφαρμογής, προκειμένου να βελτιστοποιήσει τη λειτουργία τους. Ωστόσο, τα πρότυπα που στηρίζονται στο IEEE 802.15.4 δεν είναι συμβατά με το πρωτόκολλο IP και συνεπώς οι κόμβοι των δικτύων WSN δεν έχουν τη δυνατότητα σύνδεσης με την υποδομή του Διαδικτύου. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού περιλαμβάνει κόμβους συγκέντρωσης ή πύλες δικτύου που συλλέγουν την πληροφορία που παράγεται από τους κόμβους του WSN και ακολουθώντας την προωθούν προς το Διαδίκτυο. Ένας τέτοιος τρόπος οργάνωσης του δικτύου, το καθιστά ευάλωτο σε πιθανή αστοχία λειτουργίας των οντοτήτων αυτών.

Η αδυναμία επικοινωνίας των κόμβων ενός WSN με το Διαδίκτυο οδήγησε τον οργανισμό Internet Engineering Task Force (IETF) στην ανάπτυξη του προτύπου 6LoWPAN (IPv6 for Low-power Wireless Personal Area Network). Το βασικό πρόβλημα προσαρμογής των WSN με το πρωτόκολλο IPv6 έγκειται στο σύστημα

διευθυνσιοδότησης του τελευταίου, αφού απαιτεί την ύπαρξη επικεφαλίδας μήκους 40 bytes, ενώ το μέγιστο μήκος πακέτου στο πρότυπο IEEE 802.15.4 είναι 127 bytes. Μια άμεση υλοποίηση του πρωτοκόλλου IPv6 θα σήμαινε μεγάλη σπατάλη των ενεργειακών πόρων των κόμβων του WSN. Για το λόγο αυτό, το πρότυπο 6LoWPAN προτείνει την εισαγωγή ενός στρώματος μετασχηματισμού της επικεφαλίδας. Συγκεκριμένα, υιοθετείται η ιδέα των στοιβαγμένων επικεφαλίδων (stacked headers), με την οποία αντικαθίσταται η μονολιθική επικεφαλίδα του πρωτοκόλλου IPv6. Επίσης, με ειδικές τεχνικές συμπίεσης επιτυγχάνεται η σύμπτυξη του πεδίου της επικεφαλίδας από 40 bytes σε 4 bytes, που αποτελεί κατάλληλο μέγεθος για τα δίκτυα WSN. Τέλος, εκτός από την επίλυση του προβλήματος με το μέγεθος της επικεφαλίδας, το πρότυπο 6LoWPAN επιλύει ζητήματα μεταφοράς και δρομολόγησης, καθιστώντας περισσότερο διαφανή τη λειτουργία του πρωτοκόλλου IPv6 σε δίκτυα WSN.

1.5 Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Στη συνέχεια, γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των εμπορικών και ερευνητικών εφαρμογών που μπορούν να υλοποιηθούν με χρήση δικτύων WSN. Αυτές μπορούν να ενταχθούν σε πέντε κατηγορίες:

1. Περιβαλλοντικές εφαρμογές
2. Εφαρμογές υγείας
3. Οικιακές εφαρμογές
4. Βιομηχανικές εφαρμογές
5. Στρατιωτικές εφαρμογές

1.5.1 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται για πληθώρα περιβαλλοντικών εφαρμογών. Οι συνηθέστερες σχετικές χρήσεις των WSN περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της χλωρίδας και της πανίδας απομακρυσμένων περιοχών αλλά και την αξιολόγηση καιρικών φαινομένων για την πρόληψη καταστροφών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ασύρματων δικτύων αισθητήρων για παρακολούθηση πανίδας είναι το ZebraNet και το δίκτυο του νησιού Great Duck των Η.Π.Α. Άλλες περιβαλλοντικές εφαρμογές μπορεί να είναι:

- Έγκαιρη ανίχνευση δασικών πυρκαγιών
- Παρακολούθηση κλιματικών αλλαγών
- Περιβαλλοντική και βιολογική παρακολούθηση υδάτων, εδάφους και ατμόσφαιρας

1.5.2 Εφαρμογές υγείας

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε εφαρμογές υγείας. Συγκεκριμένα, το μικρό κόστος υλοποίησής τους τα καθιστά ιδανικά για την συνεχή παρακολούθηση ασθενών και τη διαχείριση φαρμακευτικών αγωγών σε νοσοκομεία. Μάλιστα, έχει προταθεί και δημιουργία τεχνητών μελών του σώματος που στηρίζεται στη λειτουργία τέτοιων δικτύων. Παραδείγματα επιτυχημένης εφαρμογής WSN στον

τομέα της υγείας είναι το δίκτυο CodeBlue και το δίκτυο AlarmNet. Το πρώτο δίκτυο προορίζεται για ενδο-νοσοκομειακή χρήση, όπου κάθε ασθενής αποτελεί κόμβο του δικτύου. Οι αισθητήρες αποστέλλουν τις κρίσιμες ιατρικές μετρήσεις στον κόμβο-συλλέκτη και όταν διαπιστωθεί κάποια μη φυσιολογική ένδειξη γίνεται άμεση ιατρική παρέμβαση. Αντίθετα, το δίκτυο AlarmNet προορίζεται για παρακολούθηση ηλικιωμένων ανθρώπων εντός του προσωπικού τους χώρου.

1.5.3 Οικιακές Εφαρμογές

Με την πρόοδο της τεχνολογίας αναμένεται ότι σε λίγα χρόνια όλες οι οικιακές συσκευές θα έχουν διεύθυνση IP και συνεπώς θα είναι προσβάσιμες μέσω του Διαδικτύου. Έτσι, οργανώνοντας τις οικιακές συσκευές σε ένα οικιακό ασύρματο δίκτυο, ο χρήστης θα μπορεί να ενημερώνεται άμεσα για πιθανή βλάβη ή να πραγματοποιεί απομακρυσμένη διαχείριση των οικιακών συσκευών.

1.5.4 Βιομηχανικές Εφαρμογές

Μια από τις συνηθέστερες χρήσεις των WSN στη βιομηχανία είναι η επίβλεψη της κατάστασης του εξοπλισμού παραγωγής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής είναι η FabApp που λειτουργεί ως προληπτικό μέσο προστασίας βιομηχανικού εξοπλισμού, μέσω της ανάλυσης των μετρήσεων των δονήσεων που λαμβάνονται. Επίσης, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην επίβλεψη κατασκευών, όπου η ανθρώπινη παρουσία είναι επικίνδυνη, αλλά και στην παρακολούθηση της αγροτικής παραγωγής. Άλλες πιθανές εφαρμογές είναι:

- ✓ Διαχείριση αποθεμάτων παραγωγής
- ✓ Έλεγχος της ποιότητας προϊόντων
- ✓ Έλεγχος ρομπότ σε περιβάλλοντα αυτοματοποιημένης λειτουργίας.

1.5.5 Στρατιωτικές Εφαρμογές

Η εύκολη ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, η ιδιότητα αυτό-οργάνωσης και η ανοχή σε απώλειες κόμβων, τα καθιστούν κατάλληλα για στρατιωτικές εφαρμογές. Τέτοιες εφαρμογές μπορεί να είναι:

- Εντοπισμός και αναγνώριση πυρηνικών, βιολογικών και χημικών επιθέσεων
- Η επιτήρηση του πεδίου μάχης
- Η εκτίμηση καταστροφών
- Η κατασκοπία

Ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά προγράμματα ανάπτυξης δικτύων WSN για στρατιωτικές εφαρμογές ήταν το πρόγραμμα Smart Dust. Ο αρχικός σκοπός του προγράμματος ήταν η δημιουργία μικρών σε μέγεθος αισθητήρων και η σχετική έρευνα στέφθηκε με επιτυχία, αφού κατασκευάστηκαν ασύρματοι κόμβοι με όγκο που δεν υπερέβαινε τα $16mm^3$, που είχαν τη δυνατότητα συλλογής πληροφοριών σχετικών με την κίνηση εχθρικών στόχων. Μάλιστα, η προσπάθεια ανάπτυξης του προγράμματος Smart Dust είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη του λογισμικού TinyOS, που αποτελεί μέχρι και σήμερα το πλέον διαδεδομένο λειτουργικό σύστημα για τη μελέτη

ασύρματων κόμβων, και οδήγησε στην ίδρυση εταιρειών πρωτοπόρων στην ανάπτυξη και προτυποποίηση των WSN.

Στο πλαίσιο της επιτήρησης του πεδίου μάχης, ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ελεύθερων σκοπευτών. Το αποτέλεσμα της σχετικής έρευνας ήταν η ανάπτυξη του προγράμματος Boomerang. Το πρόγραμμα αυτό, χρησιμοποιώντας συστάδες από κατάλληλα κατανεμημένα παθητικά ακουστικά WS, εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες των ακουστικών κυμάτων που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια πυροβολισμών, και με χρήση διαφορικής ανάλυσης προσδιορίζει τη θέση του σκοπευτή.

Μια ακόμα εφαρμογή των WSN για στρατιωτικούς σκοπούς αποτελεί και το πρόγραμμα VigilNet. Το πρόγραμμα αυτό αποσκοπεί στην ενεργειακά αποτελεσματική ανάπτυξη κατανεμημένων δικτύων WSN για την ανίχνευση στόχων και παρατήρηση και επιτήρηση πεδίων μαχών. Για τις εφαρμογές αυτές, τα δίκτυα WSN θεωρούνται ευρείας κλίμακας, αποτελούμενα από χιλιάδες κόμβους σε μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις. Η διάρκεια ζωής του δικτύου VigilNet βελτιστοποιείται με χρήση ιεραρχικών πρωτοκόλλων συνάθροισης δεδομένων. Στο δίκτυο αυτό ορίζονται δύο είδη κόμβων: οι φρουροί (sentries) και οι απλοί κόμβοι. Όταν κάποιος κόμβος ανιχνεύσει ένα περιστατικό άξιο αναφοράς, το αναφέρει στον πλησιέστερο κόμβο-φρουρό για επεξεργασία, συνάθροιση και δρομολόγηση της πληροφορίας. Εκτός από τις διαδικασίες αυτές, οι κόμβοι-φρουροί είναι υπεύθυνοι για την ομαδοποίηση των κόμβων, ώστε να υπάρχει καλύτερη αντιμετώπιση έκτακτων καταστάσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από κόμβους που χαρακτηρίζονται από περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα. Για το λόγο αυτό, ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα κατά τη σχεδίαση τέτοιων δικτύων είναι και η ενεργειακή αποδοτικότητα, η οποία είναι απαραίτητη προκειμένου να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Σε επίπεδο κόμβου, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, διακρίνονται συνήθως τρία υποσυστήματα: το υποσύστημα διεξαγωγής μετρήσεων (sensing subsystem), το υποσύστημα επικοινωνίας (communication subsystem) και το υποσύστημα επεξεργασίας δεδομένων (processing subsystem). Καίτοι οι αριθμητικές τιμές της ενεργειακής δαπάνης που απαιτείται για τις διάφορες διαδικασίες εξαρτώνται γενικά από το είδος του κόμβου-αισθητήρα, υπάρχουν κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, οι πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι η μετάδοση δεδομένων είναι ενεργειακά πολύ δαπανηρή, ενώ η επεξεργασία δεδομένων καταναλώνει σημαντικά λιγότερη ενέργεια. Μάλιστα, προσεγγιστικά υπολογίζεται ότι το ενεργειακό κόστος για τη μετάδοση ενός ψηφίου πληροφορίας (bit) είναι το ίδιο με εκείνο που απαιτείται για την αποτίμηση χίλιων αριθμητικών και λογικών εκφράσεων σε ένα τυπικό ασύρματο κόμβο-αισθητήρα. Επίσης, το μέσο ενεργειακό κόστος του υποσυστήματος επικοινωνίας δεν διαφοροποιείται όταν ο πομποδέκτης βρίσκεται σε κατάσταση λήψης, εκπομπής και αναμονής, ενώ μειώνεται κατά μια τάξη μεγέθους όταν ο πομποδέκτης μεταβαίνει στην κατάσταση ανάπαυσης (sleep state). Το κόστος για τη διεξαγωγή μετρήσεων εξαρτάται τόσο από τον κόμβο όσο και από το είδος του φυσικού μεγέθους που μετρείται. Σε πολλές περιπτώσεις, το ενεργειακό κόστος για τη διεξαγωγή μετρήσεων είναι συγκρίσιμο με το ενεργειακό κόστος για μετάδοση, ενώ σε άλλες περιπτώσεις είναι αμελητέο σε σχέση με το ενεργειακό κόστος για τις υπόλοιπες διαδικασίες.

Με βάση την προηγηθείσα ανάλυση για τα σημεία που εντοπίζεται η μεγαλύτερη ενεργειακή δαπάνη σε επίπεδο κόμβου έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί πολλές προσεγγίσεις προς μείωση του ενεργειακού κόστους σε επίπεδο δικτύου. Σε γενικό επίπεδο, οι προτεινόμενες τεχνικές για την επίτευξη ενεργειακής αποδοτικότητας μπορούν να ενταχθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- i. τεχνικές κύκλου λειτουργίας (duty cycle techniques)
- ii. τεχνικές βασισμένες στα δεδομένα (data-driven techniques)
- iii. τεχνικές βασισμένες στην κινητικότητα (mobility techniques)

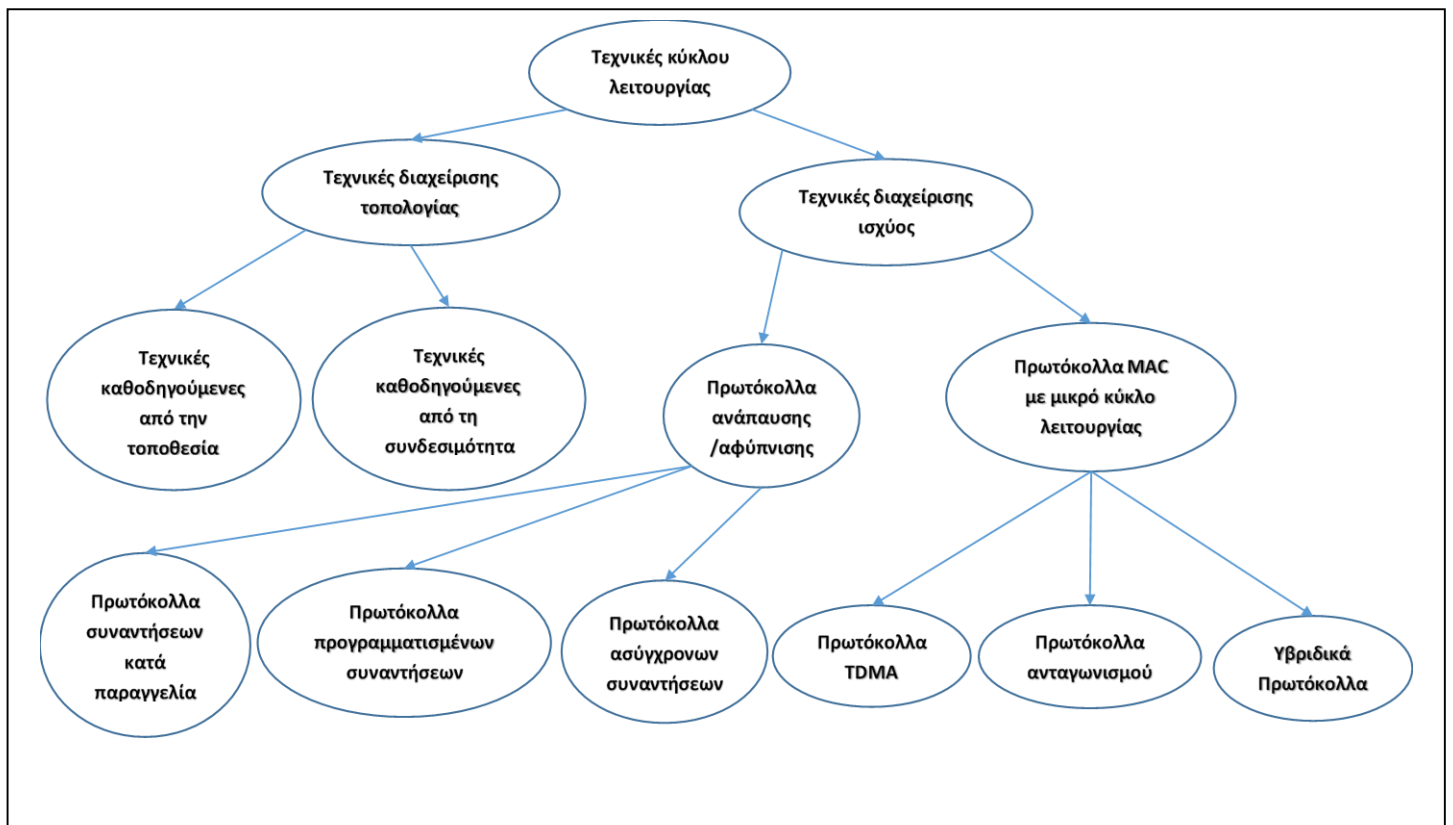
Στο υπόλοιπο κεφάλαιο αναλύονται οι ανωτέρω τεχνικές. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι πολλές από αυτές τις τεχνικές μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά μεταξύ τους, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα.

2.2 Προσεγγίσεις κύκλου λειτουργίας

Οι τεχνικές κύκλου λειτουργίας επικεντρώνονται στον τρόπο λειτουργίας του δικτύου. Ο αποτελεσματικότερος τρόπος διατήρησης της ενέργειας ενός κόμβου είναι η

μετάβαση του πομποδέκτη του σε κατάσταση ανάπαυσης, όταν δεν απαιτείται επικοινωνία. Ιδανικά, κάθε πομποδέκτης πρέπει να διακόπτει τη λειτουργία του όταν δεν υπάρχουν δεδομένα για να λάβει ή να στείλει και να μεταβαίνει σε κατάσταση λειτουργίας όταν υπάρχει διαθέσιμο πακέτο δεδομένων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι πομποδέκτες των κόμβων εναλλάσσουν την κατάσταση λειτουργίας τους ανάλογα με τη δραστηριότητα του δικτύου. Αυτός ο τρόπος συμπεριφοράς αναφέρεται ως τεχνική κύκλου λειτουργίας, όπου ο κύκλος λειτουργίας ορίζεται ως το πηλίκο του χρόνου που οι πομποδέκτες των κόμβων είναι ενεργοί προς το συνολικό χρόνο ζωής τους. Καθώς οι κόμβοι λειτουργούν συνεργατικά, πρέπει και να συντονίσουν και τα χρονικά διαστήματα όπου θα έχουν ενεργούς τους πομποδέκτες τους. Για το λόγο αυτό, αυτά τα σχήματα λειτουργίας συνοδεύονται από ένα καταναμημένο αλγόριθμο προγραμματισμού που επιτρέπει στους κόμβους του δικτύου να αποφασίσουν πότε να ενεργοποιήσουν και πότε να απενεργοποιήσουν τον πομποδέκτη τους. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι γειτονικοί κόμβοι θα είναι ταυτόχρονα ενεργοί, ώστε να είναι εφικτή η ανταλλαγή πακέτων, ακόμα και όταν αυτοί χαρακτηρίζονται από μικρό κύκλο λειτουργίας.

Η ταξινόμηση των τεχνικών κύκλου λειτουργίας φαίνεται στο Σχ. 2.1.



Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση των τεχνικών κύκλου λειτουργίας

Οι τεχνικές κύκλου λειτουργίας μπορούν να επιτευχθούν μέσα από δύο διαφορετικές και συμπληρωματικές προσεγγίσεις. Από τη μια πλευρά, είναι δυνατή η αξιοποίηση του πλεονάσματος των κόμβων που συνήθως υπάρχει στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, επιλέγοντας να παραμένει ενεργό μόνο ένα ελάχιστο υποσύνολο από τους

συνολικούς κόμβους, ώστε να υπάρχει συνοχή στο δίκτυο. Όσοι κόμβοι δεν ανήκουν σε αυτό το υποσύνολο μεταβαίνουν στην κατάσταση ανάπαυσης. Περιοδικά, γίνεται εναλλαγή των κόμβων που παραμένουν ενεργοί, ώστε, σε βάθος χρόνου, όλοι οι κόμβοι να διαθέτουν τα ίδια κατά μέσο όρο ενεργειακά αποθέματα. Η διαδικασία εύρεσης βέλτιστου υποσυνόλου κόμβων που εξασφαλίζει συνοχή στο δίκτυο ονομάζεται έλεγχος τοπολογίας. Προσομοιώσεις έχουν δείξει ότι με εφαρμογή του ελέγχου τοπολογίας, η διάρκεια ζωής του δικτύου μπορεί να αυξηθεί κατά 2 έως 3 φορές σε σχέση με τη διάρκεια ζωής του δικτύου έχοντας όλους τους κόμβους συνεχώς ενεργούς.

Από την άλλη πλευρά, οι ενεργοί κόμβοι, δηλαδή εκείνοι που έχουν επιλεγεί να παραμένουν ενεργοί από τον έλεγχο τοπολογίας, δεν χρειάζεται να έχουν τον πομποδέκτη τους συνεχώς ενεργοποιημένο. Στο πλαίσιο αυτό, μπορούν να τον απενεργοποιούν όποτε δεν υπάρχει δραστηριότητα στο δίκτυο. Αυτή η εναλλαγή του πομποδέκτη κάθε κόμβου από ενεργή κατάσταση σε κατάσταση απενεργοποίησης ονομάζεται διαχείριση ισχύος (power management). Εκτενής αναφορά για εκάστη των δύο αυτών στρατηγικών γίνεται στις ενότητες που ακολουθούν.

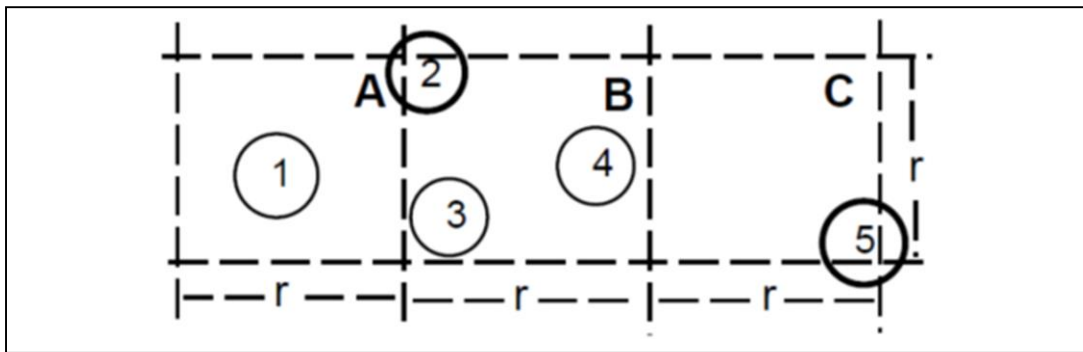
2.2.1 Πρωτόκολλα ελέγχου τοπολογίας

Η ιδέα του ελέγχου τοπολογίας σχετίζεται πολύ στενά με τον πλεονασμό κόμβων στο δίκτυο, κάτι που γενικώς ισχύει, ιδιαίτερα στα πυκνά δίκτυα. Άλλωστε, σε πολλές περιπτώσεις η δημιουργία ενός δικτύου αισθητήρων γίνεται με ρίψη των κόμβων από τον αέρα, οπότε αποτελεί συνήθη πρακτική να ρίχνεται εξ αρχής πλεονάζων αριθμός κόμβων-αισθητήρων, ώστε να αντισταθμιστούν ενδεχόμενες αστοχίες λειτουργίας κατά τη φάση ανάπτυξης του δικτύου. Επιπλέον, καθώς τις περισσότερες φορές είναι δύσκολη ή οικονομικά ασύμφορη η φυσική παρουσία στις περιοχές ανάπτυξης δικτύων αισθητήρων, η χρησιμοποίηση μεγαλύτερου του προβλεπόμενου αριθμού κόμβων-αισθητήρων κρίνεται συμφέρουσα σε σχέση με πιθανή προσπάθεια εγκατάστασης νέων κόμβων σε περίπτωση βλάβης των αρχικών. Συνεπώς, τα πρωτόκολλα ελέγχου τοπολογίας αποσκοπούν σε δυναμική προσαρμογή της τοπολογίας του δικτύου, βασισμένη στις ανάγκες της εφαρμογής, έτσι ώστε να επιτρέπει τις λειτουργίες του δικτύου και παράλληλα να ελαχιστοποιεί το πλήθος των ενεργών κόμβων, επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

Τα κριτήρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποφασιστεί ποιοι κόμβοι είναι ενεργοί ή ανενεργοί και για πόσο χρονικό διάστημα είναι αρκετά. Για το λόγο αυτό, τα πρωτόκολλα ελέγχου τοπολογίας μπορούν να ενταχθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα καθοδηγούμενα από τη θέση πρωτόκολλα (location driven protocols), τα οποία καθορίζουν ποιοι κόμβοι θα είναι ενεργοί λαμβάνοντας υπόψη τη θέση τους, που θεωρείται γνωστή. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα καθοδηγούμενα από τη συνδεσιμότητα πρωτόκολλα (connectivity driven protocols), τα οποία καθορίζουν ποιοι κόμβοι θα είναι ενεργοί ώστε να υπάρχει συνδεσιμότητα στο δίκτυο ή να επιτυγχάνεται συνεχώς λήψη μετρήσεων από όλη την περιοχή ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, ακολουθεί παρουσίαση πρωτοκόλλων από τις δύο κατηγορίες.

2.2.1.1 Πρωτόκολλα καθοδηγούμενα από τη θέση

Το GAF (Geographical Adaptive Fidelity) είναι ένα καθοδηγούμενο από τη θέση πρωτόκολλο. Στόχος του είναι να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο και να βελτιστοποιήσει την επίδοση του δικτύου αισθητήρων αναγνωρίζοντας ισοδύναμους κόμβους, με κριτήριο τη δυνατότητα προώθησης πακέτων. Στο πρωτόκολλο αυτό, κάθε κόμβος χρησιμοποιεί πληροφορίες θέσης που προέρχονται από ένα σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS, στη συνήθη περίπτωση) προκειμένου να συσχετιστεί τον εαυτό του με κάποιο εικονικό πλέγμα (virtual grid). Ολόκληρη η περιοχή ενδιαφέροντος χωρίζεται σε τετραγωνικά εικονικά πλέγματα και εντός κάθε πλέγματος κάποιος κόμβος ορίζεται ως επικεφαλής (master) του πλέγματος. Ο χωρισμός της περιοχής ενδιαφέροντος σε πλέγματα γίνεται ώστε, για οποιαδήποτε δύο γειτονικά πλέγματα A και B, κάθε κόμβος εντός του πλέγματος A να είναι σε θέση να επικοινωνεί με οποιοδήποτε κόμβο του πλέγματος B και αντιστρόφως. Κατ' αυτόν τον τρόπο, όλοι οι κόμβοι εντός του ίδιου εικονικού πλέγματος είναι ισοδύναμοι όσον αφορά τη δρομολόγηση πακέτων, οπότε αρκεί μόνο ένας εξ αυτών να είναι ενεργός κάθε στιγμή, δίχως να επηρεάζεται η αποδοτικότητα δρομολόγησης (routing fidelity). Αυτό φαίνεται γραφικά και στο Σχ. 2.2.



Σχήμα 2.2: Εικονικά πλέγματα στο πρωτόκολλο GAF. Οι κόμβοι 2,3 και 4 ανήκουν στο ίδιο εικονικό πλέγμα και συνεπώς είναι ισοδύναμοι ως προς τη δρομολόγηση πακέτων.

Η διάσταση, έστω r , του εικονικού τετραγωνικού πλέγματος σχετίζεται με την εμβέλεια των κόμβων, έστω R . Συγκεκριμένα, καθώς από τον ορισμό των εικονικών πλεγμάτων δύο οποιοδήποτε κόμβοι που ανήκουν σε γειτονικά πλέγματα πρέπει να είναι σε θέση να επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους, η χειρότερη περίπτωση είναι δύο κόμβοι να βρίσκονται σε απέναντι γωνίες δυο γειτονικών πλεγμάτων, όπως οι κόμβοι 2 και 5 του ενδεικτικού Σχ. 2.2. Για να μπορέσουν να επικοινωνήσουν, προκύπτει ότι πρέπει να ισχύει:

$$r^2 + (2r)^2 \leq R^2 \Rightarrow r \leq \frac{R}{\sqrt{5}} \quad (2.1)$$

Οι κόμβοι εντός ενός εικονικού πλέγματος πρέπει να συντονίζουν τη λειτουργία τους. Στο πρωτόκολλο GAF ορίζονται τρεις καταστάσεις λειτουργίας. Αυτές είναι οι εξής:

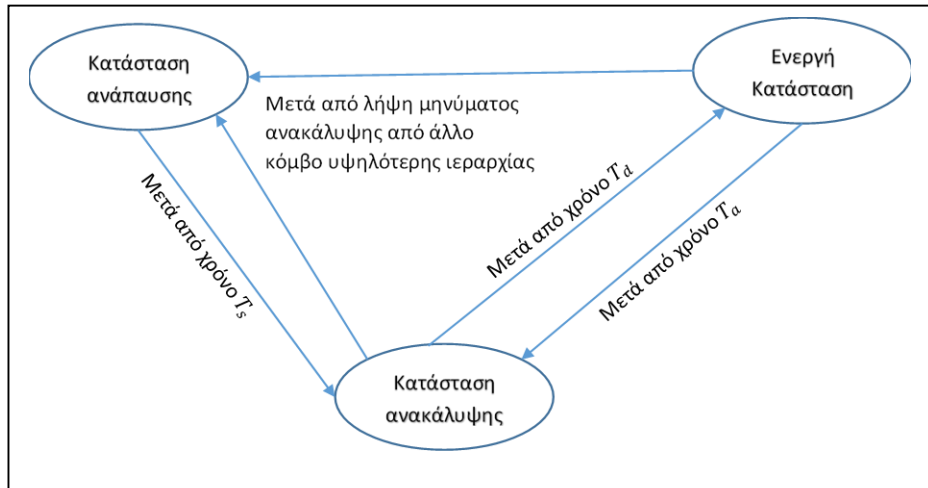
- i. η κατάσταση ανακάλυψης (discovery state), κατά την οποία κάθε κόμβος ανακαλύπτει τους άλλους κόμβους που βρίσκονται εντός του ίδιου με αυτόν εικονικού πλέγματος

- ii. η κατάσταση ανάπαυσης (sleep state), κατά την οποία ο κόμβος είναι ανενεργός
- iii. η ενεργή κατάσταση, κατά την οποία ο κόμβος συμμετέχει στη δρομολόγηση πακέτων στο δίκτυο.

Για το χειρισμό δικτύων στα οποία οι κόμβοι κινούνται, κάθε κόμβος υπολογίζει το χρόνο μέχρι να εξέλθει από το πλέγμα και γνωστοποιεί το αποτέλεσμα στους υπόλοιπους κόμβους του πλέγματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι υπόλοιποι κόμβοι ρυθμίζουν το πρόγραμμά τους και, πριν παρέλθει ο χρόνος που τους γνωστοποιήθηκε, μεταβαίνουν στην κατάσταση ανακάλυψης, ώστε κάποιος από αυτούς τελικά να μεταβεί στην ενεργή κατάσταση, διατηρώντας ενεργή τη διαδρομή δρομολόγησης.

Η διαδικασία επιλογής του επικεφαλής κάθε πλέγματος είναι η ακόλουθη. Αρχικά, κάθε κόμβος βρίσκεται σε κατάσταση ανακάλυψης και ανταλλάσσει μηνύματα με άλλους κόμβους, τα οποία περιλαμβάνουν την ταυτότητα του πλέγματος στο οποίο ανήκει (grid ID), ώστε να εντοπίσει κόμβους που να ανήκουν στο ίδιο εικονικό πλέγμα με αυτόν. Ένας κόμβος γίνεται επικεφαλής του πλέγματος εφόσον δεν λάβει κάποιο μήνυμα ανακάλυψης για ένα προκαθορισμένο διάστημα T_d . Μεταξύ των κόμβων διαμορφώνεται ιεραρχία, η οποία σχετίζεται με τα ενεργειακά αποθέματα κάθε κόμβου. Κόμβοι με μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα αποκτούν και υψηλότερη θέση στην ιεραρχία. Όταν περισσότεροι από ένας κόμβοι βρίσκονται σε κατάσταση ανακάλυψης, επικεφαλής γίνεται εκείνος με την υψηλότερη θέση στην ιεραρχία. Ο κόμβος που έχει επιλεγεί ως επικεφαλής μεταβαίνει στην ενεργή κατάσταση για χρονικό διάστημα T_a . Μετά το πέρας του χρονικού διαστήματος T_a ο κόμβος-αρχηγός μεταβαίνει στην κατάσταση ανακάλυψης, προκειμένου να δώσει την ευκαιρία σε άλλους κόμβους εντός του πλέγματος να αναλάβουν το ρόλο του επικεφαλής. Έτσι, επιτυγχάνεται και ισοκατανομή του φορτίου κίνησης μεταξύ των κόμβων ενός πλέγματος και, συνεπώς, επεκτείνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου. Οι κόμβοι που βρίσκονται σε κατάσταση ανάπαυσης μεταβαίνουν στην κατάσταση ανακάλυψης μετά από χρόνο T_s . Τέλος, σε δίκτυα που χαρακτηρίζονται από υψηλή κινητικότητα κόμβων, ο χρόνος T_s υπολογίζεται προσεγγιστικά, με βάση το χρόνο παραμονής των κόμβων στο πλέγμα, και οι κόμβοι οφείλουν να μεταβούν στην κατάσταση ανακάλυψης πριν εκπνεύσει το χρονικό διάστημα αυτό. Οι ακριβείς τιμές των χρονικών παραμέτρων T_d, T_a, T_s εξαρτώνται από το είδος της εφαρμογής.

Οι καταστάσεις λειτουργίας του πρωτοκόλλου GAF φαίνονται στο Σχ. 2.3.



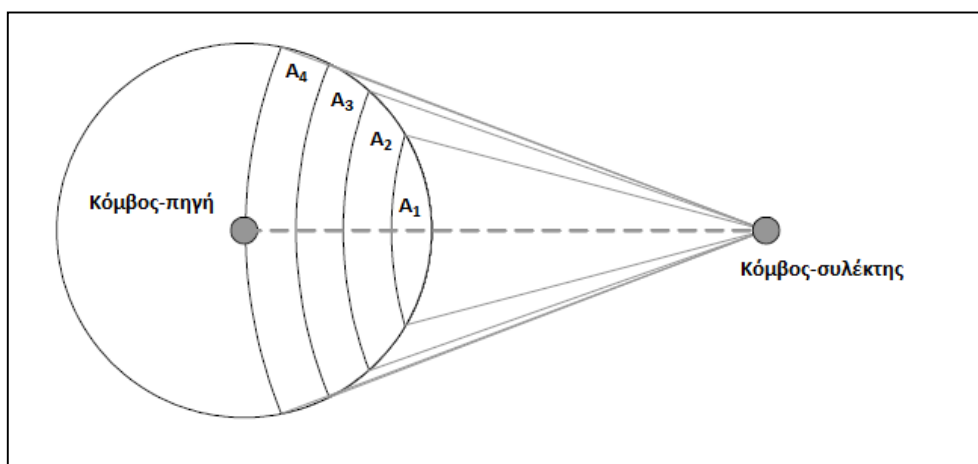
Σχήμα 2.3: Καταστάσεις μετάβασης στο πρωτόκολλο GAF

Επισημαίνεται ότι το πρωτόκολλο GAF λειτουργεί ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης. Επίσης, δεν επηρεάζει σημαντικά την επίδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης, όσον αφορά την απώλεια πακέτων και την καθυστέρηση, ενώ βελτιώνει τη διάρκεια ζωής ανάλογα με την πυκνότητα κόμβων του δικτύου.

Καίτοι χαρακτηρίζεται ως γεωγραφικό πρωτόκολλο δρομολόγησης, το GeRaF (Geographic Random Forwarding) εμφανίζει χαρακτηριστικά αξιοποίησης της θέσης και του πλεονασμού των κόμβων. Αναλυτικά, το GeRaF είναι ένα πρωτόκολλο που επιτρέπει την επικοινωνία και τη μεταφορά δεδομένων από τους κόμβους-αισθητήρες προς τον κόμβο-συλλέκτη. Περιλαμβάνει ένα χρονικό πρόγραμμα λειτουργίας των κόμβων, ένα πρωτόκολλο πρόσβασης στο κοινό μέσο (MAC protocol) και εκτελεί γεωγραφική δρομολόγηση. Η στοίβα πρωτοκόλλων GeRaF βασίζεται στην υπόθεση ότι οι κόμβοι-αισθητήρες γνωρίζουν τη θέση τους, αλλά και τη θέση του κόμβου-συλλέκτη. Η βασική ιδέα στο πρωτόκολλο GeRaF είναι ότι οι κόμβοι εναλλάσσονται μεταξύ της ενεργού και της ανενεργού κατάστασης, ακολουθώντας δεδομένο κύκλο λειτουργίας, έστω d . Κάθε φορά όπου κάποιος κόμβος έχει πακέτο προς αποστολή, ελέγχει το κανάλι για να διαπιστώσει αν υπάρχει άλλη μετάδοση σε εξέλιξη. Εφόσον διαπιστώσει ότι το κανάλι είναι ανενεργό για επαρκές χρονικό διάστημα, αποστέλλει μήνυμα (RTS – Request To Send) που λαμβάνεται από όλους τους ενεργούς κόμβους εντός της εμβέλειας του κόμβου-αποστολέα. Το τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος που βρίσκεται πλησιέστερα στον κόμβο-συλλέκτη ορίζεται ως περιοχή προώθησης και χωρίζεται σε N_p υποπεριοχές προτεραιότητας, με την υποπεριοχή που βρίσκεται εγγύτερα στον κόμβο-συλλέκτη να λαμβάνει την υψηλότερη προτεραιότητα. Στόχος του πρωτοκόλλου είναι να επιλεγεί ένας από τους καταλληλότερους κόμβους, δηλαδή ένας ενεργός κόμβος από την υποπεριοχή με την υψηλότερη προτεραιότητα, ως κόμβος-αναμεταδότης (relay node). Μετά την αποστολή του μηνύματος RTS, ο κόμβος-αποστολέας αναμένει να λάβει μήνυμα CTS (Clear To Send) από κόμβους που βρίσκονται στην υποπεριοχή με την υψηλότερη προτεραιότητα. Αν δεν ληφθεί απάντηση, ο κόμβος-αποστολέας συμπεραίνει ότι δεν υπάρχει διαθέσιμος κόμβος στην υποπεριοχή υψηλότερης προτεραιότητας και αποστέλλει νέο μήνυμα RTS,

αναμένοντας να λάβει μήνυμα CTS από κόμβους που βρίσκονται στην υποπεριοχή με την αμέσως υψηλότερη προτεραιότητα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να ληφθεί μήνυμα CTS. Αν ληφθεί μόνο ένα μήνυμα CTS, ο μοναδικός κόμβος-αποστολέας του καθίσταται κόμβος-αναμεταδότης. Στην περίπτωση, όμως, όπου περισσότεροι από ένας κόμβοι απαντήσουν με μήνυμα CTS, προκαλείται σύγκρουση. Με τη βοήθεια κατάλληλου αλγορίθμου γίνεται αντιμετώπιση της σύγκρουσης, και η διαδικασία οδηγεί τελικά στην επιλογή μοναδικού κόμβου για αναμετάδοση. Στη συνέχεια, το μήνυμα πληροφορίας προωθείται προς τον κόμβο-αναμεταδότη, ο οποίος επιβεβαιώνει την επιτυχή λήψη του μηνύματος πληροφορίας αποστέλλοντας σχετικό μήνυμα (ACK – Acknowledge message). Στη συνέχεια ο κόμβος-αναμεταδότης αναλαμβάνει το ρόλο του αποστολέα πληροφορίας και αναζητεί τον επόμενο κόμβο-αναμεταδότη, μέχρι το μήνυμα πληροφορίας να φθάσει στον τελικό προορισμό του. Στην περίπτωση όπου δεν ανευρεθεί κανένας κόμβος-αναμεταδότης σε ολόκληρη την περιοχή προώθησης, ο κόμβος-αποστολέας υπαναχωρεί προσωρινά και δοκιμάζει ξανά μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, αναμένοντας ότι τότε θα έχει αλλάξει η κατανομή των ενεργών κόμβων και θα μπορέσει να ανευρεθεί κόμβο-αναμεταδότη. Η διαδικασία υπαναχώρησης επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί κόμβος-αναμεταδότης ή να εξαντληθεί το ανώτατο όριο προσπαθειών, οπότε εγκαταλείπεται η προσπάθεια ανεύρεσης κόμβου-αναμεταδότη και το μήνυμα πληροφορίας απορρίπτεται.

Κάθε κόμβος που δεν έχει πακέτο προς μετάδοση μεταβαίνει περιοδικά στην ενεργή κατάσταση, ακολουθώντας τον κύκλο λειτουργίας του. Μόλις μεταβεί στην ενεργή κατάσταση, κάνει ακρόαση στο κανάλι. Αν διαπιστώσει ότι το κανάλι είναι ανενεργό, τότε επιστρέφει στην ανενεργό κατάσταση. Αντίθετα, εφόσον λάβει κάποιο μήνυμα RTS, ο κόμβος εισέρχεται ως υποψήφιος στη φάση ανταγωνισμού για την επιλογή του κόμβου-αναμεταδότη. Κάθε κόμβος είναι ικανός να προσδιορίσει τη δική του υποπεριοχή προτεραιότητας, βασιζόμενος στις δικές του συντεταγμένες, τις οποίες γνωρίζει, καθώς και στις συντεταγμένες του κόμβου-αποστολέα και του κόμβου-συλλέκτη, οι οποίες αναφέρονται στο μήνυμα RTS. Αν ο κόμβος που έλαβε μήνυμα RTS ανήκει στην υποπεριοχή υψηλότερης προτεραιότητας, τότε απαντάει άμεσα αποστέλλοντας μήνυμα CTS. Σε διαφορετική περίπτωση, αν ο κόμβος ανήκει στην i-οστη υποπεριοχή προτεραιότητας, απαντά μόνο αφού λάβει i μηνύματα RTS και κανένα μήνυμα CTS. Αξίζει να σημειωθεί ότι, δεδομένου ότι η επιλογή κόμβου-αναμεταδότη γίνεται αφού έχει ληφθεί υπόψη η εγγύτητά του με τον τελικό προορισμό, δεν χρειάζονται γνώσεις της τοπολογίας του δικτύου ούτε πίνακες δρομολόγησης, αλλά μόνο πληροφορίες τοποθεσίας.



Σχήμα 2.4: Περιοχές προτεραιότητας στο πρωτόκολλο GeRaF. Η περιοχή A_1 έχει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα και ακολουθούν κατά φθίνουσα σειρά οι περιοχές A_2 , A_3 και A_4

2.2.1.2 Πρωτόκολλα καθοδηγούμενα από τη συνδεσιμότητα

Το Span είναι ένα καθοδηγούμενο από τη συνδεσιμότητα πρωτόκολλο, το οποίο επιλέγει προσαρμοστικά ανάμεσα σε όλους τους κόμβους του δικτύου τους κόμβους-συντονιστές. Η θέση του στη στοιβά δικτυακών πρωτοκόλλων είναι πάνω από το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο MAC και κάτω από το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Στο πρωτόκολλο Span, ορισμένοι από τους κόμβους του δικτύου επιλέγονται για να αναλάβουν ρόλο συντονιστή. Αυτοί οι κόμβοι-συντονιστές παραμένουν στην ενεργό κατάσταση για συνεχή χρονικά διαστήματα και πραγματοποιούν δρομολόγηση. Οι υπόλοιποι κόμβοι βρίσκονται σε ανενεργό κατάσταση και περιοδικά ελέγχουν αν χρειάζεται να μεταβούν στην ενεργό κατάσταση για να αναλάβουν ρόλο κόμβου-συντονιστή. Για να εξασφαλίσει την ύπαρξη επαρκούς πλήθους κόμβων-συντονιστών, το πρωτόκολλο Span χρησιμοποιεί τον ακόλουθο κανόνα επιλογής: όταν δύο γειτονικοί κόμβοι ενός ανενεργού κόμβου δεν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, είτε άμεσα είτε έμμεσα, τότε ο ανενεργός κόμβος πρέπει να μεταβεί στην ενεργό κατάσταση και να αναλάβει ρόλο κόμβου-συντονιστή. Ωστόσο, είναι ενδεχόμενο αρκετοί κόμβοι να αντιληφθούν την έλλειψη κόμβου-συντονιστή ταυτόχρονα και συνεπώς να αποφασίσουν όλοι να αναλάβουν αυτό το ρόλο. Προς αποφυγή τέτοιων καταστάσεων, οι κόμβοι που αποφασίζουν να αναλάβουν το ρόλο κόμβου-συντονιστή αναβάλλουν την ανακοίνωση της απόφασης αυτής κατά μια τυχαία καθυστέρηση υπαναχώρησης (backoff delay). Κάθε κόμβος χρησιμοποιεί μια συνάρτηση που παράγει μια τυχαία τιμή χρονικού διαστήματος καθυστέρησης λαμβάνοντας υπόψη το πλήθος των γειτονικών κόμβων με τους οποίους θα μπορούσε να διασυνδεθεί δυνητικά και τα εναπομένοντα ενεργειακά αποθέματα του κόμβου. Η βασική ιδέα είναι ότι, αφενός, οι κόμβοι με τα υψηλότερα ενεργειακά αποθέματα πρέπει να είναι πιθανότερο να προσφερθούν για να αναλάβουν ρόλο κόμβου-συντονιστή και, αφετέρου, οι κόμβοι-συντονιστές πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο που να ελαχιστοποιεί το πλήθος τους. Από την άλλη πλευρά, κάθε κόμβος-συντονιστής ελέγχει περιοδικά αν μπορεί να

μεταβεί στην ανενεργό κατάσταση. Αναλυτικά, ένας κόμβος-συντονιστής πρέπει να αποσυρθεί από το ρόλο του αν κάθε ζεύγος γειτονικών του κόμβων είναι σε θέση να επικοινωνήσει είτε άμεσα είτε μέσω άλλων κόμβων-συντονιστών. Για την αποφυγή απώλειας συνδεσιμότητας κατά τη μεταβατική φάση, ο αρχικός κόμβος-συντονιστής συνεχίζει να παρέχει την υπηρεσία δρομολόγησης μέχρι να καταστεί διαθέσιμος ο νέος κόμβος-συντονιστής. Προκειμένου να αποφασίσει για το ρόλο που πρέπει να επιτελέσει κάθε κόμβος κάθε χρονική στιγμή, το πρωτόκολλο Span απαιτεί πληροφορίες τόσο για τη γειτονιά κάθε κόμβου όσο και για τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Ωστόσο, οι πληροφορίες αυτές παρέχονται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης, οπότε το Span εξαρτάται από αυτό και ενδεχομένως να απαιτούνται τροποποιήσεις στον τρόπο λειτουργίας του πρωτοκόλλου Span ώστε να είναι συμβατό με το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται.

Ένα άλλο πρωτόκολλο της κατηγορίας αυτής είναι το ASCENT. Συγκεκριμένα, το ASCENT (Adaptive Self-Configuring sEnsor Networks Topologies) είναι ένα καθοδηγούμενο από τη συνδεσιμότητα πρωτόκολλο, το οποίο δεν εξαρτάται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης. Στο πρωτόκολλο αυτό, κάθε κόμβος αποφασίζει αν θα συμμετέχει στο δίκτυο ή αν θα βρίσκεται στην ανενεργό κατάσταση βασιζόμενος σε πληροφορίες σχετικά με τη συνδεσιμότητα και την απώλεια πακέτων που μετρά ο ίδιος ο κόμβος τοπικά. Αρχικά, ορισμένοι κόμβοι είναι ενεργοί ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι είναι παθητικοί, δηλαδή λαμβάνουν πακέτα, χωρίς να τα προωθούν. Όταν ο αριθμός των ενεργών κόμβων δεν είναι αρκετά μεγάλος, ο κόμβος-συλλέκτης αντιμετωπίζει μεγάλη απώλεια πακέτων από τους κόμβους-πηγές. Σε αυτή την περίπτωση, ο κόμβος-συλλέκτης αποστέλλει μηνύματα βοήθειας (help messages) για να ζητήσει από γειτονικούς του κόμβους που βρίσκονται σε παθητική κατάσταση να συμμετάσχουν στο δίκτυο ως ενεργοί κόμβοι. Οι παθητικοί κόμβοι-γείτονες έχουν τον πομποδέκτη τους ενεργοποιημένο και λαμβάνουν όλα τα πακέτα που αποστέλλουν οι ενεργοί γειτονικοί τους κόμβοι. Ωστόσο, ούτε συμμετέχουν στην προώθηση δεδομένων ούτε ανταλλάσσουν πληροφορίες ελέγχου δρομολόγησης. Ουσιαστικά, οι παθητικοί κόμβοι-γείτονες απλώς συλλέγουν πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου χωρίς να αλληλοεπιδρούν με τους ενεργούς κόμβους. Αντίθετα, οι ενεργοί κόμβοι προωθούν δεδομένα και ανταλλάσσουν μηνύματα ελέγχου μέχρι να τελειώσουν τα ενεργειακά τους αποθέματα. Επίσης, όταν διαπιστώσουν ότι η τοπική απώλεια δεδομένων είναι μεγαλύτερη από κάποιο προκαθορισμένο επίπεδο μπορούν να εκπέμψουν και αυτοί μηνύματα βοήθειας. Μόλις ένας κόμβος συνδεθεί στο δίκτυο, αρχίζει να παρακολουθεί τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο και συγχρόνως ενημερώνει μέσω σχετικών μηνυμάτων τους γείτονές του για την παρουσία του ως ενεργού κόμβου. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι ο αριθμός των ενεργών κόμβων να καταστεί τέτοιος ώστε το ποσοστό απώλειας μηνυμάτων του κόμβου-συλλέκτη να βρίσκεται κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώφλιο που εξαρτάται και από την εφαρμογή. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή όταν ανιχνευθεί κάποιο περιστατικό στο δίκτυο όπως για παράδειγμα απενεργοποίηση κάποιου κόμβου λόγω εξάντλησης των ενεργειακών του αποθεμάτων ή προκληθεί αύξηση του ποσοστού λανθασμένων μηνυμάτων, λόγω αλλαγών στις συνθήκες μετάδοσης. Το πρωτόκολλο ASCENT περιορίζει την απώλεια πακέτων που οφείλονται σε συγκρούσεις καθώς η πυκνότητα κόμβων λαμβάνεται υπόψη ως παράμετρος στη λειτουργία του πρωτοκόλλου, μέσω της μέτρησης της απώλειας δεδομένων σε τοπικό επίπεδο. Επίσης, το πρωτόκολλο ASCENT είναι

εύκολα κλιμακώσιμο. Από την άλλη πλευρά, η εξοικονόμηση ενέργειας δεν αυξάνεται ανάλογα προς την πυκνότητα κόμβων, καθώς αυτή εξαρτάται ουσιαστικά από τον κύκλο λειτουργίας και όχι από το πλήθος των ενεργών κόμβων.

Μια διαφορετική κλάση προσεγγίσεων περιγράφει μαθηματικά το δίκτυο ως τυχαίο γράφο και εφαρμόζει πορίσματα της θεωρίας διήθησης [10] για να χαρακτηρίσει τη συνδεσιμότητα του δικτύου όταν εφαρμόζεται στους κόμβους ένας κύκλος λειτουργίας. Ένα πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας είναι το πρωτόκολλο Naps. Συγκεκριμένα, το Naps είναι ένα αποκεντρωμένο πρωτόκολλο διαχείρισης τοπολογίας που βασίζεται σε ένα περιοδικό σχήμα ανάπαυσης/αφύπνισης. Στο πρωτόκολλο αυτό, ο χρόνος διαιρείται σε χρονικές περιόδους με διάρκεια T . Αρχικά, κάθε κόμβος αναμένει επί τυχαίο χρονικό διάστημα t_v , το οποίο είναι ομοιόμορφα κατανομημένο στο διάστημα $[0, T)$. Μετά την πάροδο του t_v , κάθε κόμβος αποστέλλει προς όλους τους γειτονικούς του κόμβους μήνυμα HELLO ώστε να τους ενημερώσει για την αφύπνισή του. Στη συνέχεια, ακροάται το κανάλι για να λάβει πιθανά μηνύματα HELLO από άλλους κόμβους. Κάθε κόμβος μπορεί να επιστρέψει στην κατάσταση ανάπαυσης όταν έχει λάβει c μηνύματα από τους γείτονές του, διαφορετικά παραμένει ενεργός επί ολόκληρη τη χρονική περίοδο T . Οι συγγραφείς του Naps [11] έχουν αποδείξει αναλυτικά τις ιδιότητες συνδεσιμότητας του πρωτοκόλλου αυτού και οι προσομοιώσεις έχουν δείξει ότι πρόκειται για ένα ευέλικτο και εύρωστο πρωτόκολλο.

2.2.1.3 Σύνοψη

Τα πρωτόκολλα ελέγχου τοπολογίας που είναι καθοδηγούμενα από τη θέση των κόμβων απαιτούν οι κόμβοι να γνωρίζουν τη θέση τους, κάτι που επιτυγχάνεται συνήθως με ένα υποσύστημα GPS. Καθώς, όμως, το GPS είναι ιδιαίτερα ακριβό και ενεργειακά δαπανηρό, είναι συνήθως ανέφικτο να εγκατασταθεί σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Είναι, όμως, δυνατό να εξοπλιστεί με GPS ένα υποσύνολο των κόμβων και να προσδιορίζεται η θέση των υπόλοιπων κόμβων χρησιμοποιώντας άλλες τεχνικές. Ωστόσο, οι κοινοί κόμβοι-αισθητήρες δεν έχουν το κατάλληλο υλικό (hardware) για να αποκτήσουν πληροφορίες τοποθεσίας. Για το λόγο αυτό, στη γενική περίπτωση τα καθοδηγούμενα από τη συνδεσιμότητα πρωτόκολλα είναι προτιμότερα, καθώς απαιτούν πληροφορίες οι οποίες μπορούν να εξαχθούν από τοπικές μετρήσεις. Σε κάθε περίπτωση, δεδομένου ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα των πρωτοκόλλων ελέγχου τοπολογίας είναι στενά συνδεδεμένη με την πυκνότητα κόμβων, το ίδιο ισχύει για την επέκταση της ζωής του δικτύου. Έχει δειχθεί ότι τα πρωτόκολλα ελέγχου τοπολογίας αυξάνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου κατά έναν παράγοντα 2 έως 3 σε σχέση με την περίπτωση όπου στο ίδιο δίκτυο οι κόμβοι είναι συνεχώς ενεργοποιημένοι. Η βελτίωση αυτή, όμως, θεωρείται μικρή για πολλές πρακτικές εφαρμογές, οπότε η τεχνική αυτή θα πρέπει να συνδυάζεται με άλλες τεχνικές, λαμβάνοντας, όμως, υπόψη πιθανές αλληλεπιδράσεις που μπορεί να επιφέρουν αρνητικές επιπτώσεις στη λειτουργία του δικτύου.

2.2.2 Πρωτόκολλα ανάπαυσης/αφύπνισης

Τα πρωτόκολλα ανάπαυσης/αφύπνισης προσπαθούν να επιτύχουν ενεργειακή αποδοτικότητα μειώνοντας το χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι κόμβοι έχουν ενεργούς τους πομποδέκτες τους. Τα πρωτόκολλα αυτά υλοποιούνται πάνω από το

πρωτόκολλο κοινής πρόσβασης (MAC protocol), δηλαδή ανήκουν είτε στο στρώμα δικτύου είτε στο στρώμα εφαρμογής. Τα πρωτόκολλα ανάπαυσης/αφύπνισης μπορούν να ενταχθούν σε τρεις υποκατηγορίες: τα πρωτόκολλα κατά παραγγελία (on demand) συναντήσεων, τα πρωτόκολλα προγραμματισμένων συναντήσεων (scheduled rendezvous) και τα πρωτόκολλα ασύγχρονων συναντήσεων (asynchronous schemes).

Τα πρωτόκολλα κατά παραγγελία συναντήσεων εφαρμόζουν άμεση προσέγγιση στη διαχείριση ισχύος. Η βασική ιδέα είναι ότι ένας κόμβος πρέπει να αφυπνίζει τον πομποδέκτη του μόνο όταν πρέπει να γίνει επικοινωνία με άλλο κόμβο. Το βασικό πρόβλημα αυτής της προσέγγισης είναι πώς θα ειδοποιηθεί ένας κόμβος με απενεργοποιημένο πομποδέκτη ότι κάποιος άλλος κόμβος θέλει να επικοινωνήσει μαζί του. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος αυτού, τα σχήματα αυτά χρησιμοποιούν κόμβους με πολλαπλούς πομποδέκτες που χαρακτηρίζονται από διαφορετικές επιδόσεις και επίπεδα κατανάλωσης ισχύος.

Εναλλακτική λύση προσφέρει η προσέγγιση των προγραμματισμένων συναντήσεων, η βασική ιδέα της οποίας συνίσταται στο ότι κάθε κόμβος πρέπει να αφυπνίζεται το ίδιο χρονικό διάστημα με τους γειτονικούς κόμβους για να υπάρξει επικοινωνία. Έτσι, οι κόμβοι αφυπνίζονται σύμφωνα με ένα σχετικό πρόγραμμα και παραμένουν ενεργοποιημένοι επί μικρό σχετικά χρονικό διάστημα ώστε να επικοινωνήσουν με τους γείτονές τους. Έπειτα, επιστρέφουν στην κατάσταση ανάπαυσης, μέχρι την επόμενη προγραμματισμένη συνάντηση.

Μια τρίτη προσέγγιση είναι η χρήση πρωτοκόλλων ασύγχρονων συναντήσεων. Σε αυτά τα πρωτόκολλα κάθε κόμβος αφυπνίζεται σε τυχαίες χρονικές στιγμές και είναι σε θέση να επικοινωνεί με τους γείτονές του, αξιοποιώντας ιδιότητες που προέρχονται από τη δομή των πρωτοκόλλων αυτού του είδους.

2.2.2.1 Πρωτόκολλα κατά παραγγελία συναντήσεων

Τα σχήματα αυτής της κατηγορίας είναι βασισμένα στην ιδέα ότι ένας κόμβος πρέπει να είναι ενεργοποιημένος μόνο όταν χρειάζεται να επικοινωνήσει με κάποιο γειτονικό του κόμβο. Αυτό ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ισχύος καθιστώντας τα σχήματα αυτά κατάλληλα για εφαρμογές που χαρακτηρίζονται από μικρό κύκλο λειτουργίας, όπως είναι οι εφαρμογές ανίχνευσης πυρκαγιάς, οι εφαρμογές επιτήρησης μηχανικών βλαβών και γενικότερα οι εφαρμογές που είναι καθοδηγούμενες από συμβάντα. Σε τέτοια σενάρια οι κόμβοι βρίσκονται στην κατάσταση παρατήρησης κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της ζωής τους. Όταν ανιχνευθεί ένα συμβάν, οι κόμβοι μεταβαίνουν στην κατάσταση μετάδοσης. Τα σχήματα κατά παραγγελία συναντήσεων αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης κατά την κατάσταση παρακολούθησης, ενώ εξασφαλίζουν περιορισμένο χρόνο αντίδρασης για τη μετάβαση στην κατάσταση μετάδοσης. Η εφαρμογή τέτοιων σχημάτων τυπικά απαιτεί τη χρήση δύο διαφορετικών διαύλων επικοινωνίας: ενός καναλιού για κανονική επικοινωνία δεδομένων και ενός καναλιού αφύπνισης, για την αποστολή σημάτων αφύπνισης προς τους δέκτες του πρώτου καναλιού, όποτε αυτό απαιτείται. Καίτοι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας μόνο πομποδέκτης με διαφορετικά κανάλια λειτουργίας, όλα τα σχετικά σχήματα αναφέρουν την ύπαρξη δύο ξεχωριστών πομποδεκτών. Αυτό επιτρέπει να μην υπάρχει παρεμβολή των σημάτων στο κανάλι αφύπνισης με πιθανή μετάδοση δεδομένων. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί το πρόσθετο κόστος του δεύτερου

πομποδέκτη, το οποίο όμως δεν είναι σημαντικό, καθώς ολόκληρο το υποσύστημα του πομποδέκτη έχει κόστος μικρότερο από ένα ποσοστό της τάξης του 15% στους εμπορικούς κόμβους. Ένα δεύτερο μειονέκτημα αποτελεί η πιθανή αναντιστοιχία μεταξύ της εμβέλειας των δύο πομποδεκτών.

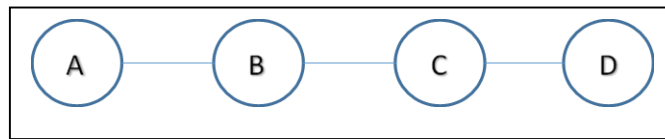
Το πρωτόκολλο STEM (Stem Topology and Energy Management) [12] χρησιμοποιεί δύο πομποδέκτες, ένα για σήματα αφύπνισης και ένα για μετάδοση πακέτων δεδομένων. Ο δεύτερος πομποδέκτης είναι ίδιας ισχύος με τον πρώτο, προς αποφυγή του προβλήματος αναντιστοιχίας της εμβέλειας. Κάθε κόμβος ενεργοποιεί τον πομποδέκτη αφύπνισης επί χρονικό διάστημα T_{active} με περίοδο επανάληψης T . Όταν κάποιος κόμβος-πηγή (κόμβος-εκκινήτης) θέλει να επικοινωνήσει με γειτονικό κόμβο (κόμβο-στόχο) αποστέλλει συρμό από περιοδικά σήματα ειδοποίησης (beacons). Μόλις ο κόμβος-στόχος λάβει σήμα ειδοποίησης, αποστέλλει μήνυμα επιβεβαίωσης της αφύπνισής του και, στη συνέχεια, ενεργοποιεί τον πομποδέκτη δεδομένων. Όταν συμβεί σύγκρουση στο κανάλι αφύπνισης, όσοι κόμβοι αντιλαμβάνονται τη σύγκρουση ενεργοποιούν τον πομποδέκτη δεδομένων τους, χωρίς προηγουμένως να αποστείλουν μήνυμα επιβεβαίωσης. Η μετάδοση μηνυμάτων ειδοποίησης επαναλαμβάνεται επί ένα μέγιστο χρονικό διάστημα, εφόσον δε ληφθεί επιβεβαίωση αφύπνισης από τον κόμβο-στόχο. Μια παραλλαγή του ανωτέρου πρωτοκόλλου, που ονομάζεται STEM-B, είναι το πρωτόκολλο STEM-T. Η βασική τους διαφορά είναι ότι το πρωτόκολλο STEM-T χρησιμοποιεί τόνο αφύπνισης οπότε ενεργοποιούνται αμέσως όλοι οι κόμβοι γείτονες του κόμβου-εκκινήτη. Τα πρωτόκολλα STEM μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με πρωτόκολλα ελέγχου τοπολογίας. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός του STEM μαζί με το GAF αυξάνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου κατά έναν παράγοντα της τάξης του 100, σε σχέση με την περίπτωση όπου στο ίδιο δίκτυο οι κόμβοι είναι συνεχώς ενεργοποιημένοι. Ωστόσο, το πρωτόκολλο STEM ανταλλάσσει εξοικονόμηση ενέργειας με καθυστέρηση απόκρισης στην εγκατάσταση διαδρομής. Συγκεκριμένα, η περίοδος μεταξύ διαδοχικών αποστολών μηνύματος ειδοποίησης πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλη, ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος για την αποστολή του μηνύματος ειδοποίησης και για τη λήψη του μηνύματος επιβεβαίωσης αφύπνισης. Επίσης, καθώς οι κόμβοι δεν είναι συγχρονισμένοι μεταξύ τους, κάθε κόμβος πρέπει να παραμένει ενεργός για χρονικό διάστημα

$$T_{active} \geq 2 * T_{wakeup} + T_{ack} \quad (2.2)$$

όπου T_{wakeup} είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αποστολή του μηνύματος ειδοποίησης και T_{ack} είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αποστολή του μηνύματος επιβεβαίωσης αφύπνισης. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι ο χρόνος T_{active} εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στους κόμβους του δικτύου. Σε δίκτυα με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης, ο χρόνος T_{active} αποκτά μεγάλες τιμές οπότε προκειμένου οι κόμβοι να έχουν μικρό κύκλο λειτουργίας θα πρέπει και ο χρόνος, T , μεταξύ διαδοχικών ενεργών περιόδων να είναι μεγάλος. Αυτό, όμως, οδηγεί τελικά σε μεγάλη καθυστέρηση στη λήψη των δεδομένων από τον κόμβο-συλλέκτη.

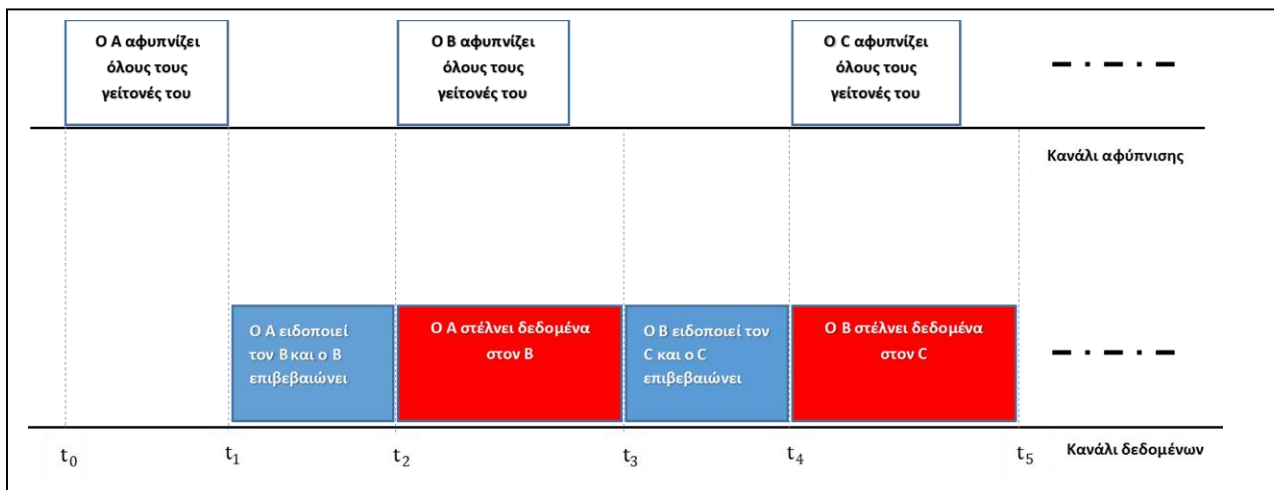
Για να επιτευχθεί μια καλύτερη σχέση ανταλλαγής μεταξύ της εξοικονόμησης ενέργειας και της καθυστέρησης αφύπνισης προτείνεται το πρωτόκολλο PTW [13]. Το πρωτόκολλο PTW (Power Tone Wakeup) βασίζεται και αυτό στην ύπαρξη δύο πομποδεκτών, ενός για τη μετάδοση δεδομένων και ενός για τη σηματοδότηση

αφύπνιση. Όταν ένας κόμβος θέλει να αποστείλει πακέτο χρησιμοποιεί ένα τόνο αφύπνισης, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα την αφύπνιση όλων των γειτονικών κόμβων. Ωστόσο, το πρωτόκολλο αυτό μεταθέτει το βάρος της ανίχνευσης τόνου από το δέκτη στον αποστολέα. Αυτό σημαίνει ότι η διάρκεια του τόνου αφύπνισης πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλη ώστε να ανιχνευθεί από τον κόμβο-στόχο, ο οποίος ενεργοποιεί τον πομποδέκτη αφύπνισης περιοδικά. Η λογική πίσω από αυτήν τη λύση είναι ότι ο κόμβος-εκκινήτης αποστέλλει μόνο ένα τόνο αφύπνισης όταν ανιχνευθεί συμβάν. Επιπλέον, η διαδικασία αφύπνισης ακολουθείται από την αποστολή δεδομένων, ώστε να μειωθεί η καθυστέρηση αντίδρασης.



Σχήμα 2.5: Γραμμική τοπολογία δικτύου για επεξήγηση λειτουργίας πρωτοκόλλου PTW

Στη γραμμική τοπολογία δικτύου που εικονίζεται στο Σχ. 2.5 ας υποθεθεί ότι ο κόμβος A θέλει να μεταδώσει μήνυμα προς τον κόμβο D διαμέσου των κόμβων B και C. Τη χρονική στιγμή t_0 ο A εκκινεί τη διαδικασία αποστέλλοντας τόνο στο κανάλι αφύπνισης. Ο τόνος αυτός αφυπνίζει όλους τους γειτονικούς κόμβους του A. Με αναφορά στο Σχ. 2.6, τη χρονική στιγμή t_1 ο A αποστέλλει ενημερωτικό μήνυμα προς τον κόμβο B, πληροφορώντας τον ότι το επόμενο πακέτο δεδομένων θα έχει αυτόν ως αποδέκτη. Λαμβάνοντας το μήνυμα αυτό, όλοι οι υπόλοιποι γείτονες του A αντιλαμβάνονται ότι το πακέτο δεδομένων δεν προορίζεται για αυτούς, οπότε απενεργοποιούν τον πομποδέκτη δεδομένων τους. Την ίδια στιγμή ο B απαντά με μήνυμα επιβεβαίωσης αφύπνισης στο κανάλι δεδομένων. Έπειτα ο A εκκινεί τη μετάδοση δεδομένων από το αντίστοιχο κανάλι. Ταυτόχρονα με τη λήψη δεδομένων, ο κόμβος B αποστέλλει τόνο αφύπνισης από το σχετικό κανάλι, και έτσι αφυπνίζει όλους τους γείτονές του, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.6. Η μετάδοση δεδομένων στο πρωτόκολλο PWT υπαγορεύεται από το πρωτόκολλο MAC που χρησιμοποιείται.



Σχήμα 2.6: Αλυσιδωτή διαδικασία αφύπνισης στο πρωτόκολλο PTW

Καθώς η ενεργειακή κατανάλωση του πομποδέκτη αφύπνισης δεν είναι αμελητέα, τόσο το STEM όσο και το PWT χρησιμοποιούν ένα ασύγχρονο σχήμα ανάπαυσης/αφύπνισης, ώστε οι κόμβοι να έχουν χαμηλό κύκλο λειτουργίας. Μια διαφορετική προσέγγιση είναι η χρήση ενός πομποδέκτη χαμηλής ισχύος ως πομποδέκτη αφύπνισης, ο οποίος βρίσκεται συνεχώς σε κατάσταση αναμονής και όταν λαμβάνει σήμα αφύπνισης αφυπνίζει τον πομποδέκτη δεδομένων. Το βασικό μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι ότι η εμβέλεια του πομποδέκτη χαμηλής ισχύος είναι σημαντικά μικρότερη από την εμβέλεια του πομποδέκτη δεδομένων. Αυτό περιορίζει την εφαρμογή της τεχνικής αυτής, αφού είναι ενδεχόμενο κάποιος κόμβος να μην μπορεί να αφυπνίσει ένα γειτονικό του κόμβο, καίτοι βρίσκεται εντός της εμβέλειας του πομποδέκτη δεδομένων.

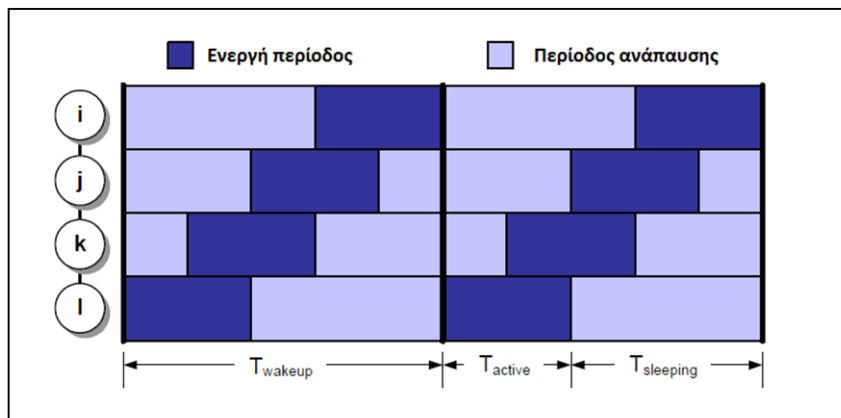
Σε κάθε περίπτωση, η χρήση δεύτερου πομποδέκτη έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση, που πιθανώς να μην είναι αμελητέα, ακόμα και με τη χρησιμοποίηση πομποδέκτη χαμηλής ισχύος. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων σχετικών με την πρόσθετη ενέργεια που καταναλώνεται από τον πομποδέκτη αφύπνισης, προτείνεται το σχήμα RTPM (Radio-Triggered Power Management). Το σχήμα αυτό προτείνει τη χρήση της ενέργειας που περιλαμβάνεται στα σήματα αφύπνισης για να πυροδοτήσει την ενεργοποίηση του πομποδέκτη αφύπνισης. Για την υλοποίηση της ιδέας αυτής χρησιμοποιείται κατάλληλο κύκλωμα πομποδέκτη. Το κύκλωμα αυτό δεν καταναλώνει ενέργεια από τον κόμβο, αλλά ενεργοποιείται από το ίδιο το σήμα αφύπνισης. Βασικό μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής ότι τα σήματα αφύπνισης πρέπει να φθάνουν στον πομποδέκτη του κόμβου-στόχου έχοντας σημαντική ποσότητα ενέργειας. Συνεπώς τα σήματα αφύπνισης δεν πρέπει να εξασθενούν διανύοντας μεγάλες αποστάσεις, οπότε υφίσταται περιορισμός της μέγιστης απόστασης στην οποία μπορεί να φτάσει το μήνυμα αφύπνισης. Με ένα σχετικά απλό κύκλωμα ως πομποδέκτη, η μέγιστη απόσταση αυτή φθάνει τα 3m. Η μέγιστη απόσταση μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας περισσότερο σύνθετα κυκλώματα, μέχρι περίπου τα 7.5m, με αντίστοιχη αύξηση της καθυστέρησης αφύπνισης, λόγω περιορισμών στα ηλεκτρονικά των κυκλωμάτων.

2.2.2.2 Πρωτόκολλα προγραμματισμένων συναντήσεων

Τα σχήματα προγραμματισμένων συναντήσεων απαιτούν όλοι οι γειτονικοί κόμβοι να αφυπνίζονται το ίδιο χρονικό διάστημα. Στα σχήματα αυτά, οι κόμβοι αφυπνίζονται περιοδικά και ελέγχουν αν υπάρχει αίτημα για επικοινωνία. Το βασικό πλεονέκτημα τέτοιων σχημάτων είναι ότι όταν ένας κόμβος είναι ενεργός, είναι βέβαιο ότι και όλοι οι γείτονές του θα είναι ενεργοί. Από την άλλη πλευρά, τα σχήματα προγραμματισμένων συναντήσεων απαιτούν οι κόμβοι να είναι συγχρονισμένοι προκειμένου να αφυπνίζονται την ίδια στιγμή. Η διαφορά των πρωτοκόλλων αυτής της κατηγορίας βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο οι κόμβοι μεταβαίνουν στις καταστάσεις ανάπαυσης και αφύπνισης. Ο απλούστερος τρόπος είναι χρησιμοποιώντας ένα πλήρως συγχρονισμένο πρότυπο (fully synchronized pattern). Στην περίπτωση αυτή, όλοι οι κόμβοι του δικτύου αφυπνίζονται περιοδικά ανά T_{wakeur} , την ίδια χρονική στιγμή και παραμένουν ενεργοποιημένοι για σταθερό χρονικό διάστημα T_{active} . Λόγω της απλότητάς του, το σχήμα αυτό χρησιμοποιείται σε πολλές πρακτικές υλοποιήσεις, όπως στο TinyDB και στο TASK. Επίσης χρησιμοποιείται και σε ορισμένα πρωτόκολλα MAC, όπως στο S-MAC και το T-MAC που περιγράφονται σε επόμενη ενότητα. Αν και απλό, το σχήμα αυτό επιτρέπει ένα μικρής διάρκειας κύκλο λειτουργίας, υπό την προϋπόθεση ότι ο χρόνος T_{active} είναι μικρότερος από το χρόνο T_{wakeur} . Επιπλέον, λόγω του σχετικά μεγάλου χρονικού εύρους των T_{active}, T_{wakeur} δεν απαιτείται ιδιαίτερα ακριβής συγχρονισμός. Το βασικό μειονέκτημα είναι ότι όλοι οι κόμβοι αφυπνίζονται την ίδια χρονική στιγμή μετά από μια μεγάλη περίοδο ανάπαυσης. Συνεπώς, πολλοί κόμβοι προσπαθούν να μεταδώσουν μηνύματα ταυτόχρονα, προκαλώντας μεγάλο αριθμό συγκρούσεων. Επίσης, το σχήμα αυτό δεν είναι ιδιαίτερα ευέλικτο, αφού οι χρόνοι T_{active}, T_{wakeur} είναι σταθεροί και δεν υπάρχει προσαρμογή σε πιθανές αλλαγές στο μοντέλο κίνησης ή και στην τοπολογία του δικτύου.

Το πλήρως συγχρονισμένο πρότυπο εφαρμόζεται εξίσου καλά τόσο σε επίπεδα όσο και σε δομημένα δίκτυα αισθητήρων. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι πολλά πρωτόκολλα δρομολόγησης σχηματίζουν ένα δένδρο συγκέντρωσης δεδομένων, που συνήθως έχει ως ρίζα του τον κόμβο-συλλέκτη. Κάποια σχήματα ανάπαυσης/αφύπνισης εκμεταλλεύονται αυτήν την εσωτερική οργάνωση του δικτύου αποδίδοντας διαφορετικές τιμές στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο κάθε κόμβος είναι ενεργός, λαμβάνοντας υπόψη τη θέση του στο δένδρο δρομολόγησης. Οι τιμές της παραμέτρου T_{active} κάθε κόμβου μπορεί να μεταβάλλονται σε βάθος χρόνου λόγω πιθανών αστοχιών των κόμβων, αλλαγών τοπολογίας ή και για λόγους εξισορρόπησης φορτίου μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Ωστόσο, υποθέτοντας ότι οι κόμβοι είναι στατικοί, το δένδρο συγκέντρωσης δεδομένων παραμένει σταθερό για εύλογο χρονικό διάστημα.

Στο πρότυπο κλιμακωτής αφύπνισης που φαίνεται στο Σχ. 2.7, οι κόμβοι που βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα του δένδρου συνάθροισης δεδομένων αφυπνίζονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Τα χρονικά διαστήματα στα οποία κόμβοι διαδοχικών επιπέδων είναι ενεργοποιημένοι πρέπει να επικαλύπτονται μερικώς για να υπάρχει δυνατότητα επικοινωνίας.



Σχήμα 2.7: Κλιμακωτό σχήμα αφύπνισης κόμβων. Ο κόμβος l βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο από τον κόμβο k . Ο κόμβος k βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο από τον κόμβο j κ.ο.κ

Το πρότυπο που παρουσιάστηκε αποκαλείται και προς τα πίσω κλιμακωτό πρότυπο [14] αφού βελτιστοποιεί την καθυστέρηση πακέτου από τα φύλλα προς τη ρίζα του δένδρου συγκέντρωσης δεδομένων που συνήθως είναι ο κόμβος-συλλέκτης. Στη βιβλιογραφία υπάρχει και το αντίστροφο σχήμα, το οποίο όμως δεν χρησιμοποιείται στην πράξη, καθώς το σύνθημα είναι η πληροφορία να ρέει από τους κόμβους-αισθητήρες προς τον κόμβο-συλλέκτη. Το πρότυπο κλιμακωτής αφύπνισης εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με το πλήρως συγχρονισμένο πρότυπο. Συγκεκριμένα, καθώς κόμβοι που ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα του δένδρου συνάθροισης δεδομένων αφυπνίζονται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, μόνο ένα μικρό υποσύνολο των κόμβων του δικτύου θα είναι ενεργοποιημένο σε δεδομένη χρονική στιγμή. Επομένως, ο αριθμός των συγκρούσεων αναμένεται μικρότερος, αφού προκύπτει μικρότερος ανταγωνισμός για πρόσβαση στο κανάλι. Για τον ίδιο λόγο, και η περίοδος όπου ο κόμβος παραμένει ενεργός μπορεί να είναι συντομότερη, οδηγώντας σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Επίσης, το σχήμα κλιμακωτής αφύπνισης είναι κατάλληλο για συνάθροιση δεδομένων, αφού οι κόμβοι λαμβάνουν δεδομένα από τους κόμβους-παιδιά τους και μπορούν να εφαρμόσουν τεχνικές συνάθροισης πριν τα αποστείλουν στο επόμενο επίπεδο του δένδρου συγκέντρωσης.

Από την άλλη πλευρά, το σχήμα κλιμακωτής αφύπνισης εμφανίζει και μειονεκτήματα. Αφού οι κόμβοι που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο του δένδρου συγκέντρωσης αφυπνίζονται την ίδια στιγμή, συγκρούσεις θα συνεχίσουν να υφίστανται. Επίσης, το σχήμα αυτό έχει περιορισμένη ευελιξία, καθώς τα χρονικά διαστήματα T_{active} , T_{wakeup} έχουν σταθερή διάρκεια για όλους τους κόμβους του δικτύου. Ιδανικά, η περίοδος όπου οι κόμβοι είναι ενεργοποιημένοι πρέπει να είναι όσο μικρότερη γίνεται, όχι μόνο για εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και προς επίτευξη της ελάχιστης καθυστέρησης πακέτων μέχρι να φθάσουν στον κόμβο-συλλέκτη. Επιπλέον, οι κόμβοι που βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα του δένδρου συνάθροισης διαχειρίζονται διαφορετικές ποσότητες δεδομένων. Συνεπώς, το χρονικό διάστημα, T_{active} , όπου κάθε κόμβος είναι ενεργός, πρέπει να υπολογίζεται ατομικά για κάθε κόμβο. Εξάλλου, ακόμα και σε δίκτυα με στατικούς κόμβους είναι πιθανό να συμβούν αλλαγές στην τοπολογία. Προς τούτο, ο

χρόνος της ενεργού περιόδου κάθε κόμβου πρέπει να προσαρμόζεται δυναμικά σε αυτές τις αλλαγές.

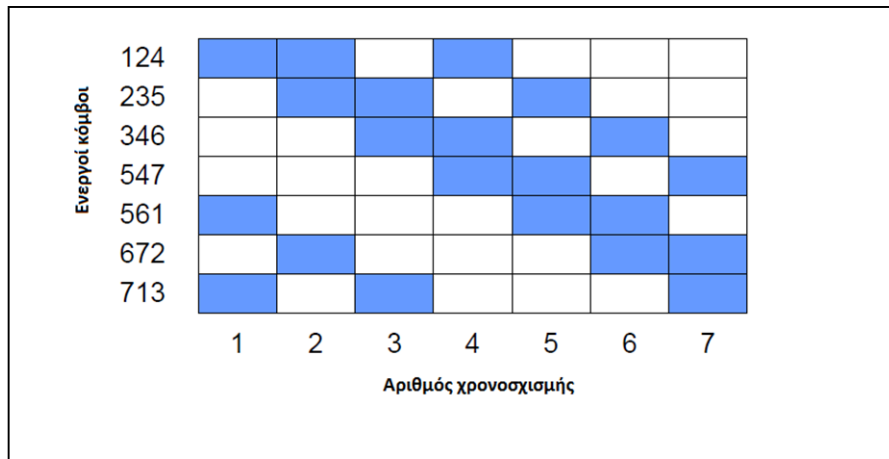
Μια διαφορετική προσέγγιση επιχειρείται με το πρωτόκολλο FPS (Flexible Power Scheduling) [15], όπου ο χρόνος διαιρείται σε χρονοσχιμές με διάρκεια T_s . Οι χρονοσχιμές σχηματίζουν έναν περιοδικό κύκλο, ο οποίος αποτελείται από m χρονοσχιμές και έχει διάρκεια T_c ίση με:

$$T_c = m * T_s \quad (2.3)$$

Κάθε κόμβος διατηρεί ένα πρόγραμμα με τις ενέργειες που πραγματοποιεί κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου. Τα σχήματα που λειτουργούν με χρονοσχιμές αντιμετωπίζουν δύο βασικά προβλήματα: δεν είναι ευέλικτα και απαιτούν αυστηρό συγχρονισμό μεταξύ των κόμβων. Για την αντιμετώπιση της έλλειψης ευελιξίας, το πρωτόκολλο FPS περιλαμβάνει ένα μηχανισμό κράτησης χρονοσχιμών κατά παραγγελία, επιτρέποντας στους κόμβους να κάνουν κρατήσεις χρονοσχιμών πριν τις χρησιμοποιήσουν. Όσον αφορά το συγχρονισμό, οι χρονοσχιμές έχουν σχετικά μεγάλη διάρκεια έτσι ώστε να μην απαιτείται αυστηρός συγχρονισμός.

2.2.2.3 Πρωτοκόλλα ασύγχρονων συναντήσεων

Τα σχήματα ασύγχρονων συναντήσεων επιτρέπουν σε κάθε κόμβο να αφυπνίζεται ανεξάρτητα από τους άλλους, αλλά εγγυάται ότι γειτονικοί κόμβοι θα έχουν πάντα αλληλεπικαλυπτόμενα ενεργά χρονικά διαστήματα εντός ενός προσδιορισμένου αριθμού κύκλων. Μια συστηματική προσέγγιση για το σχεδιασμό ασύγχρονων μηχανισμών αφύπνισης προέρχεται από την αντιμετώπιση του ζητήματος ως ένα πρόβλημα συνδυαστικής σχεδίασης [16]. Με βάση τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη θεωρητική επίλυση του προβλήματος, σχεδιάζεται το πρωτόκολλο AWP (Asynchronous Wakeup Protocol) [17]. Το πρωτόκολλο αυτό μπορεί να ανιχνεύσει γειτονικούς κόμβους σε πεπερασμένο χρονικό διάστημα χωρίς να υπάρχει ευθυγράμμιση των χρονοσχιμών των κόμβων. Επίσης, είναι ανθεκτικό στις συγκρούσεις πακέτων και σε πιθανές διαφοροποιήσεις στην τοπολογία του δικτύου. Η βασική ιδέα είναι ότι κάθε κόμβος σχετίζεται με μια συνάρτηση προγραμματισμού αφύπνισης, η οποία χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει ένα πρόγραμμα αφύπνισης. Για να επικοινωνήσουν δύο γειτονικοί κόμβοι πρέπει να έχουν επικάλυψη στο πρόγραμμα αφύπνισης τους, ανεξάρτητα από τη διαφορά που υπάρχει στα ρολόγια τους. Η ιδέα αυτή απεικονίζεται ενδεικτικά στο Σχ.2.8 μέσω ενός παραδείγματος ενός ασύγχρονου προγράμματος αφύπνισης για ένα σύνολο επτά γειτονικών κόμβων.



Σχήμα 2.8: Παράδειγμα ασύγχρονου προγράμματος συναντήσεων βασισμένο σε συμμετρική $(7,3,1)$ σχεδίαση της συνάρτησης προγραμματισμού αφύπνισης

Το παράδειγμα αυτό βασίζεται σε μια συμμετρική $(7,3,1)$ σχεδίαση της συνάρτησης προγραμματισμού αφύπνισης. Η σχεδίαση χαρακτηρίζεται ως συμμετρική γιατί όλοι οι κόμβοι έχουν τον ίδιο κύκλο λειτουργίας. Η τριάδα $(7,3,1)$ σημαίνει ότι το πρόγραμμα επαναλαμβάνεται κάθε επτά χρονοσχιμές, ότι κάθε πρόγραμμα είναι ενεργές τρεις χρονοσχιμές και ότι οποιοδήποτε δύο κόμβοι έχουν αλληλεπικαλυπτόμενο πρόγραμμα για μια χρονοσχιμή το πολύ. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει με οποιονδήποτε άλλο γειτονικό του κόμβο σε πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, η καθυστέρηση που εισάγεται μπορεί να είναι μεγάλη, ιδιαίτερα σε μεγάλα δίκτυα.

Το πρωτόκολλο RAW (Random Asynchronous Wakeup) [18] ακολουθεί διαφορετική προσέγγιση καθώς βασίζεται στο ότι τα δίκτυα αισθητήρων συνήθως χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα κόμβων. Αυτό επιτρέπει την ύπαρξη αρκετών διαδρομών μεταξύ κάποιου κόμβου-πηγής και του κόμβου-συλλέκτη. Συνεπώς, ένα πακέτο μπορεί να προωθηθεί σε οποιαδήποτε από αυτές τις διαδρομές. Το πρωτόκολλο RAW αποτελείται από ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης σε συνδυασμό με ένα σχήμα τυχαίας αφύπνισης. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης αποτελεί παραλλαγή της γεωγραφικής δρομολόγησης. Ενώ κατά τη γεωγραφική δρομολόγηση ένα πακέτο αποστέλλεται προς ένα γειτονικό κόμβο που βρίσκεται πλησιέστερα στον προορισμό του, σύμφωνα με το πρωτόκολλο RAW, το πακέτο αποστέλλεται προς οποιονδήποτε ενεργό γειτονικό κόμβο ανήκει στο σύνολο υποψήφιων κόμβων προώθησης. Το σύνολο αυτό περιλαμβάνει όλους τους ενεργούς γείτονες που ικανοποιούν κάποιο προκαθορισμένο κριτήριο. Η βασική ιδέα του σχήματος τυχαίας αφύπνισης είναι ότι κάθε κόμβος αφυπνίζεται τυχαία μια φορά εντός ενός καθορισμένου χρονικού διαστήματος, έστω T , και παραμένει ενεργός για χρόνο T_α , με $T_\alpha < T$. Στη συνέχεια, επιστρέφει στην κατάσταση ανάπαυσης. Μόλις ένας κόμβος αφυπνιστεί, αναζητεί ενεργούς γειτονικούς κόμβους, εκτελώντας μια σχετική διαδικασία ανακάλυψης γειτόνων. Έστω ότι ένας κόμβος S έχει να μεταδώσει πακέτο προς έναν κόμβο D και ότι το σύνολο υποψήφιων κόμβων προώθησης αποτελείται από m κόμβους. Στην περίπτωση αυτή, η πιθανότητα ένας τουλάχιστον κόμβος να είναι ενεργός ταυτόχρονα με τον κόμβο S είναι ίση με:

$$P = 1 - \left(1 - \frac{2 \cdot T_a}{T}\right)^m \quad (2.4)$$

Όταν το δίκτυο είναι πυκνό, το πλήθος των κόμβων, m , στο σύνολο υποψήφιων κόμβων προώθησης είναι μεγάλο, οπότε λόγω της (2.4) θα είναι μεγάλη και η πιθανότητα P .

Το σχήμα τυχαίας αφύπνισης είναι αρκετά απλό και βασίζεται μόνο σε τοπικές αποφάσεις, χαρακτηριστικό που το καθιστά κατάλληλο για δίκτυα με συχνές αλλαγές τοπολογίας. Από την άλλη πλευρά, δεν είναι κατάλληλο για αραιά δίκτυα. Με το πρωτόκολλο RAW δεν είναι εγγυημένο ότι ένας κόμβος θα ανιχνεύσει κάποιο γείτονα του ενεργό. Επομένως, δεν εξασφαλίζει ότι το πακέτο θα προωθηθεί μέσα σε ένα χρονικό πλαίσιο T , κάτι που συμβαίνει στο πρωτόκολλο AWP.

2.2.2.4 Σύνοψη

Ο τρόπος λειτουργίας του WSN δικτύου που βασίζεται στα πρωτόκολλα συναντήσεων κατά παραγγελία είναι η ιδανικός, διότι μεγιστοποιεί την εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς οι κόμβοι παραμένουν ενεργοί μόνο για τον ελάχιστο χρόνο που απαιτείται για την επικοινωνία. Επιπλέον, υπάρχει μικρή επίπτωση στην καθυστέρηση, γιατί ο κόμβος-παραλήπτης αφυπνίζεται μόλις διαπιστώσει ότι υπάρχει μήνυμα που εκκρεμεί. Η εισαγωγή ενός πομποδέκτη αφύπνισης αποτελεί καλή λύση και προσιδιάζει ιδιαίτερα στις εφαρμογές ανίχνευσης γεγονότων. Ωστόσο, η χρήση δεύτερου πομποδέκτη είναι δαπανηρή ενώ και οι συνήθεις κόμβοι δεν είναι εξοπλισμένοι κατάλληλα. Επομένως, όταν δεν είναι διαθέσιμος δεύτερος πομποδέκτης, μπορούν να χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα προγραμματισμένων συναντήσεων και τα πρωτόκολλα ασύγχρονων συναντήσεων. Τα πρωτόκολλα προγραμματισμένων συναντήσεων είναι εύχρηστα, καθώς μπορούν να τροποποιηθούν εύκολα ώστε να πραγματοποιούν συνάντηση δεδομένων. Έχουν, όμως, το βασικό μειονέκτημα ότι απαιτούν αυστηρό συγχρονισμό μεταξύ των κόμβων, κάτι που δεν ισχύει για τα πρωτόκολλα ασύγχρονων συναντήσεων. Τα τελευταία είναι επίσης απλά στην υλοποίηση και μπορούν να εξασφαλίσουν συνδεσιμότητα στο δίκτυο, ακόμα και όταν υπάρχουν δυναμικές αλλαγές στην τοπολογία του. Η μεγάλη ευελιξία τους περιορίζεται από τη σχετικά μικρή ενεργειακή αποδοτικότητα, καθώς, συνήθως, έχουν ως αποτέλεσμα οι κόμβοι του δικτύου να λειτουργούν με μεγαλύτερο κύκλο λειτουργίας σε σχέση με τον κύκλο λειτουργίας των κόμβων στα πρωτόκολλα προγραμματισμένων συναντήσεων.

2.2.3 Πρωτόκολλα MAC με χαμηλό κύκλο λειτουργίας

Πολλά πρωτόκολλα MAC έχουν προταθεί για τα WSN και η σχετική βιβλιογραφία είναι ιδιαίτερα πλούσια. Ωστόσο, η παρουσίαση που γίνεται στη συνέχεια αφορά τα σημαντικότερα από αυτά, εστιάζοντας σε ζητήματα ισχύος και όχι στον τρόπο πρόσβασης στο κοινό μέσο. Τα πρωτόκολλα που εξετάζονται μπορούν να ενταχθούν σε τρεις κατηγορίες: τα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA), τα σχήματα ανταγωνισμού και τα υβριδικά σχήματα. Τα σχήματα TDMA επιτρέπουν στους κόμβους να λειτουργούν με κύκλο λειτουργίας μικρής διάρκειας, γιατί η πρόσβαση στο μέσο γίνεται χρησιμοποιώντας χρονοσχιμές. Καθώς οι κόμβοι ενεργοποιούν τον πομποδέκτη τους μόνο κατά τη διάρκεια των δικών τους χρονοσχιμών, η ενεργειακή κατανάλωση μειώνεται ιδανικά

στο ελάχιστο που απαιτείται για μετάδοση και λήψη δεδομένων. Τα σχήματα ανταγωνισμού είναι τα πλέον δημοφιλή πρωτόκολλα MAC για WSN. Επιτυγχάνουν κύκλο λειτουργίας μικρής διάρκειας συνδυάζοντας τις λειτουργίες πρόσβασης στο μέσο με κάποιο πρωτόκολλο ανάπαυσης/αφύπνισης, όπως αυτά που περιγράφηκαν στην ενότητα 2.2.2.2. Η μόνη διαφορά είναι ότι, στην προκειμένη περίπτωση ο αλγόριθμος ανάπαυσης/αφύπνισης των κόμβων δεν είναι ανεξάρτητος από το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο MAC αλλά στενά συνδεδεμένος μαζί του. Τα υβριδικά πρωτόκολλα προσαρμόζουν τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου στο επίπεδο της συμφόρησης του δικτύου. Συμπεριφέρονται ως πρωτόκολλα ανταγωνισμού, όταν το επίπεδο συμφόρησης είναι χαμηλό, και ως πρωτόκολλα TDMA, όταν το επίπεδο συμφόρησης είναι υψηλό.

2.2.3.1 Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου

Στα πρωτόκολλα TDMA, ο χρόνος χωρίζεται σε περιοδικά πλαίσια όπου κάθε πλαίσιο αποτελείται από συγκεκριμένο αριθμό χρονοσχισμών. Κάθε κόμβος αντιστοιχείται με μια ή περισσότερες χρονοσχισμές ανά πλαίσιο, σύμφωνα με κάποιον αλγόριθμο προγραμματισμού και χρησιμοποιεί τις χρονοσχισμές για να επικοινωνεί με τους άλλους κόμβους. Ένα από τα σημαντικότερα και ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα TDMA είναι το TRAMA [19], που διαιρεί το χρόνο σε δύο περιόδους, μια περίοδο τυχαίας πρόσβασης και μια περίοδο προγραμματισμένης πρόσβασης. Η περίοδος τυχαίας πρόσβασης είναι αφιερωμένη στην κράτηση χρονοσχισμών, ενώ η πρόσβαση στο μέσο κατά τη διάρκειά της γίνεται χρησιμοποιώντας κάποιο σχήμα ανταγωνισμού. Αντίθετα, η περίοδος προγραμματισμένης πρόσβασης περιλαμβάνει ένα πλήθος χρονοσχισμών, εκάστη των οποίων αντιστοιχείται σε συγκεκριμένο κόμβο.

Ο αλγόριθμος κράτησης χρονοσχισμών είναι ο εξής. Αρχικά οι κόμβοι αποκτούν πληροφορίες για τους γειτονικούς τους κόμβους που βρίσκονται έως και δύο βήματα μακριά τους, κάτι που είναι απαραίτητο για την αποφυγή συγκρούσεων. Έπειτα, οι κόμβοι εκκινούν μια διαδικασία εκλογής για να συσχετιστεί κάθε χρονοσχισμή σε μοναδικό κόμβο. Κάθε κόμβος έχει προτεραιότητα για να γίνει ο κάτοχος συγκεκριμένης χρονοσχισμής. Η προτεραιότητα αυτή καθορίζεται ως μια συνάρτηση κατακερματισμού του αναγνωριστικού που έχει ο κόμβος και του αριθμού της χρονοσχισμής. Ο κόμβος με την υψηλότερη προτεραιότητα γίνεται κάτοχος της αντίστοιχης χρονοσχισμής. Στο τελευταίο στάδιο, οι κόμβοι αποστέλλουν ένα πακέτο συγχρονισμού, στο οποίο περιέχεται κατάλογος των γειτονικών κόμβων που προορίζονται για επακόλουθη μετάδοση. Κατά συνέπεια, οι κόμβοι συμφωνούν σε ποιες χρονοσχισμές πρέπει να είναι αφυπνισμένοι για να επικοινωνήσουν. Μη χρησιμοποιούμενες χρονοσχισμές μπορούν να διαφημιστούν από τους κατόχους τους ώστε να επαναχρησιμοποιηθούν από άλλους κόμβους.

Το FLAMA (Flow – Aware Medium Access) [20] είναι ένα πρωτόκολλο TDMA που βελτιστοποιεί το TRAMA για εφαρμογές περιοδικής παρακολούθησης. Η βασική του ιδέα είναι η αποφυγή των επικεφαλίδων που σχετίζονται με τη δρομολόγηση των δεδομένων. Καθώς οι ροές μηνυμάτων σε εφαρμογές περιοδικής αναφοράς δεδομένων είναι συνήθως σταθερές, το FLAMA αρχικά εγκαθιστά τις ροές και στη συνέχεια χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό άντλησης, ώστε τα δεδομένα να μεταφέρονται μόνο αφού ζητηθούν ρητά.

Καθώς οι βασικοί αλγόριθμοι κράτησης χρονοσχισμών είναι συνήθως αρκετά σύνθετοι και όχι πολύ ευέλικτοι, έχουν προταθεί απλούστερα σχήματα που αποσκοπούν στην επίτευξη ενεργειακής αποδοτικότητας. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το πρωτόκολλο LMAC. Βασικός του στόχος είναι να μειώσει τις μεταβάσεις καταστάσεων του πομποδέκτη και τις επικεφαλίδες πρωτοκόλλου. Προς τούτο, η λήψη των δεδομένων δεν επιβεβαιώνεται και η ανάθεση χρονοσχισμών βασίζεται σε μια δυαδική μάσκα κατελιημένων χρονοσχισμών και ενός τυχαίου αλγορίθμου επιλογής ελεύθερων χρονοσχισμών. Το βασικό μειονέκτημα του LMAC είναι το σταθερό μήκος του πλαισίου, το οποίο πρέπει να προσδιορίζεται κατά την αρχική ανάπτυξη του δικτύου και δεν μπορεί να μεταβληθεί. Για το λόγο αυτό, προτείνεται το πρωτόκολλο AI-LMAC (Adaptive Information-centric Lightweight MAC) προκειμένου η ανάθεση χρονοσχισμών να πλησιάζει περισσότερο τις πραγματικές ανάγκες των κόμβων.

2.2.3.2 Πρωτόκολλα πρόσβασης ανταγωνισμού

Τα περισσότερα πρωτόκολλα MAC που προτείνονται για WSN εντάσσονται σε αυτήν την κατηγορία. Ένα από τα πλέον δημοφιλή πρωτόκολλα ανταγωνισμού είναι το B-MAC (Berkeley MAC) [21]. Το πρωτόκολλο αυτό χαρακτηρίζεται από χαμηλή πολυπλοκότητα και χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Στόχος του είναι να παρέχει κάποιες πολύ βασικές λειτουργίες και ένα ενεργειακά αποδοτικό μηχανισμό πρόσβασης. Το B-MAC παρέχει βασικά χαρακτηριστικά πρόσβασης στο κανάλι: ένα σχήμα υπαναχώρησης, έναν ακριβή τρόπο εκτίμησης της κατάστασης καναλιού και προαιρετικές επιβεβαιώσεις. Για την επίτευξη κύκλου λειτουργίας μικρής διάρκειας, το B-MAC χρησιμοποιεί ένα ασύγχρονο σχήμα ανάπαυσης/αφύπνισης που βασίζεται στην περιοδική ακρόαση καναλιού, το οποίο ονομάζεται LPL (Low Power Listening). Οι κόμβοι περιοδικά αφυπνίζονται και ελέγχουν αν υπάρχει δραστηριότητα στο κανάλι. Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών αφυπνίσεων ονομάζεται διάστημα ελέγχου και εξαρτάται από την εφαρμογή. Μετά την αφύπνισή τους, οι κόμβοι παραμένουν ενεργοί επί σταθερό χρονικό διάστημα προκειμένου να ανιχνεύσουν πιθανές μεταδόσεις σε εξέλιξη. Τα πακέτα του πρωτοκόλλου B-MAC αποτελούνται από το προοίμιο και το ωφέλιμο φορτίο. Η διάρκεια του προοιμίου είναι τουλάχιστον ίση με το διάστημα ελέγχου, ώστε κάθε κόμβος να μπορεί να ανιχνεύσει μια μετάδοση σε εξέλιξη. Αυτή η προσέγγιση δεν απαιτεί οι κόμβοι να είναι συγχρονισμένοι. Ουσιαστικά, όταν ένας κόμβος ανιχνεύει δραστηριότητα καναλιού, απλά παραμένει ενεργός και λαμβάνει το μήνυμα.

Ένα πολύ γνωστό πρωτόκολλο MAC για δίκτυα αισθητήρων είναι το S-MAC [22]. Το πρωτόκολλο αυτό υιοθετεί ένα σχήμα προγραμματισμένων συναντήσεων. Οι κόμβοι ανταλλάσσουν μηνύματα συγχρονισμού για να συντονίσουν τις περιόδους ανάπαυσης/αφύπνισης τους. Χρησιμοποιώντας ένα αλγόριθμο τυχαίας κατανομής, κάθε κόμβος μπορεί να ακολουθεί είτε το δικό του πρόγραμμα είτε το πρόγραμμα κάποιου γείτονά του. Οι κόμβοι που ακολουθούν το ίδιο πρόγραμμα σχηματίζουν ένα εικονικό σύμπλεγμα. Ένας κόμβος μπορεί να ακολουθεί και το δικό του πρόγραμμα και το πρόγραμμα κάποιου γείτονά του, εφόσον αυτά δεν επικαλύπτονται, ώστε να γεφυρώνει την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών εικονικών συμπλεγμάτων. Ο χρόνος πρόσβασης στο κανάλι χωρίζεται σε δύο περιόδους. Στην περίοδο ακρόασης, οι κόμβοι ανταλλάσσουν πακέτα συγχρονισμού και ειδικά πακέτα ελέγχου για την αποφυγή συγκρούσεων (κατά τρόπο παρόμοιο με το πρωτόκολλο IEEE 802.11). Στον υπόλοιπο

χρόνο, γίνεται η ανταλλαγή δεδομένων. Οι κόμβοι που δεν συμμετέχουν σε κάποια επικοινωνία μπορούν να μεταβούν στην κατάσταση ανάπαυσης μέχρι την επόμενη περίοδο ακρόασης. Προς αποφυγή μεγάλων καθυστερήσεων, το S-MAC χρησιμοποιεί ένα σχήμα προσαρμοστικής ακρόασης. Ένας κόμβος, έστω i , που ακροάται τυχαία τις λήψεις κάποιου γείτονά του, έστω j , αφυπνίζεται στο τέλος της μετάδοσης επί μικρό χρονικό διάστημα. Αν ο κόμβος i είναι ο επόμενος παραλήπτης του μηνύματος, τότε ο κόμβος j , που μόλις έλαβε το μήνυμα, το προωθεί αμέσως στον κόμβο i , χωρίς να αναμένει την επόμενη συνάντηση. Οι παράμετροι του πρωτοκόλλου, δηλαδή η περίοδος ακρόασης και η ενεργή περίοδος είναι σταθερές και δεν μπορούν να μεταβληθούν. Για το λόγο αυτό, προτείνεται μια βελτιωμένη έκδοση του πρωτοκόλλου S-MAC, το T-MAC [23] που έχει σχεδιαστεί ειδικά για μεταβλητά φορτία κίνησης.

Καίτοι τα πρωτόκολλα MAC που χρησιμοποιούν κύκλο λειτουργίας είναι ενεργειακά αποδοτικά, αντιμετωπίζουν καθυστέρηση ανάπαυσης, δηλαδή ένας κόμβος πρέπει να περιμένει μέχρι ο παραλήπτης να αφυπνιστεί ώστε να του στείλει πακέτο. Η καθυστέρηση αυτή αυξάνεται καθώς μεγαλώνει και ο αριθμός των βημάτων που πρέπει να διασχίσει το πακέτο. Για το λόγο αυτό, στα πρωτόκολλα S-MAC και T-MAC η διαδικασία προώθησης δεδομένων περιορίζεται συνήθως σε λίγα βήματα. Το πρωτόκολλο D-MAC [24] είναι ένα προσαρμοστικό πρωτόκολλο κύκλου λειτουργίας, βελτιστοποιημένο για συγκέντρωση δεδομένων σε δίκτυα αισθητήρων που έχει εγκατασταθεί μια δενδρική οργάνωση στο στρώμα δικτύου. Συγκεκριμένα, στο D-MAC τα προγράμματα των κόμβων είναι κλιμακούμενα, σύμφωνα με τη θέση τους στο δένδρο συγκέντρωσης. Οι ενεργοί περίοδοι των γειτονικών κόμβων της ίδιας διαδρομής είναι διαδοχικές, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση. Κάθε κόμβος έχει μια χρονοσχισμή επαρκώς μεγάλη για την αποστολή ενός πακέτου. Όταν κάποιος κόμβος έχει περισσότερα πακέτα προς αποστολή, πρέπει να ζητήσει πρόσθετες χρονοσχισμές από τον κόμβο-πατέρα του. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το μήκος των ενεργών περιόδων μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά στην κίνηση του δικτύου.

2.2.3.3 Υβριδικά πρωτόκολλα πρόσβασης

Η βασική ιδέα των υβριδικών πρωτοκόλλων MAC είναι η εναλλαγή της συμπεριφοράς του πρωτοκόλλου μεταξύ πρωτοκόλλου TDMA και CSMA αντίστοιχα προς το επίπεδο συμφόρησης του δικτύου. Η ιδέα αυτή δεν είναι καινούργια, καθώς στα δίκτυα WLAN έχει προταθεί το πρωτόκολλο PTDMA [25]. Στο πρωτόκολλο αυτό, ο χρόνος διαιρείται σε χρονοσχισμές και οι κόμβοι χωρίζονται σε κάτοχους και μη κατόχους. Το πρωτόκολλο προσαρμόζει την πιθανότητα πρόσβασης των κατόχων και των μη κατόχων ανάλογα με το πλήθος των αποστολέων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το πρωτόκολλο λειτουργεί είτε ως TDMA είτε ως CSMA ανάλογα με το επίπεδο ανταγωνισμού στο δίκτυο. Ωστόσο, καθώς το πρωτόκολλο PTDMA αφορά σενάρια δικτύων επικοινωνίας ενός βήματος (single hop), δεν λαμβάνει υπόψη του ζητήματα όπως οι αλλαγές τοπολογίας, σφάλματα συγχρονισμού και ανωμαλίες παρεμβολών που είναι πολύ συχνά στα WSNs.

Το πλέον ενδιαφέρον υβριδικό MAC πρωτόκολλο για WSN είναι το Z-MAC [26]. Για να ορίσει το κύριο σχήμα ελέγχου μετάδοσης, το πρωτόκολλο Z-MAC εκκινεί μια προκαταρκτική φάση. Χρησιμοποιώντας μια διαδικασία εύρεσης γειτόνων, τελικά κάθε κόμβος διαμορφώνει κατάλογο που περιέχει όλους του γειτονικούς του κόμβους

που βρίσκονται έως και δύο βήματα μακριά του. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται κατανεμημένος αλγόριθμος ανάθεσης χρονοσχισμών για να εξασφαλίσει ότι οποιοδήποτε ζεύγος κόμβων που απέχουν μέχρι και δύο βήματα δεν θα έχουν την ίδια χρονοσχισμή, και συνεπώς δεν θα υπάρχουν συγκρούσεις. Το Z-MAC δεν χρησιμοποιεί κοινό πλαίσιο για όλους τους κόμβους του δικτύου, γιατί τότε θα ήταν πολύ δύσκολο να προσαρμοστεί σε πιθανές αλλαγές της τοπολογίας. Αντίθετα, κάθε κόμβος έχει το δικό του τοπικό χρονικό πλαίσιο που εξαρτάται από το πλήθος των γειτονικών του κόμβων. Η τοπική ανάθεση χρονοσχισμών και το τοπικό χρονικό πλαίσιο κάθε κόμβου προωθούνται και στους γείτονες που απέχουν δύο βήματα από αυτόν. Επομένως, κάθε κόμβος έχει πληροφορίες για τις χρονοσχισμές και για τα χρονικά πλαίσια, οπότε όλοι οι κόμβοι συγχρονίζονται σε κοινή χρονοσχισμή αναφοράς. Στο σημείο αυτό τελειώνει η προκαταρκτική φάση και αρχίζει η πρόσβαση στο κανάλι. Οι κόμβοι μπορούν να βρίσκονται σε μία από τις δύο καταστάσεις: το επίπεδο χαμηλού ανταγωνισμού (Low Contention Level – LCL) ή το επίπεδο υψηλού ανταγωνισμού (High Contention Level – HCL). Κάθε κόμβος, εφόσον δε λάβει σχετικό μήνυμα ECN, βρίσκεται στο επίπεδο χαμηλού ανταγωνισμού. Τα μηνύματα ECN αποστέλλονται από κόμβους που αντιμετωπίζουν υψηλό ανταγωνισμό. Στο επίπεδο υψηλού ανταγωνισμού, μόνο οι κάτοχοι της τρέχουσας χρονοσχισμής και οι γειτονικοί τους κόμβοι επιτρέπεται να ανταγωνιστούν για την πρόσβαση στο κανάλι. Στο επίπεδο χαμηλού ανταγωνισμού όλοι οι κόμβοι (κάτοχοι και μη κάτοχοι) επιτρέπεται να ανταγωνιστούν για μετάδοση σε οποιαδήποτε χρονοσχισμή. Ωστόσο, οι κόμβοι-κάτοχοι έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα. Έτσι, το πρωτόκολλο Z-MAC επιτυγχάνει υψηλή χρησιμοποίηση του καναλιού.

2.2.3.4 Σύνοψη

Τα πρωτόκολλα TDMA είναι εγγενώς ενεργειακά αποδοτικά, αφού οι κόμβοι ενεργοποιούν τον πομποδέκτη τους μόνο κατά τη διάρκεια της δική τους χρονοσχισμής, ενώ τον υπόλοιπο χρόνο είναι απενεργοποιημένοι. Με κατάλληλο σχεδιασμό του αλγορίθμου ανάθεσης χρονοσχισμών είναι δυνατή η ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Επιπλέον, τα πρωτόκολλα TDMA μπορούν να επιλύσουν προβλήματα παρεμβολών μεταξύ κόμβων, καθώς είναι δυνατό να προγραμματιστούν οι μεταδόσεις γειτονικών κόμβων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Ωστόσο, στην πράξη εμφανίζουν και αρκετά μειονεκτήματα που μειώνουν την εξοικονόμηση ενέργειας που προσφέρουν. Αρχικά, έχουν περιορισμένη ευελιξία και κλιμακωσιμότητα, διότι σε ένα πραγματικό δίκτυο αισθητήρων μπορεί να συμβαίνουν συχνές αλλαγές τοπολογίας λόγω διάφορων παραγόντων (συνθήκες μετάδοσης, αστοχίες κόμβων) και η δέσμευση χρονοσχισμών να καταστεί πολύ δύσκολη. Επίσης, απαιτούν αυστηρό συγχρονισμό και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις παρεμβολές. Τέλος, τα πρωτόκολλα TDMA έχουν χειρότερη επίδοση από τα πρωτόκολλα ανταγωνισμού σε συνθήκες χαμηλής κίνησης φορτίου.

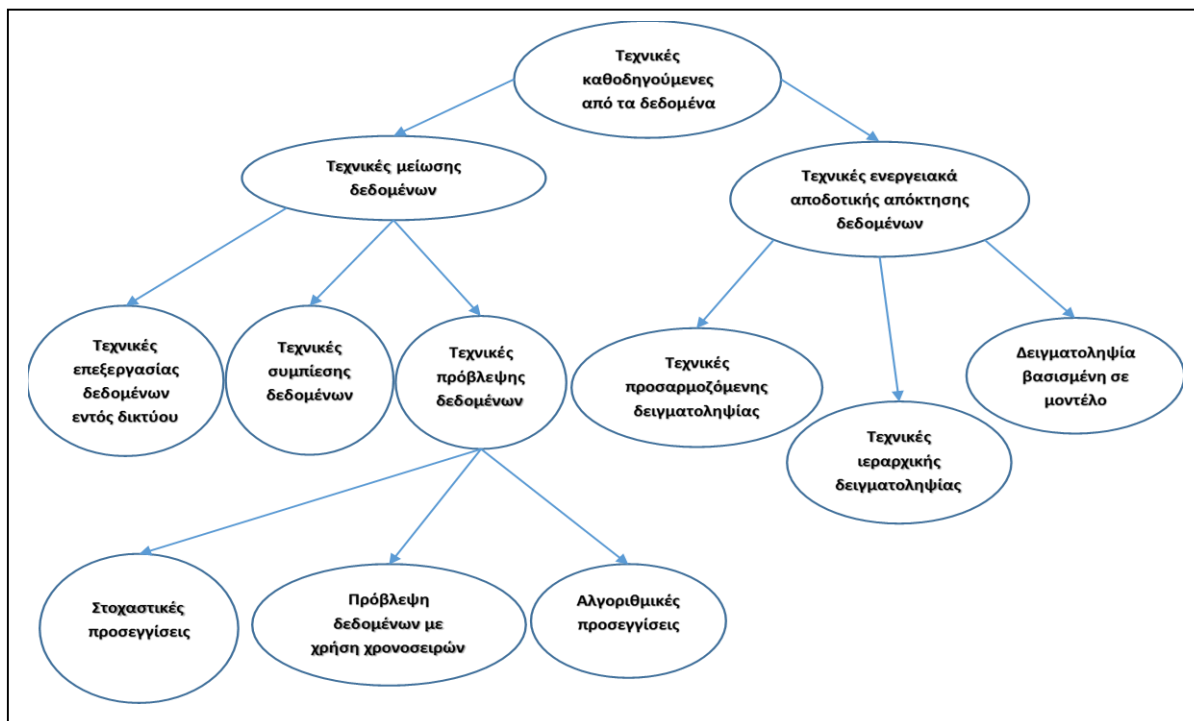
Από την άλλη πλευρά, τα πρωτόκολλα MAC που βασίζονται στον ανταγωνισμό είναι εύρωστα και κλιμακώσιμα. Επίσης, εισάγουν γενικά μικρότερη καθυστέρηση από τα πρωτόκολλα TDMA και μπορούν να προσαρμοστούν στις συνθήκες κίνησης. Όμως η κατανάλωση ενέργειας είναι μεγαλύτερη από τα πρωτόκολλα TDMA λόγω του ανταγωνισμού και των συγκρούσεων. Οι μηχανισμοί εφαρμογής κύκλου λειτουργίας είναι σε θέση να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, αλλά πρέπει να σχεδιαστούν

σωστά, ώστε να είναι προσαρμοστικοί και να μην επιφέρουν μεγάλη καθυστέρηση. Τέλος, τα υβριδικά πρωτόκολλα προσπαθούν να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα των σχημάτων TDMA και των σχημάτων ανταγωνισμού. Οι τεχνικές αυτές, όμως, φαίνεται ότι είναι πολύ σύνθετες για να υλοποιηθούν σε δίκτυα με πολλούς κόμβους.

2.3 Προσεγγίσεις καθοδηγούμενες από τα δεδομένα

Οι προσεγγίσεις αυτής της κατηγορίας διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες: τις προσεγγίσεις μείωσης δεδομένων και τις προσεγγίσεις ενεργειακά αποδοτικής απόκτησης δεδομένων. Η ταξινόμηση αυτή φαίνεται και στο Σχ. 2.9.

Η κατηγορία των προσεγγίσεων μείωσης δεδομένων μπορεί να διαιρεθεί περαιτέρω σε τρεις υποκατηγορίες. Η πρώτη υποκατηγορία σχετίζεται με την επεξεργασία δεδομένων εντός του δικτύου. Η βασική ιδέα της επεξεργασίας δεδομένων είναι η εκτέλεση συνάθροισης δεδομένων σε ενδιάμεσους κόμβους, καθώς τα δεδομένα μεταδίδονται από τους κόμβους-πηγές προς τον κόμβο-συλλέκτη. Η κατηγορία αυτή αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο. Η δεύτερη υποκατηγορία σχετίζεται με τη συμπίεση δεδομένων. Στόχος είναι η μείωση του όγκου των δεδομένων που αποστέλλουν οι κόμβοι-πηγές, εφαρμόζοντας κωδικοποίηση στους κόμβους που παράγουν τα δεδομένα και αποκωδικοποίηση στον κόμβο-συλλέκτη. Οι δύο αυτές υποκατηγορίες αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο. Η τρίτη υποκατηγορία αφορά τεχνικές μείωσης δεδομένων μέσω προσεγγίσεων πρόβλεψης δεδομένων.



Σχήμα 2.9: Ταξινόμηση των τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας που καθοδηγούνται από τα δεδομένα

2.3.1 Τεχνικές πρόβλεψης δεδομένων

Οι τεχνικές πρόβλεψης δεδομένων συνθέτουν ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει το προς παρακολούθηση φαινόμενο, ώστε οι ερωτήσεις που κάνει ο διαχειριστής του δικτύου να μπορούν να απαντηθούν χρησιμοποιώντας το μοντέλο, αντί για τα πραγματικά δεδομένα. Υπάρχουν δύο αντίγραφα του μοντέλου, όπου το ένα βρίσκεται στον κόμβο-συλλέκτη και το δεύτερο βρίσκεται στους κόμβους-πηγές, ώστε να υπάρχουν τόσα ζεύγη μοντέλων όσοι και οι κόμβοι-πηγές. Το μοντέλο στον κόμβο-συλλέκτη χρησιμοποιείται για να απαντά σε ερωτήσεις του διαχειριστή συστήματος, χωρίς να μεσολαβεί κάποια επικοινωνία. Επομένως μειώνεται η ενεργειακή κατανάλωση. Προφανώς, η λειτουργία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο αν το μοντέλο προσφέρει μια έγκυρη εικονική αναπαραγωγή του φαινομένου σε δεδομένη χρονική στιγμή. Στο σημείο αυτό, εμπλέκεται το αντίγραφο του μοντέλου που βρίσκεται στον κόμβο-πηγή. Οι κόμβοι-αισθητήρες δειγματοληπτούν το φαινόμενο και συγκρίνουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιούν με την πρόβλεψη του μοντέλου. Αν η τιμή της μέτρησης πέσει εντός ενός διαστήματος τιμών που προβλέπει το μοντέλο, το μοντέλο θεωρείται έγκυρο. Το εύρος του διαστήματος τιμών εξαρτάται από την εφαρμογή. Σε διαφορετική περίπτωση ο κόμβος-πηγή που διαπιστώνει την μη εγκυρότητα του μοντέλου μπορεί να μεταδώσει τα τελευταία δεδομένα προς τον κόμβο-συλλέκτη ή να εκκινήσει μια διαδικασία ενημέρωσης του μοντέλου. Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τεχνικές πρόβλεψης δεδομένων μπορούν να ενταχθούν σε τρεις κατηγορίες: τις στοχαστικές προσεγγίσεις, τις προσεγγίσεις προβλέψεων με χρήση χρονοσειρών και τις αλγοριθμικές τεχνικές.

Οι τεχνικές που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία εξάγουν ένα στοχαστικό χαρακτηρισμό του φαινομένου, χρησιμοποιώντας πιθανότητες και στατιστικές ιδιότητες. Δύο βασικές μέθοδοι των στοχαστικών προσεγγίσεων είναι οι εξής. Η πρώτη μέθοδος απεικονίζει τα δεδομένα χρησιμοποιώντας μια στοχαστική διαδικασία που περιγράφεται από μια συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (probability density function – pdf). Στη μέθοδο αυτή, η πρόβλεψη δεδομένων γίνεται συνδυάζοντας τις υπολογισμένες συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας με τα δείγματα των κόμβων-αισθητήρων. Η δεύτερη μέθοδος αναπαριστά το υπό μελέτη φυσικό μέγεθος στο χώρο καταστάσεων, ώστε οι επόμενες τιμές του να μπορούν να προβλεφθούν φιλτράροντας μια μη προβλέψιμη συνιστώσα που θεωρείται ως θόρυβος.

Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι τεχνικές που χρησιμοποιούν χρονοσειρές για την πρόβλεψη δεδομένων. Έτσι, ένα σύνολο τιμών προϊστορίας που έχουν ληφθεί περιοδικά χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών. Η βασική διαφορά από τις άλλες στατιστικές προσεγγίσεις είναι ότι η ανάλυση με χρήση χρονοσειρών λαμβάνει υπόψη της την εσωτερική δομή των δεδομένων. Μια χρονοσειρά αναπαρίσταται ως συνδυασμός ενός μοντέλου περιγραφής του φυσικού φαινομένου και ενός τυχαίου σφάλματος. Το μοντέλο περιγραφής χαρακτηρίζεται από την τάση του, δηλαδή από τη μεταβλητότητά του σε βάθος χρόνου και από την περιοδική του διακύμανση.

Τέλος, η τρίτη κατηγορία πρόβλεψης δεδομένων βασίζεται σε αλγορίθμους αυτό-εκμάθησης, οι οποίοι διαμορφώνουν ένα μοντέλο και το χρησιμοποιούν για την πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών του υπό παρακολούθηση φαινομένου.

2.3.1.1 Στοχαστικές προσεγγίσεις

Οι στοχαστικές προσεγγίσεις αξιοποιούν το χαρακτηρισμό του φαινομένου ως στοχαστική διαδικασία, ώστε για την πρόβλεψη δεδομένων να χρησιμοποιηθεί ένα πιθανοτικό μοντέλο. Η προσέγγιση Ken [27] ακολουθεί το γενικό σχήμα που περιεγράφηκε προηγουμένως. Συγκεκριμένα, είναι διαθέσιμο πλήθος μοντέλων έναστος των οποίων έχει αντίτυπο τόσο στον κόμβο-συλλέκτη όσο και στον αντίστοιχο κόμβο-πηγή. Το βασικό μοντέλο είναι πιθανοτικό, δηλαδή αφού προηγηθεί μια φάση εκπαίδευσης, προσδιορίζεται μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που αναφέρεται σε ένα σύνολο χαρακτηριστικών. Όταν το μοντέλο δεν θεωρείται έγκυρο, οι κόμβοι-πηγές το ενημερώνουν και αποστέλλουν δεδομένα προς τον κόμβο-συλλέκτη ώστε να ενημερώσει και αυτός το αντίτυπο του μοντέλου που διαθέτει. Η προσέγγιση Ken είναι ευέλικτη, καθώς μπορεί να χρησιμοποιεί μοντέλα στοχευμένα σε συγκεκριμένο φαινόμενο και να αξιοποιεί χωρικές και χρονικές συσχετίσεις. Για παράδειγμα, οι χρονικές συσχετίσεις μπορούν να διατυπωθούν ως διαδικασίες Markov. Οι χωρικές συσχετίσεις είναι δυσκολότερες στο χειρισμό, καθώς απαιτούν τα συσχετισμένα δεδομένα να γνωστοποιηθούν στον κόμβο που χειρίζεται το μοντέλο που περιγράφει την εξέλιξη του φαινομένου σε συγκεκριμένη περιοχή. Για το λόγο αυτό, οι κόμβοι πρέπει να συντονίζονται μεταξύ τους ώστε να ελαχιστοποιείται το επικοινωνιακό κόστος. Έτσι, προτείνεται η οργάνωση των κόμβων σε ξένες μεταξύ τους ομάδες. Η βέλτιστη λύση για την ομαδοποίηση των κόμβων με κριτήριο την ενεργειακή αποδοτικότητα προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας ένα «άπληστο» (greedy) αλγόριθμο.

2.3.1.2 Προσεγγίσεις με χρήση χρονοσειρών

Μια τυπική μέθοδος για την περιγραφή χρονοσειρών δίνεται από τα μοντέλα κινούμενου μέσου (Moving Average – MA), αυτο-παλινδρόμησης (Auto – Regressive) και το συνδυασμό τους (ARMA). Τα μοντέλα αυτά είναι σχετικά απλά. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις με αρκετά καλή ακρίβεια. Έχουν αναπτυχθεί και περισσότερα σύνθετα μοντέλα, αλλά η πολυπλοκότητά τους τα καθιστά ακατάλληλα για δίκτυα WSN.

Το PAQ [28] βασίζεται σε ένα μοντέλο AR χαμηλής τάξης, και αποσκοπεί στη μείωση του όγκου των υπολογισμών που εκτελούνται από τους κόμβους-αισθητήρες. Η πρώτη μορφή του μοντέλου σχηματίζεται από τους κόμβους-αισθητήρες χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δειγματοληπτημένων τιμών. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης εκμάθησης, οι κόμβοι αποθηκεύουν τις τιμές των μετρήσεων που πραγματοποίησαν σε μια μνήμη. Όταν η μνήμη γεμίσει, τότε προσδιορίζουν το μοντέλο και, στη συνέχεια, το αποστέλλουν στον κόμβο-συλλέκτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων-αισθητήρων και του κόμβου-συλλέκτη περιορίζεται στις παραμέτρους του μοντέλου, δηλαδή στους συντελεστές του μοντέλου AR, χωρίς να αποστέλλονται οι δειγματοληπτημένες τιμές. Για κάθε μοντέλο προδιαγράφεται ένα εύρος σφαλμάτων που καθορίζεται από το διαχειριστή του συστήματος. Όταν μια πρόβλεψη τιμής βρίσκεται εντός του εύρους σφαλμάτων, το μοντέλο θεωρείται έγκυρο. Διαφορετικά, δύο ενδεχόμενα συμβαίνουν. Το πρώτο ενδεχόμενο είναι τα δειγματοληπτημένα δεδομένα να χαρακτηριστούν ακραία λόγω ενδεχόμενης λανθασμένης ένδειξης, οπότε είτε αποστέλλονται στον κόμβο-συλλέκτη είτε απλώς αγνοούνται από τον κόμβο-πηγή. Το δεύτερο ενδεχόμενο είναι να χαρακτηριστεί το μοντέλο ως μη έγκυρο. Αυτό

συμβαίνει όταν πολλές διαδοχικές ενδείξεις προκύψουν εκτός του αποδεκτού εύρους σφαλμάτων. Τότε, το μοντέλο υπολογίζεται εξαρχής, με τον ίδιο τρόπο όπως συμβαίνει στη φάση εκμάθησης. Μια προσθήκη στο βασικό σχήμα είναι η χρήση κάποιου καταναμημένου σχήματος ομαδοποίησης παρόμοιων κόμβων-αισθητήρων. Οι κόμβοι-αισθητήρες χαρακτηρίζονται παρόμοιοι όταν περιγράφονται από το ίδιο μοντέλο, με αποκλίσεις μικρότερες από ένα κατώφλιο που καθορίζεται από το χρήστη. Η ομαδοποίηση των κόμβων μειώνει το επικοινωνιακό κόστος ακόμα περισσότερο, καθώς η ανταλλαγή πληροφοριών περιορίζεται μεταξύ των επικεφαλής των ομάδων και του κόμβου-συλλέκτη.

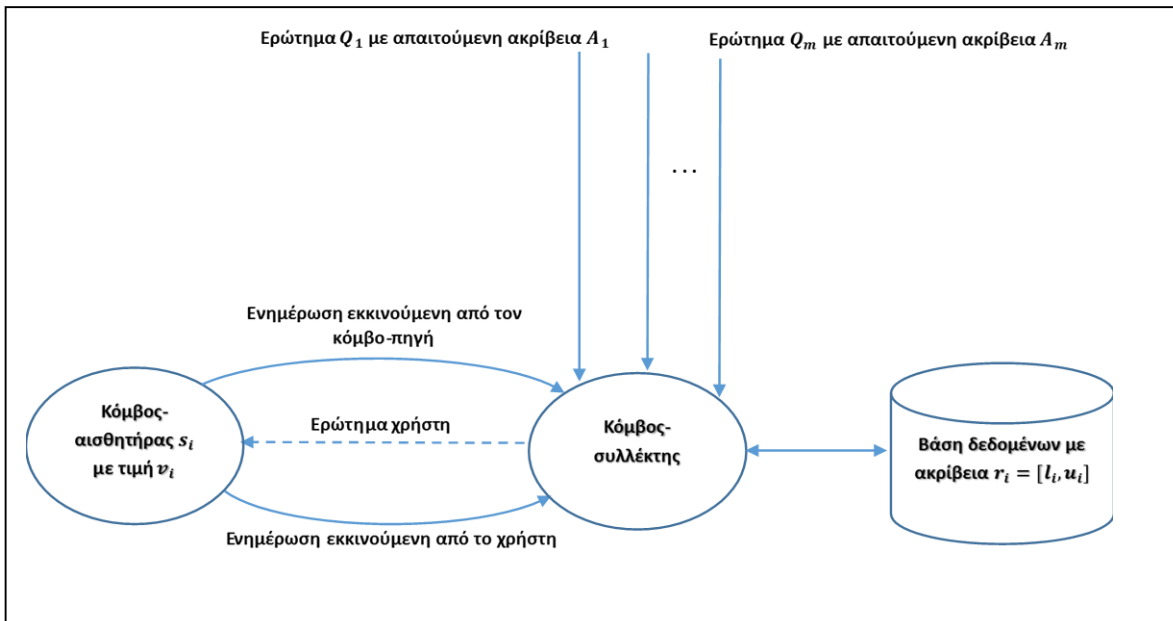
Το SAF [29] βελτιώνει το προαναφερθέν σχήμα σε δύο τομείς. Αρχικά, στο χρησιμοποιούμενο μοντέλο AR περιλαμβάνεται ο υπολογισμός της μεταβλητότητας των δεδομένων σε βάθος χρόνου. Αυτό οδηγεί σε καλύτερη πρόβλεψη των φαινομένων με οξείες μεταβολές στις τιμές τους. Επιπλέον, το SAF μπορεί, εκτός από ακραία δεδομένα, να αναγνωρίζει και ανακρίβειες που προκύπτουν όταν οι κόμβοι αδυνατούν να υπολογίσουν ένα χρονικά στατικό μοντέλο. Στην περίπτωση αυτή, οι κόμβοι μπορούν να βελτιώσουν την ευστάθεια του μοντέλου σε δύο βήματα. Αρχικά, μπορούν να φιλτράρουν τα δεδομένα για να εξομαλύνουν ακραίες τιμές και, στη συνέχεια, μπορούν να αυξήσουν τον όγκο των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του μοντέλου πρόβλεψης, ώστε να μειωθεί η σημασία μεμονωμένων τιμών των δεδομένων στο τελικό αποτέλεσμα. Όταν οι μηχανισμοί αυτοί δεν επαρκούν για τον προσδιορισμό έγκυρου μοντέλου, οι κόμβοι μπορούν να ακυρώσουν το μοντέλο που βρίσκεται αποθηκευμένο στον κόμβο-συλλέκτη και να εκκινήσουν τον προσδιορισμό νέου μοντέλου. Το δεύτερο χαρακτηριστικό στο οποίο επιφέρει βελτίωση το SAF είναι η παρουσία ενός κεντρικού σχήματος ομαδοποίησης κόμβων, που ελαχιστοποιεί τον αριθμό των σχηματιζόμενων ομάδων και έχει πολυπλοκότητα $O(n * \log(n))$

Οι προσεγγίσεις που παρουσιάστηκαν μέχρι το σημείο αυτό υποθέτουν ότι ένα μοναδικό μοντέλο αρκεί για την περιγραφή κάποιου φαινομένου. Ωστόσο, μια εναλλακτική προσέγγιση [30] παρέχει ένα σχήμα πρόβλεψης με χρήση χρονοσειρών βασιζόμενο σε ένα προσαρμοστικό μηχανισμό προς επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου. Η βασική ιδέα είναι ότι, καθώς η γνώση του προς χρήση μοντέλου μπορεί να μην είναι διαθέσιμη εκ των προτέρων, θα ήταν προτιμότερο το ίδιο το σύστημα να αποφασίσει ποιο μοντέλο θα χρησιμοποιήσει. Για το λόγο αυτό, οι κόμβοι διαθέτουν ένα σύνολο μοντέλων, αλλά κάθε δεδομένη στιγμή μόνο ένα από αυτά χρησιμοποιείται για πρόβλεψη δεδομένων. Περισσότερο σύνθετα μοντέλα μπορούν να οδηγήσουν σε καλύτερη πρόβλεψη με αντίτιμο το υψηλότερο κόστος ενημέρωσης του μοντέλου, αφού απαιτούνται περισσότερες παράμετροι για την πλήρη περιγραφή τους. Μετά από κάθε δειγματοληψία, ενημερώνονται όλα τα μοντέλα, αλλά μόνο ένα χρησιμοποιείται για την εξαγωγή προβλέψεων. Εφόσον η διαφορά μεταξύ των δειγματοληπτημένων τιμών και των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών είναι μεγαλύτερη από ένα κατώφλιο, το τρέχον μοντέλο αντικαθίσταται από αυτό που εξασφαλίζει τη ζητούμενη ακρίβεια με το μικρότερο δυνατό κόστος ενημέρωσης. Στη συνέχεια, ακολουθεί διαδικασία ενημέρωσης, ώστε να εξασφαλιστεί ότι και ο κόμβος-πηγή και ο κόμβος-συλλέκτης έχουν συγχρονιστεί με το νέο μοντέλο. Για την εξοικονόμηση των πόρων των κόμβων, τα μοντέλα με τις χειρότερες επιδόσεις καταργούνται εντελώς, μέσω ενός μηχανισμού ανταγωνισμού.

2.3.1.3 Αλγοριθμικές προσεγγίσεις

Για την πρόβλεψη δεδομένων στα WSN έχουν προταθεί αρκετά είδη μοντέλων. Το κοινό στοιχείο τους είναι η αλγοριθμική προσέγγιση που χρησιμοποιούν για να πραγματοποιούν τις προβλέψεις. Μια από τις πρώτες προσεγγίσεις εφαρμόζει μια αναλογία μεταξύ της πρόβλεψης δεδομένων και της συμπίεσης βίντεο. Σύμφωνα με την ιδέα αυτή, σε δεδομένη χρονική στιγμή, το δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως εικόνα όπου κάθε στοιχείο (pixel) της οποίας, περιγράφεται από τα δεδομένα που δειγματοληπτούνται σε κάθε κόμβο. Από αυτή τη σκοπιά, είναι φανερή η δυνατότητα αξιοποίησης της χωρικής συσχέτισης μεταξύ των δειγμάτων. Επιπλέον, καθώς τα δειγματοληπτούμενα δεδομένα μεταβάλλονται με το χρόνο, η εξέλιξη των μετρήσεων των κόμβων μπορεί να θεωρηθεί ως ταινία. Για το λόγο αυτό, προτείνεται [31] μια τεχνική πρόβλεψης δεδομένων με την ονομασία PREMON, εμπνευσμένη από το πρότυπο MPEG. Όταν εκκινεί η παρακολούθηση του φαινομένου, οι κόμβοι-αισθητήρες αποστέλλουν τις αρχικές μετρήσεις τους στον κόμβο-συλλέκτη. Έπειτα, ο κόμβος-συλλέκτης προσδιορίζει το μοντέλο λαμβάνοντας υπόψη τις συσχετίσεις μεταξύ των διαφορετικών μπλοκ στα οποία χωρίζονται οι κόμβοι και για κάθε μπλοκ προσδιορίζει ένα διάνυσμα κίνησης. Μετά τον προσδιορισμό του μοντέλου, αυτό αποστέλλεται στους κόμβους-αισθητήρες. Από το σημείο αυτό και μετά οι κόμβοι-αισθητήρες συγκρίνουν κάθε επόμενο δείγμα με την αντίστοιχη πρόβλεψη του μοντέλου. Ενώσω οι τιμές των μετρήσεων διατηρούνται εντός ενός ανεκτού εύρους σφαλμάτων που προσδιορίζεται από το διαχειριστή του συστήματος, οι κόμβοι-συλλέκτες δεν αποστέλλουν δεδομένα προς τον κόμβο-συλλέκτη. Το μοντέλο περιοδικά ακυρώνεται και μετά την ακύρωσή του εκκινεί από την αρχή η διαδικασία συγκέντρωσης δεδομένων και προσδιορισμού του μοντέλου. Το PREMON χρησιμοποιεί μια κεντρική λύση. Το πρωτόκολλο buddy [32] επεκτείνει την προσέγγιση PREMON χρησιμοποιώντας ένα καταναμημένο σχήμα προς αξιοποίηση της χρονικής συσχέτισης των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, οι κόμβοι σχηματίζουν συμπλέγματα. Σε κάθε σύμπλεγμα ορίζεται ένας αντιπρόσωπος, υπεύθυνος για την παρακολούθηση του φαινομένου και την επεξεργασία των ερωτημάτων του διαχειριστή συστήματος ενώσω οι υπόλοιποι κόμβοι του συμπλέγματος μπορούν να μεταβούν στην κατάσταση ανάπαυσης. Εντός κάθε συμπλέγματος, γίνεται εναλλαγή του κόμβου-αντιπρόσωπου, ώστε η ενεργειακή κατανάλωση να κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ των κόμβων. Η επικοινωνία των απλών κόμβων με το κόμβο-αντιπρόσωπο κάθε συμπλέγματος μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι οι κόμβοι να αποστέλλουν στον κόμβο-αντιπρόσωπο τα δειγματοληπτημένα δεδομένα. Ο δεύτερος τρόπος είναι οι κόμβοι απλώς να αποστέλλουν ένα μοντέλο στον κόμβο-αντιπρόσωπο καθώς και τα δείγματα που πιθανώς έχουν μεγάλη απόκλιση από τις αντίστοιχες προβλέψεις (τρόπος λειτουργίας PREMON). Κάθε κόμβος αποφασίζει τον τρόπο επικοινωνίας του με τον κόμβο-αντιπρόσωπο, με βάση το ενεργειακό κόστος κάθε επιλογής. Όταν το υπό παρακολούθηση φαινόμενο είναι αργά μεταβαλλόμενο χρονικά, ο τρόπος λειτουργίας PREMON είναι καταλληλότερος, διότι ο αριθμός των ανταλλασσόμενων πακέτων είναι μειωμένος. Αντίθετα, όταν το φαινόμενο μεταβάλλεται ταχέως, τότε οι επικεφαλίδες του PREMON μπορεί να είναι τόσο μεγάλες σε μέγεθος, ώστε να καθιστούν την απευθείας αποστολή των δειγματοληπτημένων μετρήσεων στον κόμβο-αντιπρόσωπο περισσότερο συμφέρουσα.

Στο [33], οι συγγραφείς προτείνουν μια διαφορετική προσέγγιση για πρόβλεψη δεδομένων, η οποία προσαρμόζεται στη συμπεριφορά του διαχειριστή συστήματος και χρησιμοποιεί ενεργειακά αποδοτικούς μηχανισμούς συλλογής δεδομένων (EEDC: Energy Efficient Data Collection). Συγκεκριμένα, το μοντέλο λειτουργίας που υιοθετείται αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων-αισθητήρων και μια βάση δεδομένων που βρίσκεται στον κόμβο-συλλέκτη. Κάθε εισερχόμενο ερώτημα, έστω Q_i , συνδέεται με συγκεκριμένο περιορισμό ακρίβειας, έστω A_i , και συγκεκριμένη μέγιστη καθυστέρηση, έστω D_i , εντός της οποίας πρέπει να απαντηθεί το ερώτημα. Κάθε κόμβος-αισθητήρας έχει αποθηκευμένη στη μνήμη του την τιμή του τελευταίου δείγματος, έστω v_i , που έλαβε από τον αισθητήρα του. Ωστόσο, στη βάση δεδομένων η αποθήκευση της τιμής δεν γίνεται με τον ίδιο τρόπο. Αντί να αποθηκευτεί η τιμή του δείγματος, αποθηκεύεται μια εκτίμηση αυτής, η οποία κυμαίνεται σε ένα εύρος, έστω r_i , το οποίο εκφράζεται μέσω ενός κατώτερου και ενός ανώτερου φράγματος, l_i και u_i αντίστοιχα. Επίσης, η απάντηση σε κάποιο ερώτημα Q_i παρέχεται με τη μορφή διαστήματος, μέσω των τιμών l_i και u_i . Το μέγεθος της ακρίβειας της απάντησης καθορίζεται από τη διαφορά $u_i - l_i$, ενώ ο περιορισμός A_i εκφράζει τη μέγιστη τιμή εύρους του διαστήματος αυτού που είναι αποδεκτή από το διαχειριστή συστήματος. Όταν ένας κόμβος-αισθητήρας ανανεώνει την τιμή της μέτρησής του, έστω v_i' , ελέγχει αν η προηγούμενη εκτίμηση της μέτρησης είναι έγκυρη και για τη νέα τιμή. Αν η νέα τιμή, v_i' προκύψει εκτός του προηγούμενου διαστήματος r_i , η προηγούμενη εκτίμηση δεν είναι πλέον έγκυρη, και αποστέλλεται νέα εκτίμηση στον κόμβο-συλλέκτη. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ενημέρωση από την πλευρά του κόμβου-πηγή (source-initiated update). Αν η προηγούμενη εκτίμηση είναι έγκυρη και για τη νέα τιμή, ο κόμβος-πηγή δεν αποστέλλει τίποτε στον κόμβο-συλλέκτη, εξοικονομώντας ενεργειακά αποθέματα. Η απάντηση των ερωτημάτων πραγματοποιείται στον κόμβο-συλλέκτη. Αν η μέγιστη αποδεκτή τιμή ανοχής, A_i , είναι μεγαλύτερη από το τρέχον σφάλμα μέτρησης, $u_i - l_i$, δηλαδή αν $A_i > u_i - l_i$, το ερώτημα απαντάται χωρίς να μεσολαβήσει επικοινωνία με τον αντίστοιχο κόμβο-αισθητήρα. Σε διαφορετική περίπτωση, η πληροφορία που παρέχεται από τη βάση δεδομένων κρίνεται ανεπαρκής και ο κόμβος-πηγή επικοινωνεί με τον αντίστοιχο κόμβο-αισθητήρα ζητώντας τη δειγματοληπτημένη τιμή που έχει, ενώ οι επόμενες αποθηκεύσεις στη βάση δεδομένων πραγματοποιούνται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ερώτηση και ενημέρωση από την πλευρά του διαχειριστή συστήματος (consumer-initiated request and update). Ο τρόπος αυτός συλλογής δεδομένων απεικονίζεται και στο Σχ. 2.10.



Σχήμα 2.10: Διαδικασία συλλογής δεδομένων με μηχανισμούς EEDC

Στόχος του μηχανισμού αυτού συλλογής και αποθήκευσης δεδομένων είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, η οποία απαιτεί τον καθορισμό δύο βασικών ζητημάτων. Αρχικά, το μέγεθος της ακρίβειας με την οποία αποθηκεύονται οι τιμές στη βάση δεδομένων είναι μέγεθος προς βελτιστοποίηση. Αν η ακρίβεια είναι μεγάλη, είναι ενδεχόμενο οι νέες τιμές των δειγμάτων να βρίσκονται συχνά εκτός του διαστήματος r_i και να απαιτείται συχνή επικοινωνία των κόμβων-αισθητήρων με τον κόμβο-συλλέκτη. Αν η ακρίβεια είναι πολύ μικρή, είναι ενδεχόμενο αυτή να μην ικανοποιεί την επιθυμητή ακρίβεια του διαχειριστή συστήματος, οδηγώντας πάλι σε συχνή ανταλλαγή μηνυμάτων. Το δεύτερο ζήτημα αφορά τη βέλτιστη στρατηγική που πρέπει να ακολουθούν οι κόμβοι-αισθητήρες, ως προς τις μεταβάσεις στις διάφορες ενεργειακές τους καταστάσεις, ώστε αφενός να εξοικονομήσουν ενεργειακούς πόρους, και αφετέρου να είναι έτοιμοι να απαντήσουν σε πιθανά ερωτήματα εντός της καθοριζόμενης μέγιστης καθυστέρησης D_i .

2.3.1.4 Σύνοψη

Η προσέγγιση που γίνεται από τις στοχαστικές τεχνικές είναι γενική και παρέχει τα μέσα για την εκτέλεση λειτουργιών υψηλού επιπέδου, όπως είναι η συνάθροιση δεδομένων. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της κατηγορίας είναι το σχετικά υψηλό υπολογιστικό κόστος. Για το λόγο αυτό, οι στοχαστικές προσεγγίσεις είναι προτιμότερες όταν είναι διαθέσιμο ένα σύνολο κόμβων-αισθητήρων με αυξημένους ενεργειακούς πόρους, όπως συμβαίνει στα ετερογενή δίκτυα. Αντίθετα, η πρόβλεψη με χρήση χρονοσειρών μπορεί να προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια ακόμα και όταν χρησιμοποιούνται απλά μοντέλα. Ωστόσο, οι προσεγγίσεις αυτού του είδους υποθέτουν την ύπαρξη κατάλληλου μοντέλου για την περιγραφή του υπό μελέτη φαινομένου, το οποίο όμως μπορεί να μην είναι γνωστό από την αρχή. Τέλος, οι αλγοριθμικές τεχνικές τείνουν να είναι προσαρμοσμένες στο είδος της εφαρμογής που

εξυπηρετούν. Για το λόγο αυτό, κάθε προσέγγιση εμφανίζει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

2.3.2 Ενεργειακά αποδοτική απόκτηση δεδομένων

Παρά τη γενική υπόθεση ότι το υποσύστημα διεξαγωγής μετρήσεων των κόμβων-αισθητήρων έχει αμελητέα ενεργειακή κατανάλωση, υπάρχει μια κατηγορία εφαρμογών στις οποίες η διεξαγωγή μετρήσεων μπορεί να απαιτεί μεγάλη ενεργειακή δαπάνη, συγκρίσιμη με αυτή του συστήματος επικοινωνίας. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε αρκετούς παράγοντες. Οι πλέον χαρακτηριστικοί από αυτούς είναι οι ακόλουθοι:

- *Ενεργειακά δαπανηροί αισθητήρες*
Από τη φύση τους, ορισμένοι αισθητήρες απαιτούν υψηλά ποσά ενέργειας για να επιτελέσουν το έργο τους. Τέτοια παραδείγματα αισθητήρων είναι οι CMOS αισθητήρες εικόνας, οι αισθητήρες πολυμέσων καθώς και κάποιοι χημικοί και βιολογικοί αισθητήρες.
- *Ενεργειακά δαπανηροί ψηφιακοί μετατροπείς*
Αισθητήρες όπως οι ακουστικοί και οι σεισμικοί εν γένει απαιτούν ψηφιακούς μετατροπείς με υψηλό ρυθμό μετάδοσης και υψηλή ακρίβεια, στοιχεία που αυξάνουν πολύ την ενεργειακή κατανάλωση του κόμβου-αισθητήρα.
- *Ενεργοί αισθητήρες*
Μια κατηγορία αισθητήρων αντλεί δεδομένα για το υπό μελέτη φαινόμενο αποστέλλοντας σήματα ανίχνευσης, όπως συμβαίνει στα ραντάρ και στα σόναρ. Αυτό οδηγεί σε αυξημένη ενεργειακή δαπάνη.
- *Μεγάλος χρόνος για την ολοκλήρωση δειγματοληψίας*
Ο χρόνος για την απόκτηση των δεδομένων μπορεί να είναι της τάξης των χιλιοστών του δευτερολέπτου ή ακόμα και της τάξης του δευτερολέπτου. Για το λόγο αυτό, η ενέργεια που καταναλώνεται από το υποσύστημα μέτρησης μπορεί να είναι υψηλή, ακόμα και αν η κατανάλωση ισχύος του κόμβου-αισθητήρα δεν είναι μεγάλη.

Στις περιπτώσεις αυτές, η μείωση του επικοινωνιακού κόστους μπορεί να μην επαρκεί. Για το λόγο αυτό, τα σχήματα εξοικονόμησης ενέργειας πρέπει να μειώσουν το πλήθος των δειγμάτων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες των κόμβων. Στο σημείο αυτό πρέπει, όμως, να τονιστεί ότι οι τεχνικές για την ενεργειακά αποδοτική απόκτηση δεδομένων δεν αποσκοπούν αποκλειστικά στη μείωση της ενεργειακής δαπάνης του υποσυστήματος διεξαγωγής μετρήσεων, διότι μειώνοντας τον αριθμό των δειγμάτων έμμεσα μειώνεται και ο όγκος της επικοινωνίας.

Οι τεχνικές ενεργειακά αποδοτικής απόκτησης δεδομένων μπορούν να ενταχθούν σε τρεις κατηγορίες: τις τεχνικές προσαρμοζόμενης δειγματοληψίας, τις τεχνικές ιεραρχικής δειγματοληψίας και τις τεχνικές δειγματοληψίας που βασίζονται σε μοντέλα περιγραφής του φαινομένου.

Καθώς τα δείγματα που λαμβάνονται μπορεί να είναι συσχετισμένα μεταξύ τους, οι τεχνικές προσαρμοζόμενης δειγματοληψίας αξιοποιούν τις ενδεχόμενες ομοιότητες για να μειώσουν τον όγκο των δεδομένων που αποκτώνται. Για παράδειγμα, το υπό μελέτη

φαινόμενο μπορεί να μεταβάλλεται αργά ως προς το χρόνο. Στην περίπτωση αυτή, οι χρονικές συσχετίσεις χρησιμοποιούνται ώστε να μειωθεί το πλήθος των απαιτούμενων μετρήσεων. Το ίδιο ισχύει όταν το φαινόμενο δεν μεταβάλλεται ακραίως μεταξύ περιοχών που καλύπτονται από γειτονικούς κόμβους.

Οι τεχνικές ιεραρχικής δειγματοληψίας βασίζονται στην υπόθεση ότι οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με διαφορετικούς τύπους αισθητήρων. Έτσι, καθώς κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από δεδομένη ανάλυση και αντίστοιχη ενεργειακή κατανάλωση, οι τεχνικές αυτές επιλέγουν ποιο είδος αισθητήρων να ενεργοποιήσουν προκειμένου να έχουν την επιθυμητή σχέση ανταλλαγής μεταξύ της ανάλυσης των λαμβανόμενων μετρήσεων και της αντίστοιχης ενεργειακής δαπάνης.

Οι τεχνικές δειγματοληψίας που βασίζονται σε μοντέλα στηρίζονται σε παρόμοια βασική ιδέα με τις τεχνικές πρόβλεψης δεδομένων. Αρχικά, οι τεχνικές αυτές διαμορφώνουν ένα μοντέλο του υπό παρατήρηση φαινομένου και, στη συνέχεια, χρησιμοποιούν τις τιμές που προβλέπει το μοντέλο προκειμένου να μειώσουν το πλήθος των δειγμάτων που λαμβάνονται.

2.3.2.1 Τεχνικές προσαρμοζόμενης δειγματοληψίας

Οι τεχνικές προσαρμοζόμενης δειγματοληψίας μπορούν να μειώσουν το πλήθος των δειγμάτων του φυσικού μεγέθους που απαιτούνται αξιοποιώντας τις χωροχρονικές συσχετίσεις των δεδομένων. Από το θεώρημα Nyquist είναι γνωστό ότι για τη συχνότητα δειγματοληψίας, έστω F_s , που απαιτείται για την αναπαραγωγή ενός σήματος πρέπει να ισχύει: $F_s \geq 2 * F_m$, όπου F_m είναι η μέγιστη συχνότητα στο φάσμα ισχύος του σήματος. Ωστόσο, ο προσδιορισμός της παραμέτρου F_m δεν είναι εύκολος, αφού, αφενός, δεν μπορεί να είναι γνωστή εκ των προτέρων και, αφετέρου, μπορεί να μεταβάλλεται με το χρόνο. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, προτείνεται προσαρμοζόμενος αλγόριθμος [34] που υπολογίζει δυναμικά την τρέχουσα μέγιστη συχνότητα, F_m , βασισμένος στην τάση των πλέον πρόσφατων μετρήσεων και αξιοποιώντας τη χρονική συσχέτιση των δειγμάτων. Καθώς οι υπολογισμοί έχουν μεγάλη πολυπλοκότητα, ο αλγόριθμος εκτελείται στον κόμβο-συλλέκτη και οι υπολογισμένοι ρυθμοί δειγματοληψίας γνωστοποιούνται έπειτα στους κόμβους-αισθητήρες. Ο μηχανισμός προσαρμοζόμενης δειγματοληψίας πρέπει να συνοδεύεται από μηχανισμό δέσμευσης εύρους ζώνης, ο οποίος θα εγγυάται ότι το συνολικό φορτίο κίνησης δεν θα υπερβαίνει τη χωρητικότητα του δικτύου.

Ένα πρωτόκολλο που αξιοποιεί τη χωρική συσχέτιση με στόχο να μειώσει επιλεκτικά τον αριθμό των κόμβων που αποστέλλουν δεδομένα στον κόμβο-συλλέκτη είναι το CC-MAC (Correlation-based Collaborative MAC) [35]. Το πρωτόκολλο αυτό ρυθμίζει τις μεταδόσεις των κόμβων ώστε να ελαχιστοποιήσει το πλήθος των κόμβων που διεξάγουν μετρήσεις χωρίς να υπερβαίνεται το ανεκτό επίπεδο παραμόρφωσης. Για το λόγο αυτό, ο αλγόριθμος INS (Iterative Node Selection), ο οποίος εκτελείται στον κόμβο-συλλέκτη προσδιορίζει την ακτίνα συσχέτισης, R_{corr} , δεδομένης της μέγιστης ανεκτής παραμόρφωσης της εφαρμογής. Η παράμετρος αυτή, στη συνέχεια, αποστέλλεται στους κόμβους-αισθητήρες κατά την εγκατάσταση του δικτύου και χρησιμοποιείται κατά τη φάση λειτουργίας του δικτύου. Δεδομένου ότι οι κόμβοι μπορεί να είναι ταυτόχρονα και πηγές δεδομένων αλλά και απλώς να προωθούν πακέτα

άλλων κόμβων, το πρωτόκολλο CC-MAC περιλαμβάνει δύο διαφορετικές συνιστώσες: το E-MAC (Event MAC) και το N-MAC (Network MAC). Το E-MAC εμποδίζει τη μετάδοση πλεονάζουσας πληροφορίας κατά τη φάση πρόσβασης στο κανάλι. Αρχικά, όλοι οι κόμβοι ανταγωνίζονται για να αποκτήσουν πρόσβαση στο κοινό κανάλι. Τελικά, όμως, μόνο ένας κόμβος καταλαμβάνει το κανάλι και γίνεται αντιπρόσωπος της περιοχής που ορίζεται με βάση την ακτίνα R_{corr} , ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι εντός της περιοχής αυτής σταματούν τις μεταδόσεις τους. Πλέον, όλη η πλεονάζουσα πληροφορία έχει φιλτραρισθεί, οπότε όλα τα πακέτα που βρίσκονται στο δίκτυο από αυτό το χρονικό σημείο πρέπει να παραδοθούν αξιόπιστα στον κόμβο-συλλέκτη. Για το λόγο αυτό, το N-MAC διαχειρίζεται τις μεταδόσεις πακέτων, αποδίδοντας στα πακέτα που έχουν να διανύσουν μεγάλη απόσταση μέχρι να φθάσουν στον κόμβο-συλλέκτη μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σχέση με τα πακέτα που δημιουργήθηκαν πολύ πρόσφατα. Καίτοι το πρωτόκολλο CC-MAC σχεδιάστηκε με στόχο τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του υποσυστήματος επικοινωνίας των κόμβων, ταυτόχρονα μειώνει και την κατανάλωση του υποσυστήματος διεξαγωγής μετρήσεων, αφού οι αισθητήρες των κόμβων μπορούν να απενεργοποιούνται όταν δεν πραγματοποιούν μετρήσεις.

Ένα ακόμη παράδειγμα προσαρμοζόμενης δειγματοληψίας που είναι σχεδιασμένο ειδικά για την εξυπηρευόμενη εφαρμογή είναι και το FloodNet [36]. Το FloodNet είναι ένα σύστημα προειδοποίησης πλημμύρας και περιλαμβάνει ένα σχήμα διαίρεσης της περιοχής ενδιαφέροντος σε πλέγματα με δυνατότητα να μεταβάλλει το ρυθμό δειγματοληψίας κάθε κόμβου. Βασική συνιστώσα του FloodNet είναι το FAR (FloodNet Adaptive Routing). Το FAR ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ισχύος των κόμβων εφαρμόζοντας από κοινού προσαρμοζόμενη δειγματοληψία και ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης χρησιμοποιεί δύο κριτήρια για την επιλογή των κόμβων που συμμετέχουν στη δρομολόγηση πακέτων προς τον κόμβο-συλλέκτη: την προτεραιότητα και τη σημασία των δεδομένων. Η προτεραιότητα σχετίζεται στενά με τα ενεργειακά αποθέματα κάθε κόμβου. Η σημασία των δεδομένων συναρτάται με τη συχνότητα δειγματοληψίας, καθώς δεδομένα που έχουν μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας σχετίζονται με κρίσιμες περιοχές, όπου το φαινόμενο μεταβάλλεται ταχέως. Συνεπώς, ο αλγόριθμος δρομολόγησης επιλέγει κόμβους για συμμετοχή στη δρομολόγηση πακέτων που έχουν χαμηλή συχνότητα δειγματοληψίας. Η βασική ιδέα είναι να επιλέγονται πρώτα κόμβοι με πολλά ενεργειακά αποθέματα, και, ανάμεσα στους κόμβους με ίδια προτεραιότητα να επιλέγονται εκείνοι οι κόμβοι που είναι λιγότερο επιφορτισμένοι με εργασίες δειγματοληψίας.

2.3.2.2 Τεχνικές ιεραρχικής δειγματοληψίας

Η προσέγγιση ιεραρχικής δειγματοληψίας βασίζεται στη χρήση κόμβων εξοπλισμένων με διαφορετικού τύπου αισθητήρες. Το φυσικό μέγεθος που ενδιαφέρει μπορεί να μετρηθεί από όλα τα είδη αισθητήρων. Όμως, κάθε είδος αισθητήρα χαρακτηρίζεται από διαφορετική ακρίβεια και αντίστοιχη ενεργειακή κατανάλωση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι συνήθεις απλοί αισθητήρες είναι ενεργειακά αποδοτικοί αλλά έχουν πολύ περιορισμένη ακρίβεια μετρήσεων. Από την άλλη πλευρά, εξελιγμένοι αισθητήρες παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων με αντίτιμο μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση. Μια συνήθης πρακτική είναι οι κόμβοι με τους απλούς αισθητήρες να χρησιμοποιούνται για την παροχή μιας γενικής εικόνας της υπό

παρατήρηση περιοχής και, όταν ανιχνευθεί κάποιο γεγονός ή κάποια υποπεριοχή πρέπει να μετρηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια, να ενεργοποιούνται οι κόμβοι με τους ενεργειακά δαπανηρούς αισθητήρες. Ένα παράδειγμα εφαρμογής αυτής της πρακτικής είναι η ανίχνευση στόχων. Πιθανοί στόχοι μπορούν να ανακαλυφθούν χρησιμοποιώντας αισθητήρες χαμηλής ισχύος, όπως μαγνητόμετρα ή παθητικούς ανιχνευτές ενέργειας. Οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να ανιχνεύσουν στόχους αλλά χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλή πιθανότητα ψευδούς συναγερμού. Επιπλέον, αν ανιχνεύσουν πιθανό στόχο, δεν μπορούν να αναγνωρίσουν με ακρίβεια το είδος του. Στην περίπτωση αυτή, οι αισθητήρες εικόνας παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Λόγω της μεγάλης ενεργειακής κατανάλωσης που εμφανίζουν, ωστόσο, δεν είναι αποδοτικό οι αισθητήρες αυτοί να παραμένουν συνεχώς ενεργοποιημένοι. Αντίθετα, είναι προτιμότερο και ενεργειακά αποδοτικότερο οι αισθητήρες εικόνας να ενεργοποιούνται μόνο σε περίπτωση πιθανής ανίχνευσης στόχου και να παραμένουν ενεργοί μέχρι να ολοκληρωθεί η πλήρης ταυτοποίησή του. Αυτού του είδους η τεχνική δειγματοληψίας ονομάζεται πυροδοτούμενη (triggered sampling). Ένα ακόμα παράδειγμα εφαρμογής που χρησιμοποιεί πυροδοτούμενη δειγματοληψία αφορά την παρακολούθηση της κατάστασης κτιρίων και την ανίχνευση καταστροφών περιγράφεται στο [37]. Το κτίριο χωρίζεται σε ζώνες που περιλαμβάνουν κόμβους-αισθητήρες με διαφορετικές δυνατότητες: τους m-κόμβους και τους μ-κόμβους. Οι m-κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με μετρητές επιτάχυνσης και δειγματοληπτούν το περιβάλλον περιοδικά. Από την άλλη πλευρά, οι μ-κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με όργανα μέτρησης καταπόνησης και παραμένουν ανενεργοί επί όσο χρονικό διάστημα δεν ανιχνεύεται κάποιο πρόβλημα. Στην περίπτωση όπου ανιχνευθεί κάποιο περιστατικό, από κάποιον m-κόμβο, οι μ-κόμβοι επικοινωνούν και με γειτονικούς κόμβους για να επιβεβαιώσουν την ένδειξη ύπαρξης ζημιάς. Εφόσον μέσω της διασταύρωσης πληροφορίας διαπιστωθεί ότι πράγματι υπάρχει κάποιο πρόβλημα, οι πυκνά τοποθετημένοι μ-κόμβοι ενεργοποιούνται για να αποκτήσουν μια λεπτομερή εικόνα για το τί συνέβη και να το αναφέρουν στον κόμβο-συλλέκτη.

Ένας παρόμοιος μηχανισμός αξιοποιεί μια γενική περιγραφή της υπό επιτήρηση περιοχής για να αναγνωρίσει συγκεκριμένες θέσεις που χρειάζονται διεξαγωγή λεπτομερέστερων μετρήσεων. Μετά την αναγνώριση των θέσεων αυτών, υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις για τη λήψη ακριβέστερων μετρήσεων: είτε να γίνει αφύπνιση κόμβων υψηλής ακρίβειας, οι οποίοι βρίσκονται ήδη τοποθετημένοι στην περιοχή είτε να γίνει καθοδήγηση ενός ρομποτικού αισθητήρα προκειμένου να φθάσει στις θέσεις όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια. Τέτοιου είδους προσεγγίσεις ονομάζονται πολυεπίπεδες (multi-scale sampling). Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης τέτοιου μηχανισμού είναι σε μια εφαρμογή ανίχνευσης πυρκαγιάς [38]. Η υπό παρακολούθηση περιοχή παρακολουθείται από στατικούς κόμβους που πραγματοποιούν μετρήσεις περιοδικά. Όταν κάποια περιοχή εμφανίσει κάποια ανωμαλία, δηλαδή η μετρούμενη θερμοκρασία υπερβεί ένα κατώφλιο, οι στατικοί κόμβοι ζητούν από τον κόμβο-συλλέκτη να γίνει μια βαθύτερη έρευνα. Τότε, ο κόμβος-συλλέκτης αποστέλλει κινητό αισθητήρα στη συγκεκριμένη περιοχή, ώστε να συλλέξει δεδομένα από όλους τους γειτονικούς κόμβους και να λάβει μια σχετική φωτογραφία. Μετά την ολοκλήρωση του έργου του, ο κινητός αισθητήρας επιστρέφει στον κόμβο-συλλέκτη και παραδίδει τα δεδομένα που συνέλεξε.

2.3.2.3 Τεχνικές δειγματοληψίας που βασίζονται σε μοντέλα περιγραφής του φαινομένου

Οι τεχνικές δειγματοληψίας που στηρίζονται σε μοντέλο περιγραφής του υπό μελέτη φαινομένου ακολουθούν παρόμοια προσέγγιση με τις τεχνικές πρόβλεψης δεδομένων οι οποίες βασίζονται επίσης σε κάποιο μοντέλο. Ωστόσο, οι αντίστοιχες τεχνικές πρόβλεψης διατηρούν τη συχνότητα δειγματοληψίας σταθερή, ώστε να χρησιμοποιήσουν τα περιοδικά δείγματα για να διατηρούν έγκυρο το μοντέλο. Αντίθετα, οι τεχνικές δειγματοληψίας μειώνουν το πλήθος των δειγμάτων που αποκτώνται κάνοντας χρήση υπολογιστικών μοντέλων. Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας προσεγγίσεων είναι το σύστημα Barbie-Q [39]. Οι βασικές συνιστώσες του συστήματος αυτού, οι οποίες εκτελούνται στον κόμβο-συλλέκτη, είναι ένα πιθανοτικό μοντέλο και ένας συντονιστής. Το πιθανοτικό μοντέλο δημιουργείται κατά τη φάση εκμάθησης, από ένα συγκεκριμένο αριθμό δειγμάτων. Η προκύπτουσα συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι αρκετά ευέλικτη ώστε να λάβει υπόψη τις τις χωρικές και χρονικές συσχετίσεις. Από αυτή την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι δυνατό να εξαχθεί η ακρίβεια, σε όρους πιθανότητας, ώστε συγκεκριμένη τιμή μέτρησης να βρίσκεται εντός του διαστήματος τιμών, που καθορίζεται από το διαχειριστή συστήματος. Επιπλέον, το μοντέλο ενημερώνεται συνδυάζοντας τις υπάρχουσες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας με τα νέα δείγματα. Ο συντονιστής στο σύστημα Barbie-Q είναι εκείνος που αποφασίζει με ποιον τρόπο θα γίνει η συλλογή των δεδομένων. Μετά από κάθε ερώτημα που φθάνει στον κόμβο-συλλέκτη, ο συντονιστής διαμορφώνει κατάλογο των κόμβων που θα ερωτηθούν και προδιαγράφει την ακρίβεια με την οποία θα γίνουν οι μετρήσεις, σε περίπτωση όπου οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με διαφορετικών προδιαγραφών αισθητήρες. Επίσης, ο συντονιστής υπολογίζει το συνολικό ενεργειακό κόστος που απαιτήθηκε για τη δημιουργία απάντησης στο ερώτημα που έλαβε, συνυπολογίζοντας το ενεργειακό κόστος για τη διεξαγωγή μετρήσεων αλλά και το ενεργειακό κόστος επικοινωνίας.

Μια διαφορετική προσέγγιση υλοποιείται στο πρωτόκολλο USAC (Utility-based Sensing And Communication) [40], το οποίο χρησιμοποιείται για παρακολούθηση σε παγετώδες περιβάλλον. Στην περίπτωση αυτή, για την πρόβλεψη των δειγμάτων γίνεται χρήση ενός γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης περιορισμένου παραθύρου. Ο αλγόριθμος για την ενημέρωση της συχνότητας δειγματοληψίας που περιγράφεται ακολούθως είναι πλήρως καταναμημένος, δηλαδή εκτελείται σε κάθε κόμβο-αισθητήρα. Όταν η προβλεπόμενη τιμή βρίσκεται εκτός ενός διαστήματος εμπιστοσύνης, η συχνότητα δειγματοληψίας αυξάνεται σε προκαθορισμένη μέγιστη τιμή, έστω f_{max} . Αυτό βελτιώνει την ακρίβεια κατά τη διάρκεια ενημέρωσης του μοντέλου, ώστε το μοντέλο να είναι σε θέση να ακολουθεί τις ξαφνικές αλλαγές των μετρούμενων δεδομένων. Αντίθετα, όταν η προβλεπόμενη τιμή βρίσκεται εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης, η συχνότητα δειγματοληψίας μειώνεται κατά παράγοντα που λαμβάνεται στο διάστημα (0,1) μέχρι να φτάσει μια ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας, έστω f_{min} . Εκτός από το μοντέλο παρακολούθησης του φαινομένου, το πρωτόκολλο USAC περιλαμβάνει και ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης, το οποίο συνυπολογίζει τόσο το ενεργειακό κόστος όσο και το κόστος επικοινωνίας, ώστε να επιλέγονται διαδρομές με κόμβους που έχουν χαμηλή συχνότητα δειγματοληψίας

έναντι κόμβων που καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας για δειγματοληψία. Έτσι, επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ των κόμβων και, κατά συνέπεια, επεκτείνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου.

2.3.2.4 Σύνοψη

Οι τεχνικές προσαρμοζόμενης δειγματοληψίας είναι πολλά υποσχόμενες διότι είναι γενικής εφαρμογής και ενεργειακά αποδοτικές. Ωστόσο, οι μέχρι τώρα προταθείσες λύσεις περιορίζονται στην αξιοποίηση μόνο ενός είδους συσχέτισης. Μια περισσότερο αποδοτική λύση από ενεργειακής πλευράς θα μπορούσε να συνδυάζει την αξιοποίηση τόσο της χωρικής όσο και της χρονικής συσχέτισης των μετρήσεων. Επίσης, οι τεχνικές προσαρμοζόμενης δειγματοληψίας είναι συνήθως συγκεντρωτικές, λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας των υπολογισμών που απαιτούνται. Από την άλλη πλευρά, οι τεχνικές ιεραρχικής δειγματοληψίας είναι εφικτές μόνο όταν το φυσικό μέγεθος που ενδιαφέρει μπορεί να μετρηθεί με διαφορετικούς τρόπους και κατ' επέκταση με διαφορετικούς αισθητήρες. Αυτού του είδους οι προσεγγίσεις είναι πολύ αποδοτικές ενεργειακά, αλλά είναι πολύ στενά συνδεδεμένες με το είδος της εφαρμογής που εξυπηρετούν. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη το κόστος για την ενσωμάτωση πρόσθετων αισθητήρων στους κόμβους. Τέλος, οι τεχνικές δειγματοληψίας που βασίζονται σε κάποιο μοντέλο περιγραφής του υπό μελέτη φαινομένου παρουσιάζουν τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με τις αντίστοιχες τεχνικές πρόβλεψης δεδομένων. Είναι αρκετά υποσχόμενες τεχνικές, αλλά πρέπει να γίνει βελτίωση προς την κατεύθυνση της αποκεντρωμένης εκτέλεσης των πρωτοκόλλων υπολογισμού του μοντέλου με παράλληλη μείωση της πολυπλοκότητας των πράξεων που απαιτούνται, διατηρώντας όμως ένα επίπεδο ακρίβειας μετρήσεων.

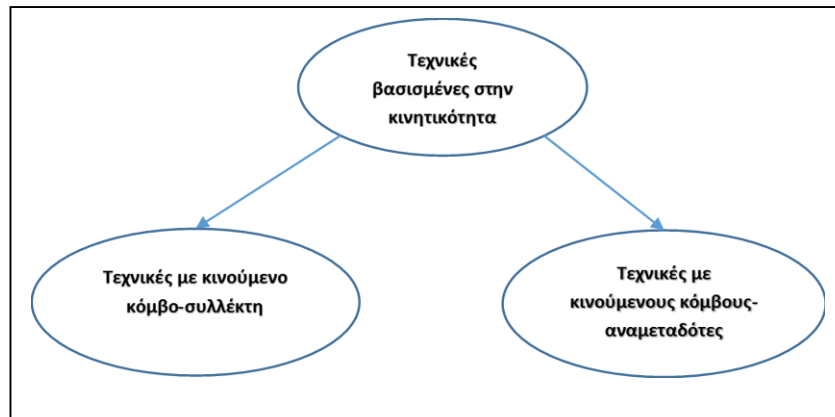
2.4 Προσεγγίσεις βασισμένες στην κινητικότητα

Το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας για τα WSN, ιδιαίτερα στα πρώτα στάδια της έρευνας αυτού του επιστημονικού πεδίου, υποθέτει ότι οι κόμβοι είναι στατικοί και έχουν εγκατασταθεί με μεγάλη πυκνότητα. Έτσι, είναι εφικτή η επικοινωνία μεταξύ οποιωνδήποτε δύο κόμβων, οδηγώντας σε βήμα-προς-βήμα τρόπο δρομολόγησης των πακέτων, από τον αποστολέα μέχρι τον τελικό παραλήπτη. Πρόσφατα, όμως, έχει αρχίσει να εξετάζεται η κινητικότητα ως ένας ενεργειακά αποδοτικός τρόπος συλλογής δεδομένων στα WSN. Η κινητικότητα στους κόμβους-αισθητήρες είναι εφικτή και μπορεί να επιτευχθεί με διαφορετικούς τρόπους. Για παράδειγμα, οι κόμβοι-αισθητήρες μπορούν να εξοπλιστούν με σύστημα κίνησης (mobilizer), ώστε να μπορούν να αλλάζουν τη θέση τους. Βέβαια, καθώς το σύστημα κίνησης είναι πολύ ενεργειακά δαπανηρό, η πρόσδοση κινητικότητας σε όλους τους κόμβους-αισθητήρες ίσως να μην είναι οικονομικά εφικτό. Εξάλλου, η πρόσθετη ενεργειακή κατανάλωση λόγω κινητικότητας μπορεί να είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό όφελος που προσφέρει η κινητικότητα. Συνεπώς, αντί να αποκτήσουν όλοι οι κόμβοι του δικτύου κινητικότητα, αυτή μπορεί να προσδοθεί μόνο σε ειδικούς κόμβους που έχουν μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα από τους κοινούς κόμβους. Στην περίπτωση αυτή, η κινητικότητα αφορά μόνο ετερογενή δίκτυα WSN. Εναλλακτικά, αντί οι κόμβοι-αισθητήρες να εξοπλιστούν με σύστημα κίνησης, μπορούν να τοποθετηθούν πάνω σε κινητά στοιχεία (π.χ πάνω σε ζώα, αυτοκίνητα, κ.τ.λ.). Υπάρχουν δύο απόψεις στο συγκεκριμένο ζήτημα. Η πρώτη άποψη θεωρεί ότι όλοι οι κόμβοι πρέπει να

τοποθετούνται πάνω σε κινητά στοιχεία. Σύμφωνα με τη δεύτερη άποψη, περιορισμένος αριθμός κόμβων τοποθετείται επί κινητών στοιχείων, ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι του δικτύου παραμένουν στατικοί. Και στις δύο περιπτώσεις, δεν υπάρχει πρόσθετη ενεργειακή κατανάλωση λόγω της κινητικότητας. Όμως, το μοντέλο κίνησης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη φάση σχεδιασμού του δικτύου.

Η εισαγωγή κινητικότητας στα WSN αναδεικνύει αρκετά ζητήματα σχετικά με τη συνδεσιμότητα. Αρχικά, κατά τη διάρκεια της σχεδίασης του δικτύου, μια αραιή αρχιτεκτονική μπορεί να θεωρηθεί ως κατάλληλη επιλογή, εφόσον ικανοποιεί τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Στην περίπτωση αυτή, δεν απαιτείται η ανάπτυξη μεγάλου αριθμού κόμβων, καθώς οι περιορισμοί για συνδεσιμότητα είναι χαλαροί, δεδομένου ότι οι κινούμενοι κόμβοι μπορούν να προσεγγίσουν απομονωμένους κόμβους του δικτύου. Επίσης, ένα δίκτυο που έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με μεγάλη πυκνότητα αλλά, λόγω φυσικών εμποδίων ή καταστροφής κόμβων κατά την αρχική εγκατάσταση δεν διαθέτει τελικά τον απαραίτητο αριθμό κόμβων για να επιτελέσει τη λειτουργία του, μπορεί να βοηθηθεί μέσω της χρήσης μη επανδρωμένων μικρών εναέριων οχημάτων, τα οποία λειτουργούν ως συλλέκτες πληροφορίας. Επιπλέον, ένα αρχικώς πλήρως συνδεδεμένο δίκτυο μπορεί να καταλήξει σε ένα σύνολο μη συνδεδεμένων υποδικτύων, λόγω αστοχιών υλικού ή εξάντλησης των ενεργειακών αποθεμάτων κάποιων κόμβων. Στην περίπτωση αυτή, κόμβοι με δυνατότητα μετακίνησης μπορούν να επανασυνδέσουν ολόκληρο το δίκτυο, καθιστώντας το πλήρως λειτουργικό και επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής του.

Η κινητικότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Τα πακέτα που προέρχονται από κόμβους-αισθητήρες διασχίζουν το δίκτυο βήμα-προς-βήμα μέχρι τον τελικό προορισμό τους, τον κόμβο-συλλέκτη. Όταν ο κόμβος-συλλέκτης είναι στατικός, ορισμένες διαδρομές αντιμετωπίζουν μεγαλύτερα φορτία κίνησης, αντίστοιχα με την τοπολογία του δικτύου και του ρυθμούς δειγματοληψίας των κόμβων-αισθητήρων. Στη γενική περίπτωση, όμως, οι κόμβοι που βρίσκονται πλησιέστερα στον κόμβο-συλλέκτη υφίστανται ταχύτερα εξάντληση των ενεργειακών τους αποθεμάτων, ακόμα και όταν εφαρμόζονται τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, η ροή του φορτίου μπορεί να εναλλάσσεται όταν μια κινητή συσκευή είναι υπεύθυνη για τη συλλογή των δεδομένων. Σε ένα τέτοιο σενάριο, οι κανονικοί κόμβοι αναμένουν την κινητή συσκευή να πλησιάσει προς το μέρος τους, οπότε και δρομολογούν πακέτα προς αυτήν, με στόχο η επικοινωνία να διεξάγεται είτε άμεσα είτε εντός περιορισμένου αριθμού βημάτων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι κόμβοι-αισθητήρες εξοικονομούν ενέργεια λόγω μείωσης (i) των σφαλμάτων ζεύξης (ii) της πλεονάζουσας πληροφορίας λόγω επικεφαλίδων και (iii) της συνεχούς προώθησης πακέτων. Επιπλέον, καθώς η κινητή συσκευή επισκέπτεται διαφορετικά σημεία του δικτύου, επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των κόμβων-αισθητήρων. Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν την κινητικότητα για εξοικονόμηση ενέργειας διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, αντίστοιχα με το είδος του κινούμενου στοιχείου. Έτσι, διακρίνονται οι προσεγγίσεις κινούμενου κόμβου-συλλέκτη και οι προσεγγίσεις κινούμενων κόμβων-αναμεταδοτών. Αυτή η ταξινόμηση φαίνεται και στο Σχ. 2.11.



Σχήμα 2.11: Ταξινόμηση των τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας που βασίζονται στην κινητικότητα

2.4.1 Προσεγγίσεις κινητού κόμβου-συλλέκτη

Πολλές προσεγγίσεις που προτείνονται στη βιβλιογραφία σχετικά με τους κινητούς κόμβους-συλλέκτες σε WSN βασίζονται στην εφαρμοσμένη μεθοδολογία του γραμμικού προγραμματισμού προς βελτιστοποίηση παραμέτρων, όπως η διάρκεια ζωής του δικτύου. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το μοντέλο που προτείνεται στο [41], που περιλαμβάνει κινητό κόμβο-συλλέκτη που μπορεί να μετακινηθεί σε περιορισμένο αριθμό θέσεων για να επισκεφθεί ένα συγκεκριμένο κόμβο και να επικοινωνήσει μαζί του. Επίσης, γίνεται η υπόθεση ότι οι κόμβοι είναι οργανωμένοι σε τετραγωνικά πλέγματα εντός της περιοχής ενδιαφέροντος. Κατά τη διάρκεια των επισκέψεων στους κόμβους-αισθητήρες, ο κόμβος-συλλέκτης παραμένει στην ίδια περιοχή επί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι κόμβοι που κάθε φορά βρίσκονται εκτός της εμβέλειας του κόμβου-συλλέκτη αποστέλλουν μηνύματα προς αυτόν σε πολλαπλά βήματα, επιλέγοντας κάθε φορά τη σχετική διαδρομή χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο εύρεσης ελάχιστης διαδρομής δρομολόγησης. Με χρήση του γραμμικού προγραμματισμού βελτιστοποιείται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο παραμένει ο κινητός κόμβος-συλλέκτης σε κάθε περιοχή. Η προκύπτουσα λύση μεγιστοποιεί τη διάρκεια ζωής του δικτύου, ενώ επιτυγχάνει ομοιόμορφη κατανομή ενέργειας, ωστόσο δε λαμβάνει υπόψη της το κόστος μετακίνησης του κόμβου-συλλέκτη. Προσομοιώσεις δείχνουν ότι η προσέγγιση αυτή μπορεί να αυξήσει τη διάρκεια ζωής του δικτύου κατά 5-10 φορές σε σχέση με το ίδιο δίκτυο όταν έχει στατικό κόμβο-συλλέκτη.

Η προαναφερθείσα προσέγγιση έχει το μειονέκτημα ότι είναι συγκεντρωτική, δηλαδή όλοι οι υπολογισμοί γίνονται από τον κόμβο-συλλέκτη. Αντίθετα, το σχήμα GMRE (Greedy Maximum Residual Energy) [42] είναι καταναμημένο. Σύμφωνα με αυτό, ο κινητός κόμβος-συλλέκτης επιλέγει την επόμενη περιοχή λειτουργίας, μεταξύ του συνόλου των εφικτών θέσεων, με κριτήριο τα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων-αισθητήρων περί αυτών. Προκειμένου ο κόμβος-συλλέκτης να λάβει πληροφορίες σχετικά με τα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων-αισθητήρων, για κάθε πιθανή επόμενη θέση του κόμβου-συλλέκτη επιλέγεται ένας κόμβος ως αντιπρόσωπος. Οι κόμβοι-αντιπρόσωποι λαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την ενεργειακή κατάσταση των γειτονικών τους κόμβων-αισθητήρων και απαντούν στα ερωτήματα που τους θέτει

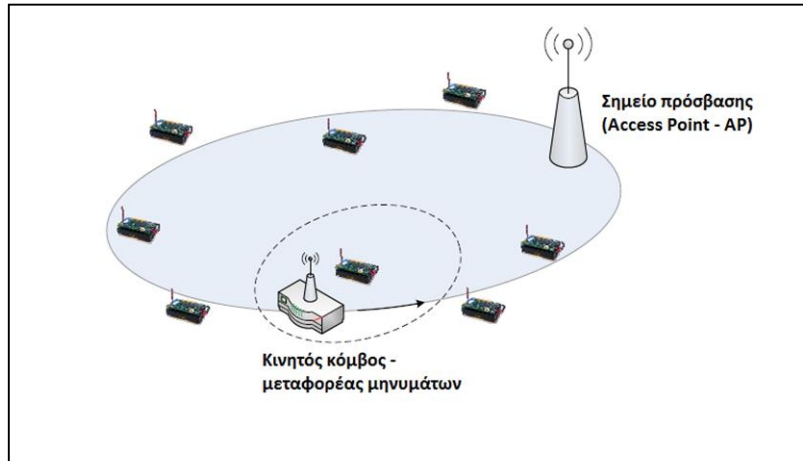
ο κόμβος-συλλέκτης. Με βάση τις απαντήσεις που λαμβάνει, ο κόμβος-συλλέκτης αποφασίζει αν και προς τα πού θα μετακινηθεί.

Μια διαφορετική κατηγορία λύσεων μελετά από κοινού την κινητικότητα και τη δρομολόγηση. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το αναλυτικό μοντέλο που αναπτύσσεται για να χαρακτηρίσει την διάρκεια ζωής του δικτύου [43]. Γίνεται εξ αρχής η υπόθεση ότι οι κόμβοι-αισθητήρες είναι κατανομημένοι σε μια κυκλική περιοχή. Για απλότητα, στην αρχή όλοι οι κόμβοι-αισθητήρες δρομολογούν τα πακέτα τους προς τον κόμβο-συλλέκτη χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο εύρεσης ελάχιστης διαδρομής. Ωστόσο, η στρατηγική δρομολόγησης αναθεωρείται στη συνέχεια, ώστε να εξαχθεί καλύτερο αποτέλεσμα. Η αρχική βέλτιστη στρατηγική δρομολόγησης προκύπτει όταν ο κόμβος-συλλέκτης κινείται κατά μήκος της περιφέρειας της κυκλικής περιοχής ενδιαφέροντος. Στην περίπτωση αυτή, όμως, οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά στην περιφέρεια του κύκλου έχουν μεσολαμβάνουν στην μετάδοση λιγότερης πληροφορίας σε σχέση με τους κόμβους που βρίσκονται προς το κέντρο της περιοχής ενδιαφέροντος. Το ενεργειακό πλεόνασμα των κόμβων της περιφέρειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς περαιτέρω βελτίωση της στρατηγικής δρομολόγησης. Η τελικά βέλτιστη λύση είναι ο κόμβος-συλλέκτης να κινείται σε κυκλική τροχιά με ακτίνα μικρότερη της ακτίνας της κυκλικής περιοχής ενδιαφέροντος. Ο κύκλος που διαγράφει ο κόμβος-συλλέκτης χωρίζει την κυκλική περιοχή ενδιαφέροντος σε δύο χώρους: στον εσωτερικό και τον εξωτερικό. Οι κόμβοι που βρίσκονται στον εσωτερικό χώρο πραγματοποιούν δρομολόγηση με βάση τον αλγόριθμο ελάχιστου μονοπατιού και οι κόμβοι στον εξωτερικό χώρο πραγματοποιούν κυκλική δρομολόγηση.

2.4.2 Προσεγγίσεις κινούμενων κόμβων-αναμεταδοτών

Το μοντέλο κινούμενων κόμβων αναμετάδοσης σε ασύρματα ad hoc δίκτυα έχει ερευνηθεί στο πλαίσιο των ευκαιριακών δικτύων (opportunistic networks) [44]. Μια από τις γνωστότερες προσεγγίσεις δίνεται από το σχήμα μεταφοράς μηνυμάτων [45]. Οι μεταφορείς μηνυμάτων είναι ειδικοί κινητοί κόμβοι που εισάγονται σε ένα αραιό ad hoc δίκτυο για να προσφέρουν την υπηρεσία της αναμετάδοσης μηνυμάτων. Οι μεταφορείς μηνυμάτων κινούνται σε όλη την έκταση του δικτύου και συλλέγουν δεδομένα από τους κόμβους-πηγές. Στη συνέχεια, αποθηκεύουν τα δεδομένα που λαμβάνουν και τα προωθούν στον προορισμό τους. Συνεπώς, οι μεταφορείς μηνυμάτων μπορούν να θεωρηθούν ως οιονεί κινητή υποδομή επικοινωνίας που εξυπηρετεί τη διακίνηση μηνυμάτων σε αραιά ασύρματα δίκτυα.

Ένα παρεμφερές σχήμα, το σύστημα data-MULE [46] προτείνεται ως λύση για αραιά ασύρματα δίκτυα. Το σύστημα data-MULE σχεδιάζεται με αρχιτεκτονική τριών επιπέδων.



Σχήμα 2.12: Αρχιτεκτονική WSN με κινητούς κόμβους-αναμεταδότες

Το χαμηλότερο επίπεδο αποτελείται από κόμβους-αισθητήρες που περιοδικά πραγματοποιούν δειγματοληψία του υπό μελέτη φυσικού μεγέθους. Το μεσαίο επίπεδο αποτελείται από κινητούς κόμβους που ονομάζονται MULE (Mobile Ubiquitous LAN Extensions) και κινούνται εντός της περιοχής ενδιαφέροντος και συλλέγοντας τα δεδομένα που διαθέτουν οι κόμβοι-αισθητήρες. Το ρόλο των κόμβων MULE μπορεί να έχουν άνθρωποι, ζώα, ή ακόμα και οχήματα. Γενικά, οι κόμβοι MULE κινούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους και ανεξάρτητα από τις θέσεις των κόμβων-αισθητήρων, ακολουθώντας μη προγραμματισμένες διαδρομές. Οποτεδήποτε πλησιάσουν ένα κόμβο-αισθητήρα, λαμβάνουν τα δεδομένα που αυτός έχει συλλέξει. Το τρίτο επίπεδο αποτελείται από ένα σύνολο σημείων πρόσβασης (Access Points – APs), που λαμβάνουν πληροφορίες από τους κόμβους MULE. Τα σημεία πρόσβασης είναι συνδεδεμένα με τον κόμβο-συλλέκτη, όπου όλες οι πληροφορίες συγκεντρώνονται, συγχρονίζονται και αποθηκεύονται. Επίσης, εκεί γίνεται αναγνώριση πολλαπλών αντιγράφων και διαχείριση των ερωτημάτων του διαχειριστή συστήματος. Οι κόμβοι-αισθητήρες, οι οποίοι υποτίθενται στατικοί, αναμένουν κάποιο κόμβο MULE να πλησιάσει κοντά τους για να του αποστείλουν δεδομένα. Η επικοινωνία μεταξύ κόμβων-αισθητήρων και κόμβων MULE γίνεται με σήματα μικρής εμβέλειας. Για το λόγο αυτό, χαρακτηρίζεται από μικρή ενεργειακή κατανάλωση. Καθώς κινείται μέσα στο δίκτυο, ο κόμβος MULE κάποια στιγμή περνάει κοντά από κάποιο σημείο πρόσβασης και του μεταδίδει όλα τα δεδομένα που έχει συλλέξει.

Σε ένα άλλο σχετικό μοντέλο λειτουργίας [47], προτείνεται κόμβος-μεταφορέας πακέτων που κινείται κατά μήκος προκαθορισμένης σταθερής διαδρομής. Στην πράξη, η αλλαγή της τροχιάς του κόμβου-μεταφορέα δεν είναι πάντα εφικτή στα δίκτυα αισθητήρων, αφού οι κόμβοι-αισθητήρες είναι συνήθως τοποθετημένοι σε μέρη με εμπόδια, όπου οι κινητοί κόμβοι μπορούν να κινηθούν μόνο κατά συγκεκριμένες διευθύνσεις. Οι κόμβοι-αισθητήρες που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από την τροχιά του κινητού κόμβου αποστέλλουν τα δεδομένα τους απευθείας σε αυτόν, όταν διέλθει από κοντά τους, καταναλώνοντας μικρά ποσά ενέργειας. Οι κόμβοι που βρίσκονται μακριά από την τροχιά του κινητού κόμβου αποστέλλουν τα δεδομένα τους προς κόμβους που βρίσκονται πλησιέστερα στην τροχιά του κινητού κόμβου. Και στην περίπτωση αυτή, όμως, οι κόμβοι-αισθητήρες εξοικονομούν ενέργεια σε σχέση με τα

στατικά δίκτυα αισθητήρων, αφού τα πακέτα τους φθάνουν στον προορισμό τους σε λιγότερα βήματα. Για μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, οι κόμβοι μπορούν να σχηματίσουν συστάδες. Επικεφαλής κάθε συστάδας είναι ο κόμβος που βρίσκεται πλησιέστερα στην τροχιά του κινούμενου κόμβου. Οι κόμβοι-μέλη μιας συστάδας αποστέλλουν τα δεδομένα τους στον επικεφαλής της συστάδας, και εκείνος τα προωθεί στον κινητό κόμβο, όταν ο τελευταίος πλησιάσει. Η επιλογή του επικεφαλής κόμβου μιας συστάδας γίνεται μετά την πρώτη επίσκεψη του κινητού κόμβου, στην οποία δεν συλλέγονται δεδομένα. Καθώς η τροχιά του κινητού κόμβου υποτίθεται σταθερή, μπορεί να προβλεφθεί χρονικά. Ο κινούμενος κόμβος μπορεί να κινείται με σταθερή ταχύτητα, αντίστοιχα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Ωστόσο, καλύτερη επίδοση επιτυγχάνεται όταν ο κινητός κόμβος εναλλάσσεται μεταξύ δύο καταστάσεων: της κίνησης με σταθερή ταχύτητα και της ακινησίας. Συνεπώς, ο κινητός κόμβος κινείται ταχέως σε μέρη με λίγους αισθητήρες και ακινητοποιείται κοντά σε σημεία όπου υπάρχουν επικεφαλής συστάδων και υπάρχει μεγαλύτερη πυκνότητα κόμβων-αισθητήρων. Ο καθορισμός των περιοχών με μεγαλύτερη πυκνότητα γίνεται μετά από κάθε διάσχιση του δικτύου από τον κινούμενο κόμβο.

Λόγω του ότι οι μεταδόσεις που γίνονται σε μικρές αποστάσεις, η αρχιτεκτονική Data-MULE είναι μια ενεργειακά αποδοτική λύση για συγκέντρωση δεδομένων σε αραιά δίκτυα αισθητήρων. Επίσης, εξασφαλίζει επεκτασιμότητα και ευελιξία ως προς το μέγεθος του δικτύου, διότι μπορούν να εισαχθούν περισσότεροι από ένας κινητοί κόμβοι MULE. Από την άλλη πλευρά, η λύση αυτή έχει δύο περιοριστικούς παράγοντες που οφείλονται στην τυχαιότητα της κίνησης του κόμβου ή των κόμβων MULE. Αρχικά, η καθυστέρηση άφιξης των δεδομένων στον κόμβο-συλλέκτη μπορεί να είναι σημαντική, διότι είναι δυνατό να μεσολαβεί μεγάλο χρονικό διάστημα από τη στιγμή όπου ο κόμβος MULE λαμβάνει τις μετρήσεις από τους κόμβους-αισθητήρες μέχρι τη χρονική στιγμή όπου τις παραδίδει σε κάποιο σημείο πρόσβασης. Το δεύτερο μειονέκτημα είναι το ότι οι αισθητήρες πρέπει συνεχώς να αναμένουν την άφιξη του κόμβου MULE και δεν μπορούν να απενεργοποιήσουν τον πομποδέκτη τους, κάτι που οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας.

Η αρχιτεκτονική των συστημάτων που περιγράφηκαν μέχρι το σημείο αυτό υποθέτει ετερογενή δίκτυα που αποτελούνται από κινητούς και στατικούς κόμβους. Υπάρχουν, όμως, και παραδείγματα δικτύων αισθητήρων που τοποθετούνται επί κινητών στοιχείων. Ένα τέτοιο είδος WSN είναι το Zebranet [48], που έχει ως στόχο την παρακολούθηση ζεβρών. Στα ζώα αυτά τοποθετούνται ειδικά κολάρα που φέρουν ενσωματωμένους κόμβους-αισθητήρες, έκαστος των οποίων περιλαμβάνει μια μονάδα GPS και δύο πομποδέκτες. Ο ένας πομποδέκτης χρησιμοποιείται για επικοινωνία μικρών αποστάσεων, όταν για παράδειγμα οι ζέβρες συγκεντρώνονται σε πηγές νερού. Ο δεύτερος πομποδέκτης χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με το σημείο πρόσβασης και με άλλα ζώα που είναι απομακρυσμένα από τα υπόλοιπα. Το σημείο πρόσβασης είναι συνήθως ένα όχημα που διασχίζει την υπό παρακολούθηση περιοχή για να συλλέξει τα δεδομένα. Συνεπώς, όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι κινητοί. Καθώς οι ζέβρες κινούνται, κάποια στιγμή είναι πιθανό να βρεθούν σε κοντινή απόσταση. Στην περίπτωση αυτή, ανταλλάσσουν τα δεδομένα τους. Όταν κάποια ζέβρα βρεθεί εντός της εμβέλειας του σημείου πρόσβασης, του αποστέλλει όλα τα δεδομένα που διαθέτει, δηλαδή τόσο τις δικές της μετρήσεις όσο και τις μετρήσεις που λήφθηκαν από άλλες

ζέβρες με τις οποίες έχει συναντηθεί. Μια πιθανή λύση για την ανταλλαγή δεδομένων, είναι η χρήση ενός απλού πρωτοκόλλου πλημμύρας, ώστε τα διαθέσιμα δεδομένα να προωθούνται σε άλλους κόμβους, αμέσως μόλις ανιχνευθούν. Καίτοι η προσέγγιση αυτή χαρακτηρίζεται από μεγάλο ποσοστό επιτυχίας, ως προς τον όγκο των δεδομένων που συλλέγονται από το σημείο πρόσβασης, οι απαιτήσεις της προσέγγισης αυτής σε εύρος ζώνης, χωρητικότητα μνήμης και ενεργειακά αποθέματα είναι πολύ μεγάλες. Προς εξοικονόμηση ενέργειας προτείνεται ένα πρωτόκολλο συλλογής δεδομένων που βασίζεται στην προϊστορία. Κάθε κόμβος αντιστοιχείται σε κάποιο επίπεδο ιεραρχίας. Το επίπεδο αυτό εκφράζει την πιθανότητα ο κόμβος να είχε μεταδώσει στο παρελθόν επιτυχώς δεδομένα στο σημείο πρόσβασης. Κόμβοι οι οποίοι έχουν πρόσφατα βρεθεί εντός της εμβέλειας του σημείου πρόσβασης είναι πιθανότερο να επιλεγούν σε σχέση με τους υπόλοιπους κόμβους για να προωθήσουν τα μηνύματά τους, είτε άμεσα είτε σε περιορισμένο αριθμό βημάτων, προς το σημείο πρόσβασης. Όταν δύο κόμβοι συναντώνται, ο κόμβος με την υψηλότερη ιεραρχία συγκεντρώνει τα δεδομένα και αναλαμβάνει να τα παραδώσει στο σημείο πρόσβασης. Προσομοιώσεις έχουν δείξει ότι το πρωτόκολλο αυτό είναι ενεργειακά αποδοτικό και έχει μεγάλο ποσοστό επιτυχημένης παράδοσης δεδομένων στο σημείο πρόσβασης.

2.4.3 Σύνοψη

Η πρόσφατη ερευνητική δραστηριότητα στο αντικείμενο των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων με κινητούς συλλέκτες δεδομένων έχει περιγράψει πιθανές λύσεις για την επίτευξη σχεδόν βέλτιστης συλλογής δεδομένων. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμη ζητήματα, τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Ένα από αυτά σχετίζεται με τη χρονική ανακάλυψη του κινούμενου στοιχείου από τον κόμβο-συλλέκτη. Για το λόγο αυτό, απαιτούνται ενεργειακά αποδοτικά σχήματα προς ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης των κόμβων-αισθητήρων, διατηρώντας την πιθανότητα να χαθεί κάποια συνάντηση με τον κινούμενο κόμβο όσο τα δυνατό μικρότερη. Οι περισσότερες σχετικές προτάσεις αφορούν τη χρήση ενός περιοδικού σχήματος αφύπνισης. Ωστόσο, αναμένεται ακόμα καλύτερα αποτελέσματα να προκύπτουν από σχήματα που αξιοποιούν το συγκεκριμένο μοντέλο κίνησης του κινητού κόμβου της εφαρμογής. Ένα δεύτερο πρόβλημα είναι ο καθορισμός ενός ενεργειακά αποδοτικού πρωτοκόλλου ειδικά για επικοινωνία μεταξύ στατικών και κινητών κόμβων. Ένα τέτοιο πρωτόκολλο, το οποίο χαρακτηρίζεται ως ευκαιριακό ALOHA MAC πρωτόκολλο, προτείνεται ως λύση για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με εναέρια οχήματα στο ρόλο των κινητών κόμβων-συλλεκτών [49]. Καίτοι, όπως εξηγήθηκε, υπάρχουν ζητήματα προς αντιμετώπιση, η χρήση κινητικότητας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να αποτελέσει αξιόπιστη και αποδοτική προσέγγιση, ιδιαίτερα για τα WSN με αραϊή αρχιτεκτονική.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που, εκτός άλλων, περιλαμβάνουν υπηρεσίες στρατιωτικής επιτήρησης και υπηρεσίες παρακολούθησης εγκαταστάσεων, φυσικού περιβάλλοντος κ.λπ. Στη γενική περίπτωση, τα WSN δίκτυα περιλαμβάνουν ένα μεγάλο πλήθος κόμβων που έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά και με το Διαδίκτυο μέσω ενός κόμβου-συλλέκτη. Οι WS κόμβοι είτε κατανέμονται τυχαία σε δύσβατους χώρους, όπως ένα πεδίο μάχης ή μια ορεινή περιοχή, είτε εγκαθίστανται σε προκαθορισμένες θέσεις. Οι κόμβοι αυτό-οργανώνονται και σχηματίζουν ένα αυτόνομο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Το δίκτυο αυτό είναι δυνατό να σχεδιαστεί με ιεραρχική δομή, οπότε οι κόμβοι είναι οργανωμένοι κατά συστάδες (clusters), για εκάστη των οποίων ορίζεται ένας επικεφαλής κόμβος (cluster head). Επίσης, στο δίκτυο μπορεί να επιβληθεί επίπεδη ιεραρχία, οπότε η επικοινωνία δύο κόμβων πραγματοποιείται κατά βήματα χρησιμοποιώντας ενδιάμεσους κόμβους ως μεσολαβητές (multi-hop network). Όλοι οι κόμβοι ενός WSN δικτύου έχουν ενσωματωμένους αισθητήρες και πραγματοποιούν περιοδικά μετρήσεις του φυσικού φαινομένου ή φαινομένων που ενδιαφέρουν. Στη συνέχεια, οι κόμβοι επεξεργάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων και τα αποστέλλουν στον κόμβο-συλλέκτη (sink node). Η συχνότητα με την οποία οι κόμβοι πραγματοποιούν μετρήσεις εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής.

Ως συγκέντρωση δεδομένων ορίζεται η συλλογή δεδομένων από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί από διάφορους κόμβους, με τελικό στόχο τη μετάδοσή τους στον κόμβο-συλλέκτη. Καθώς οι κόμβοι διαθέτουν περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα, είναι ενεργειακά ασύμφορο όλοι οι κόμβοι να αποστέλλουν τα αποτελέσματα των μετρήσεών του απευθείας στον κόμβο-συλλέκτη. Στη γενική περίπτωση, επίσης, οι μετρήσεις που προέρχονται από γειτονικούς κόμβους είναι συσχετισμένες μεταξύ τους. Επιπλέον, ο όγκος των δεδομένων που συγκεντρώνεται στον κόμβο-συλλέκτη από μεγάλα WSN δίκτυα είναι τεράστιος, καθιστώντας πολύ δύσκολη την επεξεργασία τους. Για τους λόγους αυτούς, είναι απαραίτητη η χρήση μεθόδων για το συνδυασμό μετρητικών δεδομένων ώστε στον κόμβο-συλλέκτη να αποστέλλεται πληροφορία μικρότερης αλλά αποδεκτής ποιότητας, επιτυγχάνοντας μικρότερο ενεργειακό κόστος και τηλεπικοινωνιακή επιβάρυνση. Αυτό επιτυγχάνεται όταν οι ενδιάμεσοι κόμβοι μειώνουν το πλήθος των πακέτων που αποστέλλουν προς τον κόμβο-συλλέκτη. Η σχετική διαδικασία ονομάζεται *συνάθροιση δεδομένων* (data aggregation) και ορίζεται ως η διαδικασία συγκέντρωσης δεδομένων από πολλαπλούς κόμβους και κατάλληλης επεξεργασίας τους, με στόχο την αποφυγή μετάδοσης περιττών πακέτων και τη μετάδοση συμπυκνωμένης πληροφορίας στον κόμβο-συλλέκτη. Η συνάθροιση δεδομένων επιχειρεί να συγκεντρώσει τα αναγκαία με βάση τις προδιαγραφές δεδομένα από τους κόμβους και να τα παρέχει στον κόμβο-συλλέκτη με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο έχοντας ως κόστος αποδεκτή χρονική καθυστέρηση. Ασφαλώς, η χρονική καθυστέρηση είναι πολύ σημαντική σε εφαρμογές όπου απαιτείται η επεξεργασία μετρήσεων με πολύ μικρή χρονική παλαιότητα. Όμως, είναι κρίσιμη και η εφαρμογή ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων συνάθροισης δεδομένων,

προκειμένου να επιμηκυνθεί η διάρκεια ζωής του WSN δικτύου. Εκτός από το μηχανισμό συνάθροισης δεδομένων, και άλλοι παράγοντες επηρεάζουν την ενεργειακή αποδοτικότητα ενός WSN δικτύου, όπως η δομή του δικτύου και το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Η λειτουργία ενός WSN δικτύου πρέπει να παρατείνεται όσο το δυνατό περισσότερο. Σε ένα ιδανικό σχήμα συνάθροισης δεδομένων, κάθε κόμβος καταναλώνει το ίδιο μέγεθος ενέργειας σε κάθε κύκλο συγκέντρωσης μετρήσεων. Ένας μηχανισμός συνάθροισης δεδομένων είναι ενεργειακά αποδοτικός εφόσον μεγιστοποιεί το χρόνο λειτουργίας του δικτύου. Υποθέτοντας ότι όλοι οι κόμβοι είναι εξίσου σημαντικοί, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η ενεργειακή κατανάλωση σε κάθε κόμβο. Τα μεγέθη με τα οποία καθορίζονται τα κριτήρια επίδοσης των αλγορίθμων συνάθροισης δεδομένων είναι ο χρόνος ζωής του δικτύου, η ακρίβεια των δεδομένων που φθάνουν στον κόμβο-συλλέκτη και η καθυστέρηση που μεσολαβεί από τη χρονική στιγμή που πραγματοποιείται μια μέτρηση μέχρι τη χρονική στιγμή όπου τα σχετικά δεδομένα φθάνουν στον κόμβο-συλλέκτη. Συγκεκριμένα:

1. Ως χρόνος ζωής ενός WSN δικτύου (WSN lifetime) ορίζεται το πλήθος των κύκλων συνάθροισης δεδομένων μέχρι τη χρονική στιγμή όπου προκαθορισμένο ποσοστό, έστω x , των κόμβων τεθεί εκτός λειτουργίας. Το ποσοστό x καθορίζεται από το σχεδιαστή του συστήματος. Βασικός στόχος ενός μηχανισμού συνάθροισης δεδομένων είναι η επεξεργασία και η προώθηση δεδομένων να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει ομοιόμορφη εξάντληση ενεργειακών αποθεμάτων των WSN κόμβων.
2. Ο ορισμός της ακρίβειας δεδομένων εξαρτάται από το είδος της υπηρεσίας για την οποία σχεδιάστηκε το WSN δίκτυο. Για παράδειγμα, μια εφαρμογή προσδιορισμού ενός στόχου απαιτεί μεγαλύτερη ακρίβεια δεδομένων σε σχέση με μια εφαρμογή προσδιορισμού της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.
3. Η καθυστέρηση (latency) ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη συνάθροιση, δρομολόγηση και εκπομπή των δεδομένων. Μπορεί να μετρηθεί ως η μέση τιμή ή η μέγιστη τιμή της διαφοράς μεταξύ των χρονικών στιγμών της λήψης των δεδομένων από τον κόμβο-συλλέκτη και της συλλογής τους από τους αισθητήρες των κόμβων.

Ακολούθως, παρουσιάζονται ορισμένοι αλγόριθμοι συνάθροισης δεδομένων. Αρχικά, αναλύεται η βασική τους λειτουργία και, στη συνέχεια, εξετάζεται η επίδοσή τους σε σύγκριση με συναφείς προσεγγίσεις.

3.2 Πρωτόκολλα συνάθροισης βασισμένα στην αρχιτεκτονική δικτύου

Η αρχιτεκτονική του ασύρματου δικτύου αισθητήρων επηρεάζει δραστικά την επίδοση των διαφορετικών πρωτοκόλλων συνάθροισης δεδομένων.

3.2.1 Επίπεδη αρχιτεκτονική δικτύων

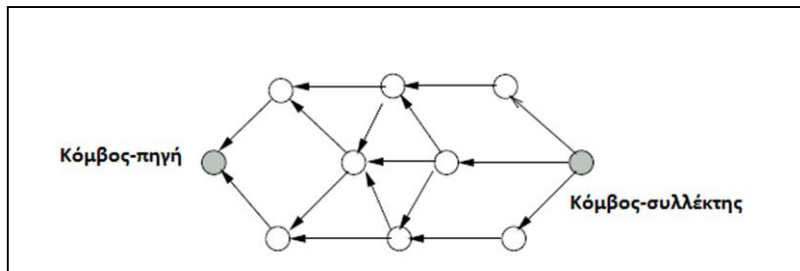
Σε WSN δίκτυα με επίπεδη αρχιτεκτονική όλοι οι κόμβοι επιτελούν τις ίδιες λειτουργίες, συνεργάζονται μεταξύ τους για να επιτελέσουν το έργο τους και αρχικά διαθέτουν τα ίδια ενεργειακά αποθέματα. Λόγω του μεγάλου πλήθους κόμβων που συνήθως υπάρχουν στα WSN δίκτυα, είναι ανέφικτο να δοθεί σε έκαστο εξ αυτών μοναδική ταυτότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθεί δεδομένο-κεντρική (data-centric) δρομολόγηση. Σε αυτό το είδος δρομολόγησης, ο διαχειριστής συστήματος αποστέλλει ερωτήματα προς τους κόμβους-αισθητήρες συγκεκριμένης περιοχής και αναμένει να λάβει ως απάντηση δεδομένα από τους κόμβους αυτούς. Καθώς τα δεδομένα ζητούνται μέσω ερωτημάτων, είναι απαραίτητη η συνοπτική περιγραφή των δεδομένων με βάση κάποιες ιδιότητές τους. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα σημαντικότερα πρωτόκολλα επίπεδης αρχιτεκτονικής και επισημαίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Η οικογένεια πρωτοκόλλων SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation) [51] αποτελεί ένα από τα πρώτα παραδείγματα σχεδίασης πρωτοκόλλων επίπεδης αρχιτεκτονικής. Τα πρωτόκολλα SPIN διαδίδουν όλη την πληροφορία που διαθέτει κάθε κόμβος σε όλους τους κόμβους του WSN, θεωρώντας ότι όλοι οι κόμβοι είναι δυνητικά κόμβοι-συλλέκτες. Αυτό επιτρέπει στο διαχειριστή συστήματος να αποστείλει το δικό του ερώτημα προς οποιονδήποτε κόμβο και να λάβει άμεσα τη ζητούμενη πληροφορία. Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων SPIN είναι η διαπραγμάτευση και η προσαρμοστικότητα πόρων. Οι κόμβοι χρησιμοποιούν ονόματα για περιγράφουν πλήρως τα δεδομένα που συλλέγουν. Τα ονόματα αυτά αποκαλούνται μετα-δεδομένα (meta-data). Η μορφή των μετα-δεδομένων εξαρτάται από την εφαρμογή και δεν προσδιορίζεται από τα πρωτόκολλα SPIN. Για παράδειγμα, οι κόμβοι μπορούν να χρησιμοποιούν τη μοναδική τους ταυτότητα (ID) ως μετα-δεδομένο, εφόσον είναι στατικοί και καλύπτουν συγκεκριμένη περιοχή. Πριν από κάθε αποστολή μηνύματος, οι κόμβοι πραγματοποιούν διαπραγματεύσεις μεταξύ τους σε επίπεδο μετα-δεδομένων, ώστε ο κόμβος-παραλήπτης να διαπιστώσει αν επιθυμεί να λάβει τα περιγραφόμενα δεδομένα από τον κόμβο-αποστολέα. Μέσω της διαπραγμάτευσης αυτής, εξασφαλίζεται ότι δεν θα αποστέλλεται πλεονάζουσα πληροφορία μεταξύ των κόμβων. Στην οικογένεια πρωτοκόλλων SPIN ορίζονται τρία είδη πακέτων - ADV, REQ και DATA - τα οποία χρησιμοποιούν οι WS κόμβοι για την επικοινωνία τους. Όταν ένας κόμβος του δικτύου, έστω A, διεξάγει μετρήσεις και λάβει νέα δεδομένα, τα διαφημίζει αποστέλλοντας προς τους γειτονικούς του κόμβους ένα μήνυμα ADV, στο οποίο συμπεριλαμβάνει τα μετα-δεδομένα της πληροφορίας που συνέλεξε. Στην περίπτωση όπου κάποιος γειτονικός κόμβος του A, έστω B, ενδιαφέρεται για τα διαφημιζόμενα δεδομένα, αποστέλλει μήνυμα REQ προς τον A. Έπειτα, ο A αποστέλλει τα δεδομένα μέσω ενός μηνύματος DATA. Στη συνέχεια, ο κόμβος B διαφημίζει τα δεδομένα που μόλις έλαβε και στους δικούς του γείτονες. Με αυτό το μηχανισμό ολόκληρο το δίκτυο λαμβάνει ένα αντίγραφο των δεδομένων του κόμβου A.

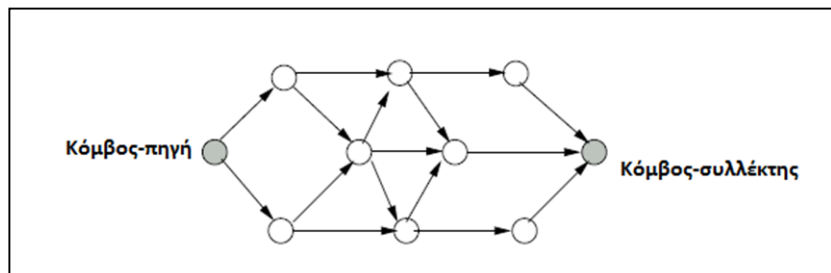
Κάθε κόμβος του WSN δικτύου διαθέτει ένα διαχειριστή πόρων (resource manager) που παρακολουθεί την απομένουσα ενέργειά του. Αν τα ενεργειακά του αποθέματα πέσουν κάτω από ένα κατώφλιο, ο κόμβος μειώνει τη συμμετοχή του στο πρωτόκολλο. Αποτελέσματα προσομοιώσεων δείχνουν ότι το πρωτόκολλο SPIN έχει την ίδια συμπεριφορά με το πρωτόκολλο πλημμύρας όσον αφορά το πλήθος των δεδομένων

που φθάνουν στον κόμβο-συλλέκτη. Ωστόσο, το πρωτόκολλο SPIN παρουσιάζει μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά τον παράγοντα 3.5 και, παράλληλα είναι ικανό να διανεμίει 60% περισσότερα δεδομένα ανά μονάδα ενέργειας σε σύγκριση με την πλημμύρα. Το πρωτόκολλο SPIN είναι κατάλληλο και για περιβάλλον με κινούμενους κόμβους, αφού οι αποφάσεις προώθησης λαμβάνονται με βάση τους τοπικούς γειτονικούς κόμβους. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου SPIN είναι ότι λειτουργεί αποτελεσματικά σε περιβάλλον με συχνές αλλαγές στην τοπολογία, αφού κάθε κόμβος χρειάζεται να γνωρίζει μόνο τους κόμβους-γείτονες με τους οποίους μπορεί να επικοινωνήσει άμεσα (one hop neighbors). Το κύριο μειονέκτημα του πρωτοκόλλου SPIN είναι η αδυναμία του να εγγραφεί την παράδοση δεδομένων. Για παράδειγμα, αν οι κόμβοι που ενδιαφέρονται για τα δεδομένα που διαφημίζει τυχαίος κόμβος είναι απομακρυσμένοι από αυτόν και οι ενδιαμέσοι κόμβοι δεν ενδιαφέρονται για τα δεδομένα αυτά, η πληροφορία δεν θα φθάσει ποτέ στον κόμβο-συλλέκτη.

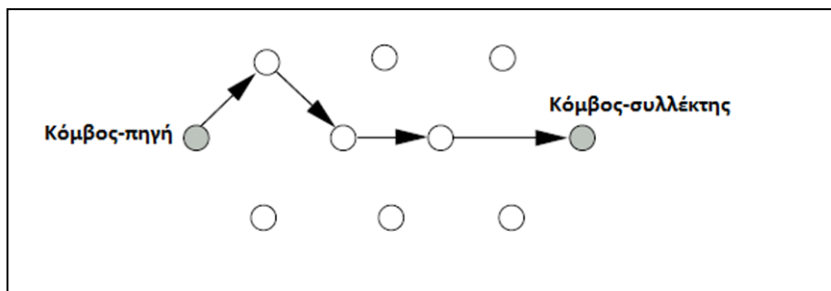
Ένα επίσης δημοφιλές και ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο συνάθροισης δεδομένων είναι Direct Diffusion [53]. Πρόκειται για ένα δεδομένο-κεντρικό πρωτόκολλο, κατάλληλο για εφαρμογές όπου ένας ή λίγοι κόμβοι-συλλέκτες ζητούν συγκεκριμένες πληροφορίες μέσω ερωτημάτων που διανέμονται στους WS κόμβους μέσω του πρωτοκόλλου πλημμύρας. Το πρωτόκολλο Directed Diffusion είναι οργανωμένο σε τρεις φάσεις. Αυτές είναι: i) διάδοση ενδιαφέροντος (interest dissemination), ii) σχηματισμός διαδρομών (gradient setup) και iii) προώθηση δεδομένων κατά μήκος των προτιμητέων διαδρομών (path reinforcement and forwarding). Όταν ο κόμβος-συλλέκτης επιθυμεί να συγκεντρώσει δεδομένα από τους WS κόμβους, αποστέλλει ένα μήνυμα ενδιαφέροντος, στο οποίο περιγράφεται ο τύπος των δεδομένων που ενδιαφέρουν και προσδιορίζεται η κατάσταση στην οποία πρέπει να μεταβούν οι αισθητήρες για τη συλλογή των μετρήσεων. Κάθε κόμβος-αισθητήρας που λαμβάνει μήνυμα ενδιαφέροντος, το αναμεταδίδει προς τους γείτονές του. Επιπλέον, κάθε κόμβος-αισθητήρας σχηματίζει μια διαδρομή, δηλαδή ένα διάνυσμα που περιλαμβάνει τον επόμενο κόμβο προς τον οποίο πρέπει να σταλούν τα δεδομένα που θα συλλεγούν, ώστε να φθάσουν πίσω στον κόμβο-συλλέκτη. Οι τρεις αυτές φάσεις του πρωτοκόλλου απεικονίζονται στα Σχ. 3.10.α, β και γ



Σχήμα 3.1.α: Φάση διάδοσης ενδιαφέροντος στο πρωτόκολλο *Directed Diffusion*



Σχήμα 3.1.β: Φάση σχηματισμού διαδρομών στο πρωτόκολλο *Directed Diffusion*



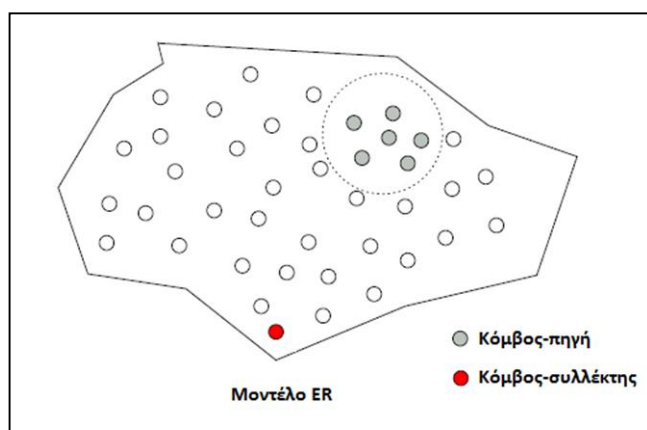
Σχήμα 3.1.γ: Φάση προώθησης δεδομένων κατά μήκος των προτιμητέων διαδρομών στο πρωτόκολλο *Directed Diffusion*

Μετά τη διαδικασία προσδιορισμού των διανυσμάτων από όλους τους κόμβους, μόνο μια διαδρομή είναι προτιμητέα για την αποστολή δεδομένων προς τον κόμβο-συλλέκτη. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή της προτιμητέας διαδρομής μπορεί να βασιστεί σε διάφορα κριτήρια, για παράδειγμα στα ενεργειακά αποθέματα ή στη θέση των WSN κόμβων που την απαρτίζουν. Επίσης, κάθε προτιμητέα διαδρομή, συναρτάται με ένα ερώτημα του κόμβου-συλλέκτη. Σε άλλο ερώτημα η προτιμητέα διαδρομή ενδέχεται να είναι διαφορετική. Η συνάθροιση δεδομένων πραγματοποιείται στους ενδιάμεσους κόμβους, οι οποίοι μπορούν να επεξεργάζονται τα δεδομένα χρησιμοποιώντας κατάλληλες μεθόδους που επιλέγονται με βάση το είδος της εφαρμογής.

Στη βιβλιογραφία έχουν γίνει προσομοιώσεις για τη σύγκριση του πρωτοκόλλου *Directed Diffusion* με ένα σχήμα πολλαπλών μεταδόσεων όπου κάθε κόμβος έχει γνώση του υπόλοιπου δικτύου και αποστέλλει δεδομένα στον κόμβο-συλλέκτη ακολουθώντας τη δρομολόγηση συντομότερου δέντρου (*shortest path multicast tree*).

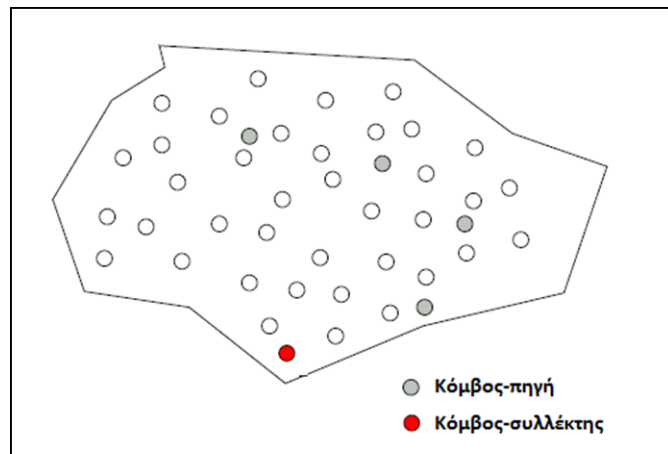
Ως μέτρα σύγκρισης της επίδοσης των πρωτοκόλλων χρησιμοποιήθηκαν η μέση καταναλισκόμενη ενέργεια και η μέση καθυστέρηση. Η μέση καταναλισκόμενη ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας ανά κόμβο προς το πλήθος των διακριτών γεγονότων που παρατηρούνται από τον κόμβο-συλλέκτη, ενώ η μέση καθυστέρηση ορίζεται ως η χρονική διαφορά μεταξύ της αποστολής ενός ερωτήματος και της λήψης των σχετικών δεδομένων. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων δείχνουν ότι το πρωτόκολλο Directed Diffusion έχει σημαντικά υψηλότερη ενεργειακή αποδοτικότητα σε σύγκριση με το σχήμα που χρησιμοποιεί τη δρομολόγηση συντομότερου δένδρου. Μάλιστα, η καταναλισκόμενη ενέργεια του πρωτοκόλλου Directed Diffusion φθάνει μόνο στο 60% της καταναλισκόμενης ενέργειας του υπό σύγκριση σχήματος λειτουργίας. Αντίθετα, η μέση καθυστέρηση είναι συγκρίσιμη στα δύο προαναφερθέντα πρωτόκολλα λειτουργίας.

Όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα, η επίδοση του πρωτοκόλλου Directed Diffusion επηρεάζεται από παράγοντες όπως η σχετική θέση των κόμβων-πηγών και του κόμβου-συλλέκτη και η πυκνότητα του WSN δικτύου. Για τη μελέτη των παραγόντων αυτών έχουν μελετηθεί δύο μοντέλα, το μοντέλο ER και το μοντέλο RS. Στο μοντέλο ER (Event Radius) θεωρείται ότι σε συγκεκριμένο σημείο του WSN δικτύου εντοπίζεται ένα γεγονός. Τότε, όλοι οι κόμβοι σε απόσταση S από το σημείο αυτό χαρακτηρίζονται ως κόμβοι-πηγές. Μια σχηματική περιγραφή του μοντέλου αυτού φαίνεται στο Σχ. 3.2.



Σχήμα 3.2: Μοντέλο ER στο πρωτόκολλο Directed Diffusion

Στο μοντέλο RS επιλέγονται τυχαία k το πλήθος WS κόμβοι ως κόμβοι-πηγές. Αντίθετα από το μοντέλο ER, στο μοντέλο RS οι κόμβοι-πηγές δεν βρίσκονται κατ' ανάγκη σε κοντινή απόσταση. Το μοντέλο RS απεικονίζεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 : Μοντέλο RS στο πρωτόκολλο Directed Diffusion

Κάθε μοντέλο λειτουργίας έχει διαφορετικές επιδόσεις ενεργειακής αποδοτικότητας που εξαρτώνται από το είδος της εξυπηρετούμενης εφαρμογής. Γενικότερα, όμως, το πρωτόκολλο Directed Diffusion αποτελεί κατάλληλη επιλογή για εφαρμογές με πολλές πηγές δεδομένων και λίγους κόμβους-συλλέκτες. Ωστόσο, δεν προτείνεται για εφαρμογές παρατήρησης που απαιτούν συνεχή παράδοση δεδομένων στον κόμβο-συλλέκτη.

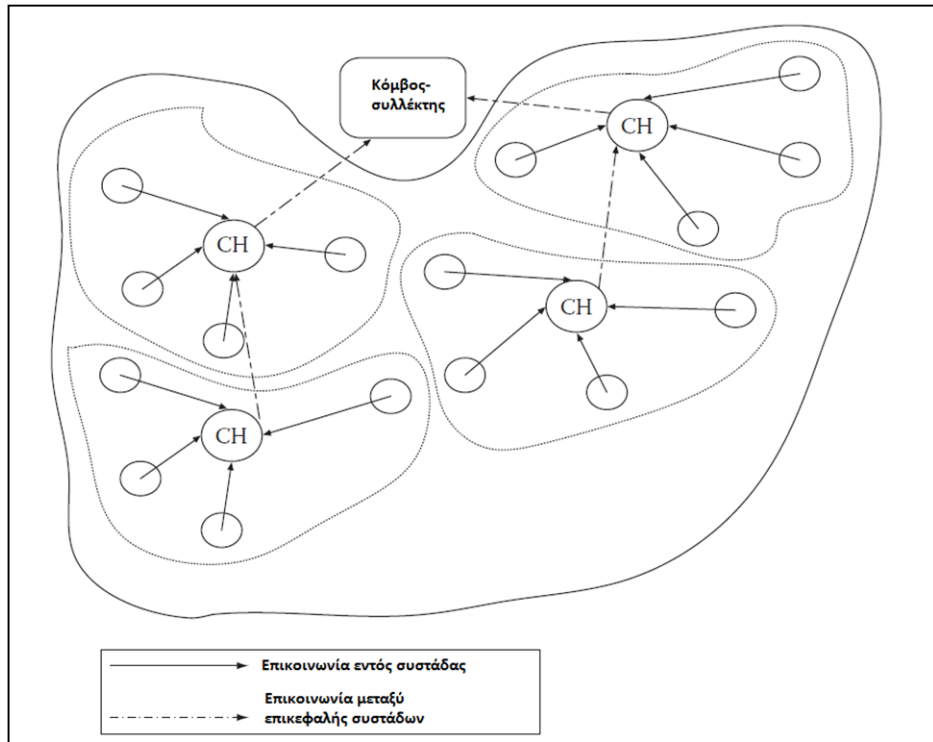
3.2.2 Ιεραρχική αρχιτεκτονική δικτύων

Η επίπεδη αρχιτεκτονική δικτύου μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική τηλεπικοινωνιακή και υπολογιστική επιβάρυνση των WSN κόμβων, οδηγώντας σε ταχύτερη εξάντληση των ενεργειακών τους αποθεμάτων και σταδιακά στην κατάρρευση του δικτύου. Επομένως, από πλευράς επεκτασιμότητας και ενεργειακής αποδοτικότητας είναι καθοριστικής σημασίας η εφαρμογή ιεραρχικών προσεγγίσεων για συνάθροιση δεδομένων. Η ιεραρχική συνάθροιση δεδομένων περιλαμβάνει συγχώνευση δεδομένων σε ειδικούς κόμβους, με στόχο τη μείωση του πλήθους των μηνυμάτων που μεταδίδονται στον κόμβο-συλλέκτη και τη συνεπακόλουθη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του WSN δικτύου. Στη συνέχεια περιγράφονται τα σημαντικότερα πρωτόκολλα ιεραρχικής συνάθροισης δεδομένων.

3.2.2.1 Συνάθροιση δεδομένων σε δίκτυα που οργανώνονται κατά συστάδες

Σε ενεργειακά περιορισμένα δίκτυα αισθητήρων μεγάλου μεγέθους, είναι ενεργειακά αναποτελεσματικό οι κόμβοι να αποστέλλουν τα δεδομένα τους απευθείας στον κόμβο-συλλέκτη. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι κόμβοι μπορούν να αποστείλουν τα δεδομένα τους σε κάποιο τοπικό συναθροιστή (local aggregator) ή στον επικεφαλής της συστάδας (cluster head) που συναθροίζει δεδομένα από όλους τους κόμβους που ανήκουν στη συστάδα. Κατά περίπτωση, ο τοπικός συναθροιστής ή ο επικεφαλής της συστάδας προωθεί το αποτέλεσμα της διαδικασίας συνάθροισης προς τον κόμβο-συλλέκτη. Αυτό οδηγεί σε σημαντική ενεργειακή εξοικονόμηση για τους ενεργειακά

περιορισμένους κόμβους. Οι επικεφαλής των συστάδων μπορούν να επικοινωνούν με τον κόμβο-συλλέκτη είτε απευθείας είτε σχηματίζοντας ένα δίκτυο μεταξύ τους και πραγματοποιώντας επικοινωνία κατά βήματα (multi-hop network).



Σχήμα 3.4: Μοντέλο επικοινωνίας σε WSN δίκτυα οργανωμένα κατά συστάδες

Ένα από τα σημαντικότερα πρωτόκολλα συνάθροισης ιεραρχικής αρχιτεκτονικής είναι το πρωτόκολλο LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [54]. Το πρωτόκολλο LEACH βασίζεται στο σχηματισμό συστάδων αξιοποιώντας προς τούτο καταναμημένο μηχανισμό. Αρχικά, το LEACH επιλέγει τυχαία μερικούς κόμβους ως επικεφαλής συστάδας. Με την παρέλευση του χρόνου, οι κόμβοι-επικεφαλής εναλλάσσονται προκειμένου να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή της κατανάλωσης ισχύος μεταξύ των κόμβων του WSN δικτύου. Οι επικεφαλής συστάδας συγκεντρώνουν τα δεδομένα που προέρχονται από τους κόμβους-αισθητήρες που ανήκουν στη συστάδα, τα συναθροίζουν χρησιμοποιώντας μια προκαθορισμένη συνάρτηση συνάθροισης και έπειτα τα προωθούν προς τον κόμβο-συλλέκτη. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μειώνεται το πλήθος των πακέτων που αποστέλλονται προς τον κόμβο-συλλέκτη και εξοικονομείται ενέργεια. Το πρωτόκολλο LEACH χρησιμοποιεί ένα σχήμα TDMA/CDMA MAC για να μειώσει τις συγκρούσεις πακέτων μεταξύ των κόμβων εντός και εκτός των συστάδων. Καθώς η συλλογή δεδομένων πραγματοποιείται συγκεντρωτικά και γίνεται περιοδικά, το πρωτόκολλο αυτό είναι κατάλληλο για εφαρμογές παρατήρησης.

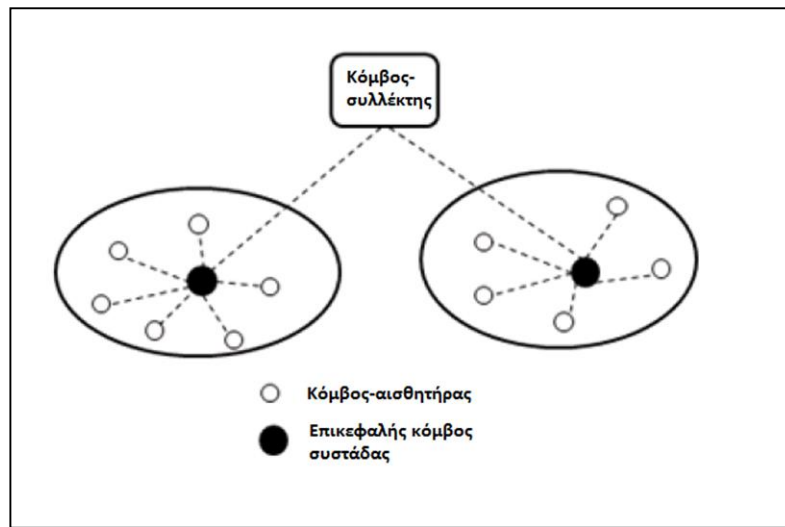
Η λειτουργία του πρωτοκόλλου LEACH χωρίζεται σε δύο φάσεις: τη φάση εγκατάστασης και τη φάση μόνιμης κατάστασης λειτουργίας. Στη φάση εγκατάστασης, οι κόμβοι οργανώνονται κατά συστάδες και για εκάστη εξ αυτών επιλέγεται ένας

κόμβος ως επικεφαλής. Συγκεκριμένα, ένα προκαθορισμένο ποσοστό κόμβων, έστω p , εκλέγονται ως επικεφαλής κάποιας συστάδας ως εξής. Κάθε κόμβος-αισθητήρας που δεν έχει εκλεγεί πρόσφατα ως επικεφαλής συστάδας επιλέγει κάποιο τυχαίο αριθμό, έστω r , στο διάστημα $(0,1)$. Αν ο αριθμός r είναι μικρότερος από ένα κατώφλιο, έστω $T(n)$, ο κόμβος γίνεται επικεφαλής συστάδας για τον τρέχοντα κύκλο λειτουργίας. Η τιμή του κατωφλίου $T(n)$ υπολογίζεται με βάση τη σχέση

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p*(r \bmod (1/f))} & , i \in G \\ 0 & , \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.1)$$

όπου G είναι το σύνολο των κόμβων που δεν έχουν εκλεγεί ως επικεφαλής κόμβοι στους τελευταίους $(1/p)$ κύκλους λειτουργίας. Κάθε κόμβος που εκλέγεται ως επικεφαλής συστάδας ενημερώνει τους υπόλοιπους κόμβους, περί της εκλογής του. Κάθε κόμβος που δεν έχει αναλάβει ρόλο επικεφαλής συστάδας, μόλις λάβει κάποιο μήνυμα ενημέρωσης αποφασίζει σε ποια συστάδα θα συμμετάσχει, με κριτήριο από ποιον κόμβο έλαβε το σήμα με τη μεγαλύτερη ένταση. Αφού αποφασίσει, αποστέλλει μήνυμα προς τον αντίστοιχο επικεφαλής κόμβο ώστε να τον ενημερώσει για την ένταξή του στη συστάδα. Τελικά και έχοντας λάβει μηνύματα από όλους τους κόμβους της συστάδας, ο επικεφαλής κόμβος διαμορφώνει ένα TDMA σχήμα και εκχωρεί μια χρονοσχιμή σε κάθε κόμβου-μέλος της συστάδας του, ενημερώνοντας σχετικά. Κατά τη διάρκεια της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας του πρωτοκόλλου LEACH, οι κόμβοι-αισθητήρες πραγματοποιούν μετρήσεις και αποστέλλουν τα δεδομένα στον επικεφαλής κόμβο της συστάδας όπου ανήκουν. Ο επικεφαλής κόμβος συναθροίζει τα δεδομένα που λαμβάνει και τα αποστέλλει στον κόμβο-συλλέκτη. Μετά την παρέλευση ενός προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος, το πρωτόκολλο μεταβαίνει στη φάση εγκατάστασης οπότε γίνεται εκ νέου επιλογή των επικεφαλής κόμβων. Για την επικοινωνία εντός της έκτασής της, κάθε συστάδα χρησιμοποιεί διαφορετικούς κώδικες CDMA από γειτονικές συστάδες, με στόχο να μειωθούν οι παρεμβολές. Καίτοι το πρωτόκολλο LEACH είναι ικανό να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του WSN δικτύου, προκύπτουν μερικά ζητήματα σχετικά με τις υποθέσεις που υιοθετούνται από αυτό. Αρχικά, το LEACH υποθέτει ότι όλοι οι κόμβοι έχουν την απαιτούμενη ισχύ ώστε να μπορούν να μεταδίδουν δεδομένα απευθείας στον κόμβο-συλλέκτη, κάτι που πολλές φορές είναι ανέφικτο για WSN που εκτείνονται σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Γίνεται, επίσης, η υπόθεση ότι οι κόμβοι-αισθητήρες έχουν συνεχώς δεδομένα προς αποστολή και ότι γειτονικοί κόμβοι έχουν συσχετισμένα δεδομένα. Επιπλέον, δεν είναι βέβαιο ότι το πλήθος των προκαθορισμένων επικεφαλής κόμβων πρόκειται να κατανεμηθεί ομοιόμορφα στο δίκτυο. Επομένως, υπάρχει ενδεχόμενο οι επικεφαλής συστάδων να βρεθούν συγκεντρωμένοι σε ένα τμήμα του δικτύου. Η ιδέα της δυναμικής οργάνωσης σε συστάδες επιφέρει, επίσης, μεγάλο όγκο διαχειριστικών μηνυμάτων, κάτι που αυξάνει την ενεργειακή κατανάλωση. Έχει προταθεί μια επέκταση του πρωτοκόλλου LEACH που περιλαμβάνει διαπραγμάτευση και έχει μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα. Βασική ιδέα είναι ότι, πριν γίνει κάποια μετάδοση εντός κάθε συστάδας, γίνεται σχετική διαπραγμάτευση μεταξύ του κόμβου-αποστολέα και του επικεφαλής κόμβου χρησιμοποιώντας μια περιγραφή των προς αποστολή δεδομένων, ώστε να διαπιστωθεί αν τα δεδομένα αυτά θα προσθέσουν νέα πληροφορία σε σχέση με τα ήδη υπάρχοντα. Με τη διαδικασία αυτή εξασφαλίζεται ότι

δεν θα αποστέλλεται περιττή πληροφορία, κάτι που οδηγεί σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.



Σχήμα 3.5: Μοντέλο επικοινωνίας WSN δικτύου στο πρωτόκολλο LEACH

Ένα δεύτερο πρωτόκολλο συνάθροισης δεδομένων σε WSN δίκτυα οργανωμένα κατά συστάδες είναι το πρωτόκολλο HEED (Hybrid Energy Efficient Distributed clustering Protocol) [55]. Βασικός στόχος του πρωτοκόλλου HEED είναι η επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Για το λόγο αυτό, η επιλογή των επικεφαλής κόμβων κάθε συστάδας βασίζεται κατά κύριο λόγο στα υπολειπόμενα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων. Τα αποθέματα εκτιμώνται προσεγγιστικά, δεδομένου ότι η ενεργειακή κατανάλωση ανά bit για διεξαγωγή μετρήσεων, επεξεργασία και επικοινωνία είναι γνωστή. Προς αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας ως δεύτερη παράμετρος για το σχηματισμό συστάδων λαμβάνεται το επικοινωνιακό κόστος εντός κάθε συστάδας. Η παράμετρος αυτή λαμβάνεται υπόψη στην περίπτωση όπου κάποιος κόμβος-αισθητήρας πρέπει να επιλέξει ανάμεσα σε δύο ή περισσότερες συστάδες. Αναλυτικά, καθώς πολλοί κόμβοι-αισθητήρες διαθέτουν πολλαπλά επίπεδα ισχύος εκπομπής, αποτελεί συνήθη πρακτική να χρησιμοποιούνται τα χαμηλότερα επίπεδα ισχύος για την επικοινωνία εντός κάθε συστάδας και τα υψηλότερα επίπεδα ισχύος να χρησιμοποιούνται από τους επικεφαλής συστάδων για τη μεταξύ τους επικοινωνία και την επικοινωνία με τον κόμβο-συλλέκτη. Το επίπεδο ισχύος που χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή μηνυμάτων εντός κάθε συστάδας καθορίζει το μέγεθός της και επηρεάζει το συνολικό πλήθος συστάδων που θα δημιουργηθούν στο δίκτυο. Στην περίπτωση όπου, κατά το σχηματισμό συστάδων, κάποιος κόμβος βρεθεί εντός της εμβέλειας δύο ή περισσότερων συστάδων, τότε πρέπει να αποφασίσει σε ποια συστάδα θα ενταχθεί βασιζόμενος στην παράμετρο του επικοινωνιακού κόστους.

Το επικοινωνιακό κόστος εξαρτάται από δύο μεταβλητές: i) το μέγεθος της συστάδας και ii) από την ύπαρξη ή μη πολλαπλών επιπέδων ισχύος στους κόμβους-αισθητήρες.

- Στην περίπτωση όπου ορίζεται μοναδικό επίπεδο ισχύος για την επικοινωνία εντός κάθε συστάδας, το επικοινωνιακό κόστος είναι είτε ανάλογο με το βαθμό του επικεφαλής-κόμβου, εφόσον απαιτείται ομοιόμορφη κατανομή

επικοινωνιακής κίνησης μεταξύ των επικεφαλής-κόμβων, είτε αντιστρόφως ανάλογο προς το βαθμό του επικεφαλής-κόμβου, εφόσον απαιτείται ο σχηματισμός πυκνών συστάδων. Ως βαθμός ενός κόμβου ορίζεται το πλήθος των γειτονικών κόμβων με τους οποίους μπορεί να επικοινωνήσει άμεσα. Συμπερασματικά, όταν καλείται να αποφασίσει σε ποια συστάδα να ενταχθεί, κάποιος κόμβος εντάσσεται είτε στη συστάδα της οποίας ο επικεφαλής έχει τον ελάχιστο βαθμό, όταν το ζητούμενο είναι η ισοκατανομή επικοινωνιακής κίνησης μεταξύ των κόμβων είτε στη συστάδα της οποίας ο επικεφαλής έχει το μέγιστο βαθμό, όταν το ζητούμενο είναι η δημιουργία πυκνών συστάδων.

- Στην περίπτωση όπου κάθε κόμβος-αισθητήρας έχει πολλαπλά επίπεδα ισχύος, υπολογίζεται η μέση ελάχιστη ισχύς προσβασιμότητας (Average Minimum Reachability Power – AMPR). Η AMPR ορίζεται ως το άθροισμα των ελάχιστων επιπέδων ισχύος που απαιτούνται από όλους τους κόμβους της συστάδας, προκειμένου να επικοινωνήσουν με τον επικεφαλής της συστάδας. Συμβολικά ισχύει ότι:

$$AMPR = \frac{\sum_{i=1}^M MinPower_i}{M} \quad (3.2)$$

όπου M είναι ο αριθμός των κόμβων-μελών της συστάδας. Η AMPR αποτελεί μέτρο εκτίμησης της ενεργειακής κατανάλωσης για επικοινωνία, αν ο κόμβος αυτός εκλεγεί επικεφαλής της συστάδας αυτής. Η χρήση της AMPR ως κριτήριο επιλογής συστάδας υπερτερεί σε σχέση με την επιλογή συστάδας με βάση την απόσταση του κόμβου από τον επικεφαλής της συστάδας.

Το πρωτόκολλο HEED εναλλάσσει τους επικεφαλής συστάδων περιοδικά. Στην αρχή κάθε διαδικασίας επιλογής επικεφαλής συστάδων, όλοι οι κόμβοι ορίζουν την πιθανότητα επιλογής τους, έστω CH_{prob} με βάση τη σχέση:

$$CH_{prob} = C_{prob} * \frac{E_{residual}}{E_{max}} \quad (3.3)$$

όπου το C_{prob} υποδηλώνει το αρχικό ποσοστό των κόμβων των δικτύου που είναι επιθυμητό να γίνουν επικεφαλής συστάδας. Το ποσοστό αυτό χρησιμοποιείται για να περιορίσει τις αρχικές επικοινωνίες μεταξύ των κόμβων και δεν επηρεάζει τον τελικό αριθμό συστάδων που θα δημιουργηθούν. Η μεταβλητή $E_{residual}$ είναι η εκτίμηση της εναπομένουσας ενέργειας του κόμβου και η παράμετρος E_{max} δηλώνει τα αρχικά ενεργειακά αποθέματα του κόμβου. Με τον τρόπο που είναι δομημένος ο αλγόριθμος επιλογής των επικεφαλής συστάδων, είναι σε θέση να χειριστεί και ετερογενή δίκτυα, στα οποία κάθε κόμβος θα χαρακτηρίζεται από διαφορετικά αρχικά ενεργειακά αποθέματα. Κάθε κόμβος αποστέλλει μήνυμα όπου η κατάσταση επιλογής του ως επικεφαλής συστάδας χαρακτηρίζεται ως πιθανή, αν η πιθανότητα CH_{prob} είναι μικρότερη της μονάδας, και ως οριστική αν είναι ίση με τη μονάδα. Αν ο κόμβος αυτός δεν επιλεγεί ως επικεφαλής συστάδας, εντάσσεται στη συστάδα που έχει το μικρότερο κόστος από τις ήδη υπάρχουσες. Στη συνέχεια, αλλάζει την πιθανότητα επιλογής του ως επικεφαλής συστάδας για την επόμενη φορά που θα επαναληφθεί η διαδικασία, σύμφωνα με τη σχέση

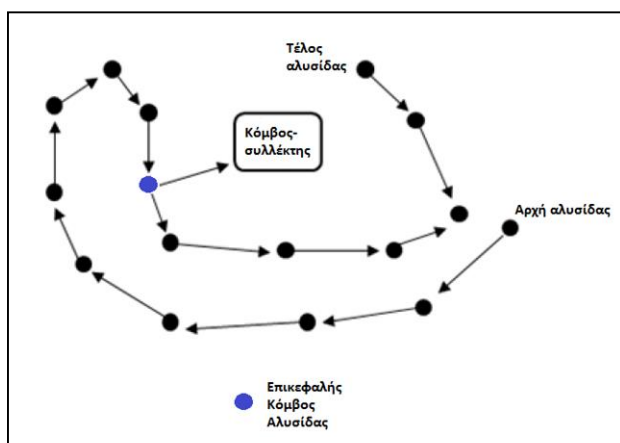
$$CH_{prob,n+1} = \min(2 * CH_{prob}, 1) \quad (3.4)$$

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι κάθε κόμβος να έχει οριστεί ως επικεφαλής συμπλέγματος. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η επικοινωνία μεταξύ των επικεφαλής συστάδων δεν εξετάζεται από το πρωτόκολλο HEED. Συνοψίζοντας, το πρωτόκολλο HEED επιτυγχάνει παράταση της διάρκειας ζωής σε σχέση με άλλα παρεμφερή πρωτόκολλα. Αυτό οφείλεται στον τρόπο επιλογής των επικεφαλής-κόμβων, οι οποίοι, όπως προκύπτει από προσομοιώσεις, είναι κατάλληλα γεωγραφικά κατανομημένοι, ώστε να εξασφαλίζεται ελάχιστο κόστος επικοινωνίας.

Ένα ακόμα σημαντικό πρωτόκολλο συνάθροισης δεδομένων σε WSN οργανωμένα κατά συστάδες είναι και το πρωτόκολλο COUGAR [56]. Μάλιστα, το πρωτόκολλο αυτό είναι κατάλληλο για εφαρμογές παρακολούθησης, όπου οι κόμβοι πραγματοποιούν μετρήσεις περιοδικά. Το πρωτόκολλο COUGAR μπορεί να ενταχθεί στην κατηγορία πρωτοκόλλων που εφαρμόζουν συνάθροιση περιοδικά και ανά βήμα επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων (periodic per hop aggregation). Όπως και τα άλλα σχετικά πρωτόκολλα, το πρωτόκολλο COUGAR αρχικά οργανώνει το δίκτυο κατά συστάδες και, στη συνέχεια, οι κόμβοι αποστέλλουν δεδομένα στον επικεφαλής κόμβο της συστάδας όπου ανήκουν. Οι επικεφαλής-κόμβοι, μόλις λάβουν δεδομένα από όλους τους κόμβους, τα συναθροίζουν και τα αποστέλλουν προς τον κόμβο-συλλέκτη. Ωστόσο, η διαφορά του COUGAR σε σχέση με άλλα πρωτόκολλα έγκειται στον τρόπο με τον οποίο σχηματίζονται οι συστάδες. Για παράδειγμα, στο πρωτόκολλο LEACH, οι κόμβοι επιλέγουν σε ποια συστάδα θα ενταχθούν με βάση την ισχύ των σημάτων που λαμβάνουν από τους επικεφαλής κάθε συστάδας. Όμως, για την επιλογή αυτή, στο πρωτόκολλο COUGAR μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πρόσθετα κριτήρια. Επομένως, είναι ενδεχόμενο ένας κόμβος να απέχει δύο ή και περισσότερα βήματα από τον επικεφαλής της συστάδας που ανήκει. Για το λόγο αυτό, στην επικοινωνία εντός κάθε συστάδας χρησιμοποιείται η τεχνική AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector), η οποία αποφεύγει την παραγωγή πολλαπλών αντιγράφων του ίδιου πακέτου, καθιστώντας εφικτές τις υλοποιήσεις συναρτήσεων που είναι ευαίσθητες σε αντίγραφα πακέτων. Στον πυρήνα του αλγορίθμου COUGAR βρίσκεται ο μηχανισμός συγχρονισμού των κόμβων, ο οποίος εξασφαλίζει την ορθή λειτουργία του πρωτοκόλλου. Κάθε επικεφαλής συστάδας διαθέτει κατάλογο με τους κόμβους από τους οποίους αναμένει να λάβει δεδομένα. Μάλιστα, ο κατάλογος αυτός ανανεώνεται κάθε φορά όπου ο επικεφαλής-κόμβος λαμβάνει δεδομένα από κάποιο κόμβο εντός συστάδας. Ο επικεφαλής-κόμβος δεν συναθροίζει και προωθεί τα δεδομένα που διαθέτει, πριν παρέλθει μια χρονική διάρκεια, η οποία υπολογίζεται προσεγγιστικά, με βάση ένα σχετικό μηχανισμό. Επίσης, κάθε κόμβος-μέλος της συστάδας, μπορεί να ειδοποιεί τον επικεφαλής της συστάδας ώστε να είναι περισσότερο ακριβής ο υπολογισμός της χρονικής διάρκειας αναμονής. Τέλος, για την αντιμετώπιση εσφαλμένων εκτιμήσεων χρησιμοποιούνται τεχνικές υπαναχώρησης (back-off techniques) και τεχνικές λήξης χρόνου (timeouts).

3.2.2.2 Συνάθροιση δεδομένων σε δίκτυα που οργανώνονται κατά αλυσίδες

Η βασική ιδέα για τη συνάθροιση δεδομένων σε δίκτυα οργανωμένα κατά αλυσίδες είναι ότι κάθε κόμβος μεταδίδει μόνο προς τον εγγύτερο γειτονικό του κόμβο. Ένα πρωτόκολλο που υλοποιεί αυτήν την ιδέα είναι το πρωτόκολλο PEGASIS (Power Efficient data GAttering protocol for Sensor Information Systems) [57], σύμφωνα με το οποίο οι κόμβοι οργανώνονται σε μια γραμμική αλυσίδα για συνάθροιση δεδομένων. Ο σχηματισμός της αλυσίδας μπορεί να γίνει είτε κεντρικά, με τον κόμβο-συλλέκτη να εκτελεί έναν σχετικό αλγόριθμο, είτε καταναμημένα, εφαρμόζοντας σε όλους τους WS κόμβους έναν άπληστο αλγόριθμο (greedy algorithm). Σε κάθε περίπτωση, όμως, είναι απαραίτητη η γνώση της τοπολογίας ολόκληρου του WSN δικτύου από κάθε κόμβο. Πρέπει να σημειωθεί, επίσης, ότι για την ορθή λειτουργία του πρωτοκόλλου, κάθε κόμβος του WSN δικτύου πρέπει να μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με τον κόμβο-συλλέκτη. Η διαδικασία σχηματισμού της αλυσίδας εκκινεί από τον πλέον απομακρυσμένο κόμβο του δικτύου σε σχέση με τον κόμβο-συλλέκτη. Στη συνέχεια, ο κοντινότερος γείτονας των κόμβων που περιέχονται ήδη στην αλυσίδα επιλέγεται για να ενταχθεί σε αυτή και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ενσωματωθούν όλοι οι κόμβοι του δικτύου. Ο επικεφαλής της αλυσίδας αλλάζει μετά από το πέρας κάθε κύκλου συνάθροισης δεδομένων, σύμφωνα με τον ακόλουθο κανόνα: ο κόμβος i επιλέγεται ως επικεφαλής της αλυσίδας μετά από i κύκλους. Σε κάθε κύκλο συγκέντρωσης δεδομένων, ένας κόμβος λαμβάνει δεδομένα από τον προηγούμενο κόμβο της αλυσίδας, συναθροίζει τα δεδομένα που λαμβάνει με τα δικά του και, στη συνέχεια, αποστέλλει ένα μήνυμα ίσου μεγέθους με εκείνο που έλαβε, που περιλαμβάνει το αποτέλεσμα της συνάθροισης δεδομένων, στον επόμενο κόμβο της αλυσίδας. Μετά από πεπερασμένο αριθμό βημάτων, ο επικεφαλής της αλυσίδας, που έχει παρεμφερή ρόλο με τον επικεφαλής συστάδας λαμβάνει συναθροισμένα δεδομένα από όλους τους κόμβους της αλυσίδας και, στη συνέχεια, τα αποστέλλει στον κόμβο-συλλέκτη, όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.6.



Σχήμα 3.6: Μοντέλο επικοινωνίας στο πρωτόκολλο PEGASIS

Η προσέγγιση που περιγράφηκε για τη δημιουργία της αλυσίδας μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ορισμένοι κόμβοι να έχουν σχετικά απομακρυσμένους γείτονες κατά μήκος της αλυσίδας. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται μη επιτρέποντας σε απομακρυσμένους κόμβους να γίνουν επικεφαλής της αλυσίδας, διότι διαφορετικά οι κόμβοι αυτοί θα καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας, με επακόλουθο τα ενεργειακά τους αποθέματα να εξαντλούνται ταχέως. Το πρωτόκολλο PEGASIS προσφέρει

σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας συγκρινόμενο με το πρωτόκολλο LEACH. Αυτό οφείλεται στις μικρότερες αποστάσεις μετάδοσης που μεσολαβούν μεταξύ των κόμβων και του επικεφαλής μιας αλυσίδας σε σχέση με τις αποστάσεις μεταξύ κόμβων και επικεφαλής συμπλέγματος στο πρωτόκολλο LEACH. Επίσης, ο επικεφαλής της αλυσίδας λαμβάνει κατά μέγιστο δύο πακέτα από τους δύο γειτονικούς του κόμβους. Αντίθετα, ο επικεφαλής συμπλέγματος στο πρωτόκολλο LEACH έχει να εκτελέσει συγκέντρωση δεδομένων από αρκετά πακέτα που λαμβάνει από τους κόμβους-μέλη του συμπλέγματος. Το βασικό μειονέκτημα είναι η αναγκαιότητα της γνώσης της θέσης όλων των κόμβων του δικτύου, ώστε να γίνει κατάλληλη επιλογή γειτόνων και έτσι να ελαχιστοποιηθεί η μέγιστη απόσταση μεταξύ γειτονικών κόμβων. Επιπλέον, το πρωτόκολλο PEGASIS υποθέτει ότι όλοι οι κόμβοι διαθέτουν τους ίδιους ενεργειακούς πόρους, υπόθεση που οδηγεί σε μεγάλη καθυστέρηση για τους κόμβους που βρίσκονται στο τέλος της αλυσίδας και οι οποίοι είναι οι περισσότερο απομακρυσμένοι από τον κόμβο-συλλέκτη. Τέλος, το πρωτόκολλο PEGASIS είναι ακατάλληλο για δίκτυα με δυναμικές αλλαγές συνθηκών, καθώς αστοχίες σε ενδιάμεσες ζεύξεις της αλυσίδας επιφέρουν απώλεια των δεδομένων όλων των προηγούμενων κόμβων της αλυσίδας.

3.2.2.3 Συνάθροιση δεδομένων σε δίκτυα που οργανώνονται κατά δένδρα

Στα δίκτυα αυτά, η συνάθροιση δεδομένων πραγματοποιείται στους ενδιάμεσους κόμβους κατά την έκταση του δένδρου και μόνο μια συναθροισμένη εκδοχή των δεδομένων αποστέλλεται στη ρίζα του δένδρου που αποτελεί και τον κόμβο-συλλέκτη του WSN. Αυτό το είδος συνάθροισης δεδομένων είναι κατάλληλο για εφαρμογές που περιλαμβάνουν συνάθροιση δεδομένων εντός του δικτύου. Παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί η παρατήρηση του επιπέδου ραδιενέργειας σε ένα πυρηνικό εργοστάσιο, όπου η μέγιστη παρατηρούμενη τιμή ραδιενέργειας αποτελεί τη χρησιμότερη και κρισιμότερη πληροφορία για την ασφάλεια του εργοστασίου.

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα είναι ο σχηματισμός ενός ενεργειακά αποδοτικού δένδρου συνάθροισης δεδομένων. Μια ευριστική κατανεμημένη μέθοδος, η οποία για το σχηματισμό και τη διατήρηση ενός δένδρου συνάθροισης δεδομένων λαμβάνει υπόψη της τα διαθέσιμα ενεργειακά αποθέματα του δικτύου είναι ο αλγόριθμος EADAT [58]. Ο αλγόριθμος αυτός εκκινεί από τον κόμβο-συλλέκτη ο οποίος αποστέλλει μήνυμα ελέγχου προς όλους τους κόμβους. Ο κόμβος-συλλέκτης αναλαμβάνει το ρόλο του κόμβου-ρίζας στο δένδρο συνάθροισης. Το μήνυμα ελέγχου που αποστέλλεται περιλαμβάνει πέντε πεδία:

- i. το πεδίο *ID*, που περιγράφει την ταυτότητα του κόμβου
- ii. το πεδίο *father*, που περιγράφει τον πατέρα του κόμβου
- iii. το πεδίο *power*, που περιγράφει τα υπολειπόμενα αποθέματα ενέργειας του κόμβου
- iv. το πεδίο *status*, που περιγράφει την κατάσταση του κόμβου και λαμβάνει τρεις τιμές: κόμβος-φύλλο, όχι κόμβος-φύλλο και αδιευκρίνιστο
- v. το πεδίο *hopcnt*, που περιγράφει το πλήθος των βημάτων που απέχει ο κόμβος από τον κόμβο-συλλέκτη

Μετά τη λήψη του μηνύματος ελέγχου για πρώτη φορά, ο κόμβος s_n θέτει το ρολόι του ίσο με T_n . Μέσα στο διάστημα αυτό, ο κόμβος s_n επιλέγει ως πατέρα του τον κόμβο με την υψηλότερη υπολειπόμενη ενέργεια και τη μικρότερη απόσταση σε βήματα από τον κόμβο-συλλέκτη. Οι πληροφορίες αυτές είναι γνωστές στον κόμβο s_n από το μήνυμα ελέγχου που έλαβε. Μόλις εκπνεύσει ο χρόνος T_n , ο κόμβος s_n αυξάνει το μετρητή βημάτων κατά ένα και με τη σειρά του εκπέμπει το δικό του μήνυμα ελέγχου. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι κάθε κόμβος να αποστείλει μια φορά μήνυμα ελέγχου. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός δένδρου συνάθροισης δεδομένων που έχει ως κόμβο-ρίζα του τον κόμβο-συλλέκτη. Το κύριο πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι ότι κόμβοι με μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να γίνουν εσωτερικοί κόμβοι του δένδρου συνάθροισης. Για τη διατήρηση του δένδρου απαιτείται ένα κατώφλιο εναπομένουσας ισχύος, έστω P_{th} . Όταν η ισχύς κάποιου κόμβου πέσει κάτω από αυτό το κατώφλιο, ο κόμβος αυτός εκπέμπει περιοδικά βοηθητικά μηνύματα για T_d μονάδες χρόνου και, στη συνέχεια, κλείνει τον πομπό του. Κάθε κόμβος-παιδί του κόμβου που εξέπεμψε τα βοηθητικά μηνύματα αλλάζει τον πατέρα του. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων δείχνουν ότι, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο EADAT, η διάρκεια ζωής του δικτύου επεκτείνεται σε σύγκριση με μεθόδους δρομολόγησης που δεν πραγματοποιούν συνάθροιση. Επίσης, με χρήση του πρωτοκόλλου EADAT, η εναπομένουσα ενέργεια των ενεργών κόμβων μειώνεται με πολύ αργότερο ρυθμό σε σχέση με το σενάριο όπου δε χρησιμοποιείται συνάθροιση δεδομένων. Επίσης, η διάρκεια ζωής του δικτύου αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με την πυκνότητα του δικτύου. Επομένως, η χρήση του πρωτοκόλλου EADAT ενδείκνυται για το σχηματισμό ενεργειακά αποδοτικών δένδρων συνάθροισης δεδομένων.

Ένα δεδομένο-κεντρικό πρωτόκολλο που στηρίζεται στο σχηματισμό ενός δένδρου συνάθροισης δεδομένων είναι και το πρωτόκολλο TAG (Tiny AGgregation) [59]. Το πρωτόκολλο αυτό είναι κατάλληλο για εφαρμογές παρατήρησης και μπορεί να ενταχθεί στην κατηγορία πρωτοκόλλων που εφαρμόζουν συνάθροιση περιοδικά και ανά βήμα επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων (periodic per hop aggregation). Η εφαρμογή του πυρήνα του πρωτοκόλλου TAG πραγματοποιείται σε δύο φάσεις: τη φάση διανομής (distribution phase) και τη φάση συλλογής δεδομένων (collection phase). Κατά τη φάση διανομής, ο κόμβος-συλλέκτης μεταδίδει ένα μήνυμα προς όλους τους κόμβους-αισθητήρες, με το οποίο ζητεί από αυτούς να οργανωθούν σε ένα δένδρο δρομολόγησης που έχει ως ρίζα τον κόμβο-συλλέκτη. Κάθε μήνυμα περιλαμβάνει ένα πεδίο που καθορίζει το επίπεδο του δένδρου στο οποίο ανήκει ο κόμβος-αποστολέας. Όταν ένας κόμβος που δεν έχει ενταχθεί σε κάποιο επίπεδο του δένδρου δρομολόγησης λάβει ένα μήνυμα, εντάσσεται στο αμέσως επόμενο επίπεδο του δένδρου από αυτό που αναφερόταν στο μήνυμα που έλαβε. Επίσης, ορίζει ως κόμβο-πατέρα του τον κόμβο-αποστολέα του μηνύματος αυτού. Στη συνέχεια, αποστέλλει μήνυμα στο οποίο έχει προσθέσει το δικό του επίπεδο και το δικό του αναγνωριστικό (Identifier – ID) στα αντίστοιχα πεδία του μηνύματος. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι όλοι οι κόμβοι να ενταχθούν στο δένδρο δρομολόγησης. Μετά το σχηματισμό του, το δένδρο δρομολόγησης χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των ερωτημάτων (queries) του κόμβου-συλλέκτη προς όλους τους κόμβους-αισθητήρες του δικτύου. Τα ερωτήματα αυτά έχουν τη μορφή των αντίστοιχων ερωτημάτων της γλώσσας βάσεων δεδομένων SQL που φαίνεται στο Σχ. 3.7.

```
SELECT{agg(expr), attrs} from SENSOR
WHERE{selPreds}
GROUP BY{attrs}
HAVING{havingPreds}
EPOCH DURATION i
```

Σχήμα 3.7: Μορφή ερωτημάτων στο πρωτόκολλο TAG

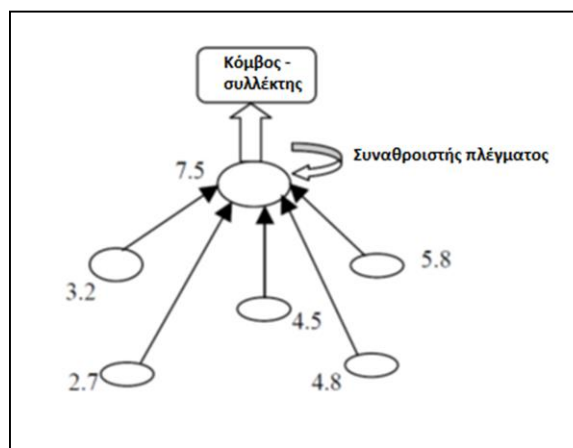
Στην πράξη, ο κόμβος-συλλέκτης αποστέλλει ένα ερώτημα, όπου προσδιορίζει τις ποσότητες που θέλει να συγκεντρώσει (στο πεδίο *attr*), τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η συνάθροιση των δεδομένων (στο πεδίο *aggr(expr)*) αλλά και τους κόμβους που εμπλέκονται στη συλλογή δεδομένων (στα πεδία *WHERE*, *GROUP*, *HAVING*). Τέλος, στο πεδίο *EPOCH DURATION* προσδιορίζεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο πρέπει να αναμένει κάθε κόμβος, πριν να στείλει νέα δεδομένα, ώστε η συνάθροιση να πραγματοποιείται μεταξύ δεδομένων που λήφθηκαν περίπου την ίδια χρονική στιγμή.

Κατά τη φάση συλλογής του πρωτοκόλλου TAG και λόγω της δενδρικής δομής του, κάθε κόμβος-πατέρας πρέπει να αναμένει για να λάβει δεδομένα από όλα τα παιδιά του πριν συναθροίσει όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις του προς το επόμενο επίπεδο του δένδρου. Στο πρωτόκολλο TAG, ο χρόνος διαιρείται σε εποχές (epochs) και κάθε εποχή υποδιαιρείται σε μικρότερα χρονικά διαστήματα, που ονομάζονται χρονοσχισμές επικοινωνίας (communication slots). Το πλήθος των χρονοσχισμών αυτών είναι ίσο με το μέγιστο βάθος του δένδρου δρομολόγησης. Το ότι ο χρόνος διαιρείται σε χρονοσχισμές παρέχει τη δυνατότητα στους κόμβους-αισθητήρες να μεταβαίνουν σε αδρανή κατάσταση μετά την αποστολή των συναθροισμένων δεδομένων και μέχρι το επόμενο προγραμματισμένο διάστημα μετάδοσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η συνάθροιση δεδομένων πραγματοποιείται από τους ενδιάμεσους κόμβους του δικτύου. Το πρωτόκολλο TAG, όπως συμβαίνει και με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα που βασίζουν τη λειτουργία τους στο σχηματισμό δένδρου δρομολόγησης, δεν λειτουργεί αποδοτικά σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από δυναμικές μεταβολές ή από μεγάλη πιθανότητα απώλειας ζεύξης. Μάλιστα, σε ενδεχόμενη αλλαγή τοπολογίας, είναι αναγκαία η εκ νέου κατασκευή του δένδρου δρομολόγησης, κάτι που συνεπάγεται σημαντική κατανάλωση ενέργειας, λόγω των σχετικών διαχειριστικών μηνυμάτων που πρέπει να κυκλοφορήσουν στο δίκτυο.

3.2.2.4 Συνάθροιση δεδομένων σε δίκτυα που οργανώνονται κατά πλέγματα

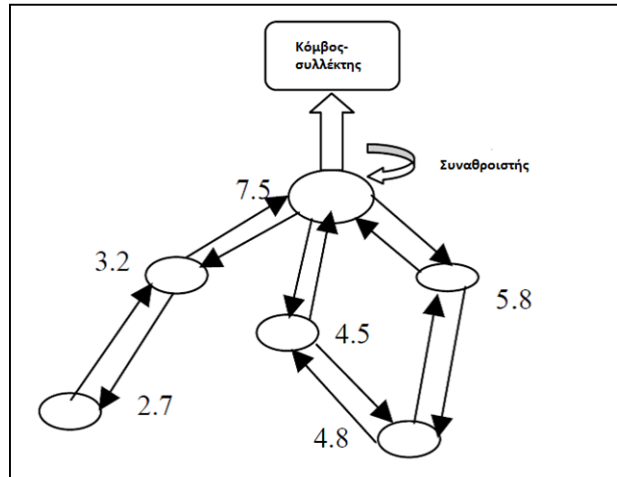
Ένας άλλος τρόπος οργάνωσης WSN δικτύων είναι ο διαχωρισμός της περιοχής κάλυψης σε πλέγματα. Στη συνέχεια, περιγράφονται δύο σχήματα συνάθροισης δεδομένων που στηρίζονται σε αυτό το είδος χωρισμού του δικτύου [60]. Στο πρώτο σχήμα συνάθροισης που ονομάζεται *grid-based data aggregation*, ένα σύνολο κόμβων ορίζονται ως συναθροιστές δεδομένων σε συγκεκριμένες σταθερές περιοχές του δικτύου. Οι κόμβοι που ανήκουν σε ένα πλέγμα αποστέλλουν τα δεδομένα τους απευθείας στον κόμβο-συναθροιστή του πλέγματός τους. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι κόμβοι δεν επικοινωνούν μεταξύ τους. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας είναι παρόμοιος

με τη συνάθροιση δεδομένων σε WSN δίκτυα οργανωμένα κατά συστάδες, με τη διαφορά ότι ο επικεφαλής κάθε συστάδας είναι σταθερός. Αυτό το σχήμα συνάθροισης είναι κατάλληλο για μεταβλητά περιβάλλοντα, όπως συμβαίνει κατά τη στρατιωτική παρακολούθηση και κατά την πρόβλεψη του καιρού. Ο τρόπος λειτουργίας του σχήματος grid-based data aggregation απεικονίζεται στο Σχ. 3.8.



Σχήμα 3.8: Τρόπος λειτουργίας σχήματος grid-based data aggregation. Οι κόμβοι-αισθητήρες αποστέλλουν τις μετρήσεις τους σε συγκεκριμένο κόμβο-συναθροιστή, ο οποίος συναθροίζει τα δεδομένα και τα προωθεί στον κόμβο-συνάλλεκτη

Στο δεύτερο σχήμα συνάθροισης, που ονομάζεται in-network data aggregation, ο κόμβος που διαθέτει την κρισιμότερη πληροφορία συναθροίζει τα πακέτα δεδομένων και αποστέλλει το αποτέλεσμα στον κόμβο-συνάλλεκτη. Κάθε κόμβος αποστέλλει την τιμή της μέτρησής του στους γειτονικούς του κόμβους. Αν κάποιος γειτονικός κόμβος έχει μεγαλύτερη τιμή μέτρησης, ο αποστολέας σταματά να αποστέλλει πακέτα. Μόλις λάβει πακέτα από όλους τους γειτονικούς του κόμβους, ο κόμβος με την υψηλότερη μέτρηση γίνεται ο συναθροιστής δεδομένων. Αυτό το σχήμα λειτουργίας και συνάθροισης είναι κατάλληλο για περιβάλλοντα όπου τα γεγονότα συμβαίνουν τοπικά. Ο τρόπος λειτουργίας του σχήματος In-network data aggregation απεικονίζεται στο Σχ. 3.9.



Σχήμα 3.9: Τρόπος λειτουργίας σχήματος In-network data aggregation. Οι κόμβοι-αισθητήρες ανταλλάσσουν τις μετρήσεις τους, όπως φαίνεται από τα βέλη. Ως κόμβος-συναθροιστής επιλέγεται εκείνος με τη μεγαλύτερη τιμή (7.5)

Μια περισσότερο αποδοτική προσέγγιση είναι ένα υβριδικό σχήμα λειτουργίας που συνδυάζει τα θετικά χαρακτηριστικά των δύο προαναφερθέντων αλγορίθμων. Συγκεκριμένα, στο υβριδικό σχήμα οι κόμβοι εκκινούν τη λειτουργία τους χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο in-network data aggregation. Όταν συμβεί κάποιο περιστατικό, αναγνωρίζεται ο κόμβος με τη σημαντικότερη πληροφορία. Οι κόμβοι, επίσης, διατηρούν έναν πίνακα με παρελθόντα περιστατικά και αντίστοιχες τιμές των μετρούμενων φυσικών μεγεθών. Όταν κάποιος κόμβος ανιχνεύει ένα περιστατικό, ελέγχει τον πίνακα του για το προηγούμενο περιστατικό και αναγνωρίζει το είδος του. Αν διαπιστωθεί ότι πρόκειται για ένα τοπικό περιστατικό, τότε ακολουθείται ο αλγόριθμος in-network data aggregation. Αν, όμως, διαπιστωθεί ότι πρόκειται για περιστατικό που κινείται εντός της ευρύτερης περιοχής του δικτύου (π.χ εισβολή), η πληροφορία αποστέλλεται σε έναν προκαθορισμένο κόμβο και ακολουθείται ο αλγόριθμος grid-based data aggregation.

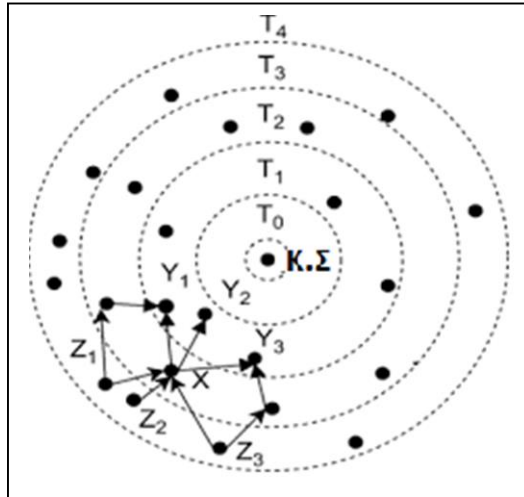
Προσομοιώσεις που έγιναν σε δίκτυο εκατό κόμβων, τοποθετημένων κατά τυχαίο τρόπο φανερώνουν ότι οι επιδόσεις του υβριδικού σχήματος και του σχήματος in-network data aggregation όσον αφορά την απόκτηση δεδομένων είναι σχεδόν ίδιες. Με κριτήριο την καθυστέρηση δεδομένων, το υβριδικό σχήμα εμφανίζει πολύ καλύτερη επίδοση σε σχέση με σχήμα που δεν χρησιμοποιεί καθόλου συνάθροιση (π.χ πρωτόκολλο πλημμύρας) και σε σχέση με το σχήμα grid-based data aggregation.

3.3 Πρωτόκολλα συνάθροισης δεδομένων σε WSN δίκτυα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των πρωτοκόλλων συνάθροισης που βασίζονται στην ιεραρχική οργάνωση του δικτύου είναι ότι υπάρχει μεγάλος κίνδυνος απώλειας δεδομένων σε περίπτωση αστοχίας στην επικοινωνία. Μάλιστα, όσο υψηλότερα στο επίπεδο ιεραρχίας συμβεί σφάλμα τόσο περισσότερα δεδομένα χάνονται. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού είναι η δρομολόγηση πληροφορίας προς τον κόμβο-συνάθροιστή μέσω πολλαπλών διαδρομών. Συγκεκριμένα, κάθε κόμβος, αντί να αποστέλλει τα δεδομένα του μόνο προς ένα γειτονικό κόμβο, τα αποστέλλει προς

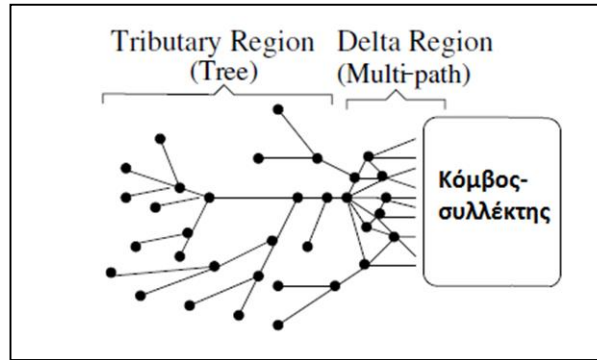
πολλούς γείτονές του, αξιοποιώντας τη δυνατότητα ευρυεκπομπής που προσφέρει το ασύρματο μέσο. Η αποστολή των δεδομένων προς πολλαπλούς αποδέκτες έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλαπλών ροών πληροφορίας προς τον κόμβο-συλλέκτη, κάτι που οδηγεί στην αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Δημιουργείται, επομένως, μια σχέση ανταλλαγής (trade-off) μεταξύ της ευρωστίας (robustness) του WSN δικτύου και της ενεργειακής κατανάλωσης των κόμβων. Ένας πολύ συνηθισμένος τρόπος οργάνωσης του WSN δικτύου για να υποστηρίξει δρομολόγηση μέσω πολλαπλών διαδρομών είναι η τοπολογία δακτυλίου (ring topology), στην οποία οι κόμβοι χωρίζονται σε επίπεδα με βάση το πλήθος των βημάτων που απέχουν από τον κόμβο-συλλέκτη. Τελικά, η συνάθροιση δεδομένων πραγματοποιείται σε κάθε κόμβο-αισθητήρα και σε κάθε διαδρομή, καθώς η πληροφορία σταδιακά μεταφέρεται προς τον κόμβο-συλλέκτη.

Ένα πρωτόκολλο υλοποίησης δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών είναι το Synopsis Diffusion [61]. Το πρωτόκολλο αυτό έχει δύο φάσεις λειτουργίας: τη φάση διανομής ερωτημάτων και τη φάση συλλογής δεδομένων. Η τοπολογία δακτυλίου σχηματίζεται κάθε φορά όπου ο κόμβος-συλλέκτης αποστέλλει ένα ερώτημα στους WS κόμβους. Η φάση συλλογής δεδομένων χωρίζεται σε εποχές (epochs). Στο τέλος κάθε εποχής δημιουργείται ένα συναθροισμένο πακέτο. Κάθε εποχή χωρίζεται σε χρονοσχισμές. Κάποιες από τις χρονοσχισμές χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό των μεταδόσεων, όπως γίνεται με το σχήμα TDMA. Η συνάθροιση δεδομένων εκκινεί από το δακτύλιο με τη μεγαλύτερη ακτίνα (βλ. σχήμα 3.10) και συνεχίζεται στο επόμενο επίπεδο, μέχρι τα συναθροισμένα δεδομένα να φθάσουν στον κόμβο-συλλέκτη. Καθώς η πληροφορία δρομολογείται μέσω πολλαπλών διαδρομών, είναι πιθανό οι κόμβοι να λαμβάνουν την ίδια πληροφορία πολλές φορές. Για το λόγο αυτό, η συνάρτηση συνάθροισης που χρησιμοποιείται δεν πρέπει να είναι ευαίσθητη σε αντίγραφα των ίδιων δεδομένων (π.χ συνάρτηση εύρεσης μεγίστου – ελαχίστου και όχι συνάρτηση υπολογισμού μέσης τιμής). Γενικότερα, δεδομένου ότι είναι ιδιαίτερα εύρωστα, τα πρωτόκολλα συνάθροισης και δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών είναι κατάλληλα για WSN με συχνές απώλειες πακέτων.



Σχήμα 3.10: Τοπολογία δακτυλίου σε δίκτυο WSN και δρομολόγηση μέσω πολλαπλών διαδρομών στο πρωτόκολλο Synopsis Diffusion

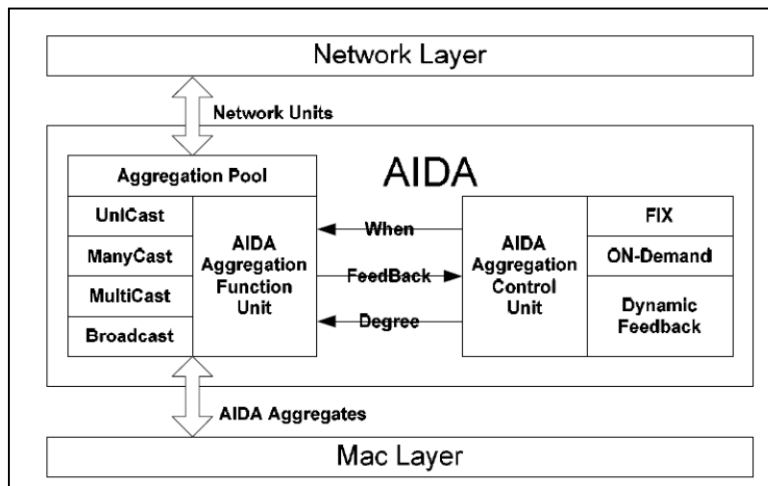
Για την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων που παρέχουν τα πρωτόκολλα συνάθροισης που βασίζονται σε ιεραρχικές δομές και των πρωτοκόλλων συνάθροισης και δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών, είναι δυνατό να σχεδιαστούν πρωτόκολλα που θα λειτουργούν με υβριδικό τρόπο. Ένα τέτοιο υβριδικό πρωτόκολλο συνάθροισης είναι το Tributaries and Deltas [62]. Στο πρωτόκολλο αυτό, διαφορετικές δομές συνάθροισης δεδομένων λειτουργούν σε διαφορετικές περιοχές του δικτύου. Η βασική ιδέα είναι ότι, υπό συνθήκες μικρών απωλειών πακέτων η δενδρική δομή συνάθροισης είναι καταλληλότερη, λόγω της ενεργειακής αποδοτικότητας που εξασφαλίζει. Αντίθετα, υπό συνθήκες υψηλών απωλειών πακέτων, είναι προτιμητέο ένα σχήμα συνάθροισης και δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών, λόγω της ευρωστίας που εμφανίζει. Για το λόγο αυτό, οι κόμβοι διαιρούνται σε δύο κατηγορίες: εκείνους που είναι οργανωμένοι σε δενδρική δομή (κόμβοι T) και εκείνοι που εκτελούν δρομολόγηση μέσω πολλαπλών διαδρομών (κόμβοι M). Η δυσκολία έγκειται στη σύζευξη των κόμβων διαφορετικών κατηγοριών. Για το λόγο αυτό, υιοθετούνται δύο κανόνες. Σύμφωνα με τον πρώτο κανόνα, κανένας κόμβος T δεν μπορεί να λάβει δεδομένα από κόμβο M. Ο δεύτερος κανόνας ορίζει ότι οι κόμβοι M μαζί με τον κόμβο-συλλέκτη σχηματίζουν ένα υπογράφο – που ονομάζεται και περιοχή Delta- , ο οποίος τροφοδοτείται με δεδομένα από κόμβους T. Η περιοχή Delta μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί μεταβάλλοντας τον τρόπο λειτουργίας των αντίστοιχων κόμβων. Αύξηση της περιοχής Delta συνεπάγεται αύξηση του πλήθους των διαδρομών προς τον κόμβο-συλλέκτη, κάτι που είναι επιθυμητό όταν το ποσοστό απωλειών πακέτων είναι μεγάλο. Αντίθετα, όταν το ποσοστό απωλειών πακέτων είναι μικρό, η περιοχή Delta μπορεί να μειωθεί, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα.



Σχήμα 3.11: Τρόπος οργάνωσης WSN δικτύου στο υβριδικό πρωτόκολλο Tributaries and Deltas

3.4 Πρωτόκολλα συνάθροισης δεδομένων για αξιοπιστία από άκρο σε άκρο και έλεγχο συμφόρησης

Μια διαφορετική προσέγγιση όσον αφορά τη συνάθροιση δεδομένων επιχειρείται από το πρωτόκολλο AIDA (Adaptive Application Independent Data Aggregation in Wireless Sensor Networks) [63]. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο που εκτελεί συνάθροιση δεδομένων προσαρμοστικά. Είναι ανεξάρτητο από το είδος της εξυπηρετούμενης εφαρμογής και εξασφαλίζει έλεγχο της καθυστέρησης που προκαλείται λόγω της λειτουργίας του. Βασικός στόχος του πρωτοκόλλου AIDA είναι η μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης του επικοινωνιακού διαύλου. Το AIDA λειτουργεί ως στρώμα συνάθροισης μεταξύ του στρώματος δικτύου και του στρώματος κοινής πρόσβασης και συνδυάζει όλα τα στρώματα που βρίσκονται πάνω από αυτό για να μειώσει τις επικεφαλίδες που εμπλέκονται κατά τη φάση ανταγωνισμού για πρόσβαση στο κοινό μέσο και τις επικεφαλίδες που σχετίζονται με την επιβεβαίωση λήψης πακέτων. Η λειτουργία του AIDA επιτελείται από δύο συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα είναι το λειτουργικό τμήμα, το οποίο συμπύκνωση και αποσυμπύκνωση τα πακέτα δικτύου. Η δεύτερη συνιστώσα έχει την ευθύνη για τον έλεγχο και το συντονισμό της διαδικασίας. Η αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου AIDA εικονίζεται στο Σχ. 3.12.



Σχήμα 3.12: Αρχιτεκτονική δομή πρωτοκόλλου AIDA

Η λειτουργία του πρωτόκολλο AIDA είναι η εξής: τα πακέτα που προέρχονται από το στρώμα δικτύου εισάγονται στο χώρο συνάθροισης (aggregation pool). Με κριτήριο το πλήθος των πακέτων που πρέπει να συνενωθούν αλλά και τον επόμενο προορισμό των πακέτων αυτών επιλέγεται η κατάλληλη μορφή συνάθροισης και, στη συνέχεια, το αποτέλεσμα προωθείται στο στρώμα MAC για να μεταδοθεί. Αντίστοιχα, τα πακέτα που λαμβάνονται, αναμένουν προκειμένου να αποσυμπιεστούν και να προωθηθούν στα ανώτερα στρώματα για περαιτέρω επεξεργασία.

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.12 υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την πραγματοποίηση συνάθροισης. Αρχικά, υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας χωρίς συνάθροιση, στην περίπτωση όπου αυτό απαιτηθεί. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης σταθερού σχήματος συνάθροισης, κατά το οποίο το πρωτόκολλο αναμένει για τη συγκέντρωση ενός προκαθορισμένου αριθμού πακέτων για να γίνει συνάθροιση. Για να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρξει πολύ μεγάλη αναμονή, τίθεται ένα άνω όριο αναμονής (timeout). Επιπλέον, υπάρχει το σχήμα συνάθροισης κατά παραγγελία (on-demand), σύμφωνα με το οποίο πραγματοποιείται συνάθροιση πακέτων μόνο όταν το κοινό μέσο είναι κατειλημμένο. Μόλις διαπιστωθεί ότι το μέσο είναι διαθέσιμο, το αποτέλεσμα της διαδικασίας συνάθροισης προωθείται στο στρώμα MAC για να μεταδοθεί. Τέλος, το προσαρμοζόμενο σχήμα εφαρμόζει ένα συνδυασμό του σταθερού σχήματος συνάθροισης και του σχήματος συνάθροισης κατά παραγγελία. Το προσαρμοζόμενο σχήμα, επίσης, διαθέτει σχήμα ανατροφοδότησης αλλά και ελέγχει συνεχώς το κοινό μέσο και την ουρά αναμονής πακέτων τόσο για συνάθροιση, όσο και για αποσυμπίεση, ώστε να βελτιστοποιεί τη λειτουργία του.

Στο πρωτόκολλο AIDA ορίζονται επίσης τέσσερις τρόποι συνάθροισης πακέτων, αντίστοιχα με τον παραλήπτη τους, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.12. Επομένως, όταν για παράδειγμα έλθει η στιγμή να γίνει συνάθροιση και υπάρχει μόνο ένα διαθέσιμο πακέτο, χρησιμοποιείται η λειτουργία unicast, οπότε πρακτικά δεν πραγματοποιείται συνάθροιση. Αν υπάρχουν πολλά πακέτα που έχουν κοινό προορισμό, τότε χρησιμοποιείται η λειτουργία multicast. Όταν υπάρχουν πακέτα για συνάθροιση, τα οποία προορίζονται για όλους τους γειτονικούς κόμβους, χρησιμοποιείται η λειτουργία broadcast. Τέλος, όταν υπάρχουν πακέτα για συνάθροιση που, όμως, έχουν διαφορετικούς προορισμούς ο τρόπος συνάθροισης είναι περισσότερο σύνθετος και χρησιμοποιείται το σχήμα multicast. Στο σχήμα multicast το πρωτόκολλο AIDA συναθροίζει όλα τα πακέτα που έχει, ανεξάρτητα με τον προορισμό τους, αφήνοντας σχετική ένδειξη σε ένα τμήμα του συναθροισμένου πακέτου. Στη συνέχεια το συναθροισμένο πακέτο αποστέλλεται προς όλους τους γειτονικούς κόμβους. Κάθε κόμβος που λαμβάνει το πακέτο που περιέχει την ένδειξη multicast, το λαμβάνει και εξετάζει αν υπάρχει τμήμα του συναθροισμένου πακέτου που έλαβε, το οποίο να προορίζεται για εκείνον.

Σύμφωνα με προσομοιώσεις, το πρωτόκολλο AIDA μπορεί να επιτύχει μεγάλη ενεργειακή αποδοτικότητα, ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται ταυτόχρονα με σχήματα συνάθροισης που είναι κατάλληλα προσαρμοσμένα στην συγκεκριμένη εξυπηρετούμενη εφαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

4.1 Περιγραφή του προβλήματος

Θεωρείται ένα ad hoc WSN, οι κόμβοι του οποίου κατανέμονται στο χώρο δίχως να έχουν αυστηρά καθορισμένες θέσεις.

Σκοπός του δικτύου είναι να λαμβάνει συνεχώς πληροφορία από το περιβάλλον για ένα ή περισσότερα φαινόμενα. Για το λόγο αυτό, κάθε κόμβος του δικτύου διαθέτει αισθητήρες, μέσω των οποίων πραγματοποιεί μετρήσεις των προς παρακολούθηση φυσικών μεγεθών. Μετά από κάθε μέτρηση, κάθε κόμβος αποστέλλει το αποτέλεσμα της με πακέτο προς ένα γειτονικό του κόμβο. Ο κόμβος που συγκεντρώνει όλες τις πληροφορίες που παρέχει το δίκτυο ονομάζεται κόμβος-συλλέκτης (sink node) και μπορεί να επικοινωνεί με το διαχειριστή του δικτύου είτε άμεσα είτε μέσω του Διαδικτύου.

Για την αποτελεσματική παρατήρηση των διαφόρων φαινομένων απαιτείται κατά κανόνα αρκετά μεγάλο πλήθος κόμβων. Επίσης, το κόστος των κόμβων αυτών πρέπει να είναι μικρό, ώστε το συνολικό κόστος υλοποίησης του δικτύου να μην καταστεί απαγορευτικό. Το μικρό κόστος, όμως, έχει ως συνέπεια οι κόμβοι να διαθέτουν περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα.

Από την άλλη πλευρά, είναι ιδιαίτερα σημαντικό η πληροφορία να φθάνει από τους κόμβους του δικτύου στον κόμβο-συλλέκτη εντός προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος, ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί έγκαιρα. Η συνολική καθυστέρηση που μεσολαβεί από τη διεξαγωγή μέτρησης από κάποιο κόμβο μέχρι τη λήψη της από τον κόμβο-συλλέκτη αποτελεί κριτήριο αξιολόγησης της προσφερόμενης υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) και ονομάζεται χρόνος απόκρισης (latency). Η μέγιστη επιτρεπτή καθυστέρηση απόκρισης (maximum latency - T_{max}) του WSN δικτύου καθορίζεται από τις προδιαγραφές.

Επομένως, ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που έχουν σχέση με τη σχεδίαση τέτοιων WSN δικτύων, είναι η διατύπωση και η υλοποίηση αλγορίθμων για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων ώστε, αφενός, να εξασφαλίζεται ότι ο χρόνος απόκρισης του δικτύου είναι εντός των προδιαγραφών, αλλά και, αφετέρου, να μεγιστοποιείται ο χρόνος ζωής (lifetime) των δικτύων, ιδίως όταν αυτά χαρακτηρίζονται από περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα.

4.2 Βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά WSN ειδικού σκοπού

Κάθε εφαρμογή/υπηρεσία παρατήρησης φυσικών φαινομένων (monitoring application), που εξυπηρετείται από WSN, χαρακτηρίζεται από την τιμή του χρονικού διαστήματος, έστω T_{rep} , το οποίο μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων από τον αισθητήρα κάθε κόμβου.

Οι κόμβοι που χρησιμοποιούνται σε τέτοια δίκτυα διαθέτουν συνήθως τρία υποσυστήματα. Το πρώτο υποσύστημα αφορά τον αισθητήρα που πραγματοποιεί τις μετρήσεις του ή των φυσικών φαινομένων που ενδιαφέρουν. Το δεύτερο υποσύστημα -το υπολογιστικό-αφορά την εκτέλεση υπολογισμών. Στο υποσύστημα αυτό γίνεται η συνάθροιση της πληροφορίας, αλλά και η πραγματοποίηση υπολογισμών που σχετίζονται με την εκτέλεση του ενσωματωμένου προγράμματος που υλοποιεί το πρωτόκολλο λειτουργίας του δικτύου. Το τρίτο υποσύστημα αφορά την επικοινωνία των κόμβων με το δίκτυο και περιλαμβάνει πομπό και δέκτη, ενσωματωμένους συνήθως στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, κάθε υποσύστημα μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα από το άλλο. Πρέπει να σημειωθεί ότι η λειτουργία εκπομπής έχει σημαντικά μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με τις υπόλοιπες λειτουργίες.

Για την ανάλυση που θα ακολουθήσει, θεωρείται ότι οι μετρήσεις που φθάνουν σε κάποιο κόμβο από γειτονικούς του μπορούν να υποστούν συνάθροιση (aggregation) με τη δική του μέτρηση χρησιμοποιώντας την κατά περίπτωση κατάλληλη συνάρτηση συνάθροισης. Παραδείγματα συναρτήσεων συνάθροισης είναι η συνάρτηση εύρεσης μεγίστου ή ελαχίστου ή η συνάρτηση υπολογισμού μέσης τιμής. Το είδος της συνάρτησης συνάθροισης καθορίζεται συνήθως από τις απαιτήσεις της εφαρμογής που εξυπηρετείται από το WSN. Απόρροια της διαδικασίας συνάθροισης πληροφορίας είναι η κυκλοφορία στο δίκτυο πακέτων σταθερού μεγέθους, χαρακτηριστικό που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη δυνατότητα συγχρονισμού των κόμβων.

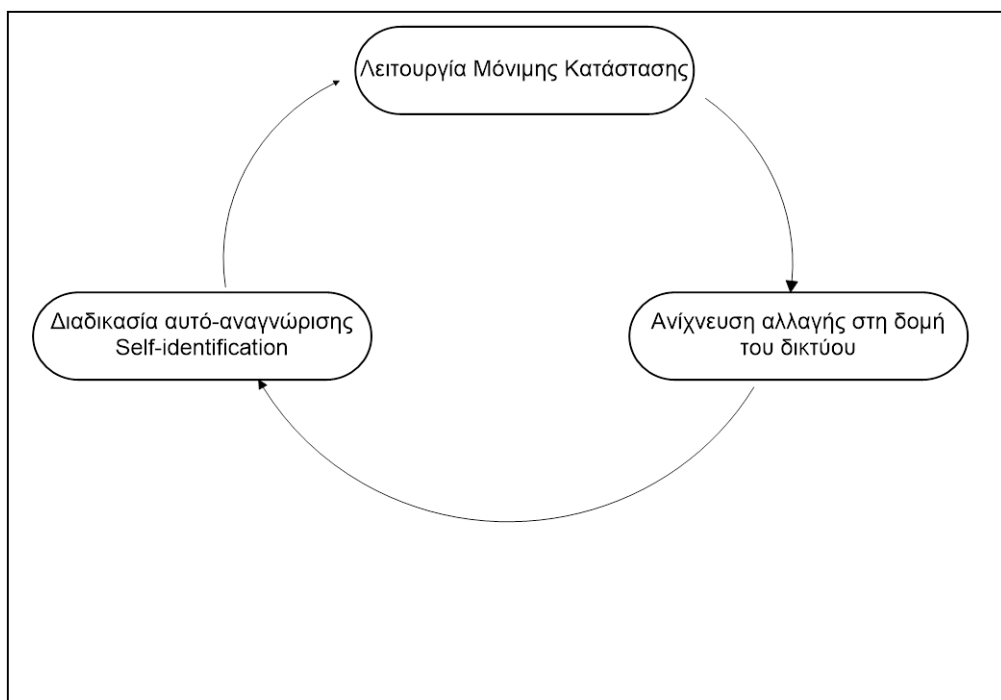
Η λειτουργία του WSN διακρίνεται σε τρεις διακριτές φάσεις, οι οποίες εναλλάσσονται: τη φάση αυτό-αναγνώρισης, τη φάση μόνιμης κατάστασης λειτουργίας και τη φάση ανίχνευσης αλλαγών στην τοπολογία του δικτύου. Συγκεκριμένα, μετά την εγκατάσταση των κόμβων στο χώρο ανάπτυξης του δικτύου, εκκινεί η διαδικασία αυτο-αναγνώρισης (self-identification), κατά την οποία οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας μηνύματα με στόχο το σχηματισμό δένδρου δρομολόγησης (routing tree), στη ρίζα του οποίου βρίσκεται ο κόμβος-συλλέκτης. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτο-αναγνώρισης:

- i. σε κάθε κόμβο έχει ανατεθεί ένας κόμβος-πατέρα που ανήκει στο δένδρο δρομολόγησης προς τον οποίο θα αποστέλλει τα πακέτα του με τελικό προορισμό τον κόμβο-συλλέκτη
- ii. κάθε κόμβος γνωρίζει πόσοι κόμβοι-παιδιά του έχουν ανατεθεί, τα πακέτα των οποίων πρέπει να προωθεί προς τον κόμβο-συλλέκτη
- iii. ο κόμβος-συλλέκτης γνωρίζει το μέγιστο πλήθος βημάτων (maximum number of hops) που απέχει από τον πλέον απομακρυσμένο κόμβο.

Τη φάση αυτό-αναγνώρισης διαδέχεται η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του δικτύου, κατά τη διάρκεια της οποίας κάθε κόμβος λαμβάνει πακέτα με μετρήσεις από τους κόμβους-παιδιά του και μαζί με τις δικές του μετρήσεις, τις προωθεί στον κόμβο-πατέρα του. Η διαδικασία σχηματισμού του δένδρου δρομολόγησης πρέπει να επαναλαμβάνεται οπωσδήποτε κάθε φορά όπου συμβαίνει ένα αναγνωρίσιμο γεγονός, όπως η έξοδος κάποιου κόμβου από το δίκτυο (είτε λόγω βλάβης είτε λόγω εξάντλησης

των ενεργειακών του πόρων) ή η εισαγωγή νέων κόμβων στο δίκτυο ή, τέλος, αλλαγή σε ορισμένες παραμέτρους λειτουργίας του δικτύου.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής θα εξεταστεί η λειτουργία ενός WSN στη μόνιμη κατάσταση, δηλαδή αφού έχει σχηματιστεί το δένδρο δρομολόγησης. Συνεπώς κάθε κόμβος πλέον γνωρίζει τον κόμβο-πατέρα του και τους κόμβους-παιδιά του. Επίσης, θεωρείται γνωστό το μέγιστο πλήθος βημάτων, έστω max_hops , καθώς και η μέση καθυστέρηση μετάδοσης ενός μηνύματος δεδομένων από έναν κόμβο προς έναν γειτονικό του κόμβο, έστω $mean_delay$, που αποτελούν παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν για τη διατύπωση του προτεινόμενου αλγορίθμου συνάθροισης και εκπομπής μετρήσεων.



Σχήμα 4.2: Φάσεις λειτουργίας ενός WSN

4.3 Διατύπωση του προβλήματος

Λαμβάνοντας υπόψη τις προαναφερθείσες θεωρήσεις, ο αλγόριθμος λειτουργίας του δικτύου πρέπει να αξιοποιεί τη δυνατότητα συνάθροισης δεδομένων. Ταυτόχρονα, πρέπει να διαχειρίζεται αποδοτικά τα περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων.

Δεδομένου ότι η αποστολή πακέτων είναι η περισσότερο δαπανηρή ενεργειακά κατάσταση λειτουργίας των κόμβων, πρέπει να ελαχιστοποιείται ο χρόνος παραμονής τους σε αυτή, ώστε να επιμηκυνθεί η διάρκεια ζωής τους και, κατ' επέκταση, η διάρκεια ζωής του δικτύου.

Η κεντρική ιδέα του προτεινόμενου αλγορίθμου συνοψίζεται ακολούθως. Κάθε κόμβος διεξάγει μετρήσεις ανά T_{rep} , όπως καθορίζεται από το είδος της υπηρεσίας. Επίσης,

είναι πιθανό να λάβει πακέτα που περιέχουν μετρήσεις από κόμβους - παιδιά του. Όταν οι κόμβοι έχοντας πραγματοποιήσει μια μέτρηση αποστέλλουν το αντίστοιχο πακέτο μετάδοσης στον κόμβο-πατέρα τους, ενεργοποιούν πολύ συχνά τον πομπό τους, με αποτέλεσμα τα ενεργειακά τους αποθέματα να εξαντλούνται απαγορευτικά σύντομα. Αντίθετα, όταν οι κόμβοι, έχοντας διαθέσιμες μετρήσεις και πριν τις αποστείλουν στον κόμβο-πατέρα τους αναμένουν για κάποιο χρονικό διάστημα τότε αυξάνεται η πιθανότητα να λάβουν πακέτο μέτρησης από κάποιο κόμβο-παιδί τους πριν εκπέμψουν. Στην τελευταία περίπτωση, οι κόμβοι μπορούν να πραγματοποιούν συνάθροιση όλων των διαθέσιμων μετρήσεων. Για την υλοποίηση της συνάθροισης, οι κόμβοι ενεργοποιούν το υπολογιστικό τους υποσύστημα και αυξάνουν την ενεργειακή τους κατανάλωση. Όμως, μετά τη συνάθροιση πληροφορίας, οι κόμβοι αποστέλλουν μόνο ένα πακέτο στον κατά περίπτωση κόμβο-πατέρα τους. Κατ' αυτόν τον τρόπο, χρειάζεται να μεταβούν μόνο μια φορά στην περισσότερο δαπανηρή κατάσταση εκπομπής. Το γεγονός αυτό, όχι μόνο αντισταθμίζει την πρόσθετη – και πάντως μικρή – ενεργειακή δαπάνη που έγινε για τη συνάθροιση αλλά προσφέρει ενεργειακό όφελος που οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Επομένως, λόγω του προσδοκώμενου ενεργειακού οφέλους, κρίνεται σκόπιμο από ενεργειακής πλευράς οι κόμβοι να μην αποστέλλουν τις μετρήσεις τη στιγμή που τις λαμβάνουν αλλά να αναμένουν για ενδεχόμενη λήψη πακέτων από κόμβους-παιδιά τους και πραγματοποίηση συνάθροισης. Ωστόσο, η αναμονή αυτή έχει δυσμενή επίπτωση στη λειτουργία των κόμβων και του δικτύου γενικότερα καθώς οι μετρήσεις φθάνουν με μεγαλύτερη καθυστέρηση στον κόμβο-συλλέκτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο διαχειριστής του δικτύου να λαμβάνει μετρήσεις που έχουν σχετικά μεγάλη παλαιότητα και μπορεί να μην απεικονίζουν εγκαίρως την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Επομένως, όταν η καθυστέρησή τους μεγαλώνει, η αξία των μετρήσεων μειώνεται γεγονός που έχει αρνητική επίπτωση στην ποιότητα υπηρεσίας.

Συνεπώς, ανακύπτει μια σχέση ανταλλαγής (trade-off) που σχετίζεται με την εξοικονόμηση ενέργειας και το χρονικό διάστημα κατά το οποίο καθυστερούν οι μετρήσεις στους κόμβους μέχρι να ενσωματωθούν σε κάποιο πακέτο και να προωθηθούν στον επόμενο κόμβο. Στο πλαίσιο αυτό, αν το χρονικό αυτό διάστημα αναμονής αυξηθεί, αναμένεται οι κόμβοι να λάβουν και νέες μετρήσεις, και μέσω της διαδικασίας συνάθροισης να αποκομίσουν ενεργειακό όφελος. Σε βάθος χρόνου το ενεργειακό αυτό όφελος αντιστοιχεί σε επέκταση (prolongation) της διάρκειας ζωής (lifetime) των κόμβων και, κατ' επέκταση, του ίδιου του δικτύου. Όμως, η αύξηση του χρονικού διαστήματος αναμονής έχει ως αρνητική συνέπεια οι μετρήσεις να φθάνουν στον κόμβο-συλλέκτη με μεγαλύτερη καθυστέρηση και, ως εκ τούτου, μειωμένη αξία. Η μείωση αυτή αντιστοιχεί σε μείωση της ποιότητας υπηρεσίας που παρέχει το WSN.

Προκειμένου να διατυπωθεί αλγόριθμος που εξισορροπεί κατά βέλτιστο τρόπο τους δύο αντικρουόμενους στόχους ενός WSN, δηλαδή της διάρκειας ζωής του δικτύου και της ποιότητας υπηρεσίας, είναι απαραίτητη η ποσοτική αποτίμησή τους. Για το λόγο αυτό, ορίζεται συνάρτηση οφέλους (utility function), έστω u , που είναι:

- I. φθίνουσα συνάρτηση του χρόνου, καθώς αποτιμά την ποιότητα υπηρεσίας που μειώνεται με την πάροδο του χρόνου που οφείλεται σε αυξανόμενη απαξίωση των μετρήσεων λόγω καθυστέρησης

- II. αύξουσα συνάρτηση του πλήθους των μετρήσεων που συναθροίζει κάθε κόμβος πριν μεταδώσει πακέτο στον κόμβο-πατέρα του, καθώς αποτιμά την εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται μέσω της συνάθροισης

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος λειτουργίας βασίζεται στο διαισθητικό συλλογισμό ότι για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου αρκεί η βελτιστοποίηση της λειτουργίας κάθε επιμέρους κόμβου. Αν και αυτό δεν αποδεικνύεται θεωρητικά, μπορεί να επιβεβαιωθεί πειραματικά.

Η λειτουργία του προτεινόμενου αλγόριθμου συνάθροισης και εκπομπής μετρήσεων οργανώνεται σε κύκλους. Επίσης, κάθε χρονικό διάστημα μετράται ως ακέραιο πολλαπλάσιο μιας χρονικής διάρκειας, έστω t_{slot} .

Για τη συνέχεια, κρίνεται σκόπιμος ο ορισμός βασικών μεγεθών απαραίτητων για τον κατάλληλο ορισμό της συνάρτησης οφέλους u .

4.3.1 Ορισμός μέγιστης καθυστέρησης σε επίπεδο κόμβου

Όπως προαναφέρθηκε, για κάθε εφαρμογή ορίζεται η ελάχιστη ποιότητα υπηρεσίας ως προς τη συνολική καθυστέρηση απόκρισης του δικτύου. Αυτή ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της χρονικής στιγμής πραγματοποίησης της μέτρησης και της χρονικής στιγμής όπου η μέτρηση αυτή φθάνει στον κόμβο-συλλέκτη και πρέπει να είναι μικρότερη της T_{max} . Καθώς, όμως, επιχειρείται η βελτιστοποίηση σε επίπεδο κόμβου, ο περιορισμός της συνολικής καθυστέρησης, T_{max} , πρέπει να επιμεριστεί σε χρονικούς περιορισμούς που καθορίζουν τη λειτουργία του δικτύου σε επίπεδο κόμβου. Έτσι, κάθε κόμβος, από τη στιγμή που διαθέτει μια μέτρηση, πρέπει να την προωθήσει στον κόμβο-πατέρα του εντός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, έστω τ_n .

Ο υπολογισμός του μέγιστου χρονικού διαστήματος αναμονής εξαρτάται από την τοπολογία του δικτύου. Συγκεκριμένα, από τη φάση αυτό-αναγνώρισης θεωρείται γνωστό το μέγιστο πλήθος βημάτων από οποιονδήποτε κόμβο μέχρι τον κόμβο-συλλέκτη, max_hops . Επίσης υπολογίζεται μια τιμή της μέση καθυστέρησης, $mean_delay$, που απαιτείται για την αποστολή ενός πακέτου δεδομένων από τον έναν κόμβο προς έναν άλλο γειτονικό του κόμβο. Έτσι, η διάρκεια του μέγιστου επιτρεπτού χρονικού διαστήματος αναμονής για κάθε κόμβο, έστω τ_n , έχει μια ελάχιστη τιμή και στη συνέχεια αυξάνεται καθώς ο αντίστοιχος κόμβος βρίσκεται σε πλησιέστερα στον κόμβο-συλλέκτη στο δέντρο δρομολόγησης. Η ελάχιστη τιμή της ποσότητας τ_n ισούται με το χρόνο που χρειάζεται ο κόμβος-συλλέκτης για να ολοκληρώσει μια μέτρηση. Ο χρόνος αυτός, έστω x , είναι μια παράμετρος που εξαρτάται τόσο από το είδος του κόμβου-αισθητήρα όσο και από το είδος του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Για τους υπόλοιπους κόμβους θα ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις αναλογίας:

$$\frac{\tau_{dist=1} - x}{max_hops - 1} = \frac{\tau_{dist=2} - x}{max_hops - 2} = \dots = \frac{\tau_{dist=max_hops-1} - x}{1} \quad (4.1)$$

Επίσης, για να εξασφαλιστεί ότι τα πακέτα φθάνουν στον κόμβο-συλλέκτη εντός του προκαθορισμένου από την εφαρμογή χρονικού διαστήματος, T_{max} , πρέπει να ισχύει ότι:

$$\sum_{i=1}^{max_hops} \tau_{dist=i} = T_{max} - (max_hops - 1) * mean_delay \quad (4.2)$$

Μέσω της επίλυσης των εξισώσεων (4.1) και (4.2) προσδιορίζονται οι τιμές του μέγιστου χρονικού διαστήματος αναμονής για τους κόμβους κάθε επιπέδου του δένδρου συνάθροισης.

Πράγματι, εφόσον κάθε κόμβος του δικτύου, s_n , είναι υποχρεωμένος να αποστείλει κάθε μέτρηση που έχει λάβει εντός χρονικού διαστήματος τ_n , ικανοποιούνται κατ'ελάχιστο οι προδιαγραφές του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί, όμως, ότι τα σχήματα που υλοποιούν τη διαδικασία της αυτο-αναγνώρισης για το σχηματισμό του δένδρου δρομολόγησης, στη γενική περίπτωση, διαμορφώνουν συμμετρικά δένδρα. Συνεπώς, το ενδεχόμενο να λάβει η παράμετρος max_hops υπερβολικά μεγάλη τιμή λόγω ύπαρξης ενός μόνο πολύ απομακρυσμένου κόμβου έχει πολύ μικρή πιθανότητα.

Η λειτουργία εκπομπής κάθε κόμβου οργανώνεται σε κύκλους μεταβλητής διάρκειας, με την παράμετρο τ_n να εκφράζει τη μέγιστη χρονική διάρκεια κάθε κύκλου για τον κόμβο s_n . Το τέλος κάθε κύκλου επέρχεται οσάκις ο κόμβος s_n αποφασίζει να αποστείλει πακέτο στο οποίο έχει συναθροίσει όλες τις μετρήσεις που είχε λάβει μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή. Ως t_n συμβολίζεται η τρέχουσα χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου. Η μεταβλητή t_n μπορεί να λάβει τιμές στο διάστημα $[0, \tau_n]$, αφού μηδενίζεται οσάκις ο κόμβος πραγματοποιεί αποστολή των μετρήσεων που έχει μέχρι τότε συλλέξει, οπότε εκκινεί νέος κύκλος λειτουργίας. Δηλαδή, η μεταβλητή t_n εκφράζει το σχετικό χρόνο, με αρχή την έναρξη κάθε νέου κύκλου λειτουργίας. Ως T_n συμβολίζεται ο απόλυτος χρόνος, όπως μετράται από τον κόμβο s_n . Θεωρητικά, η μεταβλητή αυτή έχει την ίδια τιμή σε όλους τους κόμβους. Καθώς, όμως, μπορεί να προστεθούν νέοι κόμβοι στο δίκτυο ή άλλοι να τεθούν εκτός λειτουργίας λόγω εξάντλησης των ενεργειακών τους αποθεμάτων, στη γενική περίπτωση η μεταβλητή T_n λαμβάνει διαφορετικές τιμές στους διάφορους κόμβους του δικτύου. Πάντως, μπορεί να επιτευχθεί συγχρονισμός όλων των κόμβων του δικτύου με το ρολόι του κόμβου-συλλέκτη με μετάδοση της πληροφορίας συγχρονισμού μέσω των πακέτων που διακινούνται κατά τη φάση αυτο-αναγνώρισης του δικτύου αλλά και κατά περίπτωση ή κατά τακτά χρονικά διαστήματα.

Ως K συμβολίζεται το πλήθος των κόμβων-παιδιών του κόμβου s_n , ενώ ως k ορίζεται το πλήθος των μετρήσεων που έχει λάβει ο κόμβος s_n μέχρι τη χρονική στιγμή t_n . Επισημαίνεται, όμως, ότι η παράμετρος k λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0, K+1]$. Αυτό συμβαίνει διότι ο αισθητήρας του εκάστοτε υπό μελέτη κόμβου s_n αντιστοιχείται σε ένα επιπλέον παιδί.

4.3.2 Ορισμός της συνάρτησης οφέλους

Όσον αφορά τη μαθηματική περιγραφή της ενεργειακής εξοικονόμησης στη συνάρτηση οφέλους, αυτή μπορεί να γίνει ως εξής:

Έστω ότι κάποιος κόμβος πρέπει να στείλει k μετρήσεις. Αν τις αποστείλει μια προς μια, θα χρειαστεί συνολικά k αποστολές πακέτων, ενώ αν τις συγχωνεύσει σε ένα μόνο πακέτο, θα πραγματοποιήσει μόνο μια αποστολή. Επομένως, θα αποφύγει $k-1$ αποστολές πακέτων μετρήσεων. Συνεπώς, το ενεργειακό όφελος, έστω g , είναι ίσο με

το γινόμενο του πλήθους των αποστολών που αποφεύγει, επί το ενεργειακό κόστος εκπομπής πακέτου, έστω E_o , δηλαδή

$$g(k) = (k - 1) * E_o, \quad k \geq 1 \quad (4.3)$$

Από τη σχέση (4.3) είναι φανερό ότι το ενεργειακό όφελος είναι ανάλογο του πλήθους των πακέτων που συναθροίζονται.

Το σχετικό ενεργειακό όφελος λόγω της εφαρμογής συνάθροισης στις μετρήσεις είναι:

$$h(k) = k, \quad k \geq 1 \quad (4.4)$$

Η διαφορά μεταξύ των συναρτήσεων $h(k)$ και $g(k)$ είναι ότι η δεύτερη μηδενίζεται για $k=1$, χαρακτηριστικό που προκαλεί προβλήματα στην ανάλυση που ακολουθεί.

Όσον αφορά το μέτρο αποτίμησης της ποιότητας υπηρεσίας μέσω της συνάρτησης οφέλους, αυτό μπορεί να διατυπωθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλη φθίνουσα ως προς το χρόνο συνάρτηση, έστω $f(t)$. Η συνάρτηση αυτή αντανακλά το ότι καθώς παρέρχεται ο χρόνος, η χρησιμότητα των μετρήσεων μειώνεται. Η συνάρτηση $f(t)$ πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη χρονική εξάρτηση της εφαρμογής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για τη μορφή της συνάρτησης $f(t)$ επιλέγεται η συνάρτηση κανονικής κατανομής, με μηδενική μέση τιμή και διασπορά σ_τ^2 , που εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής και θεωρείται γνωστή.

Συνεπώς:

$$f(t_n) = \exp\left(-\left(t_n^2 / (2 * \sigma_\tau^2)\right)\right), \quad t_n \in [0, \tau_n] \quad (4.5)$$

Η ποιότητα υπηρεσίας μεγιστοποιείται όταν $t_n = 0$, δηλαδή όταν ο κόμβος προωθεί χωρίς καθυστέρηση οποιαδήποτε μέτρηση διαθέτει προς τον κόμβο-πατέρα του. Αντίθετα, η ποιότητα υπηρεσίας ελαχιστοποιείται όταν $t_n = \tau_n$, δηλαδή όταν ο κόμβος s_n εξαντλεί όλο το χρόνο που έχει στη διάθεσή του αναμένοντας να λάβει πρόσθετες μετρήσεις τις οποίες συναθροίζει και προωθεί. Κανονικοποιώντας κατά τρόπο ώστε η μέγιστη ποιότητα υπηρεσίας να αντιστοιχεί στη μονάδα, η βοηθητική παράμετρος q_n μπορεί να συσχετιστεί με τις προαναφερθείσες παραμέτρους. Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι η ελάχιστη ποιότητα υπηρεσίας προκύπτει για $t_n = \tau_n$, από τη σχέση (4.5) προκύπτει :

$$q_n = f(\tau_n) = \exp\left(-\left(\tau_n^2 / (2 * \sigma_\tau^2)\right)\right) \Rightarrow \tau_n = \sigma_{\tau_n} * \sqrt{2 * \ln\left(\frac{1}{q}\right)} \quad \mu\epsilon \quad 0 < q < 1 \quad (4.6)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τους δύο αντικρουόμενους παράγοντες η συνάρτηση οφέλους $u(k, t_n)$ μπορεί να έλθει στη μορφή :

$$u(k, t_n) = k * \exp\left(-\left(t_n^2 / (2 * \sigma_\tau^2)\right)\right), \quad t_n \in [0, \tau_n], \quad k \geq 1 \quad (4.7)$$

Όπως αναμενόταν, η συνάρτηση οφέλους είναι ανάλογη του πλήθους των συναθροιζόμενων μετρήσεων k και φθίνουσα συνάρτηση του χρόνου καθυστέρησης t_n .

4.3.3 Προσδιορισμός του διαστήματος αναμονής

Μια πολύ σημαντική παράμετρος για την αποτελεσματική λειτουργία του υπό διατύπωση σχήματος είναι το διάστημα αναμονής τυχαίου κόμβου s_n . Συγκεκριμένα, το πρόβλημα εντοπίζεται στο ποιο είναι το καταλληλότερο χρονικό διάστημα κατά το οποίο πρέπει να αναμείνει ο κόμβος s_n πριν αποφασίσει να αποστείλει πακέτο στον κόμβο-πατέρα του, προωθώντας τις συναθροισμένες μετρήσεις που έχει στη διάθεσή του μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή.

Το κριτήριο υπό το οποίο θα λαμβάνει τη σχετική απόφαση ο κόμβος s_n είναι το αναμενόμενο όφελος του. Αν υποθεθεί ότι ο κόμβος s_n έχει λάβει κατά τη διάρκεια κάποιου κύκλου λειτουργίας του μέχρι τη χρονική στιγμή t_n τις μετρήσεις από k κόμβους-παιδιά του, ανακλύπει προς απάντηση το δίλημμα αν είναι προτιμότερο να στείλει όσες μετρήσεις διαθέτει μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή ή να αναμείνει και επί πόσο χρονικό διάστημα προκειμένου να λάβει και συναθροίσει στο προς αποστολή πακέτο και άλλες μετρήσεις από κόμβους-παιδιά του με στόχο να αυξήσει το όφελός του.

Εφόσον κάποιος κόμβος λάβει μία μέτρηση, είτε από τον αισθητήρα του είτε από κάποιο κόμβο-παιδί του, και αποφασίσει να αναμείνει, δεν πρέπει να αναμείνει για αυθαίρετο χρονικό διάστημα για δύο λόγους. Αφενός, η μέγιστη διάρκεια κύκλου, τ_n , θέτει εξαρχής ένα άνω φράγμα για το διάστημα αναμονής ώστε να εξασφαλίζεται η ελάχιστη ποιότητα υπηρεσίας. Αφετέρου, όπως έχει ήδη επισημανθεί, οι κόμβοι του δικτύου διαθέτουν περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα. Συνεπώς, ο προσδιορισμός του κατάλληλου διαστήματος αναμονής λειτουργεί ως δικλείδα ασφαλείας για την περίπτωση όπου κάποιος κόμβος-παιδί του s_n τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω εξάντλησης της ενέργειάς του, οπότε ο κόμβος s_n απαλλάσσεται από άσκοπη αναμονή.

Για τον προσδιορισμό του διαστήματος αναμονής ακολουθείται το εξής σκεπτικό:

Ο κόμβος s_n , που ήδη διαθέτει μετρήσεις προς αποστολή (τουλάχιστον τη δική του ενδεχομένως συναθροισμένη με μετρήσεις κάποιων κόμβων-παιδιών του) επιλέγει να αναμείνει επί προσδιοριστέο χρονικό διάστημα Δt , λαμβάνοντας υπόψη δύο αντικρουόμενους παράγοντες, συγκεκριμένα ότι:

- i. όσο αναμένει, η αξία των μετρήσεών του μειώνεται
- ii. αν ενσωματώσει στο προς αποστολή πακέτο του τουλάχιστον μια πρόσθετη μέτρηση, το ενεργειακό του όφελος αυξάνεται.

Όμως, ακόμα και στην περίπτωση (ii) όπου ο κόμβος ενσωματώσει στο προς αποστολή πακέτο του πρόσθετες μετρήσεις, η συνάρτηση οφέλους του μπορεί να λάβει μικρότερη ή μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με εκείνη που είχε τη χρονική στιγμή όπου ο κόμβος s_n αποφάσισε να αναμείνει. Συγκεκριμένα, η συνάρτηση οφέλους αναμένεται να λάβει μεγαλύτερη τιμή αν το διάστημα αναμονής Δt είναι σχετικά μικρό, αφού, τότε, η ενεργειακή εξοικονόμηση λόγω συνάθροισης της ή των πρόσθετων μετρήσεων θα υπερβαίνει τη μείωση που επέρχεται στην ποιότητα υπηρεσίας με την πάροδο του χρόνου. Αντίθετα, αν το διάστημα αναμονής Δt είναι σχετικά μεγάλο, τότε, παρά το

ενεργειακό όφελος που αναμένεται λόγω συνάθροισης νέων μετρήσεων, η μείωση στην ποιότητα υπηρεσίας ενδεχομένως είναι ικανή να οδηγήσει τη συνάρτηση οφέλους να λάβει τιμή μικρότερη από την τιμή που είχε τη στιγμή της απόφασης του κόμβου να αναμείνει. Στο τελευταίο ενδεχόμενο, επομένως, η απόφαση του κόμβου να αναμείνει κρίνεται λανθασμένη, αφού μειώνεται αντί να αυξηθεί η τιμή της συνάρτησης οφέλους. Συνεπώς, καθίσταται φανερή η σημασία της κατάλληλης επιλογής διαστήματος αναμονής Δt .

Το σκεπτικό με το οποίο προσδιορίζεται η τιμή του χρονικού διαστήματος αναμονής είναι το εξής:

Η αναμονή ενός κόμβου για χρονικό διάστημα Δt σε συνδυασμό με τη λήψη τουλάχιστον μιας νέας μέτρησης δεν πρέπει να μειώνει την τιμή της συνάρτησης οφέλους σε σχέση με την τιμή που είχε τη στιγμή της λήψης της απόφασης για αναμονή. Συγκεκριμένα, για να έχει νόημα ο κόμβος s_n , ο οποίος τη χρονική στιγμή t_n έχει διαθέσιμες k μετρήσεις, να αναμείνει για χρονικό διάστημα Δt , πρέπει το όφελός του, $u(k, t_n)$ να είναι μικρότερο ή ίσο από το όφελος του ίδιου κόμβου αν τη χρονική στιγμή $t_n + \Delta t$ έχει διαθέσιμες $k+1$ μετρήσεις, δηλαδή υποθέτοντας ότι στη διάρκεια της αναμονής έλαβε τουλάχιστον μια νέα μέτρηση. Επομένως, πρέπει να ισχύει

$$u(k + 1, t_n + \Delta t) \geq u(k, t_n) \quad (4.8)$$

Αντικαθιστώντας στην (4.8) την έκφραση της συνάρτησης οφέλους από τη σχέση (4.7) και επιλύοντας την ως προς τη θετική μεταβλητή Δt , προκύπτει ότι

$$\Delta t(k, t_n) \leq -t_n + \sqrt{t_n^2 + \tau_n^2 * \frac{\ln\left(\frac{k+1}{k}\right)}{\ln(q_n^{-1})}} \quad \text{για } k \geq 1 \quad (4.9)$$

Επομένως, εμφανίζεται μια μέγιστη τιμή του χρονικού διαστήματος Δt , η οποία εξισώνει τις τιμές της συνάρτησης οφέλους $u(k + 1, t_n + \Delta t)$ και $u(k, t_n)$. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει με εφαρμογή της αρχής της αδιαφορίας (indifference principle), σύμφωνα με την οποία ο κόμβος s_n δεν έχει λόγο να προτιμήσει την αποστολή των k διαθέσιμων μετρήσεων τη χρονική στιγμή t_n από την αποστολή των $k+1$ διαθέσιμων μετρήσεων τη χρονική στιγμή $t_n + \Delta t$, εφόσον και οι δύο αποφάσεις του αποδίδουν το ίδιο όφελος.

Συμπερασματικά, η εξίσωση μέσω της οποίας προσδιορίζεται το διάστημα αναμονής είναι

$$u(k, t_n) = u(k + 1, t_n + \Delta t) \quad \text{για } k \geq 1 \quad (4.10)$$

Αντικαθιστώντας στην (4.10) τη συνάρτηση οφέλους της σχέσης (4.7) λαμβάνοντας υπόψη και την (4.6) προκύπτει

$$\Delta t(k, t_n) = -t_n + \sqrt{t_n^2 + \tau_n^2 * \frac{\ln\left(\frac{k+1}{k}\right)}{\ln(q_n^{-1})}} \quad \text{για } k \geq 1 \quad (4.11)$$

Η σχέση (4.11) προσδιορίζει το μέγιστο χρονικό διάστημα $\Delta t(k, t_n)$ κατά το οποίο μπορεί να αναμείνει ο κόμβος s_n δίχως στατιστικά να μειωθεί το αναμενόμενο όφελός του.

Για να υπάρχει το χρονικό περιθώριο ώστε κάποιος κόμβος s_n , που έχει ήδη διαθέσιμη την πρώτη μέτρηση κατά τη χρονική στιγμή t_n , να λάβει τουλάχιστον μια πρόσθετη μέτρηση, ώστε μέσω της διαδικασίας συνάθροισης να προσδοκά όφελος, πρέπει να ισχύει $\Delta t(2, t_n) < \tau_n$

Όπως φαίνεται στη σχέση (4.11), ο τρόπος καθορισμού του κατά περίπτωση χρονικού διαστήματος αναμονής αναφέρεται στην περίπτωση όπου κάποιος κόμβος s_n διαθέτει τουλάχιστον μια μέτρηση προς αποστολή.

Ωστόσο, το διάστημα αναμονής τυχαίου κόμβου s_n όταν δεν έχει κάποια διαθέσιμη μέτρηση, έστω Δt_0 , πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες προδιαγραφές. Συγκεκριμένα, πρέπει να έχει μικρή διάρκεια, ώστε αν ληφθεί κάποια μέτρηση, να τεθεί άμεσα σε εφαρμογή ο προτεινόμενος αλγόριθμος λειτουργίας του WSN.

Το χρονικό αυτό διάστημα Δt_0 εμφανίζεται πάντα στην αρχή κάθε κύκλου, όταν ο κόμβος δεν έχει καμία διαθέσιμη μέτρηση. Αυτό συμβαίνει σε δύο περιπτώσεις που εναλλάσσονται. Η πρώτη περίπτωση είναι όταν πλησιάζει η στιγμή ο κόμβος s_n να δώσει εντολή στον αισθητήρα του να πραγματοποιήσει μέτρηση. Σε αυτό το ενδεχόμενο, ο κόμβος s_n υπολογίζει ακριβώς τη χρονική στιγμή που θα είναι διαθέσιμη η δική του μέτρηση και έτσι γνωρίζει επί πόσο θα χρειαστεί να αναμείνει. Η δεύτερη περίπτωση εμφανίζεται όταν ο κόμβος s_n έχει στείλει σχετικά πρόσφατα πακέτο που περιείχε συναθροισμένη τη δική του μέτρηση με μετρήσεις που ενδεχομένως έλαβε από κόμβους-παιδιά του. Τότε, λειτουργεί ως ενδιάμεσος κόμβος για το δίκτυο αλλά δεν γνωρίζει πότε και αν θα έχει διαθέσιμη την επόμενη μέτρηση.

Για να αντιμετωπιστούν συμβιβαστούν οι δύο αυτές καταστάσεις προτείνεται το χρονικό διάστημα αναμονής Δt_0 να ισούται με μια χρονική στιγμή (slot) του συστήματος, ώστε να εκκινεί η λειτουργία του περιγραφόμενου σχήματος συνάθροισης και μετάδοσης δεδομένων άμεσα.

Πίνακας 4.1: Σύνοψη χρησιμοποιούμενων συμβόλων	
s_n	Τυχαίος κόμβος του WSN
T_{max}	Μέγιστος συνολικός χρόνος απόκρισης του WSN
T_{rep}	Χρόνος μεταξύ πραγματοποίησης διαδοχικών μετρήσεων από κάποιο κόμβο
max_hops	Μέγιστο πλήθος βημάτων μεταξύ οποιουδήποτε κόμβου του WSN και του κόμβου-συλλέκτη
τ_n	Μέγιστη χρονική διάρκεια κύκλου λειτουργίας του τυχαίου κόμβου
t_n	Χρονική στιγμή εντός του τρέχοντος κύκλου λειτουργίας
T_n	Απόλυτος χρονικός άξονας
K	Πλήθος κόμβων-παιδιών του τυχαίου κόμβου
k	Πλήθος διαθέσιμων μετρήσεων του τυχαίου κόμβου στον τρέχοντα κύκλο

u	Συνάρτηση οφέλους του τυχαίου κόμβου
x	Χρόνος ολοκλήρωσης μέτρησης από αισθητήρα κόμβου- τεχνική παράμετρος
σ_τ	Παράμετρος με διαστάσεις χρόνου του χρησιμοποιούμενου μοντέλου περιγραφής της χρονικής συσχέτισης των μετρήσεων

Πίνακας 4.2: Σύνοψη χρησιμοποιούμενων συμβόλων. Τονίζεται ότι όλες οι χρονικές μεταβλητές αποτιμώνται ως ακέραια πολλαπλάσια της στοιχειώδους χρονοσχισμής του δικτύου, που εκφράζει τη μονάδα του χρόνου

4.4 Παρουσίαση του αλγορίθμου συνάθροισης και εκπομπής μετρήσεων

Ας υποθεθεί ότι τη χρονική στιγμή T_o εκκινεί νέος κύκλος λειτουργίας για τον κόμβο s_n .

- Βήμα 1: Η μεταβλητή t_n , που εκφράζει τη σχετική χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, μηδενίζεται. Επίσης, ο κόμβος s_n δεν διαθέτει μέτρηση προς αποστολή, οπότε $k=0$. Ο κόμβος s_n αναμένει για χρονικό διάστημα Δt_o . Μόλις λήξει το χρονικό αυτό διάστημα, υπάρχουν δύο ενδεχόμενα: είτε ο κόμβος s_n θα διαθέτει μέτρηση (από το δικό του αισθητήρα ή από κάποιο κόμβο-παιδί του) είτε όχι.
 - i. Αν δεν υπάρχει μέτρηση, δηλαδή αν $k=0$, ο τρέχων κύκλος ολοκληρώνεται και επαναλαμβάνεται το βήμα 1. Ας σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή τα μεγέθη που αξιολογούν την επίδοση του δικτύου, δηλαδή το ενεργειακό όφελος και η καθυστέρηση δεν ορίζονται.
 - ii. Αν υπάρχει τουλάχιστον μια μέτρηση, ακολουθεί το βήμα 2.
- Βήμα 2: Αρχικά, ενημερώνεται η μεταβλητή k , ώστε να είναι ίση με το πλήθος των μετρήσεων που διαθέτει ο κόμβος s_n . Στη συνέχεια, συγκρίνεται το πλήθος των μετρήσεων k που είναι διαθέσιμες για μετάδοση προς τον κόμβο-πατέρα του με το μέγιστο πλήθος μετρήσεων $K+1$ που είναι δυνατόν να μεταδοθούν από οποιοδήποτε κόμβο.
 1. Αν $k=K+1$ περαιτέρω αναμονή δεν έχει νόημα, οπότε ο κόμβος s_n συναθροίζει τις μετρήσεις που διαθέτει και τις αποστέλλει στον κόμβο-πατέρα του. Ο τρέχων κύκλος ολοκληρώνεται. Το ενεργειακό κέρδος που προέκυψε από τον τρέχοντα κύκλο είναι :

$$g(K + 1) = K * E_o \quad (4.12)$$
 2. Αν $k < K+1$, υπάρχει περιθώριο να ληφθούν πρόσθετες μετρήσεις, οπότε ο κόμβος s_n έχει δυνητικό ενεργειακό όφελος εφόσον αναμείνει. Στη συνέχεια, ελέγχεται αν υπάρχει το αναγκαίο χρονικό περιθώριο αναμονής του κόμβου s_n . Συγκεκριμένα, αν ο κόμβος s_n αποφασίσει να αναμείνει, πρέπει να αναμείνει επί χρονικό διάστημα ίσο με $\Delta t(k, t_n)$, όπου k το τρέχον πλήθος των διαθέσιμων προς αποστολή μετρήσεων και t_n η σχετική χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια του

τρέχοντος κύκλου. Επομένως, ο κόμβος s_n πρέπει να εξετάσει αν η μέγιστη διάρκεια ενός κύκλου του επιτρέπει να αναμείνει, συγκρίνοντας αν η χρονική στιγμή της απόφασης t_n προσαυξημένη κατά το χρονικό διάστημα $\Delta t(k, t_n)$ είναι μικρότερη ή ίση της μέγιστης χρονικής διάρκειας κάθε κύκλου, τ_n . Δηλαδή:

$$t_n + \Delta t(k, t_n) \leq \tau_n \quad (4.13)$$

- i. Αν ισχύει η (4.13), ο κόμβος s_n διαθέτει και το χρονικό περιθώριο να αναμείνει προσδοκώντας να λάβει πρόσθετες μετρήσεις. Για να ληφθεί υπόψη και η ποιότητα υπηρεσίας που έχει προδιαγραφεί για τη συγκεκριμένη WSN εφαρμογή, η τελική απόφαση ως προς το τί θα αποφασίσει ο κόμβος s_n αποτελεί πείραμα τύχης που εκτελείται ως εξής:
 - a. Με πιθανότητα $(1-p)$ ο κόμβος συναθροίζει και αποστέλλει τις k μετρήσεις που έχει λάβει τη χρονική στιγμή t_n . Ο τρέχων κύκλος λειτουργίας ολοκληρώνεται, με ενεργειακό όφελος ίσο προς

$$g(k) = (k - 1) * E_o \quad (4.14)$$
 Στη συνέχεια ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 1.
 - b. Με πιθανότητα p ο κόμβος αποφασίζει να αναμείνει κατά το χρονικό διάστημα $\Delta t(k, t_n)$, οπότε ο τρέχων κύκλος συνεχίζεται και μετά την πάροδο του χρονικού διαστήματος αυτού και ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 2.
- ii. Αν δεν ισχύει η (4.13), ο κόμβος s_n δεν έχει το χρονικό περιθώριο να αναμείνει για χρονικό διάστημα $\Delta t(k, t_n)$, οπότε αποφασίζει να συναθροίσει και αποστέλλει όλες τις μετρήσεις που έχει λάβει. Ο τρέχων κύκλος ολοκληρώνεται και ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 1. Το ενεργειακό όφελος του κύκλου δίνεται από τη σχέση (4.14).

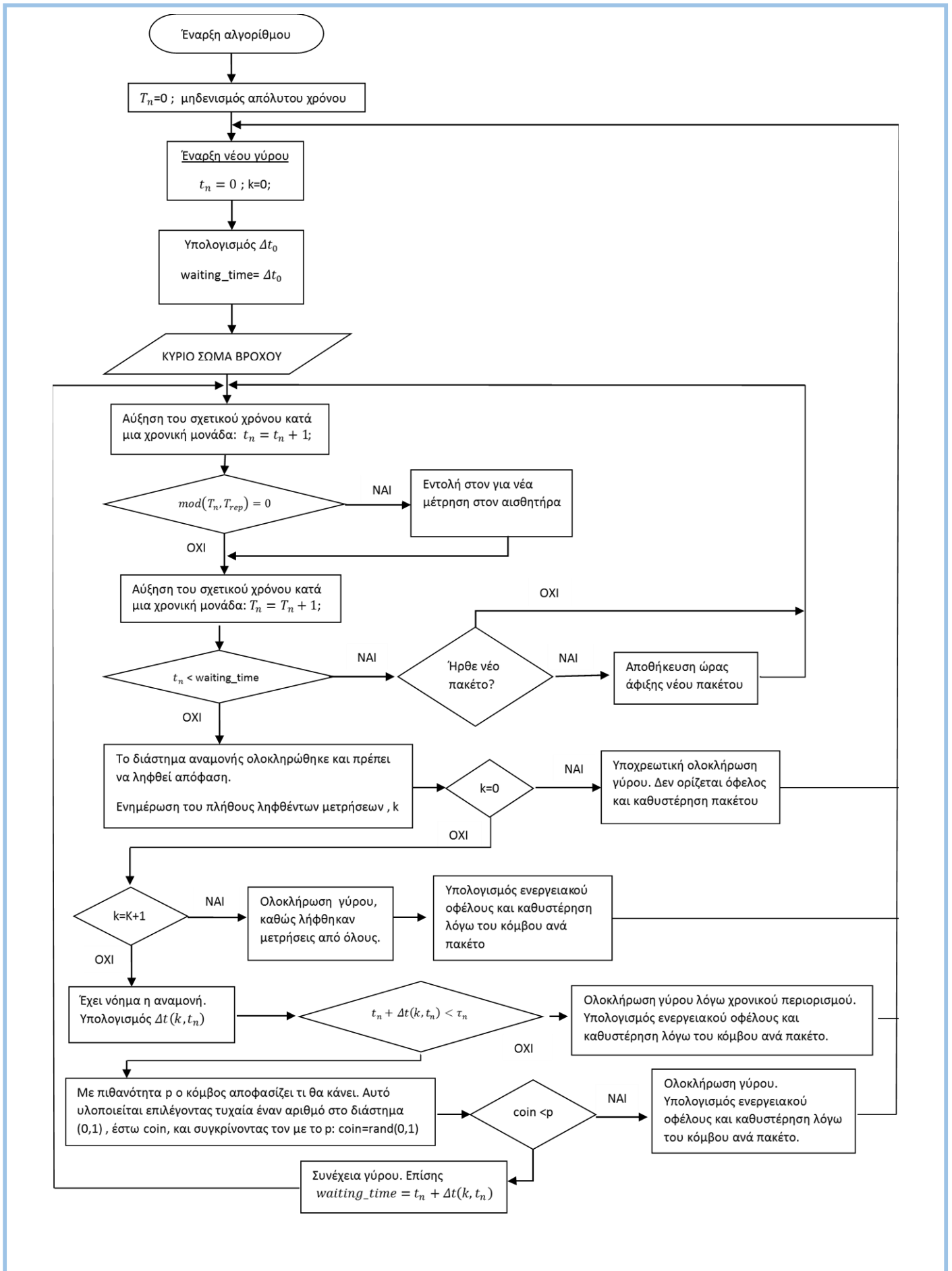
Από τα προηγούμενα γίνεται φανερό ότι ο τρόπος λειτουργίας κάθε κόμβου του δικτύου εξασφαλίζει συνολικά στο δίκτυο ανεκτή ποιότητα υπηρεσίας, δηλαδή ποιότητα υπηρεσίας που υπερβαίνει το κατώφλιο που θέτουν οι προδιαγραφές, χωρίς, όμως, να είναι η μέγιστη δυνατή. Η ρύθμιση της επιθυμητής ποιότητας υπηρεσίας επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας ανάλογα την τιμή της παραμέτρου ποιότητας υπηρεσίας, p , στο εύρος τιμών $[0,1]$.

Όταν η παράμετρος ποιότητας υπηρεσίας, p , είναι μικρότερη από $\frac{1}{2}$, αναμένεται ότι, τις περισσότερες φορές, ο κόμβος s_n αποφασίζει να συναθροίσει και να αποστέλλει όσες μετρήσεις είχε λάβει μέχρι τη χρονική στιγμή t_n , και να μην αναμείνει πρόσθετη

μέτρηση προς συνάθροιση με τις ήδη διαθέσιμες και αποστολή της συναθροισμένης τιμής με καθυστέρηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η καθυστέρηση με την οποία φθάνουν οι μετρήσεις στον κόμβο-συλλέκτη. Βελτιώνεται δηλαδή η ποιότητα υπηρεσίας του δικτύου σε βάρος, όμως, της διάρκειας ζωής του δικτύου, αφού πραγματοποιούνται περισσότερες αποστολές πακέτων σε επίπεδο δικτύου. Αντίθετα αποτελέσματα θα υπάρξουν αν η παράμετρος ποιότητας υπηρεσίας, p , είναι μεγαλύτερη από $\frac{1}{2}$. Στην περίπτωση αυτή, η καθυστέρηση με την οποία θα φθάνουν οι μετρήσεις στον κόμβο-συλλέκτη θα αυξηθεί, με ταυτόχρονη αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου, αφού θα πραγματοποιούνται συνολικά λιγότερες αποστολές πακέτων σε επίπεδο δικτύου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παράμετρος ποιότητας υπηρεσίας καθορίζεται από το διαχειριστή του δικτύου και κοινοποιείται σε όλο το δίκτυο κατά τη διάρκεια της φάσης αυτο-αναγνώρισης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται υπό μορφή διαγράμματος ροής, ο προτεινόμενος αλγόριθμος συνάθροισης και εκπομπής.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής προτεινόμενου αλγορίθμου συνάθροισης και μετάδοσης δεδομένων σε WSN

4.5 Αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου

Τα μέτρα (metrics) που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της επίδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι δύο. Το πρώτο είναι το ενεργειακό όφελος που επιτυγχάνεται για το δίκτυο. Το δεύτερο είναι η μέση καθυστέρηση την οποία υφίστανται τα μετρητικά δεδομένα προκειμένου να φθάσουν από τους αισθητήρες όπου παράγονται στον κόμβο-συλλέκτη.

Ο υπολογισμός του ενεργειακού οφέλους γίνεται ανά κύκλο λειτουργίας και ανά κόμβο. Συνεπώς, για να προκύψει συνολική εικόνα ως προς το μέγεθός του ενεργειακού οφέλους, πρέπει να αθροιστεί το ενεργειακό κέρδος που προκύπτει ανά κύκλο λειτουργίας ανά κόμβο και, στη συνέχεια να αθροιστούν τα επιμέρους αποτελέσματα από όλους τους κόμβους του δικτύου.

Όσον αφορά τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης, αυτός μπορεί να γίνει κατά δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος πραγματοποιείται σε επίπεδο κόμβου. Συγκεκριμένα, κάθε κόμβος γνωρίζει τη χρονική στιγμή κατά την οποία κάποια μέτρηση καθίσταται διαθέσιμη σε αυτόν. Επίσης, γνωρίζει τη χρονική στιγμή κατά την οποία κάθε μέτρηση συναθροισμένη σε πακέτο προωθείται προς τον κόμβο-πατέρα του. Κατ' αυτόν τον τρόπο, κάθε κόμβος μπορεί να υπολογίσει την καθυστέρηση που προκάλεσε ο ίδιος σε κάθε μέτρηση. Επίσης, κάθε κόμβος μπορεί να υπολογίσει το μέσο όρο των καθυστερήσεων, και, στη συνέχεια, να προσδιορίσει τη μέση καθυστέρηση ανά μέτρηση που προκαλεί.

Όμως, κυρίως ενδιαφέρει η συνολική καθυστέρηση που υφίσταται κάθε μέτρηση από τη στιγμή που θα πραγματοποιηθεί από κάποιο αισθητήρα μέχρι να φθάσει στον κόμβο-συλλέκτη. Αυτή είναι ίση με το άθροισμα των καθυστερήσεων που υφίσταται η μέτρηση σε κάθε κόμβο μέχρι να φθάσει στον προορισμό της.

Ένας τρόπος εκτίμησης της μέγιστης συνολικής καθυστέρησης είναι ο εξής. Σε κάθε πακέτο, εκτός από την ίδια τη μέτρηση, ενσωματώνεται και χρονοσφραγίδα που θα δηλώνει την απόλυτη χρονική στιγμή πραγματοποίησης της μέτρησης. Επίσης, σε περίπτωση συνάθροισης της μέτρησης με άλλες, στο πεδίο της χρονοσφραγίδας εισάγεται η παλαιότερη χρονική τιμή από τις μετρήσεις που συναθροίζονται. Έτσι, όταν κάποια στιγμή στον κόμβο-συλλέκτη φθάσει πακέτο που περιέχει και μέτρηση από κόμβους-φύλλα του δικτύου, ο κόμβος-συλλέκτης είναι σε θέση να συγκρίνει την τρέχουσα απόλυτη χρονική στιγμή με την τιμή της χρονοσφραγίδας που θα περιέχεται στο πακέτο. Η διαφορά των δύο αυτών χρονικών στιγμών αποτελεί μια εκτίμηση της μέγιστης συνολικής καθυστέρησης του δικτύου. Αυτό ισχύει, βέβαια, υπό την προϋπόθεση ότι οι κόμβοι του δικτύου είναι συγχρονισμένοι. Ο συγχρονισμός των κόμβων απαιτείται για να υπάρχει κοινή χρονική αναφορά όσον αφορά τις χρονικές στιγμές διεξαγωγής των μετρήσεων, ενώ δεν απαιτείται να είναι αυστηρός. Καθώς οι κόμβοι-αισθητήρες ενός WSN δικτύου αναπτύσσονται, στη συνηθισμένη περίπτωση, περίπου την ίδια χρονική στιγμή, εκκινούν σχεδόν ταυτόχρονα τη λειτουργία τους, και επομένως, η έννοια της κοινής χρονικής αναφοράς μεταξύ των κόμβων υφίσταται. Σε περίπτωση μεταγενέστερης προσθήκης νέων κόμβων στο δίκτυο, αυτοί συγχρονίζονται με τον κόμβο-συλλέκτη κατά τη φάση αυτό-αναγνώρισης του δικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

5.1 Τιμές λειτουργικών παραμέτρων προσομοίωσης

Για την πειραματική επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του προτεινόμενου σχήματος συνάθροισης και προώθησης δεδομένων σε WSN δίκτυα, γίνεται προσομοίωση του σχήματος αυτού χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πακέτο Matlab.

Η προσομοίωση γίνεται σε ένα WSN δίκτυο που περιλαμβάνει 50 κόμβους, οι οποίοι κατανέμονται στο χώρο κατά τυχαίο τρόπο. Η προσομοίωση της λειτουργίας του WSN δικτύου εκκινεί μετά τη φάση αυτό-αναγνώρισης του δικτύου, δηλαδή αφού έχει σχηματιστεί το δένδρο συνάθροισης και προώθησης δεδομένων. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφ.4 η τοποθέτηση των κόμβων γίνεται κατά τυχαίο τρόπο. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις που κάθε φορά διεξάγονται σε διαφορετικό δένδρο συνάθροισης, το οποίο και σχηματίζεται κατά τη διάρκεια κάθε προσομοίωσης κατά τυχαίο τρόπο. Πάντοτε, όμως, στη ρίζα του δένδρου συνάθροισης βρίσκεται ο κόμβος-συλλέκτης.

Οι τιμές των λειτουργικών παραμέτρων του δικτύου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις αναφέρονται στον Πίν. 5.1.

<i>Πίνακας 5.1: Τιμές παραμέτρων προσομοίωσης</i>	
$T_{max} = 600$	<i>Μέγιστος συνολικός χρόνος απόκρισης του WSN</i>
$T_{rep} = T_{max}/5$	<i>Χρόνος μεταξύ πραγματοποίησης διαδοχικών μετρήσεων από κάποιο κόμβο</i>
$x = 10$	<i>Χρόνος ολοκλήρωσης μέτρησης από αισθητήρα κόμβου- τεχνική παράμετρος</i>
$\sigma_{\tau} = 0.1 * T_{max}$	<i>Παράμετρος με διαστάσεις χρόνου του χρησιμοποιούμενου μοντέλου περιγραφής της χρονικής συσχέτισης των μετρήσεων</i>
$mean_delay = 30$	<i>Μέσος τιμή του χρόνου που απαιτείται για τυχαίο πακέτο, ώστε να μεταβεί από έναν κόμβο-αισθητήρα προς τον κόμβο του επόμενου επιπέδου στο δένδρο συνάθροισης</i>
$T_{simulation} = 12 * T_{max}$	<i>Ολικός χρόνος προσομοίωσης</i>

Πίνακας 5.1: Τιμές παραμέτρων προσομοίωσης. Τονίζεται ότι όλες οι χρονικές μεταβλητές αποτιμώνται ως ακέραια πολλαπλάσια της στοιχειώδους χρονοσχημής του δικτύου, που εκφράζει τη μονάδα του χρόνου

Η προσομοίωση για κάθε τοπολογία δικτύου, δηλαδή για κάθε δένδρο δρομολόγησης πραγματοποιείται πολλές φορές. Αυτό που διαφοροποιείται σε κάθε προσομοίωση ίδιας τοπολογίας δικτύου είναι η τιμή της παραμέτρου ποιότητας υπηρεσίας, p . Συγκεκριμένα, η τιμή p λαμβάνει τις τιμές 0, 0.25, 0.5, 0.75 και 1. Η τιμή $p = 0$ αντιστοιχεί στην περίπτωση που στο δίκτυο δεν πραγματοποιείται συνάθροιση δεδομένων, ενώ η τιμή $p=1$ αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου οι κόμβοι εξαντλούν το διαθέσιμο χρονικό διάστημα που έχουν για να αναμονή τυχούσας λήψης πρόσθετων μετρήσεων. Επίσης, για τις αποστάσεις των κόμβων έχει υποτεθεί ότι χαρακτηρίζονται

από μεταβλητότητα. Συγκεκριμένα, ο χρόνος για να φθάσει ένα πακέτο από κάποιο κόμβο στον αντίστοιχο κόμβο-πατέρα του χαρακτηρίζεται από μια ντετερμινιστική συνιστώσα (*mean_delay*) και μια τυχαία συνιστώσα η οποία λαμβάνει υπόψη ενδεχόμενα φυσικά εμπόδια μεταξύ των κόμβων ή και πιθανές επανεκπομπές λόγω σφαλμάτων.

5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης για διαφορετικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας

Όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφ.4, τα μέτρα επίδοσης του δικτύου είναι το ενεργειακό όφελος και η καθυστέρηση απόκρισης του δικτύου.

Ως κριτήριο για την πυκνότητα κόμβων του δικτύου χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή της απόστασης που απέχουν οι κόμβοι-αισθητήρες από τον κόμβο-συλλέκτη, μετρημένη σε πλήθος βημάτων (*hops*). Ως βήμα ορίζεται η απόσταση οποιουδήποτε κόμβου-αισθητήρα από τον κόμβο-αισθητήρα στο αμέσως υψηλότερο επίπεδο του δένδρου συνάθροισης. Επομένως, όταν η μέση τιμή απόστασης από τον κόμβο-συλλέκτη σε ένα δίκτυο λαμβάνει μεγάλη αριθμητική τιμή, το δίκτυο αυτό χαρακτηρίζεται ως αραιό. Αντίθετα, όταν η μέση τιμή απόστασης από τον κόμβο-συλλέκτη σε ένα δίκτυο λαμβάνει μικρή αριθμητική τιμή, τότε το δίκτυο αυτό χαρακτηρίζεται ως πυκνό.

Τα μεγέθη που προσδιορίστηκαν κατά την προσομοίωση κάθε δικτύου είναι το συνολικό ενεργειακό όφελος του και η μέση μέγιστη καθυστέρηση που υφίσταται μια μέτρηση. Για τη μέτρηση του συνολικού ενεργειακού οφέλους, αθροίζονται το ενεργειακά οφέλη όλων των κόμβων του δικτύου, μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης. Για τη μέτρηση της μέσης μέγιστης καθυστέρησης ακολουθείται η εξής διαδικασία. Όταν κάποια μέτρηση προέρχεται από κάποιο κόμβο-φύλλο του δένδρου δρομολόγησης που απέχει το μέγιστο αριθμό βημάτων από τον κόμβο-συλλέκτη, αυτό σημειώνεται σε σχετικό πεδίο του πακέτου που αποστέλλεται, μαζί με την αντίστοιχη απόλυτη χρονική στιγμή κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η μέτρηση. Η ένδειξη αυτή διατηρείται και μετά από ενδεχόμενες συναθροίσεις που γίνονται. Μόλις φθάσει στον κόμβο-συλλέκτη πακέτο που περιέχει μέτρηση από κόμβο που απέχει μέγιστο αριθμό βημάτων, υπολογίζεται η διαφορά της τρέχουσας χρονικής στιγμής από τη χρονική στιγμή όπου πραγματοποιήθηκε η μέτρηση. Η διαφορά αποτελεί τη μέγιστη καθυστέρηση του δικτύου. Για λόγους στατιστικής ορθότητας, στο τέλος της προσομοίωσης υπολογίζεται η μέση τιμή από τις μέγιστες καθυστερήσεις που σημειώθηκαν κατά τη διάρκειά της.

5.2.1 Ενεργειακό όφελος

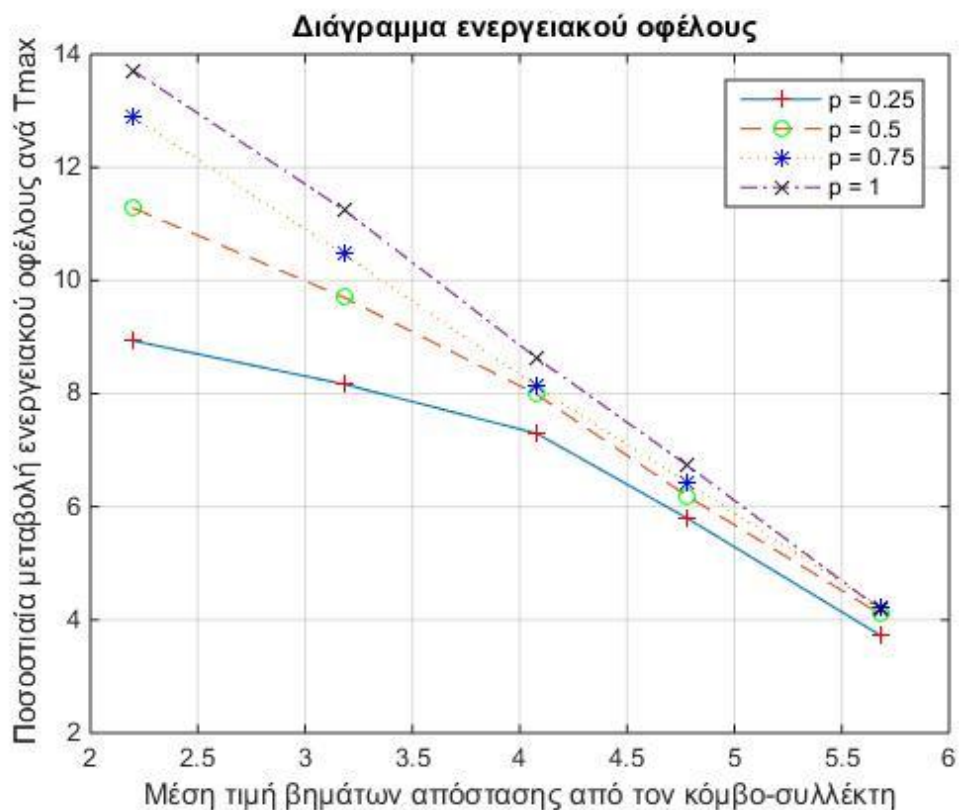
Οι απόλυτες τιμές του ενεργειακού οφέλους που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις δεν προσφέρονται για εξαγωγή συμπερασμάτων. Αντίθετα, το ενεργειακό όφελος θα αποτιμηθεί σχετικά με την περίπτωση όπου δεν πραγματοποιείται συνάθροιση, οπότε οι κόμβοι δεν αναμένουν να λάβουν τις μετρήσεις άλλων κόμβων. Η περίπτωση αυτή προκύπτει όταν η τιμή p λαμβάνει την τιμή 0.

Το μέγεθος που χρησιμοποιείται είναι η ποσοστιαία μεταβολή του ενεργειακού οφέλους. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η ποσότητα

$$\left(\frac{\text{Ενεργειακό όφελος με συνάθροιση}}{\text{Ενεργειακό όφελος χωρίς συνάθροιση}} - 1 \right) * 100\% \quad (5.1)$$

Το ενεργειακό όφελος που προκύπτει, υπολογίζεται για διάφορες τιμές της παραμέτρου p .

Στο διάγραμμα του Σχ.5.1 φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή του ενεργειακού οφέλους για δίκτυα διαφορετικών διαστάσεων ανά χρονικό διάστημα T_{max} .



Διάγραμμα 5.1: Ποσοστιαία μεταβολή του ενεργειακού οφέλους για διάφορες τιμές της παραμέτρου p

5.2.2 Καθυστέρηση απόκρισης

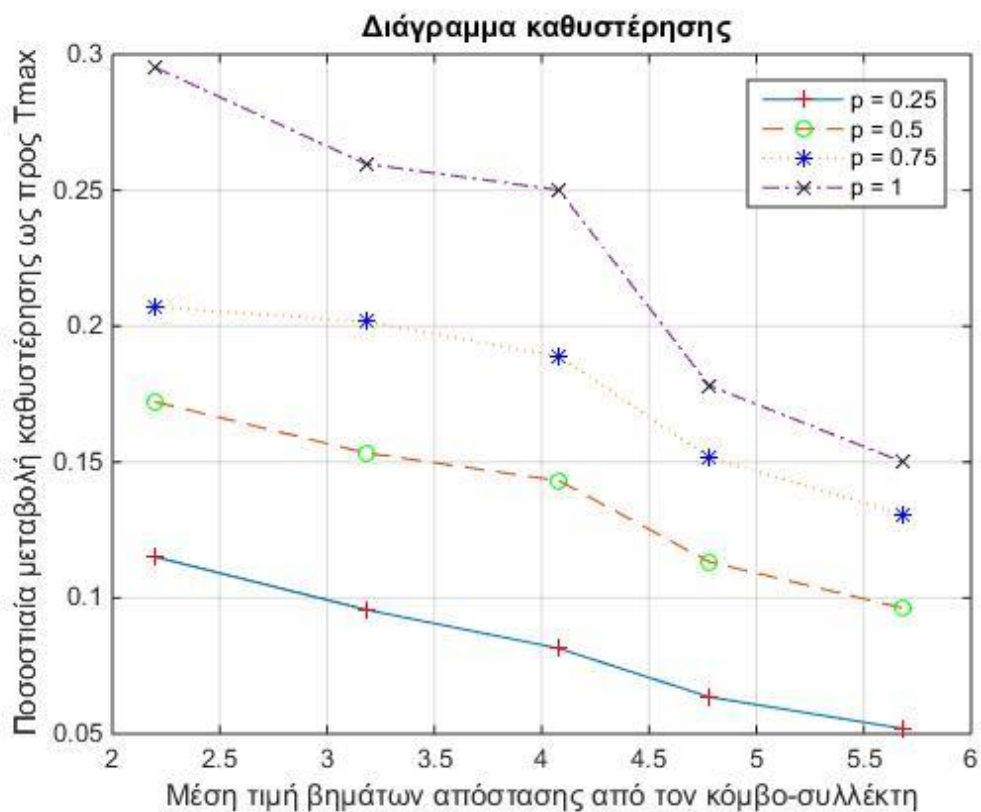
Οι απόλυτες τιμές της μέσης μέγιστης καθυστέρησης που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις δεν προσφέρονται για εξαγωγή συμπερασμάτων. Αντίθετα, η καθυστέρηση θα αποτιμηθεί σχετικά με την περίπτωση όπου δεν πραγματοποιείται συνάθροιση, οπότε οι κόμβοι δεν αναμένουν να λάβουν τις μετρήσεις άλλων κόμβων. Η περίπτωση αυτή προκύπτει όταν η τιμή p λαμβάνει την τιμή 0.

Το μέγεθος που χρησιμοποιείται είναι η ποσοστιαία μεταβολή της μέσης μέγιστης καθυστέρησης. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η ποσότητα

$$\left(\frac{\text{Μέση Μέγιστη Καθυστέρηση με συνάθροιση}}{\text{Μέση Μέγιστη Καθυστέρηση χωρίς συνάθροιση}} - 1 \right) * 100\% \quad (5.2)$$

Η μέση μέγιστη καθυστέρηση που προκύπτει, υπολογίζεται για διάφορες τιμές της παραμέτρου p .

Στο διάγραμμα του Σχ.5.2 φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή της μέσης μέγιστης καθυστέρησης ως προς T_{max} για δίκτυα διαφορετικών διαστάσεων.



Διάγραμμα 5.2: Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης μέγιστης καθυστέρησης για διάφορες τιμές της παραμέτρου p

5.2.3 Συμπεράσματα προσομοίωσης και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η προσομοίωση επιβεβαιώνει τα θεωρητικώς αναμενόμενα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, διατηρώντας σταθερή την τοπολογία του δικτύου και μεταβάλλοντας μόνο την τιμή της παραμέτρου p , παρατηρείται ότι καθώς λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, πάντοτε εντός του διαστήματος $[0,1]$, το συνολικό ενεργειακό όφελος του δικτύου αυξάνεται, διότι οι κόμβοι αναμένουν κατά μέσο όρο περισσότερες φορές να λάβουν και νέα μέτρηση ώστε να τη συναθροίσουν με τις υπάρχουσες και να αποφύγουν

αποστολές πακέτων. Ωστόσο, ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η αύξηση του ενεργειακού οφέλους μειώνεται καθώς αυξάνεται η πυκνότητα του δικτύου. Αυτό είναι επίσης αναμενόμενο, αφού καθώς το δίκτυο μεγαλώνει σε διαστάσεις, κάθε κόμβος-αισθητήρας που δεν απέχει το μέγιστο πλήθος βημάτων από τον κόμβο αισθητήρα θα έχει μικρότερο πλήθος παιδιών και, κατά συνέπεια, μικρότερες δυνατότητες συνάθροισης δεδομένων. Ταυτόχρονα, σε δίκτυα μεγαλύτερων διαστάσεων, οι κόμβοι έχουν μικρότερο διαθέσιμο χρονικό διάστημα αναμονής. Αυτό σημαίνει ότι, από ένα σημείο και μετά, η αύξηση της παραμέτρου p δεν μεταβάλλει ουσιαστικά το συνολικό ενεργειακό κέρδος του δικτύου, διότι οι κόμβοι αναγκάζονται να αποστέλλουν σύντομα τις μετρήσεις τους, χάνοντας τη δυνατότητα να τις συναθροίσουν με άλλες.

Αντίστοιχα, όσον αφορά τη μέση μέγιστη χρονική καθυστέρηση απόκρισης δικτύου προκύπτει ότι, καθώς η παράμετρος p λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές πάντοτε εντός του διαστήματος $[0,1]$, η μέση μέγιστη καθυστέρηση αυξάνεται, διότι κάθε κόμβος αναμένει κατά μέσο όρο περισσότερες φορές να λάβει και επόμενη μέτρηση. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι, με τον τρόπο που είναι δομημένος ο προτεινόμενος αλγόριθμος λειτουργίας, η μέγιστη καθυστέρηση οποιασδήποτε μέτρησης ποτέ δεν υπερβαίνει την αντίστοιχη προδιαγραφή, T_{max} . Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι σε δίκτυα μεγαλύτερων διαστάσεων, η αύξηση της τιμής p αυξάνει τη μέση μέγιστη καθυστέρηση, χωρίς ανάλογη αύξηση στο ενεργειακό όφελος. Αυτό συμβαίνει γιατί οι κόμβοι, ακόμα και αν αποφασίσουν να αναμείνουν για κάποιο χρονικό διάστημα, αυτό δεν επαρκεί για να λάβουν πρόσθετη μέτρηση, και τελικά αναγκάζονται λόγω χρονικού περιορισμού να τερματίσουν τον τρέχοντα κύκλο λειτουργίας τους.

5.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης για διαφορετικές υπηρεσίες

Καθώς το προτεινόμενο σχήμα συνάθροισης και εκπομπής μετρήσεων εξαρτάται από το είδος της εξυπηρετούμενης εφαρμογής, γίνονται προσομοιώσεις και για διαφορετικά είδη εφαρμογών προκειμένου να εξεταστεί η απόδοση του προτεινόμενου σχήματος συνάθροισης και εκπομπής δεδομένων. Συγκεκριμένα, το είδος της εξυπηρετούμενης εφαρμογής υπεισέρχεται στο προτεινόμενο σχήμα μέσω της παραμέτρου σ_τ , η οποία εκφράζει και τη χρονική συσχέτιση μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων. Όσο η τιμή σ_τ μεγαλώνει, αυτό συνεπάγεται δυνατότητα για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα αναμονής, εντός πάντα του μέγιστου επιτρεπτού ορίου, τ_n , για κάθε κύκλο λειτουργίας. Στην παρούσα προσομοίωση, η τιμή σ_τ λαμβάνει τις τιμές: $0.05 * T_{max}$, $0.1 * T_{max}$ και $0.15 * T_{max}$.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται διατηρώντας σταθερές παραμέτρους λειτουργίας, όπως αυτές φαίνονται στον Πίν.5.1. σε δίκτυα με διαφορετικές πυκνότητες κόμβων. Αυτό που μεταβάλλεται κάθε φορά είναι η τιμή της παραμέτρου σ_τ , ενώ οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για $p=0.5$

5.3.1 Ενεργειακό όφελος

Όπως και προηγουμένως, οι απόλυτες τιμές του ενεργειακού οφέλους που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις δεν προσφέρονται για εξαγωγή συμπερασμάτων. Αντίθετα, το

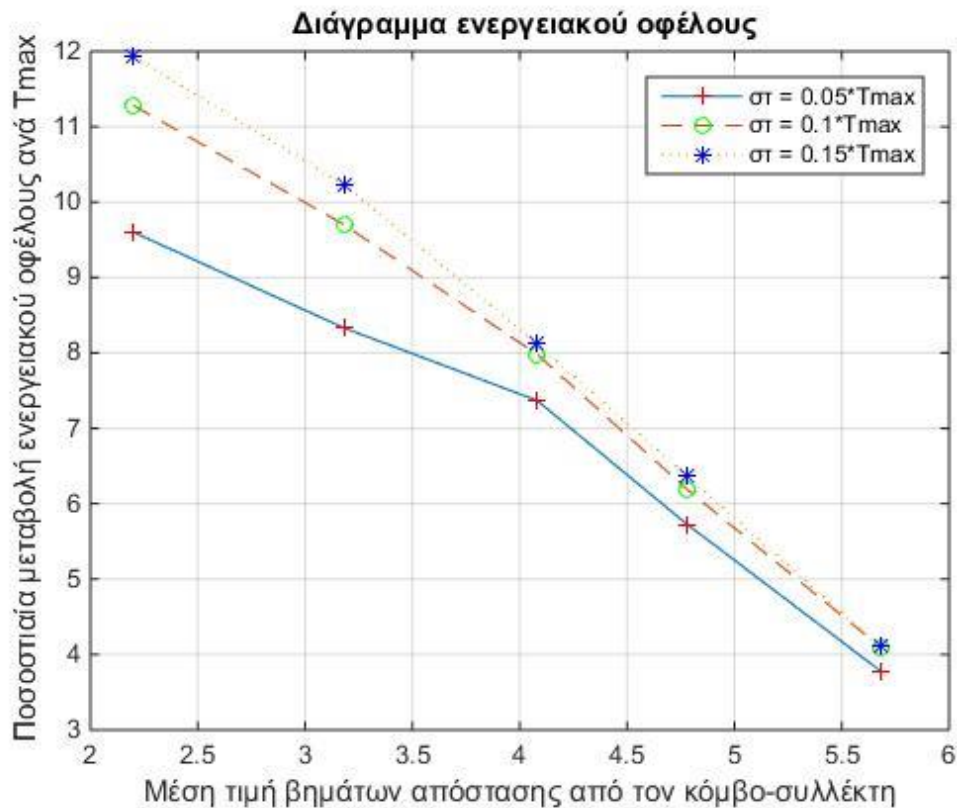
ενεργειακό όφελος θα αποτιμηθεί σχετικά με την περίπτωση όπου δεν πραγματοποιείται συνάθροιση, οπότε οι κόμβοι δεν αναμένουν να λάβουν τις μετρήσεις άλλων κόμβων.

Το μέγεθος που χρησιμοποιείται είναι η ποσοστιαία μεταβολή του ενεργειακού οφέλους. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η ποσότητα

$$\left(\frac{\text{Ενεργειακό όφελος με συνάθροιση}}{\text{Ενεργειακό όφελος χωρίς συνάθροιση}} - 1 \right) * 100\% \quad (5.1)$$

Το ενεργειακό όφελος που προκύπτει, υπολογίζεται για τιμή $p=0.5$ και διάφορες τιμές της παραμέτρου σ_τ .

Στο διάγραμμα του Σχ.5.3 φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή του ενεργειακού οφέλους για δίκτυα διαφορετικών διαστάσεων ανά χρονικό διάστημα T_{max} .



Διάγραμμα 5.3: Ποσοστιαία μεταβολή του ενεργειακού οφέλους για διάφορες τιμές της παραμέτρου σ_τ

5.3.2 Καθυστέρηση απόκρισης

Αντίστοιχα με προηγουμένως, οι απόλυτες τιμές της μέσης μέγιστης καθυστέρησης που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις δεν προσφέρονται για εξαγωγή

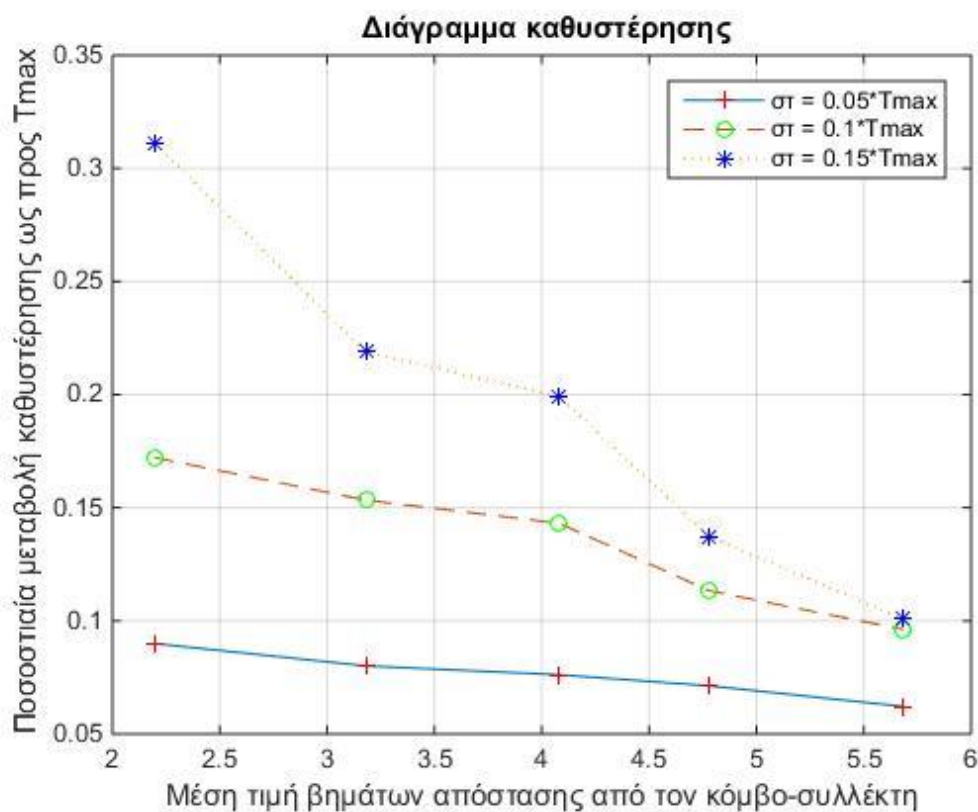
συμπερασμάτων. Αντίθετα, η καθυστέρηση θα αποτιμηθεί σχετικά με την περίπτωση όπου δεν πραγματοποιείται συνάθροιση, οπότε οι κόμβοι δεν αναμένουν να λάβουν τις μετρήσεις άλλων κόμβων.

Το μέγεθος που χρησιμοποιείται είναι η ποσοστιαία μεταβολή της μέσης μέγιστης καθυστέρησης. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η ποσότητα

$$\left(\frac{\text{Μέση Μέγιστη Καθυστέρηση με συνάθροιση}}{\text{Μέση Μέγιστη Καθυστέρηση χωρίς συνάθροιση}} - 1 \right) * 100\% \quad (5.2)$$

Η μέση μέγιστη καθυστέρηση που προκύπτει, υπολογίζεται για τιμή $p=0.5$ και διάφορες τιμές της παραμέτρου σ_τ .

Στο διάγραμμα του Σχ.5.4 φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή της μέσης μέγιστης καθυστέρησης ως προς T_{max} για δίκτυα διαφορετικών διαστάσεων.



Διάγραμμα 5.4 Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης μέγιστης καθυστέρησης για διάφορες τιμές της παραμέτρου σ_τ

5.3.3 Συμπεράσματα προσομοίωσης και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η προσομοίωση επιβεβαιώνει τα θεωρητικώς αναμενόμενα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, διατηρώντας σταθερή την τοπολογία του δικτύου και μεταβάλλοντας μόνο την τιμή της παραμέτρου σ_τ , παρατηρείται ότι καθώς λαμβάνει μεγαλύτερες

τιμές, το συνολικό ενεργειακό όφελος του δικτύου αυξάνεται, διότι οι κόμβοι αναμένουν κατά μέσο όρο μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα για να λάβουν και νέα μέτρηση ώστε να τη συναθροίσουν με τις υπάρχουσες και να αποφύγουν αποστολές πακέτων. Ωστόσο, ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η αύξηση του ενεργειακού οφέλους μειώνεται καθώς αυξάνεται η πυκνότητα του δικτύου. Αυτό είναι επίσης αναμενόμενο, αφού καθώς το δίκτυο μεγαλώνει σε διαστάσεις, κάθε κόμβος-αισθητήρας που δεν απέχει το μέγιστο πλήθος βημάτων από τον κόμβο αισθητήρα έχει μικρότερο διαθέσιμο χρονικό διάστημα αναμονής.

Αντίστοιχα, όσον αφορά τη μέση μέγιστη χρονική καθυστέρηση απόκρισης δικτύου προκύπτει ότι, καθώς η παράμετρος σ_τ λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, η μέση μέγιστη καθυστέρηση αυξάνεται, διότι κάθε κόμβος αναμένει κατά μέσο όρο μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα για να λάβει και επόμενη μέτρηση. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι, με τον τρόπο που είναι δομημένος ο προτεινόμενος αλγόριθμος λειτουργίας, η μέγιστη καθυστέρηση οποιασδήποτε μέτρησης ποτέ δεν υπερβαίνει την αντίστοιχη προδιαγραφή, T_{max} .

Βιβλιογραφία

- [1] I.F. Akyildiz, M.V. Curan, “Wireless Sensor Networks”, Wiley, July 2010.
- [2] Α.Χ. Βουλκίδης, “Τεχνικές Συγκέντρωσης σε Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Απρίλιος 2013.
- [3] Α. Βαζιντάρη, “Εξοικονόμηση Ενέργειας σε Αυτό-οργανούμενα Δίκτυα Ανεκτικά σε Καθυστέρηση”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Οκτώβριος 2015.
- [4] Ε.Δ. Σίμου, “Συνάθροιση Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων Βασισμένη στη Θεωρία Παιγνίων, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Ιούλιος 2013.
- [5] G. Anastasi, M. Conti, M.D. Francesco, A. Passarella, “Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: a Survey”, *Ad Hoc Networks* 7 pp. 537 - 568, Elsevier Journal, 2009.
- [6] S. Roychowdhury, C. Patra, “Geographic Adaptive Fidelity and Geographic Energy Aware Routing in Ad Hoc Routing”, *Special Issue of International Journal of Computer and Communication Technology (IJCCT)*, Volume 1, Issue 2, pp. 309-313, August 2010.
- [7] P. Casari, A. Marcucci, M. Nati, C. Petrioli, M. Zorzi, “A detailed simulation study of geographic random forwarding (GeRaF) in wireless sensor networks”, *Proc. of Military Communications Conference 2005 (MILCOM 2005)*, Vol. 1, pp.59-68, October 2005.
- [8] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, R. Morris, “Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks”, *ACM Wireless Networks*, Vol.8 N.5, September 2002.
- [9] A. Cerpa, D. Estrin, “Ascent: Adaptive Self-Configuring Sensor Network Topologies”, *Proc. IEEE INFOCOM 2002*
- [10] G. Grimmett, “Percolation”, Springer-Verlag, 2nd edition, 1999.
- [11] P.B. Godfrey, D. Ratajczak, “Naps: Scalable, Robust Topology Management in Wireless Ad Hoc Networks”, *Proc. of the 3rd international Symposium on information Processing in Sensor Networks (ISPN '04)*, Berkeley, California, USA, April 2004
- [12] C. Schurgers, V. Tsiatsis, M.B. Srivastava, “STEM: Topology Management for Energy Efficient Sensor Networks”, *IEEE Aerospace Conference '02, Big Sky*, March 2002.
- [13] X. Yang, N. Vaidya, “A Wakeup Scheme for Sensor Networks: Achieving Balance between Energy Saving and End-to-end Delay”, *Proc. of the IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS 2004)*, pp.19-26, 2004.

- [14] A. Keshavarzian, H. Lee, L. Venkatraman, "Wakeup Scheduling in Wireless Sensor Networks", Proc. ACM MobiHoc 2006, pp.322-333, Italy, May 2006.
- [15] B. Hohlt, L. Doherty, E. Brewer, "Flexible Power Scheduling for Sensor Networks", Proc. ACM Workshop on Information Processing in Sensor Networks (ISPN 2004), Berkeley, April 2004.
- [16] D.R. Stinson, "Combinatorial Designs: Construction and Analysis", Springer 2003.
- [17] R. Zheng, J.Hou, L. Sha, "Asynchronous Wakeup for Ad Hoc Networks", Proc. ACM Mobihoc 2003, pp. 35-45, Annapolis (USA), June 2003.
- [18] V. Paruchuri, S. Basavaraju, R. Kannan, S. Iyengar, "Random Asynchronous Wakeup Protocol for Sensor Networks", Proc. IEEE Int'l Conf. On Broadband Networks (BROADNETS 2004), 2004.
- [19] V. Rajendran, K. Obracza, J.J Garcia-Luna Aceves, "Energy-efficient, Collision-free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks", Proc. ACM SenSys 2003, USA, November 2003.
- [20] V. Rajendran, K. Obracza, J.J Garcia-Luna Aceves, "Efficient Application-aware Medium Access for Sensor Networks", Proc. of the 2nd IEEE Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS 2005), USA, November 2005.
- [21] J. Polastre, J. Hill, D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Sensor Networks", Proc. of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), November 2004.
- [22] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, Volume: 12, Issue: 3, Pages: 493-506, June 2004.
- [23] T.V. Dam and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", The first ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03), USA, November 2003.
- [24] G. Lu, B.Krishnamachari, C.S. Raghavendra, "An adaptive Energy-Efficient and Low-latency Mac for Data Gathering in Wireless Sensor Networks", Proc. of the 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, Pages: 224, April 2004.
- [25] A. Epremedes, O. Mowafi, "Analysis of a Hybrid Access Scheme for Buffered User Probabilistic Time Division", IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. 8, N.1, pp.52-61, January 1982.
- [26] I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, J.Min, "Z-MAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks", Proc. ACM SenSys 2005, USA, November 2005.
- [27] D. Chu, A. Deshpande, J.M. Hellerstein, W. Hong, "Approximate Data Collection in Sensor Networks using Probabilistic Models", Proc. of the 22nd

- International Conference on Data Engineering (ICDE06), p.48 USA, April 2006
- [28] D. Tulone, S. Madden, "PAQ: Time series forecasting for approximate query answering in sensor networks", Proc. of the 3rd European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN06), pp.21-37, February 2006.
- [29] D.Tulone, S. Madden, "An energy-efficient querying framework in sensor networks for detecting node similarities", Proc. of the 9th Intl. ACM Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM06), pp.291-300, October 2006
- [30] Y.-A. Le Borgne, S. Santini, G. Bontempi, "Adaptive Model Selection for Time Series Prediction in Wireless Sensor Networks", Signal Processing (Elsevier publisher), Volume:87, Issue: 12, Pages: 3010-3020, December 2007.
- [31] S. Goel, T. Imielinski, "Prediction-based Monitoring in Sensor Networks: Taking Lessons for MPEG", ACM Computer Communication Review, Vol.31, No. 5, October 2001.
- [32] S. Goel, A. Passarella, T. Imielinski, "Using buddies to live longer in a boring world", Proc. IEEE International Workshop on Sensor Networks and Systems for Pervasive Computing (PerSeNS 2006), Italy, March 2006.
- [33] Q. Han, S. Mehrota, N. Venkatasubramanian, "Energy Efficient Data Collection in Distributed Sensor Environments", Proc. of the 24th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'04), pp. 590-597, March 2004.
- [34] C. Alippi, G. Anastasi, C. Galperti, M. Roveri, "Adaptive Sampling for Energy Conservation in Wireless Sensor Networks for Snow Monitoring Applications", Proc. of the IEEE International Workshop on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems for Global and Homeland Security (MASS-GHS), Italy, October 2007.
- [35] M.C. Vuran and I.F. Akyildiz, "Spatial Correlation-based Collaborative Medium Access Control in Wireless Sensor Networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 14, No. 2, pp.316-329, April 2006
- [36] J. Zhou, D. De Roure, "FloodNet: Coupling Adaptive Sampling with Energy Aware Routing in a Flood Warning System", USA, April 2005.
- [37] T. Kijewski-Correa, M. Haenggi, P. Antsaklis, "Wireless Sensor Networks for Structural Health Monitoring: A Multi-Scale Approach", ASCE Structures 2006 Congress, 2006
- [38] Y.-C. Tseng, Y.C. Wang, K.-Y Cheng, Y.-Y. Hsieh, "iMouse: An Integrated Mobile Surveillance and Wireless Sensor System, IEEE Computer, Volume: 40, Issue: 6, Pages: 60-66, June 2007

- [39] A. Deshpande, C. Guestrin, S. Madden, J.M. Hellerstein, W. Hong, “Model-Driven Data Acquisition in Sensor Networks”, Proc. of the 30th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB 2004), Canada, September 2004.
- [40] P. Padhy, R. K. Dash, K. Martinez, N. R. Jennings, “A Utility-Based Sensing and Communication Model for a Glacial Sensor Network”, Proc. of the Fifth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS’06), Japan, May 2006.
- [41] Z. M. Wang, S. Basagni, E. Melachrinoudis, C. Petrioli, “Exploiting Sink Mobility for Maximizing Sensor Networks Lifetime”, Proc. of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS’05), Hawaii, January 2005.
- [42] S. Basagni, A. Carosi, E. Melachrinoudis, C. Petrioli, Z.M Wang, “Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime”, ACM/Elsevier Journal on Wireless Networks, 2007.
- [43] J. Luo, J.P. Hubaux, “Joint Mobility and Routing for Lifetime Elongation in Wireless Sensor Networks”, Proc. IEEE Infocom 2005, Vol. 3, pp. 1735-1746, USA, March 2005.
- [44] G. Anastasi, M. Conti, A. Passarella, L. Pelusi, “Mobile-relay Forwarding in Opportunistic Networks”, Chapter in Adaptive Techniques in Wireless Networks, 2007.
- [45] W. Zhao, M. Ammar, E. Zegura, “ A Message Ferrying Approach for Data Delivery in Sparse Mobile Ad Hoc Networks”, Proc. of ACM MobiHoc 2004, Japan, May 2004.
- [46] S. Jain, R. Shah, W. Brunette, G. Borriello, S. Roy, “Exploiting Mobility for Energy Efficient Data Collection in Wireless Sensor Networks”, ACM/ Springer Mobile Networks and Applications, Vol. 11, pp. 327-339, 2006.
- [47] A. Kansal, A.A Somasundra, D.D. Jea, M.B Srivastava, D. Estrin, “Intelligent fluid infrastructure for embedded networks”, Proc of the 2nd ACM/SIGMOBILE International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobySys 2004), pp. 111-124, USA, 2004.
- [48] P. Juang, H. Oki, Y. Wang, M. Martonosi, L. Peh, D. Rubenstein, “Energy-Efficient Computing for Wildlife Tracking: Design Tradeoffs and Early Experiences with Zebrant”, Proc. Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS), 2002.
- [49] P. Venkatasubramanian, S. Adireddy, L. Tong, “Sensor Networks with Mobile Access: Optimal Random Access and Coding”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume: 22, Issue: 6, pp. 1058-1068, August 2004.

- [50] Al-Karaki, J. N. and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey", *IEEE Wireless Communications*, Volume 11, No. 6, pp. 6-28, December 2004.
- [51] J. Kulik, W. R. Heinzelman, and H. Balakrishnan, "Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks", *Wireless Networks*, Volume: 8, pp. 169-185, 2002.
- [52] E. Fasolo, M. Rossi, J. Widmer, M. Zorzi, "In-Network Aggregation Techniques for Wireless Sensor Networks: A Survey", *IEEE Wireless Communications*, pp. 70-87, April 2007.
- [53] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks", *Proceedings of ACM MobiCom '00*, pp. 56-67, USA, 2000.
- [54] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks", *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'00)*, January 2000.
- [55] O. Younis, S. Fahmy, "Distributed Clustering in Ad-Hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy-Efficient Approach", *Proc of IEEE INFOCOM*, Hong Kong, 2004.
- [56] Y. Yao and J. Gehrke, "The Cougar Approach to In-Network Query Processing in Sensor Networks", *ACM SIGMOD Record*, Vol. 31, No.3, pp.9-18, September 2002
- [57] S. Lindsey, C. Raghavendra and K.M. Sivalingam, "Data Gathering Algorithms in Sensor Networks using Energy Metrics", *IEEE Trans. Parallel Distrib. Sys*, Vol. 13, No. 9, pp. 924-935, September 2002.
- [58] M. Ding, X. Cheng and G. Xue, "Aggregation tree construction in sensor networks", *2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference*, Vol. 4, No. 4, pp. 2168-2172, October 2003
- [59] S. Madden et al, "TAG: a Tiny Aggregation Service for Ad Hoc Sensor Networks", *OSDI 2002*, USA, December, 2002
- [60] K. Vaidhyanathan, S. Sur, S. Narravula, P. Sinha, "Data Aggregation techniques sensor networks", *Technical Report, OSU-CISRC-11/04-TR60*, Ohio University, 2004
- [61] S. Nath et al, "Synopsis Diffusion for Robust Aggregation in Sensor Networks", *ACM SenSys 2004*, USA, November 2004.
- [62] A. Manjhi, S. Nath, and P. B. Gibbons, "Tributaries and Deltas: Efficient and Robust Aggregation in Sensor Network Stream", *ACM SIGMOD 2005*, USA, June 2005.

- [63] T. He, B. M Blum, J.A. Stankovic and T. Abdelzaher, “AIDA: Adaptive application-independent data aggregation in wireless sensor networks”, ACM Transactions, vol.3, no.2, pp. 426 – 457, May 2004