



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ
ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ
ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργία Χ. Ποζιοπούλου

Επιβλέπων : Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ
ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ
ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργία Χ. Ποζιοπούλου

Επιβλέπων : Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27^η Ιουλίου 2012.

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Κανελλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

.....
Γεωργία Χ. Ποζιοπούλου

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

Copyright © Γεωργία Χ. Ποζιοπούλου, 2012.

Με 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 τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks, WSNs) έχουν αρχίσει να απασχολούν έντονα την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια, τόσο λόγω της μεγάλης ποικιλίας των εφαρμογών τους, όσο και για τα πολλά ανεξερευνήτα επιστημονικά προβλήματα που θέτουν.

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα αποτελεί η διαχείριση των ενεργειακών πόρων των κόμβων αισθητήρων που απαρτίζουν αυτά τα δίκτυα, αφού είναι εφοδιασμένοι με μικρής χωρητικότητας μπαταρίες λόγω του μικρού μεγέθους τους, των οποίων η αντικατάσταση είναι αδύνατη ή δεν συμφέρει. Ανάμεσα στις διάφορες λειτουργίες που επιτελούν οι κόμβοι αισθητήρων, η μεταξύ τους επικοινωνία είναι από τις πιο απαιτητικές από άποψη κατανάλωσης. Γι' αυτό το λόγο, έχουν προταθεί διάφορες λύσεις τόσο για την αποδοτικότερη εκμετάλλευση των ενεργειακών τους αποθεμάτων, όσο και για τη μείωση της κατανάλωσης των αναγκών ασύρματης επικοινωνίας των κόμβων.

Το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων αισθητήρων ενός WSN μέσω του χρονοπρογραμματισμού της επικοινωνίας τους και της ομαδοποίησης τους σε συστάδες. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού της επικοινωνίας, ο οποίος γίνεται με βάση τις απώλειες του καναλιού, δηλαδή τις απώλειες διάδοσης και τις διαλείψεις σκίασης, και χρησιμοποιεί τη θεωρία βέλτιστης παύσης για τον προσδιορισμό της βέλτιστης χρονικής στιγμής πραγματοποίησης της επικοινωνίας. Επιπρόσθετα, το δίκτυο οργανώνεται σε συστάδες για περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Μετά την κατασκευή του αλγορίθμου, αναπτύχθηκε πρόγραμμα προσομοίωσης στο περιβάλλον Matlab, ώστε να επαληθευτεί η θεωρητική του ανάλυση. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση του αλγορίθμου που κατασκευάστηκε με δύο άλλους αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού, οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικά κριτήρια για τον προγραμματισμό της επικοινωνίας των κόμβων. Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν, αποδεικνύεται ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας των ασύρματων κόμβων αισθητήρων.

Λέξεις Κλειδιά

Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, κόμβος αισθητήρων, ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας, χρονοπρογραμματισμός επικοινωνίας, απώλειες καναλιού, θεωρία βέλτιστης παύσης, το πρόβλημα της γραμματέως, αλγόριθμος ομαδοποίησης, Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH), μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων.

Abstract

Wireless sensor networks (WSNs) have drawn a lot of the scientific interest during the last years, not only because of their wide range of applications, but also due to the numerous unsolved issues that they pose.

One of the most challenging aspects is the efficient utilization of the energy supplies of the sensor nodes that form the network, because, due to their small size, they are equipped with small batteries that are impossible or impractical to change. The communication between the nodes of the network is one of the most energy consuming functions that they have to support. Therefore, there has been a lot of research concerning energy efficient communication schemes based on various techniques, such as routing and clustering.

This diploma thesis discusses the minimization of the wireless sensor nodes energy consumption through communication time-scheduling and clustering techniques. More specifically, a communication scheduling scheme based on channel losses, which consist both of the path losses and shadow fading, is proposed. The proposed scheduling scheme uses the optimal stopping theory in order to find the best time instant to communicate. Additionally, the WSN is organized in clusters for the further reduction of the energy consumption. Apart from the theoretical analysis of the algorithm, simulations in Matlab are conducted, in order to confirm the expected outcome. Lastly, the simulation results are compared to those of two different scheduling schemes. Based on the simulations results, the nodes achieve significantly lower energy consumption by using the proposed scheduling scheme.

Key words

Wireless sensor network (WSN), sensor node, energy efficient communication, time-scheduling, path loss, shadowing, optimal stopping theory, the secretary problem, clustering algorithm, Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH), random waypoint mobility model.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών στα πλαίσια της δραστηριότητας του Εργαστηρίου Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο της διπλωματικής μου εργασίας Λέκτορα κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο τόσο για την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνησή της, όσο και για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Μάριο Πουλάκη για τη συνεχή βοήθεια και στήριξη που μου προσέφερε.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	14
1.1 Εισαγωγή στους κόμβους αισθητήρων (sensor nodes).....	14
1.2 Εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (wireless sensor networks) 14	
1.3 Εφαρμογές των WSNs	15
1.3.1 Στρατιωτικές εφαρμογές	16
1.3.2 Περιβαλλοντικές εφαρμογές	17
1.3.3 Εφαρμογές υγείας.....	18
1.3.4 Άλλες εφαρμογές	19
1.4 Σενάρια WSNs	20
1.4.1 Τύποι πηγών και καταβόθρων	20
1.4.2 Τύποι εφαρμογών WSNs	22
1.4.3 Είδη κινητικότητας	23
1.5 Δομή κόμβου αισθητήρα	25
1.5.1 Μονάδα επεξεργασίας (Processing unit).....	27
1.5.1.1 Ελεγκτής.....	27
1.5.1.2 Μνήμη.....	29
1.5.2 Μονάδα επικοινωνίας (Transceiver unit).....	29
1.5.2.1 Χαρακτηριστικά πομποδέκτη	30
1.5.2.2 Δομή πομποδέκτη	32
1.5.2.3 Καταστάσεις λειτουργίας πομποδέκτη.....	34
1.5.3 Μονάδα ανίχνευσης (Sensing unit).....	34
1.5.3.1 Αισθητήρες.....	34
1.5.3.2 Ενεργοποιητές.....	35
1.5.4 Μονάδα παροχής ενέργειας (Power unit)	35
1.5.4.1 Τεχνικές αποθήκευσης ενέργειας	35
1.5.4.2 Τεχνικές συλλογής ενέργειας.....	37
1.6 Σχεδιασμός WSNs.....	38
1.6.1 Χαρακτηριστικά WSNs.....	38
1.6.2 Απαιτούμενοι μηχανισμοί των WSNs	40
1.7 Τεχνολογίες που καθιστούν δυνατή την ανάπτυξη των WSNs.....	42
1.7.1 Τεχνολογία υλικού.....	43
1.7.2 Ασύρματη δικτύωση.....	43
1.7.3 Συνεργατική επεξεργασία σήματος.....	44

BIBΛIOΓPAΦIA KEΦAΛAIOY 1	45
KEΦAΛAIO 2: KATANAΛΩΣH ENEPΓEIAS KOMBOY AICΘHTHPΩN....	48
2.1 Eισαγωγή.....	48
2.2 Κατανάλωση ενέργειας μικροελεγκτή	50
2.3 Κατανάλωση ενέργειας μνήμης	50
2.4 Κατανάλωση ενέργειας πομποδέκτη	51
2.4.1 Μοντελοποίηση κατανάλωσης ενέργειας κατά την εκπομπή	51
2.4.2 Μοντελοποίηση κατανάλωσης ενέργειας κατά τη λήψη	53
2.4.3 Αριθμητικά στοιχεία.....	53
2.4.4 Δυναμική ρύθμιση της κατανάλωσης ενέργειας του πομποδέκτη....	54
2.5 Σχέση μεταξύ επεξεργασίας και αποστολής δεδομένων.....	55
2.6 Κατανάλωση ενέργειας αισθητήρων/ ενεργοποιητών.....	55
BIBΛIOΓPAΦIA KEΦAΛAIOY 2	57
KEΦAΛAIO 3: OMAΔOΠOIOHΣH KOMBΩN AICΘHTHPΩN	59
3.1 Eισαγωγή.....	59
3.2 Περιοριστικοί παράγοντες.....	60
3.3 Σχεδιασμός συστάδων.....	61
3.4 Αλγόριθμοι ομαδοποίησης.....	62
3.4.1 Ευρετικοί Αλγόριθμοι (Heuristic Algorithms).....	62
3.4.1.1 Linked Cluster Algorithm (LCA)	63
3.4.1.2 Linked Cluster Algorithm 2 (LCA2)	63
3.4.1.3 Highest-Connectivity Cluster Algorithm.....	64
3.4.1.4 Max-Min D-Cluster Algorithm.....	64
3.4.2 Σταθμισμένα Σχήματα (Weighted Schemes).....	65
3.4.3 Ιεραρχικά Σχήματα (Hierarchical Schemes)	66
3.4.3.1 Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH).....	66
3.4.3.2 Two-Level Hierarchy LEACH (TL-LEACH).....	67
3.4.3.3 Energy Efficient Clustering Scheme (EECS).....	68
3.4.3.4 Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering (HEED)	68
3.4.4 Σχήματα Πλέγματος (Grid Schemes)	69
3.4.4.1 Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS)	69
3.4.4.2 GROUP.....	69
BIBΛIOΓPAΦIA KEΦAΛAIOY 3	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΘΕΩΡΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΠΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....73

4.1	Εισαγωγή.....	73
4.2	Μαθηματική παρουσίαση του προβλήματος.....	73
4.3	Παραδείγματα προβλημάτων βέλτιστης παύσης.....	75
4.3.1	Το πρόβλημα πώλησης σπιτιού.....	75
4.3.2	Το πρόβλημα μεγιστοποίησης μέσου όρου.....	76
4.3.3	Το πρόβλημα του κουλοχέρη (one-armed bandit problem).....	77
4.3.4	Το πρόβλημα ανίχνευσης σημείου αλλαγής.....	78
4.3.5	Προβλήματα ακολουθιακής στατιστικής απόφασης Bayes (Bayes sequential statistical decision problems).....	79
4.4	Προβλήματα πεπερασμένου χρονικού ορίζοντα.....	80
4.5	Το πρόβλημα της γραμματέως.....	80
4.5.1	Το κλασικό πρόβλημα της γραμματέως.....	81
4.5.2	Ελαχιστοποίηση προσδοκώμενης κατάταξης του επιλεγμένου αντικειμένου.....	83
4.5.3	Παραλλαγές του κλασικού προβλήματος της γραμματέως.....	84
4.5.3.1	Αβέβαιη διαθεσιμότητα και ανάκληση προηγούμενων αντικειμένων.....	84
4.5.3.2	Μειωμένο κέρδος.....	86
4.5.3.3	Άγνωστος αριθμός αντικειμένων n με γνωστή κατανομή.....	87
4.5.3.4	Τυχαίες αφίξεις.....	88
4.5.3.5	Επιλογή k αντικειμένων.....	89
4.5.3.6	Επιλογή 2 αντικειμένων, επιτυχία αν είναι τα δύο καλύτερα αντικείμενα.....	90
4.5.3.7	Πεπερασμένη μνήμη.....	90
4.5.3.8	Παρατήρηση με αντίπαλο.....	91
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4.....	93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....95

5.1	Στόχος του αλγορίθμου.....	95
5.2	Περιγραφή του μοντέλου συστήματος.....	96
5.3	Εφαρμογή του προβλήματος της γραμματέως.....	97
5.4	Μοντέλο κινητικότητας καταβόθρας.....	98
5.5	Ομαδοποίηση σε συστάδες: Τροποποιημένος αλγόριθμος LEACH με ντετερμινιστική επιλογή επικεφαλών.....	101

5.6	Μοντέλο επικοινωνίας κόμβων και κατανάλωσης ενέργειας	102
5.7	Ανάλυση αλγορίθμου	105
5.7.1	Επικοινωνία κόμβων – επικεφαλή συστάδας	105
5.7.2	Επικοινωνία επικεφαλών συστάδας – καταβόθρας	106
5.7.3	Επανακαθορισμός συστάδων	107
5.8	Εναλλακτικοί ευρετικοί αλγόριθμοι.....	108
5.8.1	Χρονοπρογραμματισμός με τυχαία επιλογή χρονικής στιγμής επικοινωνίας	108
5.8.2	Χρονοπρογραμματισμός με νετερμινιστική επιλογή χρονικής στιγμής επικοινωνίας	109
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5	111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗΣ. 112

6.1	Μετρικές αξιολόγησης	112
6.2	Στιγμιότυπα προσομοίωσης	113
6.3	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	115
6.4	Συμπεράσματα.....	129

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας.....	16
Σχήμα 1.2: Αισθητήρας πίεσης	15
Σχήμα 1.3: Fiber αισθητήρας.....	16
Σχήμα 1.4: Αισθητήρας ροής αερίων	19
Σχήμα 1.5: Αισθητήρας προσέγγισης.....	18
Σχήμα 1.6: Χρήση WSNs και κινητών τηλεφώνων για την τηλεπαρακολούθηση των ασθενών	19
Σχήμα 1.7: Τύποι καταβόθρας σε single-hop δίκτυο όταν έχουμε μια καταβόθρα και μία πηγή	21
Σχήμα 1.8: Διαφορετικές περιπτώσεις πολλών καταβόθρων και/ή πηγών σε multi-hop δίκτυο.....	21
Σχήμα 1.9: Παράδειγμα κινητικότητας της καταβόθρας PDA και της προώθησης των δεδομένων που ζητάει από απομακρυσμένους κόμβους	24
Σχήμα 1.10: Παράδειγμα κινητικότητας γεγονότος.....	25
Σχήμα 1.11: Δομή κόμβου αισθητήρων	26
Σχήμα 1.12: Κόμβος αισθητήρων για εντοπισμό χημικών.....	27
Σχήμα 1.13: Ασύρματος κόμβος αισθητήρων.....	28
Σχήμα 1.14: Εύκαμπτος ασύρματος κόμβος αισθητήρων	30
Σχήμα 1.15: Αρχιτεκτονική του RF μπροστινού άκρου.....	33
Σχήμα 2.1: Διάγραμμα εξοικονόμησης ενέργειας με δύο καταστάσεις λειτουργίας.....	49
Σχήμα 2.2: Πίνακας χαρακτηριστικών πομποδέκτη	54
Σχήμα 2.3: Πίνακας χαρακτηριστικών ορισμένων τύπων αισθητήρων	56
Σχήμα 3.1: Αρχιτεκτονική κοινού WSN	59
Σχήμα 3.2: Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων ομαδοποίησης	63
Σχήμα 3.3: Παράδειγμα πλέγματος συστάδων στον GROUP	70
Σχήμα 5.1: Τοπολογία του WSN.....	97
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα κίνησης κόμβου που ακολουθεί το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων	100
Σχήμα 5.3: Παράμετροι μοντέλου επικοινωνίας	104
Σχήμα 6.1: Στιγμιότυπο προσομοίωσης 1/6	114
Σχήμα 6.2: Στιγμιότυπο προσομοίωσης 2/6	114
Σχήμα 6.3: Στιγμιότυπο προσομοίωσης 3/6	114
Σχήμα 6.4: Στιγμιότυπο προσομοίωσης 4/6	114
Σχήμα 6.5: Στιγμιότυπο προσομοίωσης 5/6	114
Σχήμα 6.6: Στιγμιότυπο προσομοίωσης 6/6	114
Σχήμα 6.7: Διάγραμμα ζωντανών κόμβων ανά γύρο προσομοίωσης για $k = 10$ sec	115

Σχήμα 6.8: Διάγραμμα ζωντανών κόμβων ανά γύρο προσομοίωσης για $k = 12,5 \text{ sec}$	116
Σχήμα 6.9: Διάγραμμα ζωντανών κόμβων ανά γύρο προσομοίωσης για $k = 15 \text{ sec}$	116
Σχήμα 6.10: Διάγραμμα ζωντανών κόμβων ανά γύρο προσομοίωσης για $k = 17,5 \text{ sec}$	117
Σχήμα 6.11: Διάγραμμα ζωντανών κόμβων ανά γύρο προσομοίωσης για $k = 20 \text{ sec}$	117
Σχήμα 6.12: Διάγραμμα ζωντανών κόμβων ανά γύρο προσομοίωσης με χρήση του αλγορίθμου <i>optimal</i> για διάφορες τιμές του k	118
Σχήμα 6.13: Διάγραμμα FND συναρτήσεως των τιμών του k	119
Σχήμα 6.14: Διάγραμμα HND συναρτήσεως των τιμών του k	120
Σχήμα 6.15: Διάγραμμα LND συναρτήσεως των τιμών του k	120
Σχήμα 6.16: Ποσοστά βελτίωσης της διάρκειας ζωής του δικτύου με χρήση του αλγορίθμου <i>optimal</i> σε σύγκριση με τους αλγορίθμους <i>random</i> και <i>deterministic</i>	121
Σχήμα 6.17: Ποσοστά βελτίωσης της διάρκειας ζωής του δικτύου με χρήση του αλγορίθμου <i>optimal</i> συναρτήσεως των τιμών του k	122
Σχήμα 6.18: Διάγραμμα FND συναρτήσεως των τιμών του k με 7 επικεφαλείς συστάδων.....	122
Σχήμα 6.19: Διάγραμμα HND συναρτήσεως των τιμών του k με 7 επικεφαλείς συστάδων.....	123
Σχήμα 6.20: Διάγραμμα LND συναρτήσεως των τιμών του k με 7 επικεφαλείς συστάδων.....	123
Σχήμα 6.21: Διάγραμμα LND συναρτήσεως του πλήθους των κόμβων του δικτύου για διάφορες τιμές του k με χρήση του αλγορίθμου <i>optimal</i>	124
Σχήμα 6.22: Διάγραμμα LND συναρτήσεως του πλήθους των κόμβων του δικτύου για διάφορες τιμές του k	125
Σχήμα 6.23: Διάγραμμα καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο για διάφορες τιμές του k και $N = 51$	126
Σχήμα 6.24: Διάγραμμα καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο για διάφορες τιμές του k και $N = 101$	126
Σχήμα 6.25: Ποσοστά μείωσης της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο με χρήση του αλγορίθμου <i>optimal</i> σε σύγκριση με τους αλγορίθμους <i>random</i> και <i>deterministic</i>	127
Σχήμα 6.26: Ποσοστά μείωσης της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο συναρτήσεως της αύξησης των κόμβων του δικτύου.....	128
Σχήμα 6.27: Ποσοστά μείωσης της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο με χρήση του αλγορίθμου <i>optimal</i> συναρτήσεως των τιμών του k	128

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

1.1 Εισαγωγή στους κόμβους αισθητήρων (sensor nodes)

Ο αισθητήρας είναι μια διάταξη που μπορεί να ανιχνεύσει ένα φυσικό σήμα που προκύπτει από κάποιο φυσικό φαινόμενο και να παράγει μια μετρήσιμη έξοδο σε μορφή αναλογικού σήματος για τον παρατηρητή του φυσικού φαινομένου.

Με την ανάπτυξη της ηλεκτρονικής και των ασύρματων επικοινωνιών, είναι πλέον δυνατή η ανάπτυξη μικροσκοπικών κόμβων αισθητήρων χαμηλού κόστους. Αυτοί οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να επιτελέσουν διάφορες λειτουργίες και έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους αυτόνομα σε κοντινές αποστάσεις, δηλαδή επικοινωνούν χωρίς τη συμβολή του ανθρώπινου παράγοντα.

1.2 Εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (wireless sensor networks)

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) αποτελείται από δεκάδες έως χιλιάδες κόμβους αισθητήρων, οι οποίοι επικοινωνούν ασύρματα με σκοπό την ανταλλαγή δεδομένων και τη συνεργατική επεξεργασία τους ([3], [23], [29]). Η λογική των WSNs στηρίζεται στο γεγονός ότι απλοί κόμβοι αισθητήρων με περιορισμένες δυνατότητες δημιουργούν ένα δίκτυο που δύναται να εκτελέσει μια εργασία.

Οι κόμβοι αισθητήρων διασκορπίζονται στο χώρο που θέλουμε να δράσουμε ή πολύ κοντά σε αυτόν. Οι θέσεις που κατέχουν οι κόμβοι αισθητήρων δεν είναι απαραίτητο να είναι γνώστες, ούτε προσχεδιασμένες. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει την τυχαία κατανομή τους σε περιπτώσεις που ο άνθρωπος δεν μπορεί να προσπελάσει την περιοχική τοποθέτησης. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι οι ίδιοι οι κόμβοι θα πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με πρωτόκολλα και αλγορίθμους που κάνουν δυνατή την αυτό-οργάνωσή τους. Δηλαδή, οι κόμβοι αισθητήρων μετά την τοποθέτησή τους, οργανώνουν ένα δίκτυο με συνδέσεις πολλαπλών βημάτων (multi-hop) μεταξύ τους.

Στη συνέχεια, οι κόμβοι αρχίζουν τη συλλογή δεδομένων. Λόγω της ύπαρξης ενσωματωμένου επεξεργαστή στον κόμβο, αντί να στέλνεται άκριτα το σύνολο των δεδομένων από τους κόμβους αισθητήρων σε άλλους κόμβους υπεύθυνους για τη συγκέντρωση των δεδομένων, γίνεται επεξεργασία και φιλτράρισμα τους τοπικά. Τελικά, αποστέλλονται στους υπεύθυνους κόμβους μόνο τα χρήσιμα δεδομένα.

1.3 Εφαρμογές των WSNs

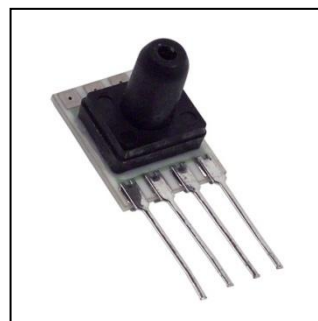
Οι υπέρμαχοι των WSNs υποστηρίζουν ότι όχι μόνο θα διευκολυνθούν πολλές υπάρχουσες εφαρμογές με τη χρήση τους, αλλά επίσης ότι θα δημιουργηθούν και ολοκληρωτικά καινούργιοι τομείς εφαρμογών.

Με εξαίρεση την ανάγκη για χαμηλού κόστους παραγωγή, εύκολο προγραμματισμό και δικτύωση και μεγάλη διάρκεια ζωής των κόμβων αισθητήρων, το πιο βασικό θέμα για την ανάπτυξη πραγματικών εφαρμογών είναι οι ικανότητες αίσθησης και ενεργοποίησης που μπορούμε να τους προσδώσουμε. Για τις περισσότερες φυσικές παραμέτρους υπάρχει ήδη η κατάλληλη τεχνολογία, η οποία απαιτείται για τη δημιουργία των αισθητήρων. Μερικοί από αυτούς τους αισθητήρες είναι οι θερμικοί, υγρασίας, οπτικοί και υπέρυθροι, ακουστικοί, δόνησης (π.χ. για ανίχνευση σεισμικών διαταραχών), πίεσης, χημικοί (π.χ. για εντοπισμό διαφόρων τύπων αερίων ή για αναγνώριση της σύνθεσης του εδάφους), μηχανικής αντοχής, μαγνητικοί (π.χ. για ανίχνευση διερχομένων οχημάτων) και ραντάρ ([16], [17]). Στα Σχήματα 1.1 - 1.5 απεικονίζονται ορισμένα είδη αισθητήρων. Επιπλέον, είναι δυνατός ο έλεγχος ενεργοποιητών από ένα κόμβο αισθητήρων. Ένας ενεργοποιητής (actuator) μπορεί να ελέγξει μια μηχανική συσκευή, όπως η σερβομηχανική οδήγηση, ή να λειτουργήσει σαν ηλεκτρονόμος και να αλλάξει την κατάσταση λειτουργίας κάποιας ηλεκτρικής συσκευής, όπως να αναβοσβήσει ένα λαμπτήρα.

Οι παραπάνω ικανότητες αίσθησης και/ή ενεργοποίησης των κόμβων αισθητήρων σε συνδυασμό με τις ικανότητες επεξεργασίας και επικοινωνίας που διαθέτουν, τους καθιστούν κατάλληλους για μια ευρεία γκάμα εφαρμογών. Οι εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιούν οποιοδήποτε τύπο αισθητήρα ή και πολλούς διαφορετικούς τύπους αισθητήρων στα πλαίσια της ίδιας εφαρμογής. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα σενάρια εφαρμογών, πολλά από τα οποία έχουν υλοποιηθεί ήδη.



Σχήμα 1.1: Αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας



Σχήμα 1.2: Αισθητήρας πίεσης

1.3.1 Στρατιωτικές εφαρμογές

Η γρήγορη τοποθέτηση, η ιδιότητα αυτο-οργάνωσης των κόμβων αισθητήρων, καθώς και η ανοχή στα σφάλματα, είναι τα βασικά χαρακτηριστικά των WSNs που τα καθιστούν ιδανικά για στρατιωτικές εφαρμογές. Ορισμένες τέτοιες εφαρμογές είναι:

1. Παρακολούθηση συμμαχικών δυνάμεων, στρατιωτικού εξοπλισμού και πυρομαχικών: Κάθε στρατιώτης, όχημα, εξοπλισμός και σημαντικό πυρομαχικό μπορεί να εφοδιάζεται με ένα κόμβο αισθητήρων ώστε να μπορούν οι ανώτεροι να είναι ενημερωμένοι ανά πάσα στιγμή για τη διαθεσιμότητά τους.
2. Παρακολούθηση πεδίου μάχης: Κάθε κρίσιμο πεδίο μάχης, καθώς και οι διαδρομές πρόσβασης στα στρατόπεδα μπορούν να παρακολουθούνται μέσω κόμβων αισθητήρων, ώστε να είναι άμεσα αντιληπτές οι κινήσεις των εχθρικών δυνάμεων.
3. Στόχευση: Οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να ενσωματωθούν στα συστήματα οδήγησης των έξυπνων πυρομαχικών.
4. Αποτίμηση ζημιάς μάχης: Μετά το πέρας μιας μάχης, μπορεί να εγκατασταθεί ένα WSN στην περιοχή, το οποίο θα συλλέξει δεδομένα σχετικά με τις ζημιές.
5. Ανίχνευση και αναγνώριση πυρηνικής, βιολογικής και χημικής επίθεσης: Σε περίπτωση βιολογικής και χημικής επίθεσης έχει μεγάλη σημασία για την έγκαιρη και έγκυρη ενημέρωση, η ύπαρξη πληροφοριών από το σημείο της επίθεσης. Τα WSNs μπορούν να λειτουργήσουν σαν συστήματα ανίχνευσης τέτοιων επιθέσεων, συμβάλλοντας έτσι στην ασφάλεια των πολιτών. Επίσης, μπορούν να αναγνωρίσουν το είδος της επίθεσης, ώστε να μη χρειαστεί να πάει ειδική επανδρωμένη ομάδα και καθιστούν έτσι δυνατή την καλύτερη οργάνωση της αντιμετώπισής της.



Σχήμα 1.3: Fiber αισθητήρας

1.3.2 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Τα WSNs έχουν εφαρμογές και στο περιβάλλον. Κάποιες από αυτές είναι:

1. Ανίχνευση πυρκαγιάς σε δάσος: Οι κόμβοι που χρησιμοποιούνται μετράνε τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και επιπλέον μπορούν να αποφανθούν για τη θέση τους είτε σε σχέση με τους γειτονικούς κόμβους, είτε σε απόλυτες συντεταγμένες. Αυτούς τους κόμβους τους διασκορπίζουμε από αέρος στο δάσος και συνεργατικά μπορούν να δημιουργήσουν τον χάρτη θερμοκρασίας του ή να υποδείξουν στους πυροσβέστες τα σημεία υψηλής θερμοκρασίας που έχουν εξωτερική πρόσβαση. Αν το δίκτυο έχει μεγάλη πυκνότητα κόμβων, τότε μπορούμε να εντοπίσουμε ακριβώς την εστία της πυρκαγιάς προτού προλάβει να εξαπλωθεί. Οι κόμβοι μπορούν να είναι εφοδιασμένοι με αποτελεσματικές τεχνικές συλλογής ενέργειας [12], όπως για παράδειγμα ηλιακούς συλλέκτες, για να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Απαραίτητη κρίνεται η συνεργασία των κόμβων στην αίσθηση και τη συλλογή δεδομένων, ώστε να έχουμε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα και να ξεπερνιούνται εμπόδια, όπως δέντρα και πέτρες.
2. Ανίχνευση πλημμύρας: Στις ΗΠΑ εφαρμόζεται ήδη το σύστημα ALERT για την ανίχνευση των πλημμύρων. Το σύστημα αποτελείται από αισθητήρες για τη βροχόπτωση, τη στάθμη του νερού και τον καιρό. Όλοι οι κόμβοι στέλνουν τα αντίστοιχα δεδομένα σε μια τελική βάση δεδομένων, όπου γίνεται η αξιολόγησή τους και η λήψη αποφάσεων.
3. Εφαρμογές στην γεωργία: Σε ό,τι αφορά τη γεωργία, μπορούμε να έχουμε ακριβή άρδευση και τοποθέτηση λιπάσματος με χρήση κόμβων που αισθάνονται την υγρασία και τη σύνθεση του εδάφους. Επιπλέον, τα WSNs παρακολουθούν τα επίπεδα των εντομοκτόνων στο πόσιμο νερό, της διάβρωσης του εδάφους και της μόλυνσης του αέρα σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, έχουμε εφαρμογή και στην εκτροφή ζώων, όπου κάθε ζώο φέρει έναν κόμβο αισθητήρων που παρατηρεί τα ζωτικά σημεία του (πχ θερμοκρασία σώματος, αριθμός βημάτων και άλλα) και ειδοποιεί σε περίπτωση υπέρβασης των προκαθορισμένων κατωφλίων.



Σχήμα 1.4: Αισθητήρας ροής αερίων

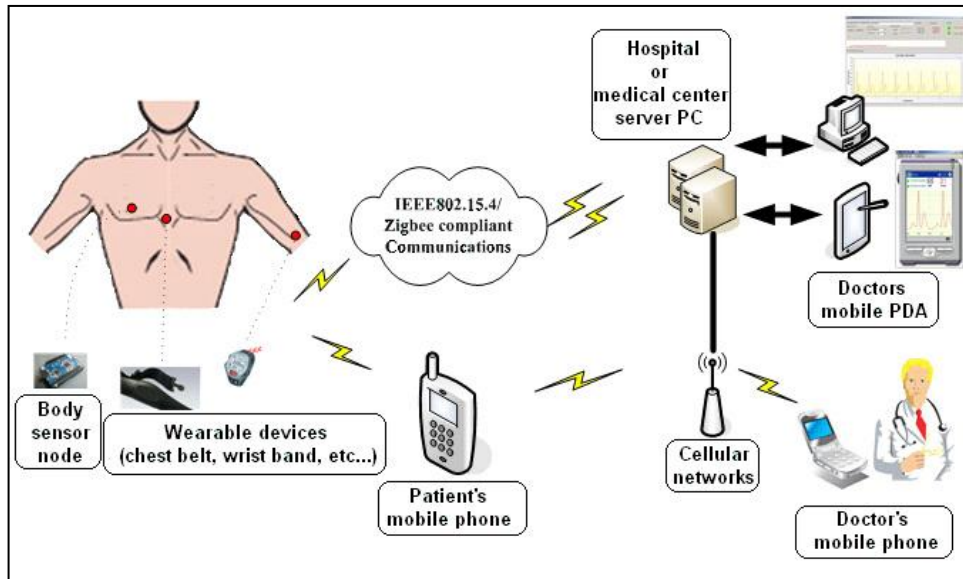


Σχήμα 1.5: Αισθητήρας προσέγγισης

1.3.3 Εφαρμογές υγείας

Ορισμένες εφαρμογές υγείας των WSNs αφορούν τη διάγνωση, την παρακολούθηση ασθενών, τη χορηγία φαρμάκων στα νοσοκομεία, την τηλεπαρακολούθηση των ζωτικών σημείων, τον εντοπισμό και την παρακολούθηση γιατρών και ασθενών μέσα στο νοσοκομείο και άλλα [25].

1. Εντοπισμός και παρακολούθηση γιατρών και ασθενών μέσα στο νοσοκομείο: Αν κάθε γιατρός έχει ένα κόμβο αισθητήρων πάνω του, τότε γίνεται πολύ εύκολα και γρήγορα ο εντοπισμός του από τους άλλους γιατρούς σε περίπτωση ανάγκης. Οι ασθενείς μπορούν να έχουν ένα ελαφρύ και μικρό κόμβο αισθητήρων πάνω τους, ο οποίος μπορεί να παρακολουθεί κάποια συγκεκριμένα ζωτικά σημεία, όπως τους παλμούς της καρδιάς και την πίεση του αίματος, για συνεχή και έγκαιρη ενημέρωση των γιατρών.
2. Τηλεπαρακολούθηση των ζωτικών σημείων: Τα στοιχεία που συγκεντρώνουν οι κόμβοι μπορούν να αποθηκεύονται για μεγάλα χρονικά διαστήματα και στη συνέχεια να τα επεξεργάζονται οι γιατροί. Επιπλέον, μπορούν να παρακολουθούνται και να ανιχνεύονται συμβάντα στους ηλικιωμένους ανθρώπους, όπως για παράδειγμα κάποιο χτύπημα ή πέσιμο [8]. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων στους ανθρώπους που παρακολουθούνται και προσφέρει έγκαιρη ανίχνευση πιθανών νοσημάτων μέσω της αναγνώρισης συγκεκριμένων συμπτωμάτων. Η τηλεπαρακολούθηση των ζωτικών σημείων με χρήση των WSNs αλλά και της τεχνολογίας των κινητών τηλεφώνων παρουσιάζεται εποπτικά στο Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6: Χρήση WSNs και κινητών τηλεφώνων για την τηλεπαρακολούθηση των ασθενών

1.3.4 Άλλες εφαρμογές

1. Οικιακοί αυτοματισμοί: Για αυτή την εφαρμογή πρέπει να τοποθετηθούν κόμβοι αισθητήρων και ενεργοποιητές σε διάφορες οικιακές συσκευές, όπως στην ηλεκτρική σκούπα, στον ηλεκτρικό φούρνο, στο φούρνο μικροκυμάτων και άλλα. Οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά και με το εξωτερικό δίκτυο μέσω διαδικτύου ή δορυφόρου. Έτσι, οι χρήστες μπορούν να τηλεχειρίζονται εύκολα τις οικιακές συσκευές είτε τοπικά, είτε απομακρυσμένα ή ακόμα και οι ίδιες οι συσκευές μπορούν να τίθενται εντός και εκτός λειτουργίας σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζει ο χρήστης.
2. Έξυπνα κτίρια: Τα κτίρια σπαταλάνε μεγάλα ποσά ενέργειας λόγω κακής ρύθμισης του συστήματος θέρμανσης, ψύξης και ανακύκλωσης του αέρα. Με τη βοήθεια των WSNs μπορούμε να παρατηρούμε σε πραγματικό χρόνο και να ρυθμίζουμε τη θερμοκρασία, την υγρασία, τη ροή του αέρα και άλλες παραμέτρους, ώστε να διευκολύνεται η καθημερινότητα των ενοίκων και να ελαττωθεί η κατανάλωση της ενέργειας. Επίσης, μπορούμε με κατάλληλους αισθητήρες να παρατηρούμε και τη μηχανική αντοχή κτιρίων που βρίσκονται σε σεισμογενείς περιοχές. Μετρώντας διάφορες μηχανικές παραμέτρους μέσω ενός WSN μπορούμε να διαπιστώσουμε αν είναι ασφαλές να εισέλθουμε στο κτίριο μετά από σεισμό ή αν το κτίριο πρόκειται να καταρρεύσει.

3. Παρακολούθηση μηχανημάτων και προληπτική συντήρηση: Η βασική ιδέα σε αυτή την περίπτωση είναι η τοποθέτηση κόμβων σε απομακρυσμένα μηχανήματα ή μηχανικά μέρη που δεν είναι εύκολα προσβάσιμα. Αυτοί οι κόμβοι θα ανιχνεύουν συγκεκριμένα μοτίβα δονήσεων που υποδηλώνουν την ανάγκη συντήρησης.
4. Παρακολούθηση αποθήκης: Εφοδιάζοντας κάθε προϊόν της αποθήκης με κόμβο αισθητήρων μπορούμε να έχουμε άμεση ενημέρωση για το απόθεμα του συγκεκριμένου προϊόντος, αλλά και της θέσης του στην αποθήκη. Με αυτό τον τρόπο γίνεται πιο εύκολη η οργάνωση και η εποπτεία της αποθήκης.

1.4 Σενάρια WSNs

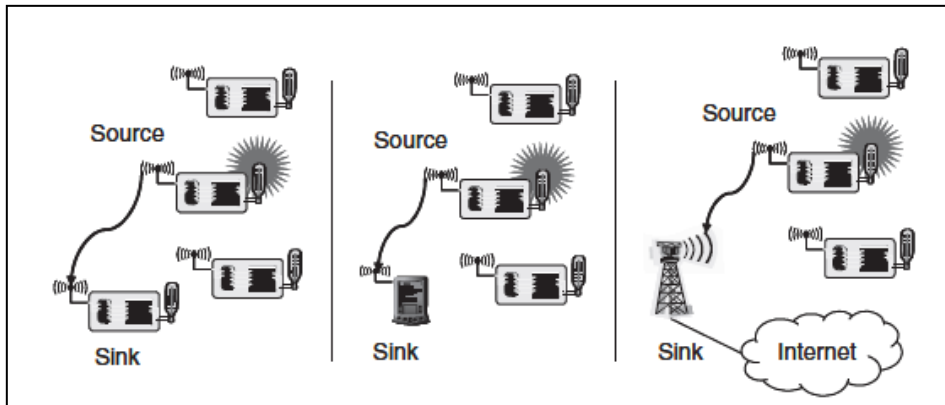
1.4.1 Τύποι πηγών και καταβόθρων

Μελετώντας τις εφαρμογές παρατηρούμε ότι υπάρχει κάποιος διαχωρισμός στο ρόλο που επιτελούν ορισμένοι κόμβοι [23]. Γενικά, οι κόμβοι χωρίζονται σε πηγές (source nodes) και καταβόθρες (sink nodes).

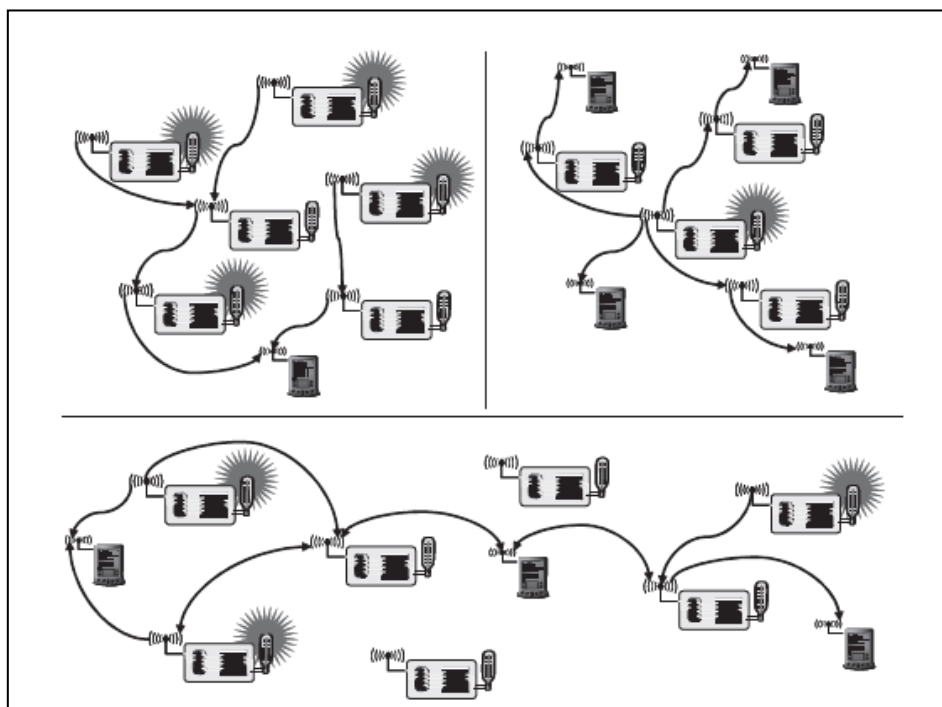
Πηγή είναι η οντότητα του δικτύου που μπορεί να παρέχει δεδομένα, δηλαδή οι κόμβοι αισθητήρων που εκτελούν τη συλλογή των δεδομένων από το περιβάλλον. Επίσης, πηγή θα μπορούσε να αποτελεί και ο ενεργοποιητής ενός κόμβου, ο οποίος παρέχει ανάδραση από το περιβάλλον σχετικά με μια διαδικασία.

Καταβόθρα, από την άλλη μεριά, είναι η οντότητα του δικτύου που απαιτεί και συλλέγει το σύνολο των δεδομένων. Συνήθως, σε κάθε WSN υπάρχουν λιγότερες καταβόθρες απ' ότι πηγές και μπορεί να αποτελούν μέρος του δικτύου, δηλαδή να είναι κόμβοι αισθητήρων ή να βρίσκονται έξω από αυτό. Σε περίπτωση που οι καταβόθρες βρίσκονται έξω από το δίκτυο, υπάρχουν δύο περιπτώσεις: να είναι μια συσκευή που αλληλεπιδρά με το δίκτυο, όπως ένα PDA ή να είναι απλώς μια δίοδος προς ένα μεγαλύτερο δίκτυο, όπως το Διαδίκτυο, όπου ο κόμβος που ζητά τα δεδομένα είναι μακριά και έμμεσα συνδεδεμένος με το WSN. Επιπλέον, οι καταβόθρες δεν ενδιαφέρονται για την ταυτότητα των κόμβων που στέλνουν δεδομένα, αφού σημασία έχουν τα ίδια τα δεδομένα. Το Σχήμα 1.7 παρουσιάζει εποπτικά τους διαφορετικούς τύπους καταβόθρων σε περίπτωση που έχουμε μια πηγή και μια καταβόθρα σε δίκτυο ενός βήματος (single-hop). Από τα αριστερά προς τα δεξιά έχουμε μια καταβόθρα που ανήκει στο δίκτυο, μια καταβόθρα PDA και μια καταβόθρα σταθμό βάσης που επικοινωνεί με το Διαδίκτυο. Πρέπει να σημειωθεί ότι μια πηγή στέλνει δεδομένα όταν έχει αναμμένο το φωτάκι της. Φυσικά, είναι δυνατό να υπάρχουν πολλές πηγές και/ή καταβόθρες στο δίκτυο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8. Πιο συγκεκριμένα, πάνω αριστερά έχουμε μια καταβόθρα PDA που λαμβάνει

δεδομένα από 4 ενεργές πηγές, ενώ πάνω δεξιά έχουμε 4 καταβόθρες PDA που λαμβάνουν δεδομένα από μια ενεργή πηγή. Τέλος, κάτω έχουμε 3 καταβόθρες PDA από τις οποίες μόνο οι δύο συλλέγουν δεδομένα από τις ενεργές πηγές. Η τρίτη καταβόθρα PDA συμμετέχει σαν απλός κόμβος στην προώθηση των δεδομένων, όπως και οι ανενεργοί κόμβοι.



Σχήμα 1.7: Τύποι καταβόθρας σε single-hop δίκτυο όταν έχουμε μια καταβόθρα και μία πηγή



Σχήμα 1.8: Διαφορετικές περιπτώσεις πολλών καταβόθρων και/ή πηγών σε multi-hop δίκτυο

1.4.2 Τύποι εφαρμογών WSNs

Με βάση τον τρόπο αλληλεπίδρασης μεταξύ καταβόθρων και πηγών μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις εφαρμογές ως εξής:

1. Ανίχνευση γεγονότος: Οι κόμβοι αισθητήρων οφείλουν να ενημερώσουν τις καταβόθρες μόλις ανιχνεύσουν κάποιο συγκεκριμένο συμβάν, για παράδειγμα την υπέρβαση ενός κατωφλίου θερμοκρασίας. Το γεγονός μπορεί να παρατηρηθεί είτε από ένα μεμονωμένο κόμβο, είτε απαιτείται συνεργασία των κόμβων για την εξακρίβωσή του. Αν υπάρχουν πολλά διαφορετικά γεγονότα που μπορούν να συμβούν, οι κόμβοι πιθανώς να προβαίνουν και σε ταυτοποίηση γεγονότος.
2. Περιοδικές μετρήσεις: Στους κόμβους μπορεί να ανατεθεί η περιοδική μέτρηση ενός μεγέθους και η αναφορά της μέτρησης αυτής στις καταβόθρες. Πολλές φορές κάποιο γεγονός πυροδοτεί την περιοδική μέτρηση, της οποίας η συχνότητα εξαρτάται από την εφαρμογή.
3. Προσέγγιση συνάρτησης και εύρεση συνόρων: Ο τρόπος μεταβολής ορισμένων μεγεθών από σημείο σε σημείο μπορεί να θεωρηθεί ως συνάρτηση της θέσης. Ένα WSN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσεγγίσει με μετρήσεις από τους κόμβους αυτή τη συνάρτηση και να τη γνωστοποιήσει στις καταβόθρες. Ο ρυθμός ανανέωσης της συνάρτησης και η ακρίβεια στην προσέγγισή της εξαρτώνται από την εκάστοτε εφαρμογή. Ένα παρόμοιο πρόβλημα είναι η εύρεση σημείων ή περιοχών με ίδια τιμή συνάρτησης, το οποίο ισοδυναμεί με την εύρεση των συνόρων της συνάρτησης. Ένα παράδειγμα είναι ο εντοπισμός των ισοθερμικών σημείων σε εφαρμογές ανίχνευσης πυρκαγιάς σε δάσος, ώστε να εντοπίσουμε τα σύνορα της πραγματικής πυρκαγιάς.
4. Παρακολούθηση τροχιάς: Συχνά τυχαίνει το αίτιο ενός γεγονότος να είναι κινητό, όπως για παράδειγμα ένας εισβολέας σε σενάρια παρακολούθησης. Το WSN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ενημερώνει τις καταβόθρες σχετικά με τη θέση του αιτίου του γεγονότος και πιθανώς να προβαίνει και σε εκτίμηση της ταχύτητας και της κατεύθυνσής του. Για να είναι αυτό δυνατό θα πρέπει οι κόμβοι να συνεργάζονται πριν ενημερώσουν τις καταβόθρες.

Μελετώντας τις διάφορες εφαρμογές συμπεραίνουμε ότι υπάρχει πληθώρα επιλογών σχετικά με το στήσιμο του WSN. Οι θέσεις των κόμβων μπορούν να είναι από αυστηρά προκαθορισμένες, όπως στις εφαρμογές συντήρησης μηχανημάτων, έως εντελώς τυχαίες, όπως στις εφαρμογές εντοπισμού πυρκαγιάς σε δάσος. Επιπλέον, οι κόμβοι μπορούν να έχουν τη δυνατότητα κίνησης για να είναι ικανοί να

διορθώσουν τυχόν λάθη στην τοποθέτησή τους στο δίκτυο. Αυτό γίνεται με τη μετάβασή τους σε νέα θέση, από την οποία μπορούν να εκπληρώσουν καλύτερα τις εργασίες με τις οποίες είναι επιφορτισμένοι.

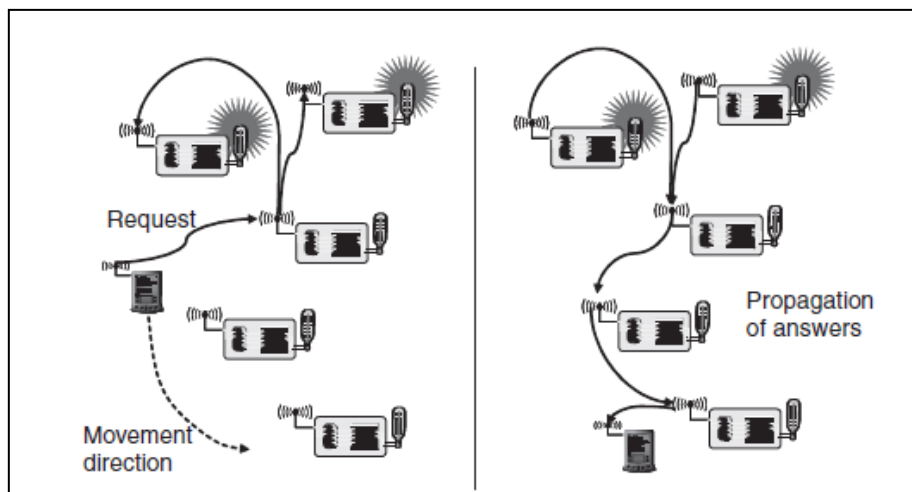
Η φύση των εφαρμογών επηρεάζει σημαντικά τις διαθέσιμες επιλογές για παροχή ενέργειας. Σε μερικές εφαρμογές είναι δυνατή η ενσύρματη παροχή ενέργειας. Όταν αυτό δεν είναι δυνατό και οι κόμβοι πρέπει να είναι αυτοσυντηρούμενοι, η παροχή και η κατανάλωση της ενέργειας είναι ένα σημαντικό ζήτημα. Κυρίαρχο ρόλο στο σχεδιασμό της παροχής ενέργειας παίζουν, εκτός από την εφαρμογή, και το μέγεθος και το κόστος του κόμβου.

1.4.3 Είδη κινητικότητας

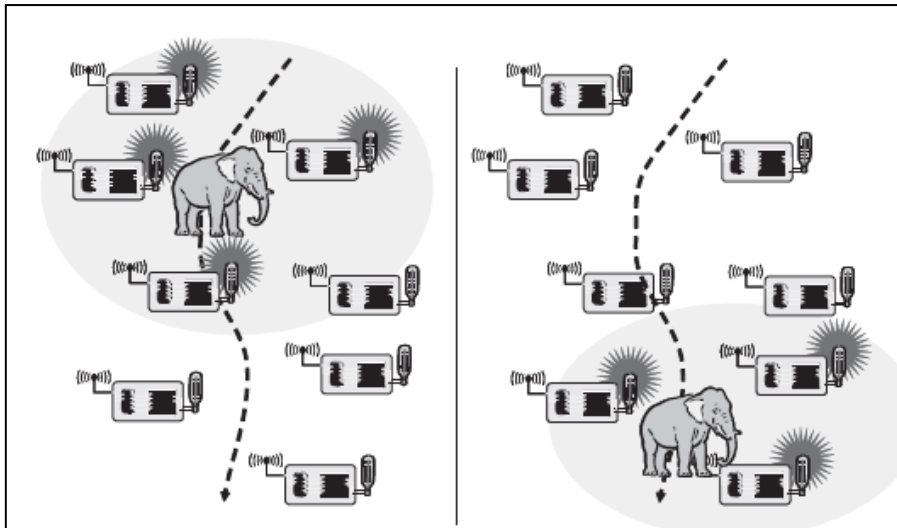
Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα των WSNs είναι ότι υποστηρίζουν κινητούς συμμετέχοντες. Η κινητικότητα στα WSNs μπορεί να εμφανιστεί σε τρεις μορφές:

1. Κινητικότητα κόμβου: Οι ίδιοι οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να είναι κινητοί. Το αν οι κόμβοι κινούνται εξαρτάται αποκλειστικά από την εφαρμογή. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές ελέγχου του περιβάλλοντος οι κόμβοι θα πρέπει να έχουν σταθερές θέσεις. Αντιθέτως, σε εφαρμογές παρακολούθησης εκτρεφόμενων ζώων, όπου κάθε ζώο έχει προσαρτημένο πάνω του ένα κόμβο, η κίνησή τους είναι αυτονόητη. Σε περίπτωση κίνησης των κόμβων, το δίκτυο θα πρέπει να αυτο-οργανώνεται συχνά για να μπορεί να λειτουργήσει σωστά. Είναι εμφανές ότι η συχνότητα αυτο-οργάνωσης και η ταχύτητα των κόμβων πρέπει να εξισορροπηθούν με την ενέργεια που χρειάζεται το δίκτυο για να έχουμε την απαιτούμενη λειτουργικότητα.
2. Κινητικότητα καταβόθρας: Παρότι και οι κόμβοι καταβόθρες μπορούν να κινούνται, η πιο ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι όταν κινείται μια καταβόθρα που δεν είναι μέρος του δικτύου, όπως το PDA που αναφέρθηκε παραπάνω. Σε μια απλή περίπτωση, η καταβόθρα μπορεί να αλληλεπιδράσει με το δίκτυο σε κάποιο σημείο και να συνεχίσει την κίνησή της αφού ολοκληρώσει την αλληλεπίδραση αυτή. Μια σχεδιαστική επιλογή είναι το αν η καταβόθρα θα μπορεί να επικοινωνεί με όλους τους κόμβους ή μόνο με συγκεκριμένους. Ένα ενδιαφέρον ζήτημα προκύπτει όταν η καταβόθρα ζητήσει δεδομένα που δεν είναι τοπικά διαθέσιμα, αλλά πρέπει να ανακληθούν από ένα απομακρυσμένο σημείο του δικτύου. Το πρόβλημα είναι ότι ενώ τα εν λόγω δεδομένα μεταφέρονται, η καταβόθρα μπορεί να έχει αλλάξει θέση. Το δίκτυο, πιθανώς σε συνεργασία με την καταβόθρα, θα πρέπει να προβαίνει σε προβλέψεις για την κίνησή της ώστε να προωθεί τα δεδομένα κατάλληλα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.9.

3. Κινητικότητα γεγονόςτος: Σε εφαρμογές ανίχνευσης γεγονότος και ιδιαίτερα σε προβλήματα παρακολούθησης τροχιάς, το αίτιο του γεγονότος ή το παρακολουθούμενο αντικείμενο μπορεί να είναι κινούμενα. Σε αυτή την περίπτωση, είναι σημαντικό να έχουμε ανά πάσα στιγμή επαρκή αριθμό κόμβων για την παρατήρηση του γεγονότος. Γι' αυτό, καθώς κινείται το γεγονός, οι κόμβοι που το περιβάλλουν ενεργοποιούνται και το παρατηρούν μέχρι να απομακρυνθεί, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια περιοχή υψηλής δραστηριότητας γύρω του [9]. Αυτή η διαδικασία φαίνεται στο Σχήμα 1.10, όπου οι κόμβοι πρέπει να παρακολουθούν την τροχιά του ελέφαντα (διακεκομμένη γραμμή). Επιπλέον, σημειώνονται με ανοιχτό γκρι οι περιοχές υψηλής δραστηριότητας γύρω από τον ελέφαντα.



Σχήμα 1.9: Παράδειγμα κινητικότητας της καταβόθρας PDA και της προώθησης των δεδομένων που ζητάει από απομακρυσμένους κόμβους



Σχήμα 1.10: Παράδειγμα κινητικότητας γεγονότος

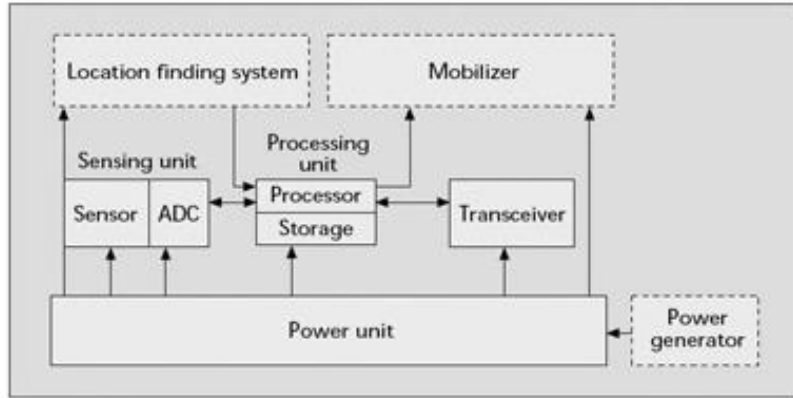
1.5 Δομή κόμβου αισθητήρα

Όταν επιλέγονται τα εξαρτήματα ενός κόμβου αισθητήρων, αναπόφευκτα οι απαιτήσεις της προς υλοποίηση εφαρμογής παίζουν σημαντικό ρόλο σε ό,τι αφορά το μέγεθος, το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας του κόμβου. Σημαντική είναι η επεξεργαστική ικανότητα και η ικανότητα επικοινωνίας του κόμβου, αλλά θα πρέπει να υπάρχει ισορροπία μεταξύ των χαρακτηριστικών αυτών και του κόστους τους.

Ένας τυπικός κόμβος αισθητήρων αποτελείται από τέσσερα κυρίως εξαρτήματα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.11:

1. Μονάδα ανίχνευσης (Sensing unit)
2. Μονάδα επεξεργασίας (Processing unit)
3. Μονάδα επικοινωνίας (Transceiver unit)
4. Μονάδα παροχής ενέργειας (Power unit)

Ορισμένοι διαθέσιμοι κόμβοι αισθητήρων φαίνονται στα Σχήματα 1.12 - 1.14.

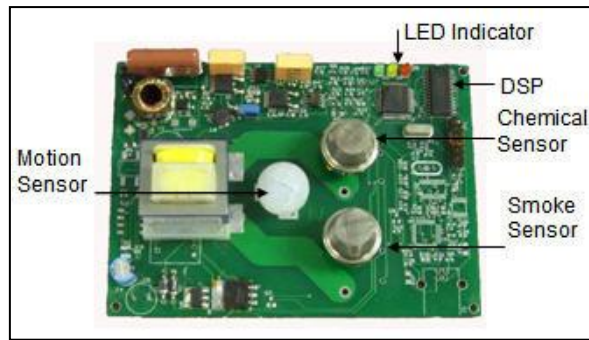


Σχήμα 1.11: Δομή κόμβου αισθητήρων

Η μονάδα ανίχνευσης αποτελείται από ένα ή περισσότερους αισθητήρες και/ή ενεργοποιητές και έναν μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (ADC), ο οποίος μετατρέπει το αναλογικό σήμα εξόδου του αισθητήρα σε ψηφιακό, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία του από την μονάδα επεξεργασίας. Η μονάδα ανίχνευσης αποτελεί δηλαδή τη φυσική διεπαφή του κόμβου με το περιβάλλον. Η μονάδα επεξεργασίας, η οποία αποτελείται από έναν ελεγκτή και μια μικρής χωρητικότητας μνήμη, λαμβάνει το ψηφιακό σήμα από τον ADC και εκτελεί όλες τις απαραίτητες λειτουργίες ώστε ο κόμβος αισθητήρων σε συνεργασία με άλλους κόμβους αισθητήρων να υλοποιήσει την επιθυμητή εργασία. Η μονάδα επικοινωνίας είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων αισθητήρων μέσω της ανταλλαγής δεδομένων. Η μονάδα παροχής ενέργειας είναι πολύ σημαντική, καθώς τροφοδοτεί με ρεύμα όλα τα εξαρτήματα του κόμβου αισθητήρων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τις παραπάνω τέσσερις βασικές μονάδες, ένας κόμβος αισθητήρων μπορεί να έχει επιπλέον εξαρτήματα ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, μπορεί να περιέχει κάποιο σύστημα εντοπισμού θέσης (location finding system) αν απαιτείται η γνώση της ακριβούς θέσης του ή κινητοποιητή (mobilizer) σε περίπτωση που χρειάζεται να κινείται.

Όλα τα εξαρτήματα πρέπει να λειτουργούν με γνώμονα την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και την εκπλήρωση των απαιτήσεων της εφαρμογής. Για παράδειγμα, οι μονάδες επικοινωνίας και επεξεργασίας πρέπει να είναι απενεργοποιημένες όταν δεν χρησιμοποιούνται. Προκειμένου να ενεργοποιηθούν, μπορεί να υπάρχει ένας μετρητής που ανά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα τις ενεργοποιεί ή μπορούν να ενεργοποιούνται όταν ανιχνευτεί κάποιο συγκεκριμένο γεγονός, όπως η λήψη ενός πακέτου.



Σχήμα 1.12: Κόμβος αισθητήρων για εντοπισμό χημικών

1.5.1 Μονάδα επεξεργασίας (Processing unit)

Η μονάδα επεξεργασίας αποτελεί τον πυρήνα του κόμβου αισθητήρων. Συλλέγει τα δεδομένα από τους αισθητήρες του κόμβου, τα επεξεργάζεται, αποφασίζει πότε και πού να τα στείλει, λαμβάνει δεδομένα από άλλους κόμβους και αποφασίζει σχετικά με την συμπεριφορά του ενεργοποιητή. Όπως είναι εμφανές, αποτελεί την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του κόμβου.

1.5.1.1 Ελεγκτής

Όλες αυτές οι εργασίες μπορούν να εκτελεστούν από διάφορες αρχιτεκτονικές ελεγκτών με διαφορετικούς συμβιβασμούς (trade-offs) ανάμεσα σε ευελιξία, λειτουργία, ενεργειακή απόδοση και κόστος.

Μια λύση είναι η χρήση επεξεργαστών γενικού σκοπού, όπως αυτοί που υπάρχουν στους προσωπικούς υπολογιστές. Οι επεξεργαστές αυτοί είναι πολύ ισχυροί και έχουν υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Υπάρχουν όμως και πιο απλοί επεξεργαστές ειδικά εξοπλισμένοι για χρήση σε ενσωματωμένα συστήματα, γνωστοί ως μικροελεγκτές. Τα χαρακτηριστικά που κάνουν τους μικροελεγκτές κατάλληλους για χρήση σε ενσωματωμένα συστήματα είναι η εύκολη δικτύωσή τους με άλλες συσκευές, το σύνολο εντολών τους που ανταποκρίνεται σε χρονοευσίθητη επεξεργασία σήματος, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, η ικανότητα προγραμματισμού τους που τους καθιστά ιδιαίτερα ευέλικτους και η ενσωματωμένη μνήμη που συνήθως διαθέτουν. Συγκεκριμένα για τα WSNs, ένα μεγάλο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας με το να εισέρχονται σε κατάσταση ύπνου, κατά την οποία μόνο ορισμένα τμήματα του μικροελεγκτή είναι ενεργά.



Σχήμα 1.13: Ασύρματος κόμβος αισθητήρων

Μια ειδική περίπτωση προγραμματιζόμενου επεξεργαστή είναι ο Επεξεργαστής Ψηφιακού Σήματος (Digital Signal Processor, DSP), ο οποίος είναι ειδικά εξοπλισμένος από άποψη αρχιτεκτονικής και συνόλου εντολών, για την επεξεργασία μεγάλου όγκου διανυσματικών δεδομένων. Σε ένα κόμβο αισθητήρων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας DSP για την επεξεργασία των δεδομένων που προέρχονται από μια αναλογική, ασύρματη συσκευή με στόχο την δημιουργία μιας ψηφιακής ροής δεδομένων. Παρόλα αυτά, στα WSNs οι απαιτήσεις της ασύρματης επικοινωνίας και οι εργασίες επεξεργασίας σήματος των δεδομένων που συλλέγουν οι αισθητήρες είναι πολύ απλές. Γι' αυτό συνήθως δεν χρησιμοποιούνται οι DSP στους κόμβους αισθητήρων.

Μια ακόμη επιλογή είναι η χρήση Field-Programmable Gate Arrays (FPGA) ή Application-Specific Integrated Circuits (ASIC). Ένα FPGA μπορεί να επαναπρογραμματιστεί στον τόπο λειτουργίας για να προσαρμοστεί σε ένα μεταβλητό σύνολο απαιτήσεων. Αυτό φυσικά θέλει χρόνο και ενέργεια, οπότε ο επαναπρογραμματισμός δεν είναι δυνατό να πραγματοποιείται τόσο συχνά όσο μπορούμε να αλλάξουμε το πρόγραμμα εκτέλεσης ενός μικροελεγκτή. Ο ASIC είναι ένας εξειδικευμένος επεξεργαστής, που σχεδιάζεται για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως για δρομολογητές υψηλής ταχύτητας. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε απώλεια ευελιξίας με αντάλλαγμα μια αρκετά αποδοτικότερη κατανάλωση ενέργειας και λειτουργία. Επίσης, οι ASIC απαιτούν ανάπτυξη υλικού, γεγονός που τους κάνει ακριβούς σε σχέση με τους μικροελεγκτές, οι οποίοι απαιτούν ανάπτυξη λογισμικού.

Για ένα WSN που η λειτουργία του δεν μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ζωής του και που ο αριθμός των κόμβων είναι αρκετά μεγάλος για να δικαιολογεί την επένδυση, η χρήση ενός ASIC είναι η ενδεδειγμένη λύση. Στην παρούσα φάση ανάπτυξης των WSNs, η μεγαλύτερη ευελιξία και η απλότητα στην χρήση των μικροελεγκτών, τους καθιστά την προτιμώμενη λύση.

1.5.1.2 Μνήμη

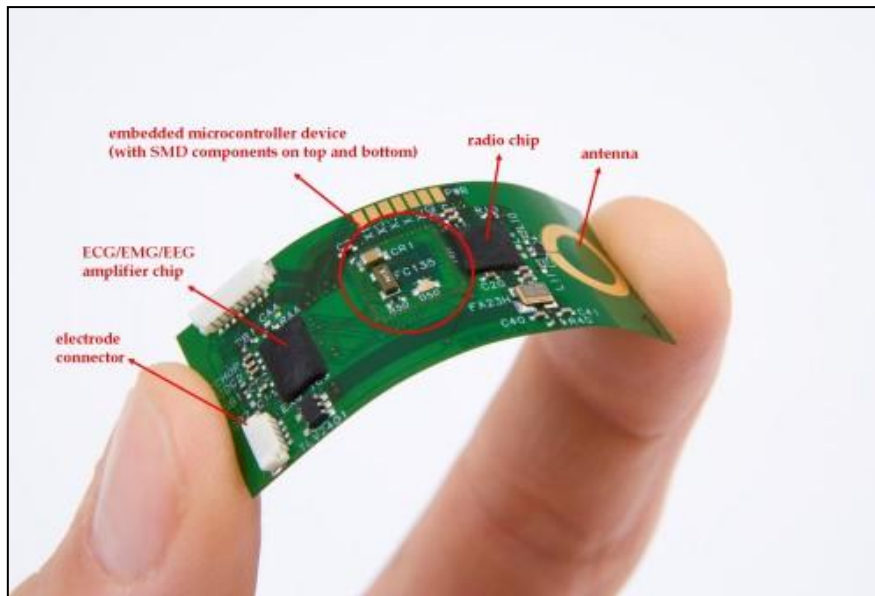
Προφανώς υπάρχει η ανάγκη ύπαρξης RAM (Random Access Memory) για την αποθήκευση των ενδιάμεσων ενδείξεων των αισθητήρων και των πακέτων από άλλους κόμβους. Παρότι η RAM είναι γρήγορη, χάνει το περιεχόμενό της σε περίπτωση διακοπής της τροφοδοσίας. Τα προγράμματα μπορούν να είναι αποθηκευμένα σε ROM (Read-Only Memory) ή EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) ή flash memory, η οποία διαφέρει από την EEPROM στο ότι επιτρέπει την εγγραφή/διαγραφή των δεδομένων σε ομάδες αντί για ένα byte τη φορά. Η flash memory μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση ενδιάμεσων δεδομένων σε περίπτωση που η RAM είναι ανεπαρκής ή όταν πρέπει να διακοπεί η τροφοδοσία της για κάποιο χρονικό διάστημα. Σε αντάλλαγμα, η flash memory έχει μεγάλες καθυστερήσεις στην εγγραφή/διαγραφή και υψηλή κατανάλωση ενέργειας.

Σημαντικό ρόλο στο κόστος και την κατανάλωση ενέργειας της μνήμης παίζει η σωστή επιλογή του μεγέθους, το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εφαρμογή.

1.5.2 Μονάδα επικοινωνίας (Transceiver unit)

Η μονάδα επικοινωνίας χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ μεμονωμένων κόμβων. Σε μερικές περιπτώσεις είναι δυνατή η ενσύρματη επικοινωνία, όπου οι συσκευές επικοινωνίας είναι τυποποιημένα εμπορικά προϊόντα.

Σε περίπτωση ασύρματης επικοινωνίας, η πρώτη επιλογή που πρέπει να γίνει είναι αυτή του μέσου επικοινωνίας. Τα πιο συνηθισμένα μέσα είναι οι ραδιοσυχνότητες (RF), η οπτική επικοινωνία και οι υπέρηχοι. Από αυτές τις επιλογές, οι επικοινωνίες που βασίζονται στις RF είναι αυτές που ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις των WSNs· προσφέρουν σχετικά μεγάλη κάλυψη και υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, αποδεκτό ρυθμό σφαλμάτων με λογική κατανάλωση ενέργειας και δεν απαιτούν οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή της συχνότητας φέροντος όταν πρόκειται για RF επικοινωνίες. Συνήθως, τα WSNs χρησιμοποιούν συχνότητες από 433 MHz έως 2,4 GHz.



Σχήμα 1.14: Εύκαμπτος ασύρματος κόμβος αισθητήρων

1.5.2.1 Χαρακτηριστικά πομποδέκτη

Για την περάτωση της επικοινωνίας, κάθε κόμβος διαθέτει πομπό και δέκτη. Η βασική λειτουργία τους είναι η μετατροπή μιας ροής bit από τον μικροελεγκτή σε ραδιοκύμα και το αντίστροφο. Για πρακτικούς λόγους, υπάρχει μια συσκευή που πραγματοποιεί και τις δύο λειτουργίες, η οποία λέγεται πομποδέκτης. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία χαμηλού κόστους πομποδεκτών στο εμπόριο που διαθέτουν όλα τα απαραίτητα κυκλώματα για εκπομπή και λήψη (διαμόρφωση, αποδιαμόρφωση, ενίσχυση, φιλτράρισμα, μίξη και άλλα). Για την επιλογή του κατάλληλου πομποδέκτη πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφορα χαρακτηριστικά. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι:

1. Κατανάλωση ενέργειας και αποδοτικότητα: Η πιο απλή ερμηνεία της ενεργειακής απόδοσης του πομποδέκτη είναι η ενέργεια που χρειάζεται για την εκπομπή ενός bit. Επίσης, για να είναι ένας πομποδέκτης κατάλληλος για χρήση σε κόμβο αισθητήρων θα πρέπει να διαθέτει διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας, όπως κατάσταση ύπνου, κατάσταση λειτουργίας, κατάσταση αδράνειας και άλλα. Η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την διάρκεια μετάβασης από μια κατάσταση σε άλλη ή όταν ο πομποδέκτης δεν εκτελεί κάποια λειτουργία είναι πολύ σημαντικό στοιχείο.
2. Συχνότητα φέροντος και πολλαπλά κανάλια: Οι πομποδέκτες είναι διαθέσιμοι σε πολλές διαφορετικές συχνότητες φέροντος. Επιπλέον, είναι χρήσιμο πολλές φορές ο ίδιος πομποδέκτης να προσφέρει αρκετές συχνότητες φέροντος (κανάλια) για επιλογή, βοηθώντας έτσι να καταπολεμηθούν προβλήματα συμφόρησης σε

πυκνά δίκτυα. Τέτοια κανάλια αξιοποιούνται με συγκεκριμένα πρωτόκολλα MAC (Medium Access Control), όπως FDMA ή πολυκαναλικό CSMA/ALOHA και άλλα.

3. Αλλαγή καταστάσεων λειτουργίας και ενέργεια: Ένας πομποδέκτης μπορεί να εκπέμπει ή να λαμβάνει δεδομένα, να χρησιμοποιεί διαφορετικά κανάλια ή να βρίσκεται σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Σε κάθε περίπτωση, ο χρόνος και η ενέργεια που χρειάζεται για μεταβούμε από την μια λειτουργία στην άλλη είναι σημαντικά ζητήματα. Ο χρόνος μετάβασης από την εκπομπή στην λήψη για παράδειγμα είναι σημαντικός για πολλά πρωτόκολλα MAC.
4. Ρυθμός δεδομένων: Η συχνότητα φέροντος, καθώς και το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης συνδυασμένα με την διαμόρφωση και την κωδικοποίηση καθορίζουν το συνολικό ρυθμό δεδομένων. Συνήθισμένες τιμές είναι μερικές δεκάδες kilobits το δευτερόλεπτο, που είναι αρκετά για τα WSNs. Μπορούμε να επιτύχουμε διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων αλλάζοντας την χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση ή αλλάζοντας την διάρκεια συμβόλου.
5. Διαμόρφωση και κωδικοποίηση: Οι πομποδέκτες υποστηρίζουν διάφορα είδη διαμόρφωσης, όπως ASK (Amplitude Shift Keying) και FSK (Frequency Shift Keying) και διαφορετικές κωδικοποιήσεις.
6. Έλεγχος ισχύος εκπομπής: Πολλοί πομποδέκτες προσφέρουν την δυνατότητα ελέγχου της ισχύος εκπομπής που θα χρησιμοποιηθεί. Συνήθως υπάρχουν ορισμένες διακριτές τιμές ισχύος από τις οποίες μπορεί να γίνει η επιλογή.
7. Συντελεστής θορύβου: Ο συντελεστής θορύβου (Noise Figure, NF) ενός στοιχείου ορίζεται ως ο λόγος του σηματοθορυβικού λόγου στην είσοδο SNR_i προς αυτόν στην έξοδο SNR_o . Ο συντελεστής θορύβου περιγράφει την χειροτέρευση του SNR λόγω της λειτουργίας του στοιχείου και συνήθως υπολογίζεται σε dB από τον τύπο:
$$NF \text{ (dB)} = SNR_i \text{ (dB)} - SNR_o \text{ (dB)}$$
8. Κέρδος: Το κέρδος του πομποδέκτη ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του σήματος εξόδου προς την ισχύ του σήματος εισόδου και συνήθως υπολογίζεται σε dB. Επιθυμητή είναι η χρήση ενισχυτών μεγάλου κέρδους για να επιτύχουμε καλή ενεργειακή απόδοση.
9. Ευαισθησία δέκτη: Η ευαισθησία του δέκτη εκφράζεται σε dBm και αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ισχύ σήματος που χρειάζεται ο δέκτης για να επιτύχει τον απαιτούμενο λόγο E_b/N_0 ή τον απαιτούμενο ρυθμό σφαλμάτων σε bit/πακέτο. Όσο μεγαλύτερη

είναι η ευαισθησία του δέκτη, τόσο επεκτείνεται η περιοχή κάλυψης του κόμβου.

10. Ακτίνα κάλυψης: Η ακτίνα κάλυψης του πομπού θεωρείται χωρίς την ύπαρξη παρεμβολών και εξαρτάται από την μέγιστη ισχύ εκπομπής, τα χαρακτηριστικά της κεραίας, την εξασθένιση λόγω του περιβάλλοντος, η οποία με την σειρά της εξαρτάται από την συχνότητα φέροντος, το σχήμα διαμόρφωσης/κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται και το ανεκτό BER (Bit Error Rate) στο δέκτη. Επίσης, η ακτίνα κάλυψης εξαρτάται και από την ποιότητα του δέκτη, κυρίως από την ευαισθησία του. Παρότι δεν είναι εύκολο να προσδιορίσουμε τυπικές τιμές για την ακτίνα κάλυψης, γνωρίζουμε ότι κυκλοφορούν προϊόντα με ακτίνα κάλυψης από μερικά μέτρα μέχρι αρκετές εκατοντάδες μέτρα.
11. Ικανότητα φραγής παρεμβολέα: Η ικανότητα φραγής του δέκτη αναφέρεται στο BER που επιτυγχάνεται παρουσία παρεμβολών. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται σε ποια επίπεδα ισχύος θα πρέπει ένας παρεμβολέας (σε σταθερή γνωστή θέση) να εκπέμπει, σε γνωστή απόσταση από την συχνότητα φέροντος, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί το επιθυμητό BER στο δέκτη. Μια ξεχωριστή περίπτωση παρεμβολής είναι η παρεμβολή γειτονικού διαύλου. Πρέπει ο πομποδέκτης να μπορεί να φιλτράρει τα σήματα των γειτονικών διαύλων και να λαμβάνει μόνο αυτά που προορίζονται γι' αυτόν.
12. Έλεγχος φέροντος και RSSI: Σε πολλά πρωτόκολλα MAC είναι βασικό να γνωρίζουμε αν ο δίαυλος είναι κατειλημμένος, δηλαδή αν κάποιος άλλος κόμβος αποστέλλει δεδομένα, οπότε θα πρέπει ο δέκτης να μπορεί να παρέχει αυτές τις πληροφορίες. Επίσης, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος ενός εισερχόμενου πακέτου μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες για το δίκτυο, όπως για παράδειγμα την απόσταση του πομπού από τον δέκτη δεδομένης ισχύος εκπομπής. Γι' αυτό ο δέκτης πρέπει να ενημερώνει το RSSI (Received Signal Strength Indicator).

1.5.2.2 Δομή πομποδέκτη

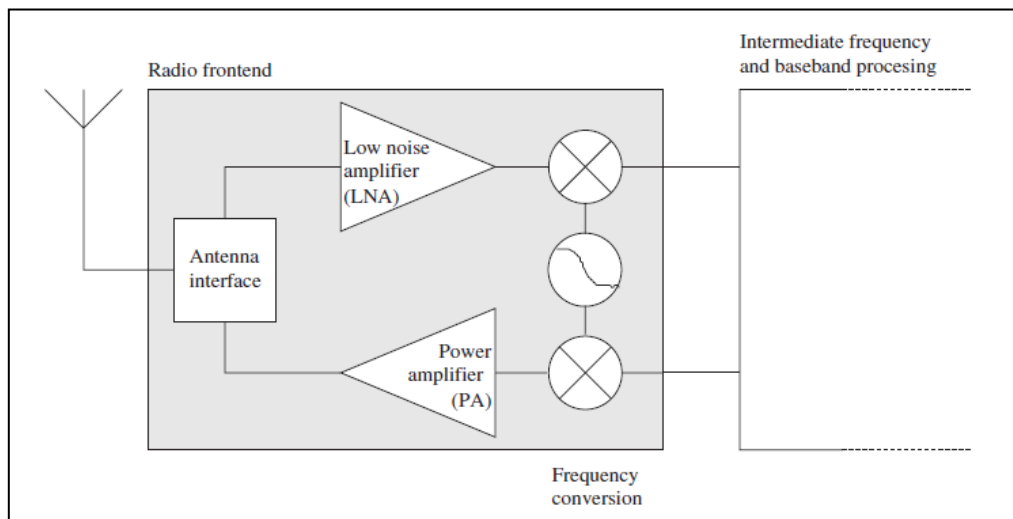
Συνήθως ένας πομποδέκτης αποτελείται από:

1. RF μπροστινό άκρο (RF front end): εκτελεί την αναλογική επεξεργασία σήματος στο εύρος ζώνης των RF.
2. Επεξεργαστής βασικής ζώνης (Baseband processor): εκτελεί όλη την ψηφιακή επεξεργασία σήματος και επικοινωνεί με τον επεξεργαστή του κόμβου.

Μεταξύ των δύο αυτών τμημάτων γίνεται μετατροπή συχνότητας, είτε απευθείας, είτε μέσω κάποιας ενδιάμεσης βαθμίδας (IFs).

Η αρχιτεκτονική του RF μπροστινού άκρου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.15 [5] και περιλαμβάνει:

1. Ενισχυτή ισχύος (Power Amplifier, PA), ο οποίος δέχεται σήματα που έχουν υποστεί άνω μετατροπή συχνότητας από τις ενδιάμεσες συχνότητες (IFs) και το τμήμα βασικής ζώνης και τα ενισχύει για την εκπομπή από την κεραία.
2. Ενισχυτή χαμηλού θορύβου (Low Noise Amplifier, LNA), ο οποίος ενισχύει τα εισερχόμενα σήματα σε επίπεδο κατάλληλο για την περαιτέρω επεξεργασία τους χωρίς να μειώνει σημαντικά το SNR [25]. Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος κυμαίνεται από πολύ ασθενές σήμα που προέρχεται από κόμβο στα όρια της περιοχής κάλυψης μέχρι ισχυρό σήμα από γειτονικό κόμβο. Αν δεν ληφθούν μέτρα, ο LNA είναι συνεχώς ενεργοποιημένος και καταναλώνει μεγάλο τμήμα της ενέργειας του πομποδέκτη.
3. Στοιχεία όπως τοπικούς ταλαντωτές, μίκτες και άλλα που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή συχνότητας από τα RF σε ενδιάμεσες συχνότητες ή την βασική ζώνη.



Σχήμα 1.15: Αρχιτεκτονική του RF μπροστινού άκρου

1.5.2.3 Καταστάσεις λειτουργίας πομποδέκτη

Σε πολλούς πομποδέκτες μπορούμε να διαχωρίσουμε 4 διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας [27]:

1. Κατάσταση εκπομπής: Σε αυτή την κατάσταση είναι ενεργός ο πομπός και η κεραία ακτινοβολεί ενέργεια.
2. Κατάσταση λήψης: Αντιστοίχως, σε αυτή την κατάσταση είναι ενεργός ο δέκτης.
3. Κατάσταση αδράνειας: Ο πομποδέκτης είναι έτοιμος να λάβει δεδομένα, αλλά δεν έχει ξεκινήσει ακόμα η λήψη. Σε αυτή την φάση, πολλά τμήματα του δέκτη είναι ενεργά, ενώ άλλα είναι απενεργοποιημένα. Για παράδειγμα, στο κύκλωμα συγχρονισμού τα στοιχεία που ασχολούνται με την απόκτηση των δεδομένων είναι ενεργά, ενώ τα στοιχεία που ασχολούνται με παρακολούθηση τροχιάς είναι απενεργοποιημένα μέχρι να χρειαστούν.
4. Κατάσταση ύπνου: Τα περισσότερα από τα στοιχεία του πομποδέκτη είναι απενεργοποιημένα. Υπάρχουν αρκετές διαβαθμίσεις για αυτή την κατάσταση που εξαρτώνται από τον αριθμό των κυκλωμάτων που είναι απενεργοποιημένα, τον απαιτούμενο χρόνο επαναφοράς και την ενέργεια επανεκκίνησής τους.

1.5.3 Μονάδα ανίχνευσης (Sensing unit)

1.5.3.1 Αισθητήρες

Οι αισθητήρες μπορούν χοντρικά να κατηγοριοποιηθούν σε 3 κατηγορίες [27]:

1. Παθητικοί, ομοιοκατευθυντικοί αισθητήρες: Αυτοί οι αισθητήρες μετράνε ένα φυσικό μέγεθος χωρίς να αλληλεπιδρούν περαιτέρω με το περιβάλλον και υπό αυτή την έννοια είναι παθητικοί. Επιπλέον, κάποιοι από αυτούς τους αισθητήρες συλλέγουν ενέργεια από το περιβάλλον για να εκτελέσουν την ενίσχυση του αναλογικού σήματος που παράγουν. Τέλος, οι μετρήσεις των αισθητήρων αυτών δεν έχουν καμία αναφορά σε κατεύθυνση. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων μετρήσεων είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η μηχανική αντοχή και άλλα.
2. Παθητικοί, κατευθυντικοί αισθητήρες: Επίσης παθητικοί, αυτοί οι αισθητήρες έχουν μια καλά ορισμένη αντίληψη της κατεύθυνσης στις μετρήσεις τους. Κλασικό παράδειγμα είναι οι κάμερες, οι οποίες λαμβάνουν μετρήσεις σε κάποια δοσμένη κατεύθυνση.

3. Ενεργητικοί αισθητήρες: Η τελευταία αυτή κατηγορία αλληλεπιδρά ενεργά με το περιβάλλον, όπως για παράδειγμα οι σόναρ ή ραντάρ αισθητήρες ή ορισμένοι σεισμικοί αισθητήρες, οι οποίοι παράγουν κύματα κρούσης μέσω μικρών εκρήξεων.

Αισθητήρες όλων των παραπάνω τύπων είναι διαθέσιμοι σε πολλές διαφορετικές μορφές. Μερικά προφανή trade-offs είναι η ακρίβεια, η κατανάλωση ενέργειας, η αξιοπιστία, το κόστος, το μέγεθος και άλλα.

Μια υπόθεση που γίνεται συχνά στην βιβλιογραφία σχετικά με τους κόμβους αισθητήρες είναι ότι διαθέτουν μια οριοθετημένη περιοχή κάλυψης, εντός της οποίας μπορούν αξιόπιστα και με ακρίβεια να μετρήσουν το παρατηρούμενο μέγεθος ([10], [11]).

1.5.3.2 Ενεργοποιητές

Οι ενεργοποιητές έχουν τόση ποικιλία, όση και οι αισθητήρες, αλλά για τις ανάγκες των WSNs οι λειτουργίες που επιτελούν είναι πιο απλές. Πρακτικά, ένας κόμβος μπορεί να ανοιγοκλείσει ένα διακόπτη ή έναν αναμεταδότη ή να ορίσει κάποιο κατώφλι. Ανεξάρτητα με το αν ελέγχεται μια λάμπα, μια μηχανή ή κάποιο άλλο φυσικό αντικείμενο, ο σχεδιασμός του πρωτοκόλλου επικοινωνίας δεν επηρεάζεται.

1.5.4 Μονάδα παροχής ενέργειας (Power unit)

Σε ό,τι αφορά αυτή την μονάδα, δύο είναι τα βασικά ζητήματα: πρώτον η αποθήκευση της ενέργειας και η παροχή ισχύος στην κατάλληλη μορφή και δεύτερον η προσπάθεια αναπλήρωσης της καταναλωμένης ενέργειας με τεχνικές συλλογής από άλλες πηγές ενέργειας έξω από τον κόμβο.

1.5.4.1 Τεχνικές αποθήκευσης ενέργειας

Ο συμβατικός τρόπος αποθήκευσης της ενέργειας είναι με χρήση μπαταριών. Ο σχεδιασμός των μπαταριών αποτελεί ένα κλάδο από μόνος του και οι τεχνικές συλλογής ενέργειας για την επαναφόρτισή τους έχουν γίνει αντικείμενο μελέτης. Υπάρχουν βέβαια και μη συμβατικά μέσα αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία θα παρουσιαστούν περιληπτικά στην συνέχεια.

- Μπαταρία

Η πηγή ισχύος του κόμβου μπορεί να είναι είτε μη επαναφορτιζόμενη μπαταρία, είτε επαναφορτιζόμενη μπαταρία, αν υπάρχει δυνατότητα συλλογής ενέργειας. Και στις δύο περιπτώσεις, οι μπαταρίες είναι ηλεκτροχημικές αποθήκες ενέργειας, όπου η επιλογή του χημικού

αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα της τεχνολογίας της μπαταρίας. Για τις μπαταρίες αυτές ισχύουν πολύ αυστηρές προϋποθέσεις. Τέτοιες είναι:

1. Χωρητικότητα: Πρέπει να διαθέτουν μεγάλη χωρητικότητα, αλλά μικρό βάρος, όγκο και χαμηλή τιμή. Η χωρητικότητα της μπαταρίας εκφράζεται ως ενέργεια ανά όγκο και μειριέται συνήθως σε J/cm^3 . Γίνονται έρευνες για κατασκευή μπαταριών μικρής κλίμακας, οι οποίες θα τοποθετούνται κατευθείαν πάνω σε ολοκληρωμένο κύκλωμα.
 2. Χωρητικότητα υπό φορτίο: Οι μπαταρίες θα πρέπει να αντέχουν διάφορα είδη χρήσης, αφού ένας κόμβος καταναλώνει διαφορετικά επίπεδα ενέργειας κατά την διάρκεια λειτουργίας του και επιπλέον μπορεί να τραβήξει υψηλά ρεύματα σε συγκεκριμένες καταστάσεις λειτουργίας. Σαν γενικός κανόνας ισχύει ότι όσο πιο μεγάλη είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας, τόσο περισσότερη ισχύς μπορεί να αποδοθεί στιγμιαία.
 3. Αποφόρτιση μπαταρίας: Πρέπει η μπαταρία να έχει αργό ρυθμό αποφόρτισης, αφού συνήθως απαιτείται μεγάλος χρόνος ζωής. Με την χρήση κατάλληλων τεχνικών, οι μπαταρίες έχουν διάρκεια ζωής μόνο μερικούς μήνες, ανεξάρτητα από το αν αντλείται από αυτές ενέργεια ή όχι.
 4. Αποδοτική επαναφόρτιση: Η επαναφόρτιση της μπαταρίας πρέπει να είναι αποδοτική ακόμα και με χαμηλή και διακοπτόμενη ισχύ επαναφόρτισης. Συνεπώς, η μπαταρία δεν θα πρέπει να παρουσιάζει κάποιο φαινόμενο μνήμης.
 5. Φαινόμενο χαλάρωσης: Το φαινόμενο χαλάρωσης είναι η φαινομενική αποφόρτιση μιας άδειας ή σχεδόν άδειας μπαταρίας όταν δεν τραβάμε ρεύμα από αυτήν και οφείλεται σε μηχανισμούς χημικής διάχυσης. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας και η αξιοποιήσιμη χωρητικότητά της αυξάνονται αν περιοριστεί αυτό το φαινόμενο.
- Μη συμβατικές μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας

Εκτός από τις παραδοσιακές μπαταρίες, υπάρχουν και άλλες μορφές πηγών ενέργειας. Οι κυψέλες καυσίμων πληρούν τις προϋποθέσεις για ηλεκτροχημικές αποθήκες ενέργειας, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια από την οξειδωση υδρογόνου ή από καύσιμα υδρογονανθράκων. Οι κυψέλες καυσίμων έχουν εξαιρετική πυκνότητα ενέργειας, αλλά τα διαθέσιμα συστήματα ακόμα απαιτούν ένα μη αμελητέο ελάχιστο μέγεθος για τις αντλίες, τις βαλβίδες και τα λοιπά. Μια πιο παραδοσιακή προσέγγιση για την αξιοποίηση της ενέργειας που βρίσκεται στους υδρογονάνθρακες, είναι η χρήση μικροσκοπικών θερμικών μηχανών, όπως η τουρμπίνα. Βέβαια, η σμίκρυνση τέτοιων θερμικών μηχανών στα

επιθυμητά μεγέθη προϋποθέτει έρευνα από την μεριά των MEMSs (Micro-Electro-Mechanical Systems).

Δυστυχώς, οι μπαταρίες ή οι άλλες μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας μόνες τους δεν επαρκούν ως πηγή ενέργειας για τον κόμβο. Ένα χαρακτηριστικό πρόβλημα είναι η μείωση της τάσης της μπαταρίας όταν πέφτει η χωρητικότητά της. Κατ' επέκταση, λιγότερη ισχύς μεταφέρεται στα κυκλώματα του κόμβου, με άμεσο αντίκτυπο στις συχνότητες των ταλαντωτών και την ισχύ εκπομπής. Επομένως, ένας κόμβος με αδύναμη μπαταρία θα έχει μικρότερη ακτίνα κάλυψης συγκριτικά με έναν με γεμάτη μπαταρία. Έτσι, πιθανώς θα αχρηστευτούν όλες οι ρυθμίσεις που έχουν γίνει σχετικά με τις ακτίνες κάλυψης των κόμβων του δικτύου κατά τον σχεδιασμό του.

Αυτό το πρόβλημα λύνεται με την χρήση ενός DC σε DC μετατροπέα, ο οποίος θα ελέγχει την τάση που λαμβάνουν τα κυκλώματα του κόμβου. Για να μπορέσει ο μετατροπέας να εξασφαλίσει την απαιτούμενη τάση ακόμα και όταν η μπαταρία δεν μπορεί, πρέπει να τραβάει μεγάλα ρεύματα από μια ήδη αδύναμη μπαταρία, επιταχύνοντας έτσι την αχρήστευσή της. Επιπλέον, ο μετατροπέας καταναλώνει και αυτός ενέργεια για την λειτουργία του, γεγονός που μειώνει την συνολική αποδοτικότητα. Όμως, αυτό αντισταθμίζεται από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η προβλέψιμη λειτουργία καθ' όλη την διάρκεια ζωής του κόμβου.

1.5.4.2 Τεχνικές συλλογής ενέργειας

Οι μη συμβατικές αποθήκες ενέργειας που περιγράφηκαν παραπάνω μετατρέπουν την ενέργεια που έχουν αποθηκευμένη σε ηλεκτρική με έναν πιο έμμεσο και περίπλοκο τρόπο από την μπαταρία. Όλα τα αποθέματα ενέργειας του κόμβου βρίσκονται πάνω του και όταν αυτά τελειώσουν ο κόμβος αχρηστεύεται.

Προκείμενου να εξασφαλίσουμε κόμβους και δίκτυα με μεγάλη διάρκεια ζωής, πρέπει να ξεπεράσουμε το εμπόδιο των περιορισμένων καυσίμων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την συλλογή ενέργειας από το περιβάλλον και την χρήση της από τον κόμβο. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για αυτή την υλοποίηση [28], μερικές από τις οποίες είναι:

1. Φωτοβολταϊκά: Οι πολύ γνωστοί ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να τροφοδοτήσουν με ενέργεια τους κόμβους. Η προσφερόμενη ενέργεια εξαρτάται από το αν οι κόμβοι χρησιμοποιούνται σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο και από την ώρα της μέρας. Έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες τόσο για εσωτερικούς κόμβους, όσο και για εξωτερικούς και συνήθως χρησιμοποιούνται για την επαναφόρτιση μπαταριών.
2. Κλίση θερμοκρασίας: Οι διαφορές στην θερμοκρασία μπορούν να μετατραπούν άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια. Θεωρητικά, ακόμα και μια σχετικά μικρή διαφορά των 5 K μπορεί να παράγει αξιόλογο

ποσό ενέργειας, αλλά οι συσκευές που υπάρχουν υστερούν σε σχέση με τις θεωρητικές δυνατότητες.

3. Δονήσεις: Μια μορφή μηχανικής ενέργειας είναι οι δονήσεις. Η προσφερόμενη ενέργεια εξαρτάται κυρίως από το πλάτος και τη συχνότητα των δονήσεων. Η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους που βασίζονται σε ηλεκτρομαγνητικές, ηλεκτροστατικές και πιεζοηλεκτρικές αρχές.
4. Διαφορές στην πίεση: Παρόμοια με τις δονήσεις, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε και την διαφορά πίεσης ως πηγή ενέργειας. Τέτοιες πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες ήδη χρησιμοποιούνται στις σόλες των παπουτσιών για να παράγουν ενέργεια με το περπάτημα του ανθρώπου. Παρόλα αυτά δεν είναι ξεκάθαρο ακόμα πώς μπορούν αυτές οι τεχνολογίες να χρησιμοποιηθούν σε ένα WSN.
5. Ροή αέρα/υγρών: Μια ακόμα συχνά χρησιμοποιούμενη πηγή ενέργειας είναι η ροή του αέρα ή υγρών σε ανεμόμυλους ή τουρμπίνες. Φυσικά, και σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα είναι η σμίκρυνση για τις ανάγκες του κόμβου.

1.6 Σχεδιασμός WSNs

Είναι εμφανές ότι μια τέτοια ευρεία γκάμα εφαρμογών δεν μπορεί να περιγραφεί από μια υλοποίηση WSN. Εντούτοις, οι εφαρμογές εμφανίζουν αρκετά κοινά σημεία σε ό,τι αφορά τα χαρακτηριστικά τους και τους απαιτούμενους μηχανισμούς για την υλοποίησή τους. Η μεγάλη πρόκληση είναι να πραγματοποιηθούν αυτά τα χαρακτηριστικά με νέους μηχανισμούς.

1.6.1 Χαρακτηριστικά WSNs

Τα παρακάτω χαρακτηριστικά εμφανίζονται στις περισσότερες από τις εφαρμογές που περιγράψαμε στην αρχή του κεφαλαίου:

1. Είδος υπηρεσίας: Είναι προφανές ότι η εργασία που επιτελεί ένα WSN είναι η συλλογή και η μεταφορά χρήσιμων δεδομένων σχετικά με ένα γεγονός και/ή η εκτέλεση ορισμένων ενεργειών.
2. Ποιότητα προσφερόμενης υπηρεσίας (Quality of Service, QoS): Η ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας είναι στενά συνδεδεμένη με το είδος της υπηρεσίας, γι' αυτό υπάρχουν πολλές παράμετροι για την εκτίμησή της. Οι πιο συνήθεις παράμετροι, όπως η φραγμένη καθυστέρηση ή το ελάχιστο εύρος ζώνης, δεν έχουν νόημα σε εφαρμογές που παρουσιάζουν ανοχή στην καθυστέρηση [4] ή το εύρος ζώνης των εκπεμπόμενων δεδομένων είναι πολύ

μικρό. Σε μερικές περιπτώσεις, αρκεί η περιστασιακή παράδοση ενός πακέτου (ανά ορισμένο χρονικό διάστημα), ενώ σε άλλες απαιτείται μεγάλη αξιοπιστία στην παράδοση των πακέτων. Επίσης, υπάρχουν εφαρμογές που η καθυστέρηση είναι σημαντική, παραδείγματος χάριν όταν ελέγχονται ενεργοποιητές από το δίκτυο σε πραγματικό χρόνο. Ο ρυθμός παράδοσης πακέτων δεν αποτελεί κάποια ουσιώδη παράμετρο, αφού σημασία έχει ο όγκος και η ποιότητα των δεδομένων που μπορούμε να εξάγουμε από τις καταβόθρες για το παρατηρούμενο γεγονός. Τελικά, συμπεραίνουμε ότι πρέπει να υπάρξουν προσαρμοσμένοι δείκτες QoS που εκφράζουν τις ανάγκες του δικτύου, όπως η αξιόπιστη ανίχνευση γεγονότων ή η ακρίβεια των προσεγγιστικών συναρτήσεων.

3. Ανοχή σφαλμάτων: Το WSN οφείλει να είναι ανεκτικό στα σφάλματα, δεδομένου ότι μπορεί κάποιος κόμβος να ξεμείνει από ενέργεια ή να καταστραφεί ή ακόμα μπορεί να διακοπεί μόνιμα η επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων. Η ανοχή τέτοιων σφαλμάτων επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση πλεοναζόντων κόμβων στο δίκτυο.
4. Διάρκεια ζωής: Σε πολλές εφαρμογές οι κόμβοι είναι εφοδιασμένοι με περιορισμένα ποσά ενέργειας. Επειδή η αντικατάσταση των μπαταριών των κόμβων είναι συνήθως αδύνατη και ασύμφορη, η διάρκεια ζωής του δικτύου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Μια λύση είναι η εξοικονόμηση ενέργειας κατά την λειτουργία του WSN. Επιπλέον, σε συνδυασμό με την μπαταρία του κόμβου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές συλλογής ενέργειας, όπως ηλιακοί συλλέκτες. Αυτές οι τεχνικές δεν αρκούν για να εξασφαλίσουν την αδιάκοπη λειτουργία του κόμβου, μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν για την μερική επαναφόρτιση των μπαταριών του. Η διάρκεια ζωής του δικτύου επιμηκύνεται με αντάλλαγμα τον περιορισμό του QoS, αφού περισσότερη ενέργεια αυξάνει το QoS αλλά μειώνει την διάρκεια ζωής του δικτύου. Είναι σαφές, λοιπόν, ότι πρέπει να υπάρξει ισορροπία μεταξύ των δύο αυτών παραμέτρων.
5. Κλιμάκωση δικτύου: Εφόσον ένα WSN μπορεί να περιλαμβάνει έναν πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων, πρέπει οι χρησιμοποιούμενες αρχιτεκτονικές και τα πρωτόκολλα να δύνανται να στηρίξουν αυτό το μέγεθος δικτύου.
6. Ευρεία γκάμα πυκνοτήτων: Σε ένα WSN ο αριθμός των κόμβων ανά μονάδα εμβαδού, δηλαδή η πυκνότητα του δικτύου, ποικίλλει. Η πυκνότητα εξαρτάται κυρίως από την εφαρμογή, αλλά μπορούμε να έχουμε και διαφορετικές πυκνότητες στα πλαίσια της ίδιας εφαρμογής. Αυτό συμβαίνει λόγω της καταστροφής ή της κίνησης ορισμένων κόμβων, αλλά και λόγω του τυχαίου στησίματος του δικτύου. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι το δίκτυο πρέπει να προσαρμόζεται σε τέτοιου είδους ανομοιογένειες.

7. Προγραμματιζόμενοι κόμβοι: Οι κόμβοι εκτός από την συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων πρέπει να ενεργούν ευέλικτα σε πιθανές μεταβολές των εργασιών τους. Γι' αυτό, πρέπει να έχουν την δυνατότητα να αλλάζει ο προγραμματισμός τους κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους, έτσι ώστε να προσαρμόζονται στις νέες απαιτήσεις. Ένας αμετάβλητος και προκαθορισμένος τρόπος επεξεργασίας δεδομένων δεν επαρκεί.
8. Αυτοσυντήρηση δικτύου: Όσο μεταβάλλεται το περιβάλλον, αλλά και το ίδιο το WSN (καταστρέφονται κόμβοι, αχρηστεύονται μπαταρίες ή αλλάζει η εργασία που πρέπει να επιτελέσει), πρέπει το δίκτυο να προσαρμόζεται. Το δίκτυο οφείλει να παρακολουθεί την κατάστασή του και να αλλάζει τις παραμέτρους λειτουργίας του ή να επιλέγει διαφορετικά trade-offs με στόχο την αύξηση της διάρκειας της ζωής του. Ένα παράδειγμα αυτοσυντήρησης είναι η προσφορά υπηρεσιών χαμηλότερης ποιότητας όταν τα αποθέματα ενέργειας τελειώνουν. Υπό αυτή την έννοια, το δίκτυο αυτοσυντηρείται. Επίσης, χρήσιμη θα ήταν η επικοινωνία του δικτύου με εξωτερικούς μηχανισμούς συντήρησης για διαβεβαίωση της λειτουργίας του εντός αποδεκτών ορίων ποιότητας [26].
9. Μικρό μέγεθος κόμβων: Το μέγεθος των κόμβων παίζει καθοριστικό ρόλο στις δυνατότητες του WSN. Οι μικροί κόμβοι είναι κατασκευάσιμοι με μικρό κόστος και μπορούν πολύ εύκολα να τοποθετηθούν με μεγάλη πυκνότητα κοντά στο φαινόμενο που θέλουμε να μελετηθεί. Επιπλέον, οι μικροί κόμβοι έχουν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, άρα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν θέλουμε να τους τοποθετήσουμε σε δύσβατο ή εχθρικό περιβάλλον, όπου η επιβίωσή τους είναι βασική επιδίωξη.
10. Χαμηλό κόστος κόμβων: Το κόστος των κόμβων είναι σημαντικός παράγοντας, καθώς για κάθε εφαρμογή χρειάζονται από δεκάδες μέχρι χιλιάδες κόμβων. Επομένως, για την ελαχιστοποίηση του κόστους του WSN πρέπει να διατηρούμε το κόστος ανά κόμβο χαμηλό.

1.6.2 Απαιτούμενοι μηχανισμοί των WSNs

Για να είμαστε σε θέση να καλύψουμε τα παραπάνω χαρακτηριστικά των WSNs, πρέπει να δημιουργηθούν καινοτόμοι μηχανισμοί για την επικοινωνία των δικτύων, καθώς και νέες αρχιτεκτονικές και πρωτόκολλα. Η πρόκληση εδώ είναι να βρεθούν οι μηχανισμοί εκείνοι που θα ανταποκρίνονται στην ιδιοσυγκρασία της εφαρμογής πληρώντας τις απαιτήσεις της για χρόνο ζωής, ποιότητα υπηρεσίας και άλλα [17]. Ταυτόχρονα, όμως, θα πρέπει αυτοί οι μηχανισμοί να μπορούν να γενικευτούν και να εφαρμοστούν σε ποικιλία εφαρμογών για να μην είναι απαραίτητη η εξ' αρχής ανάπτυξη και υλοποίηση ενός WSN για κάθε

εφαρμογή. Το γεγονός αυτό θα καθιστούσε τα WSN οικονομικά ασύμφωρα. Ορισμένοι από τους μηχανισμούς που αποτελούν βασικό τμήμα των WSNs είναι:

1. Μultihop ασύρματη επικοινωνία: Παρότι η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων αποτελεί τον πυρήνα της επικοινωνίας, η άμεση επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη έχει κάποιους περιορισμούς. Πιο συγκεκριμένα, η επικοινωνία μεταξύ μακρινών κόμβων μπορεί να επιτευχθεί με χρήση απαγορευτικά υψηλής ισχύος εκπομπής. Η χρήση ενδιάμεσων κόμβων ως αναμεταδότες συνεισφέρει στην μείωση της συνολικής απαιτούμενης ισχύος. Άρα, οι κόμβοι προκειμένου να εξοικονομήσουν ενέργεια χρησιμοποιούν τη multihop ασύρματη επικοινωνία.
2. Ενεργειακά αποτελεσματική λειτουργία: Προκειμένου να εξασφαλίσουμε την μεγάλη διάρκεια ζωής του δικτύου, απαραίτητη είναι η ενεργειακά αποτελεσματική λειτουργία του. Ορισμένες επιλογές προς αυτή την κατεύθυνση είναι η ενεργειακά αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ των κόμβων και ο ενεργειακά αποτελεσματικός καθορισμός των πληροφοριών που ζητούνται. Επίσης, ένα θέμα αποτελεί η μη ομοιόμορφη κατανάλωση ενέργειας, δηλαδή η δημιουργία hotspots.
3. Αυτο-οργάνωση: Κάθε WSN πρέπει να διαμορφώνει μόνο του τις περισσότερες παραμέτρους λειτουργίας του, αφού αυτό επιτάσσει ο μεγάλος αριθμός των κόμβων και ο απλοποιημένος τρόπος τοποθέτησής τους. Για παράδειγμα, οι κόμβοι θα πρέπει να μπορούν να αποφανθούν για την γεωγραφική τους θέση χρησιμοποιώντας τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Επίσης, το δίκτυο θα πρέπει να ανέχεται κόμβους που καταστρέφονται και να ενσωματώνει νέους κόμβους.
4. Συνεργασία και επεξεργασία δεδομένων: Σε μερικές εφαρμογές ένας κόμβος δεν μπορεί να αποφανθεί σχετικά με το αν συνέβη κάποιο γεγονός, αλλά πολλοί κόμβοι πρέπει να συνεργαστούν για να το εντοπίσουν και μόνο το σύνολο των δεδομένων τους προσφέρει αξιοποιήσιμες πληροφορίες. Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται εντός του δικτύου αντί όλοι οι κόμβοι να στέλνουν τα δεδομένα τους σε ένα εξωτερικό δίκτυο που τα επεξεργάζεται. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μέτρηση της υψηλότερης ή μέσης θερμοκρασίας μίας περιοχής και η ενημέρωση της καταβόθρας για την τιμή. Για να υλοποιηθεί αυτό αποδοτικά, θα πρέπει τα δεδομένα να συναθροίζονται καθώς προωθούνται μέσα στο δίκτυο, ώστε να μειώνεται ο όγκος των δεδομένων προς αποστολή και κατ' επέκταση να βελτιώνεται η κατανάλωση ενέργειας. Ο τρόπος συνάθροισης των δεδομένων αποτελεί ένα προς διερεύνηση ερώτημα.

5. Δεδομενοκεντρική λειτουργία: Τα παραδοσιακά δίκτυα επικεντρώνονται στην μεταφορά δεδομένων μεταξύ δύο συγκεκριμένων συσκευών, κάθε μια από τις οποίες διαθέτει τουλάχιστον μια διεύθυνση δικτύου. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας είναι διευθυνσιοκεντρικός. Σε ένα WSN, όπου έχουμε πλεονάζοντες κόμβους για προστασία απέναντι στους κόμβους που ακρηστεύονται και αντιστάθμιση της χαμηλής ποιότητας αυτών που υπολειτουργούν, η ταυτότητα ενός μεμονωμένου κόμβου που παρέχει δεδομένα μας είναι άχρηστη. Αντιθέτως, σημασία έχουν τα ίδια τα δεδομένα και όχι οι συγκεκριμένοι κόμβοι από τους οποίους προήλθαν. Γι' αυτό η δεδομενοκεντρική αρχιτεκτονική είναι πολλά υποσχόμενη σε σύγκριση με την διευθυνσιοκεντρική. Ένα παράδειγμα τέτοιας αρχιτεκτονικής είναι το αίτημα της μέσης θερμοκρασίας μιας συγκεκριμένης περιοχής αντί να ζητήσουμε τις θερμοκρασίες που μέτρησαν όλοι οι κόμβοι ξεχωριστά. Η δεδομενοκεντρική αρχιτεκτονική συνδυάζεται με την συνεργασία των κόμβων, την τοπική επεξεργασία και συνάθροιση των δεδομένων.
6. Αρχή της τοπικότητας: Οι κόμβοι, οι οποίοι διαθέτουν περιορισμένα αποθέματα μνήμης, πρέπει να περιορίσουν το βαθμό συγκέντρωσης δεδομένων κατά την διάρκεια της επεξεργασίας μόνο στους άμεσους γείτονές τους. Έτσι, ευελπιστούμε ότι θα είναι δυνατή η κλιμάκωση του δικτύου, χωρίς να στηριζόμαστε σε κόμβους με μεγάλη επεξεργαστική ισχύ.
7. Αξιοποίηση των trade-offs: Όπως με την αρχή της τοπικότητας, τα WSNs πρέπει να βασιστούν σε μεγάλο βαθμό στην αξιοποίηση των διάφορων εγγενών trade-offs μεταξύ αντιφατικών στόχων, τόσο κατά τον σχεδιασμό του συστήματος και των πρωτοκόλλων, όσο και κατά την λειτουργία τους. Ένα παράδειγμα τέτοιου trade-off είναι η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας που επιτρέπει ακριβέστερα αποτελέσματα, αλλά ταυτόχρονα μειώνει τον χρόνο ζωής του δικτύου.

Η τροποποίηση αυτών των μηχανισμών ώστε να είναι απλοί στην χρήση και ταυτόχρονα αρκούντως γενικευμένοι, είναι μια μεγάλη πρόκληση για κάθε προγραμματιστή.

1.7 Τεχνολογίες που καθιστούν δυνατή την ανάπτυξη των WSNs

Όπως είναι αναμενόμενο, οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν παίξει εξέχοντα ρόλο στην υλοποίηση, την εξέλιξη και την λειτουργία των κόμβων αισθητήρων και των WSNs. Τρεις είναι οι βασικοί τεχνολογικοί τομείς που καθιστούν δυνατή την ύπαρξη των WSNs: η τεχνολογία υλικού (hardware), η ασύρματη δικτύωση (wireless networking) και η συνεργατική επεξεργασία σήματος (collaborative signal processing).

1.7.1 Τεχνολογία υλικού

Από άποψη υλικού υπάρχουν τρεις βασικές τεχνολογίες, οι οποίες συνδυάζονται με εξελιγμένες τεχνικές πακεταρίσματος:

1. Η System-on-Chip (SoC) τεχνολογία, η οποία καθιστά δυνατό το πακετάρισμα όλων των στοιχείων ενός κυκλώματος σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα και πραγματώνει με αυτό τον τρόπο το μικρό μέγεθος του κόμβου αισθητήρα.
2. Τα εμπορικά RF κυκλώματα που υλοποιούν την ασύρματη επικοινωνία σε κοντινές αποστάσεις με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Έτσι, συμβάλλουν στην αύξηση της ζωής του κόμβου αισθητήρα.
3. Η τεχνολογία μικρο-ηλεκτρομηχανικών συστημάτων (τεχνολογία MEMS) με την οποία κατασκευάζονται μικρού μεγέθους μηχανικά εξαρτήματα με ηλεκτρική οδήγηση. Η σημαντική συνεισφορά αυτής της τεχνολογίας είναι η δυνατότητα να πακετάρουμε ομάδες αισθητήρων πάνω στην ίδια CMOS πλακέτα. Αυτό είναι σημαντικό διότι μπορούμε να κατασκευάσουμε κόμβους αισθητήρων, οι οποίοι μπορούν να παρατηρούν ταυτόχρονα διάφορα φαινόμενα.

1.7.2 Ασύρματη δικτύωση

Εκτός από το hardware, η ανάπτυξη των WSNs βασίζεται στην ανάπτυξη των τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης.

Το 1997 προτάθηκε το πρωτόκολλο IEEE 802.11, το πρώτο πρότυπο για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs). Αργότερα αναβαθμίστηκε στο IEEE 802.11b με αυξημένο ρυθμό δεδομένων και μηχανισμούς CSMA/CA για MAC. Παρότι τα πρωτόκολλα IEEE 802.11 ήταν σχεδιασμένα για WLANs που αποτελούνταν από PDAs και φορητούς υπολογιστές, χρησιμοποιούνταν στις πρώτες προσπάθειες δημιουργίας WSNs. Όμως, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας και ο υψηλός ρυθμός δεδομένων δεν ταίριαζαν στις ανάγκες των WSNs. Αυτό παρακίνησε πολλές ερευνητικές προσπάθειες για την δημιουργία ενεργειακά αποδοτικών MAC πρωτοκόλλων. Ένα από αυτά που δημιουργήθηκαν είναι το IEEE 802.15.4, το οποίο είναι σχεδιασμένο ειδικά για μικρής εμβέλειας και χαμηλού ρυθμού δεδομένων ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPANs). Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών του, το IEEE 802.15.4 υιοθετήθηκε από πολλούς εμπορικούς κόμβους αισθητήρων.

Πέρα από το φυσικό και MAC υπόστρωμα, μια ακόμα σημαντική κατεύθυνση έρευνας είναι οι τεχνικές δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα. Μερικές τεχνικές δρομολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν στα πρώτα WSNs χρησιμοποιούνταν σε ασύρματα ad hoc δίκτυα και σε ασύρματες κινητές επικοινωνίες. Αυτά τα πρωτόκολλα,

συμπεριλαμβανομένων και των DSR (Dynamic Source Routing) και AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), δεν είναι αποτελεσματικά στα WSNs λόγω του ότι δεν εκμεταλλεύονται ορισμένα συγκεκριμένα σχήματα επικοινωνίας που εμφανίζονται στις εφαρμογές και της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας. Η κύρια κατεύθυνση της έρευνας είναι η τροποποίηση των παραπάνω πρωτοκόλλων για εφαρμογή στα δίκτυα αισθητήρων και η ανάπτυξη νέων εύρωστων και ενεργειακά αποδοτικών τεχνικών δρομολόγησης.

1.7.3 Συνεργατική επεξεργασία σήματος

Οι τεχνικές συνεργατικής επεξεργασίας σήματος είναι ακόμα μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα WSNs.

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, οι κόμβοι αισθητήρων συλλέγουν μεγάλους όγκους δεδομένων, κάποιο ποσοστό των οποίων αποτελεί ωφέλιμη πληροφορία για την εφαρμογή που υλοποιείται. Επειδή η επεξεργασία των δεδομένων καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, είναι πιο συμφέρουσα η τοπική επεξεργασία των συλλεγμένων δεδομένων και η αποστολή μόνο των επεξεργασμένων δεδομένων. Συχνά όμως χρειάζεται αυτή η επεξεργασία των δεδομένων να γίνεται από ένα σύνολο γειτονικών κόμβων (δηλαδή συνεργατική επεξεργασία σήματος), λόγω της αδυναμίας στην αίσθηση των αισθητήρων και των περιορισμένων επεξεργαστικών δυνατοτήτων των κόμβων.

Σε ότι αφορά την συνεργατική επεξεργασία σήματος, σημαντικό θέμα αποτελεί η συγχώνευση των δεδομένων (data fusion). Τα δεδομένα που συλλέγουν οι κόμβοι επηρεάζονται σημαντικά από τον θόρυβο και τις παρεμβολές του περιβάλλοντος, καθώς και από τις διακυμάνσεις που παρουσιάζει το φαινόμενο που παρατηρούν. Η συγχώνευση δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επεξεργαστούμε τα δεδομένα μιας ομάδας κόμβων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επιρροή του θορύβου και να έχουμε πιο ακριβή συμπεράσματα από τα δεδομένα. Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές προς αυτή την κατεύθυνση είναι τα φίλτρα Kalman, τα νευρωνικά δίκτυα, η ασαφής λογική και η συμπερασματολογία κατά Bayes.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 1

- [1] J. Agre, L. Clare, “An integrated architecture for cooperative sensing networks”, IEEE Computer Magazine, May 2000.
- [2] I.F. Akyildiz, W. Su, “A power aware enhanced routing (PAER) protocol for sensor networks”, Georgia Tech Technical Report, January 2002, submitted for publication.
- [3] I.F.Akyildiz, W. Su, Y. Sankasubramaniam, E. Cayirci, “Wireless Sensor Networks: A Survey”, Computer Networks, 2002.
- [4] G. Asada, M. Dong, T.S. Lin, F. Newberg, G. Pottie, W.J. Kaiser, “Wireless Integrated NetworkSensors: Low Power Systems on a chip”, Proceedings of the 1998 European Solid State Circuits Conference, The Hague, Netherlands, 1998.
- [5] P.G.M. Baltus, R. Dekker, “Optimizing RF Front Ends for Low Power”, Proceedings of the IEEE, 2000.
- [6] P. Bauer, M. Sichertiu, R. Istepanian, K. Premaratne, “The mobile patient: wireless distributed sensor networks for patient monitoring and care”, Proceedings 2000 IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine, 2000.
- [7] M. Bhardwaj, T. Garnett, A.P. Chandrakasan, “Upper bounds on the lifetime of sensor networks”, IEEE International Conference on Communications ICC’01, Helsinki, Finland, June 2001.
- [8] B.G. Celler et al., “An instrumentation system for the remote monitoring of changes in functional health status of the elderly”, International Conference IEEE-EMBS, New York, 1994.
- [9] A. Cerpa, J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, J. Zhao, “Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology”, ACM SIGCOMM’2000, Costa Rica, April 2001.
- [10] K. Chakrabarty, S.S. Iyengar, H. Qi, E. Cho, “Coding Theory Framework for Target Location in Distributed Sensor Networks”, In Proceedings of the International Symposium on Information Technology: Coding and Computing, Las Vegas, NV, 2001.
- [11] K. Chakrabarty, S.S. Iyengar, H. Qi, E. Cho, “Grid Coverage for Surveillance and Target Location in Distributed Sensor Networks”, IEEE Transactions on Computers, 2002.
- [12] A. Chandrakasan, R. Amirtharajah, S. Cho, J. Goodman, G. Konduri, J. Kulik, W. Rabiner, A. Wang, “Design considerations for distributed micro-sensor systems”, Proceedings of the IEEE 1999 Custom Integrated Circuits Conference, San Diego, CA, May 1999.
- [13] C.F. Chiasserini, R.R. Rao, “Energy Efficient Battery Management”, Proceedings of the IEEE INFOCOM, Tel-Aviv, Israel, March 2000.
- [14] S. Cho, A. Chandrakasan, “Energy-efficient protocols for low duty cycle wireless microsensor”, Proceedings of the 33rd

- Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui.
- [15] I.A. Essa, "Ubiquitous sensing for smart and aware environments", IEEE Personal Communications, October 2000.
 - [16] D. Estrin, L. Girod, G. Pottie, M. Srivastava, "Instrumenting the world with wireless sensor networks", International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Salt Lake City, Utah, May 2001.
 - [17] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, S. Kumar, "Next century challenges: scalable coordination in sensor networks", ACM MobiCom'99, Washington, USA, 1999.
 - [18] K. Govil, E. Chan, H. Wasserman, "Comparing algorithms for dynamic speed-setting of a low-power CPU", Proceedings of ACM MobiCom'95, Berkeley, CA, November 1995.
 - [19] J. Heidemann, F. Silva, C. Intanagonwiwat, "Building efficient wireless sensor networks with low-level naming", Proceedings of the Symposium on Operating Systems Principles, Banff, Canada, 2001.
 - [20] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor Networks", IEEE Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, January 2000.
 - [21] W.R. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan, "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks", Proceedings of the ACM MobiCom'99, Seattle, Washington, 1999.
 - [22] C. Herring, S. Kaplan, "Component-based software systems for smart environments", IEEE Personal Communications, October 2000.
 - [23] H. Karl, A. Willig, "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks", John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2005.
 - [24] J.M. Kahn, R.H. Katz, K.S.J. Pister, "Next Century Challenges: Mobile Networking for "Smart Dust"", Proceedings of ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom 99, Seattle, WA, August 1999.
 - [25] L.E. Larson, "Radio Frequency Integrated Circuit Technology for Low-Power Wireless Communications", IEEE Personal Communications, 1998.
 - [26] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson, "Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring", Proceedings of the 1st ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Atlanta, GA, September 2002.
 - [27] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, M.B. Srivastava, "Energy-Aware Wireless Microsensor Networks", IEEE Signal Processing Magazine, 2002.
 - [28] S. Roundy, "Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks", Kluwer Academic Publishers, 2003.

- [29] Y. Yu, V.K. Prasanna, B. Krishnamachari, "Information processing and routing in Wireless Sensor Networks", World Scientific, 2006.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΚΟΜΒΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Όπως προκύπτει από το προηγούμενο κεφάλαιο, τα ενεργειακά αποθέματα ενός κόμβου αισθητήρα είναι πολύτιμα. Οι μπαταρίες έχουν μικρή χωρητικότητα και η επαναφόρτισή τους μέσω τεχνικών συλλογής ενέργειας είναι δύσκολη. Επομένως, η κατανάλωση ενέργειας του κόμβου πρέπει να ελέγχεται στενά. Τα εξαρτήματα που καταναλώνουν την περισσότερη ενέργεια είναι ο μικροελεγκτής, το μπροστινό RF άκρο του πομποδέκτη και σε μικρότερο βαθμό η μνήμη και ορισμένοι τύποι αισθητήρων.

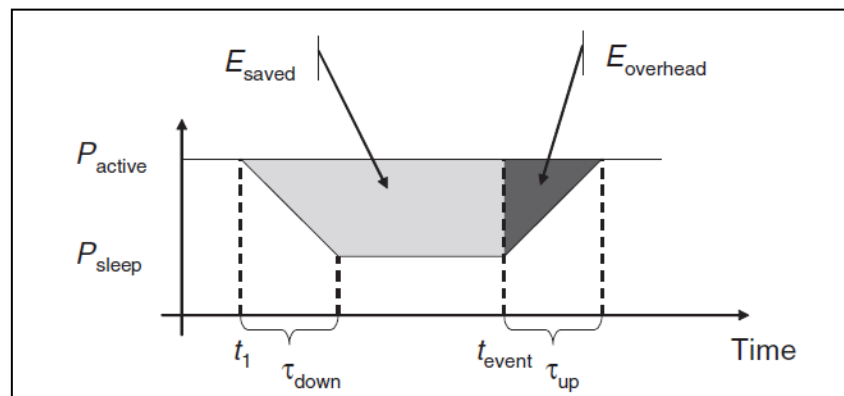
Μια σημαντική συνεισφορά στην μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας προέρχεται από τις χαμηλότερου επιπέδου τεχνολογίες, όπως είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα χαμηλής κατανάλωσης. Παρόλα αυτά, ο σχεδιασμός του υλικού δεν μπορεί να αποφέρει σημαντικά αποτελέσματα αν δε συνδυαστεί με την αποδοτική λειτουργία των εξαρτημάτων του κόμβου.

Για την αποδοτική λειτουργία ενός κόμβου εκμεταλλευόμαστε το γεγονός ότι δεν έχει να εκτελέσει κάποια εργασία την περισσότερη ώρα, οπότε συμφέρει να είναι απενεργοποιημένος. Επειδή όμως πρέπει να ενεργοποιείται ξανά είτε λαμβάνοντας κάποιο εξωτερικό ερέθισμα, είτε ανά τακτά χρονικά διαστήματα, δεν είναι δυνατό να απενεργοποιείται εντελώς, αλλά υιοθετεί διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας ανάλογα με τις εργασίες που έχει να εκτελέσει. Η ύπαρξη και χρήση διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας με αντάλλαγμα την μειωμένη λειτουργικότητα του κόμβου είναι η λύση για ενεργειακά αποδοτικούς ασύρματους κόμβους αισθητήρων. Άλλωστε, αυτή η τεχνική είναι ήδη γνωστή από τους προσωπικούς υπολογιστές, όπου έχουμε καταστάσεις αναμονής και ύπνου.

Παρότι ένα μοντέλο με καταστάσεις λειτουργίας διαβαθμισμένες ως προς την βαθύτητα του ύπνου είναι αρκετά ξεκάθαρο και απλό, η μετάβαση από τη μια κατάσταση στην άλλη απαιτεί ενέργεια και χρόνο, γεγονός που περιπλέκει το μοντέλο. Σαν γενικός κανόνας ισχύει ότι όσο πιο βαθύς είναι ο ύπνος, τόσο περισσότερη ενέργεια και χρόνο χρειάζεται ο κόμβος για να επανέλθει σε πλήρη λειτουργία (active mode) ή να μεταβεί σε κάποια κατάσταση ελαφρύτερου ύπνου. Γι' αυτό πολλές φορές ίσως είναι προτιμότερο από άποψη αποδοτικότητας να παραμένει ο κόμβος σε κατάσταση ελαφρύ ύπνου (idle mode) για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, παρά να μεταβαίνει σε βαθύτερο ύπνο (sleep mode).

Η διαφορά στην κατανάλωση ενέργειας λόγω των διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας φαίνεται από το διάγραμμα στο Σχήμα 2.1 ([13], [23]). Ας υποθέσουμε ότι ένα εξάρτημα καταναλώνει ισχύ P_{active} όταν βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας και P_{sleep} όταν βρίσκεται σε κατάσταση ύπνου. Έστω επίσης ότι την χρονική στιγμή t_1 λαμβάνεται η

απόφαση να μεταβεί το εξάρτημα σε κατάσταση ύπνου για να μειώσει την κατανάλωσή του και τελικά μετά από χρόνο τ_{down} εισέρχεται σε κατάσταση ύπνου. Αντιστοίχως, την χρονική στιγμή t_{event} συμβαίνει κάποιο γεγονός που απαιτεί την επαναφορά του εξαρτήματος σε κατάσταση λειτουργίας, η οποία επιτυγχάνεται μετά από χρονικό διάστημα τ_{up} . Αν το εξάρτημα ήταν μονίμως ενεργοποιημένο, μέχρι να συμβεί το γεγονός θα κατανάλωνε ισχύ P_{active} από την χρονική στιγμή t_1 μέχρι την t_{event} , δηλαδή $E_{active} = P_{active}(t_{event} - t_1)$. Αν θεωρήσουμε ότι κατά την χρονική διάρκεια της μετάβασης από τη μία κατάσταση στην άλλη έχουμε μέση κατανάλωση ισχύος $(P_{active} + P_{sleep})/2$, τότε η ενέργεια που καταναλώνεται συνολικά είναι $E_{states} = P_{sleep}(t_{event} - t_1 - \tau_{down}) + \tau_{down}(P_{active} + P_{sleep})/2$. Τελικά, η ενέργεια που εξοικονομείται είναι $E_{saved} = E_{active} - E_{states}$. Βέβαια, καταναλώνεται και μία επιπλέον ποσότητα ενέργειας για την επαναφορά του εξαρτήματος σε κατάσταση λειτουργίας, η οποία ισούται με $E_{overhead} = \tau_{up}(P_{active} + P_{sleep})/2$. Προφανώς, για να είναι συμφέρουσα η χρήση διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας θα πρέπει να ισχύει $E_{saved} > E_{overhead}$.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα εξοικονόμησης ενέργειας με δύο καταστάσεις λειτουργίας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι καταναλώσεις των ενεργειακά απαιτητικότερων εξαρτημάτων ενός κόμβου αισθητήρα.

2.2 Κατανάλωση ενέργειας μικροελεγκτή

Οι ενσωματωμένοι ελεγκτές συνήθως εφαρμόζουν την λογική των πολλαπλών καταστάσεων λειτουργίας όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Για παράδειγμα, ο μικροεπεξεργαστής Intel StrongARM διαθέτει τρεις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Στην κανονική κατάσταση λειτουργίας (normal mode) όλα τα εξαρτήματά του τροφοδοτούνται πλήρως και η κατανάλωση ισχύος φτάνει μέχρι τα 400 mW. Στην αδρανή κατάσταση λειτουργίας (idle mode) σταματάει τα ρολόι της CPU και διατηρούνται ενεργά μόνο τα ρολόγια που συνδέονται με περιφερειακές συσκευές. Η κατανάλωση ισχύος σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας φτάνει μέχρι τα 100 mW και με οποιοδήποτε ερέθισμα ο μικροεπεξεργαστής επανέρχεται σε κανονική κατάσταση λειτουργίας. Τέλος, ο μικροεπεξεργαστής διαθέτει την κατάσταση ύπνου (sleep mode), όπου μόνο το ρολόι πραγματικού χρόνου παραμένει ενεργό. Για να επανέλθει στην κανονική κατάσταση λειτουργίας χρησιμοποιείται χρονόμετρο και η μετάβαση μπορεί να διαρκέσει έως και 160 ms, ενώ η κατανάλωση ισχύος μέχρι τα 50 μ W.

Μια πιο εξεζητημένη υλοποίηση σε σύγκριση με τις διακριτές καταστάσεις λειτουργίας είναι η συνεχής προσαρμογή της ισχύος που καταναλώνεται, μέσω της προσαρμογής της ταχύτητας λειτουργίας του μικροελεγκτή. Η κεντρική ιδέα βασίζεται στην επιλογή της βέλτιστης ταχύτητας λειτουργίας του μικροελεγκτή με την οποία πρέπει να υλοποιηθεί μια εργασία μέσα σε δοσμένο χρονικό πλαίσιο. Μια προφανής λύση είναι να λειτουργήσει με την μέγιστη δυνατή ταχύτητα για να ολοκληρώσει το συντομότερο δυνατό την εργασία και μετά να εισέλθει σε κατάσταση ύπνου. Μια εναλλακτική λύση είναι να εκτελέσει την εργασία με τέτοια ταχύτητα ώστε να την ολοκληρώσει ακριβώς πριν λήξει το χρονικό της περιθώριο. Η λογική πίσω από αυτή την τεχνική είναι ότι ένας ελεγκτής που λειτουργεί με χαμηλότερη ταχύτητα καταναλώνει μικρότερα ποσά ενέργειας από έναν που λειτουργεί με την μέγιστη, με δεδομένο πάντα την ορθή του λειτουργία. Αυτή η τεχνική ονομάζεται δυναμική ρύθμιση τάσης (Dynamic Voltage Scaling, DVS) [4].

Όταν εφαρμόζεται η τεχνική DVS πρέπει να δίνεται προσοχή στην εντός προδιαγραφών λειτουργία του ελεγκτή, αφού υπάρχουν άνω και κάτω όρια που πρέπει να τηρούνται σε ό,τι αφορά τον χρονισμό του. Τέλος, όταν δεν υπάρχουν δεδομένα προς επεξεργασία, η μόνη λύση είναι η μετάβαση σε κατάσταση ύπνου.

2.3 Κατανάλωση ενέργειας μνήμης

Όταν αναφερόμαστε στην κατανάλωση ενέργειας της μνήμης, δύο είναι οι βασικοί τύποι μνήμης που εννοούμε την ενσωματωμένη μνήμη του μικροελεγκτή και την flash μνήμη. Η απαιτούμενη ισχύς για την οδήγηση της ενσωματωμένης μνήμης συμπεριλαμβάνεται συνήθως στα αντίστοιχα στοιχεία του μικροελεγκτή, οπότε θα επικεντρωθούμε στην flash μνήμη.

Ο τρόπος κατασκευής και χρήσης της flash μνήμης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής του κόμβου αισθητήρα. Οι σχετικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι ο χρόνος ανάγνωσης και εγγραφής, καθώς και η κατανάλωση ενέργειας αυτών των διαδικασιών. Όλα αυτά τα στοιχεία είναι διαθέσιμα από τον κατασκευαστή της μνήμης και ποικίλλουν, καθώς εξαρτώνται από αρκετούς παράγοντες. Οι χρόνοι ανάγνωσης, αλλά και η ενέργεια που απαιτείται για την ανάγνωση, κινούνται στα ίδια επίπεδα στους διάφορους τύπους flash μνήμης. Αντιθέτως, η διαδικασία εγγραφής στη μνήμη είναι πιο περίπλοκη, αφού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα των δεδομένων που προσπελαύνουμε κάθε φορά. Για παράδειγμα, η flash μνήμη που χρησιμοποιείται στους κόμβους Mica [12] καταναλώνει για ανάγνωση δεδομένων 1,111 nAh, ενώ για εγγραφή 83,333 nAh.

Όπως είναι εμφανές, η εγγραφή στη flash μνήμη είναι μια χρονοβόρα και ενεργειακά απαιτητική διαδικασία, η οποία πρέπει να περιορίζεται όσο το δυνατό περισσότερο.

2.4 Κατανάλωση ενέργειας πομποδέκτη

Ο πομποδέκτης ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρα έχει δύο λειτουργίες: την αποστολή και λήψη δεδομένων μεταξύ ενός ζεύγους κόμβων. Όπως ο μικροελεγκτής, έτσι και ο πομποδέκτης μπορεί να διαθέτει διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας, οι πιο απλές από τις οποίες είναι να είναι ενεργοποιημένος ή απενεργοποιημένος. Προκειμένου ο πομποδέκτης να είναι αποδοτικός πρέπει να είναι απενεργοποιημένος την περισσότερη ώρα και να ενεργοποιείται μόνο όταν χρειάζεται να εκτελέσει κάποια εργασία. Αυτό εισάγει μια επιπλέον πολυπλοκότητα λόγω του χρόνου και της ενέργειας που χρειάζεται ο πομποδέκτης για να μεταβεί από τη μια κατάσταση στην άλλη.

Για να κατανοήσουμε την κατανάλωση ενέργειας του πομποδέκτη και την επίδρασή της στον σχεδιασμό των πρωτοκόλλων, κρίνεται απαραίτητη η μοντελοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας τόσο για την εκπομπή, όσο και για τη λήψη. Έχουν αναπτυχθεί αρκετά τέτοια μοντέλα με διάφορα επίπεδα ακρίβειας και λεπτομέρειας ([1],[20],[24]).

2.4.1 Μοντελοποίηση κατανάλωσης ενέργειας κατά την εκπομπή

Θεωρητικά η ενέργεια που καταναλώνεται από ένα πομπό οφείλεται σε δύο αίτια: πρώτον στη δημιουργία του RF σήματος και δεύτερον στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που είναι υπεύθυνα για σύνθεση και μετατροπή συχνότητας (frequency synthesis and conversion), φίλτρα και άλλα. Πιο συγκεκριμένα, η δημιουργία του RF σήματος σχετίζεται άμεσα με τη χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση και την απόσταση πομπού – δέκτη, άρα και με την ισχύ εκπομπής P_{tx} .

Μια από τις πιο κρίσιμες επιλογές είναι αυτή της ισχύος εκπομπής P_{tx} . Η ισχύς εκπομπής παράγεται από τον ενισχυτή του πομπού, του οποίου η κατανάλωση ισχύος P_{amp} εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του και την ισχύ P_{tx} που παράγει. Στα πιο απλά μοντέλα αυτές οι δύο τιμές είναι ανάλογες μεταξύ τους, ενώ ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο θεωρεί ένα επιπλέον σταθερό ποσό ισχύος ανεξάρτητα από την ακτινοβολούμενη ισχύ. Δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$P_{amp} = a_{amp} + \beta_{amp} P_{tx} \quad (2.1)$$

όπου τα a_{amp} και β_{amp} είναι σταθερές εξαρτώμενες από την τεχνολογία επεξεργασίας και την αρχιτεκτονική του ενισχυτή.

Η αποδοτικότητα του ενισχυτή ισχύος ορίζεται ως $\eta_{amp} = P_{tx}/P_{amp}$, οπότε η μέγιστη αποδοτικότητα προκύπτει για μέγιστη ισχύ εξόδου. Παρόλα αυτά, η μέγιστη ισχύς δεν χρησιμοποιείται πάντα, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στα κυψελωτά συστήματα, και γι' αυτό το παραπάνω σχήμα μπορεί να μην είναι το πιο αποδοτικό.

Επιπρόσθετα του ενισχυτή, θα πρέπει να τροφοδοτηθούν και άλλα ηλεκτρονικά κυκλώματα κατά τη διάρκεια της εκπομπής, όπως για παράδειγμα ο επεξεργαστής βασικής ζώνης. Η συνολική ισχύς που καταναλώνεται σε αυτά τα κυκλώματα αναφέρεται ως P_{txElec} .

Η ενέργεια που απαιτείται για την εκπομπή ενός πακέτου μήκους n bits έχει εξάρτηση από τον χρόνο που κάνει το πακέτο για να σταλεί, ο οποίος καθορίζεται από τον ονομαστικό ρυθμό bit R και τον ρυθμό κωδικοποίησης R_{code} , και από την συνολική ισχύ που καταναλώνεται στην εκπομπή. Επιπλέον, αν ο πομπός πρέπει να ενεργοποιηθεί πριν την εκπομπή, προκύπτουν κόστη εκκίνησης. Όλα τα παραπάνω αντικατοπτρίζονται στην εξίσωση (2.2):

$$E_{tx}(n, R_{code}, P_{amp}) = t_{start} P_{start} + \frac{n}{R_{code} R} (P_{txElec} + P_{amp}) \quad (2.2)$$

Πρέπει να τονιστεί ότι στην παραπάνω εξίσωση δεν λαμβάνεται υπόψη η χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση. Παρότι οι μετρήσεις έχουν αποδείξει ότι υπάρχει εξάρτηση από τη διαμόρφωση που χρησιμοποιείται, η διαφορά είναι τόσο μικρή ώστε η παράβλεψή της να αποτελεί μια αποδεκτή απλοποίηση. Επίσης, έχει γίνει η υπόθεση ότι το κόστος κωδικοποίησης εξαρτάται μόνο από το ρυθμό κωδικοποίησης. Τέλος, παρατηρούμε ότι δε συμμετέχει η απόδοση της κεραίας, αφού θεωρούμε ότι δεν έχει απώλειες. Σε διαφορετική περίπτωση θα υπήρχαν επιπλέον απώλειες ισχύος μεταξύ της εξόδου του ενισχυτή και της ακτινοβολούμενης ισχύος.

2.4.2 Μοντελοποίηση κατανάλωσης ενέργειας κατά τη λήψη

Όπως συμβαίνει και με τον πομπό, ο δέκτης μπορεί να είναι είτε ενεργοποιημένος, είτε απενεργοποιημένος. Όσο είναι ενεργοποιημένος, ο δέκτης μπορεί είτε να λαμβάνει κάποιο πακέτο, είτε να είναι σε κατάσταση αναμονής, δηλαδή να παρατηρεί το κανάλι και να είναι έτοιμος να λάβει πακέτο. Προφανώς, η κατανάλωση ενέργειας του δέκτη όσο είναι απενεργοποιημένος είναι αμελητέα. Επίσης, η διαφορά στην κατανάλωση ανάμεσα στην λήψη και την κατάσταση αναμονής είναι τόσο μικρή που μπορεί να θεωρηθεί μηδενική.

Συνολικά, η ενέργεια E_{rx} που καταναλώνει ο δέκτης για τη λήψη ενός πακέτου n bits περιλαμβάνει την ενέργεια εκκίνησης (αν ο δέκτης ήταν απενεργοποιημένος) και μια ποσότητα ανάλογη του χρόνου του πακέτου. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της λήψης είναι αναγκαία η τροφοδότηση των κυκλωμάτων του δέκτη με μια σχετικά σταθερή ισχύ P_{rxElec} . Ο τελευταίος όρος αντιπροσωπεύει το κόστος αποκωδικοποίησης E_{dec} , το οποίο επιβαρύνει κάθε bit του πακέτου. Επομένως, η εξίσωση που συνοψίζει τα παραπάνω είναι:

$$E_{rx} = t_{start} P_{start} + \frac{n}{R_{code}R} P_{rxElec} + n E_{dec} \quad (2.3)$$

Η ενέργεια που δαπανάται για την αποκωδικοποίηση είναι σχετικά περίπλοκη στην μοντελοποίηση, καθώς σχετίζεται με αρκετούς παράγοντες υλικού και συστήματος. Για παράδειγμα έχει διαφορά αν η αποκωδικοποίηση πραγματοποιείται σε επιφορτισμένο με αυτή την εργασία υλικό ή με χρήση λογισμικού στον μικροελεγκτή. Επιπρόσθετα, εξαρτάται από την τάση τροφοδοσίας, τον χρόνο αποκωδικοποίησης ανά bit (ο οποίος επηρεάζεται με τη σειρά του από την ταχύτητα επεξεργασίας και κατ' επέκταση τη χρήση τεχνικών όπως DVS), το μήκος K του χρησιμοποιούμενου κώδικα και άλλες παραμέτρους.

2.4.3 Αριθμητικά στοιχεία

Λόγω του μεγάλου πλήθους εμπορικά διαθέσιμων πομποδεκτών είναι ιδιαίτερα δύσκολο να υπάρξουν συγκεκριμένοι αριθμοί για τα μεγέθη που αναφέρθηκαν παραπάνω. Υπάρχουν πομποδέκτες που μπορεί να παρουσιάζουν εξαιρετικά ενεργειακά χαρακτηριστικά, αλλά να υπολείπονται σε άλλες σημαντικές για την εφαρμογή παραμέτρους, όπως για παράδειγμα να παρουσιάζουν μειωμένη ευστάθεια συχνότητας σε διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας, χαμηλή ικανότητα μπλοκαρίσματος των παρεμβολών ή ευπάθεια στην παρεμβολή γειτονικών καναλιών. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται ορισμένες τιμές των παραμέτρων του πομποδέκτη για διαφορετικούς κόμβους ([16], [19]).

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΗ	ΤΥΠΟΣ ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΗ		
	μAMPS-1	WINS	MEDUSA-II
a_{amp}	174 mW	-	-
β_{amp}	5,0	8,9	7,43
P_{amp}	179 – 674 mW	-	-
P_{rxElec}	279 mW	368,3 mW	12,48 mW
P_{start}	58,7 mW	-	-
P_{txElec}	151 mW	386 mW	11,61 mW
R	1 Mbps	100 kbps	OOK 30 kbps ASK115,2 kbps
t_{start}	466 μ s	-	-

Σχήμα 2.2: Πίνακας χαρακτηριστικών πομποδέκτη

2.4.4 Δυναμική ρύθμιση της κατανάλωσης ενέργειας του πομποδέκτη

Η εφαρμογή των αρχών της τεχνικής DVS και στους πομποδέκτες είναι δελεαστική, αλλά ταυτόχρονα και περίπλοκη. Η μείωση της τάσης τροφοδοσίας ή της συχνότητας, ώστε να επιτευχθεί χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας με αντάλλαγμα μεγαλύτερη αδράνεια, μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο για ορισμένα ηλεκτρονικά εξαρτήματα του πομποδέκτη. Αυτό σημαίνει ότι τα υπόλοιπα κυκλώματα πρέπει να συνεχίσουν να λειτουργούν σε υψηλή ισχύ για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ένα παράδειγμα τέτοιου εξαρτήματος είναι ο ενισχυτής, ο οποίος δεν μπορεί να ελαττώσει την ισχύ P_{amp} που καταναλώνει, καθώς εξαρτάται άμεσα από την ακτινοβολούμενη ισχύ P_{tx} και κατ' επέκταση την απόσταση πομπού – δέκτη [19].

Παρόλα αυτά, αυτή η σχέση μεταξύ της τάσης τροφοδοσίας/συχνότητας και της απόδοσης που αξιοποιεί η τεχνική DVS δεν είναι η μοναδική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Άλλες πιθανές παράμετροι που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αντί της τάσης τροφοδοσίας/συχνότητας είναι η επιλογή της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης. Οι αντίστοιχες τεχνικές βελτιστοποίησης είναι η δυναμική ρύθμιση διαμόρφωσης (Dynamic Modulation Scaling, DMS), δυναμική ρύθμιση κωδικοποίησης (Dynamic Code Scaling, DCS) και δυναμική ρύθμιση διαμόρφωσης-κωδικοποίησης (Dynamic Modulation-Code Scaling, DMCS) ([14], [21], [22]).

Η κεντρική ιδέα στην οποία βασίζονται οι προσεγγίσεις των παραπάνω τεχνικών είναι η δυναμική υιοθέτηση σχήματος διαμόρφωσης ή/και κωδικοποίησης, καθώς και η επιλογή άλλων παραμέτρων του συστήματος με στόχο την μεγιστοποίηση μετρικών όπως η διέλευση και η ενεργειακή αποδοτικότητα. Επίσης, σε τέτοιες τεχνικές πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ανεκτή καθυστέρηση και η χρονομεταβλητότητα των ραδιοδιαύλων.

2.5 Σχέση μεταξύ επεξεργασίας και αποστολής δεδομένων

Με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί προηγουμένως, προκύπτει μια λογική απορία σχετικά με το ποιος είναι ο αποδοτικότερος τρόπος αξιοποίησης της περιορισμένης ενέργειας του κόμβου · η αποστολή δεδομένων ή η επεξεργασία τους.

Η κατανάλωση ενέργειας σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το χρησιμοποιούμενο υλικό. Συνήθως, η εκτέλεση μιας εντολής σε ένα μικροελεγκτή απαιτεί περίπου 1 nJ, το οποίο επαρκεί για να πάρουμε ένα δείγμα από τον πομποδέκτη. Ο λόγος της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την αποστολή ενός bit προς αυτή που απαιτείται για την εκτέλεση μιας εντολής κυμαίνεται σε ορισμένους κόμβους από 1500 ως 2700 και σε άλλους από 220 ως 2900.

Αγνοώντας τις λεπτομέρειες, καθίσταται σαφές ότι η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων είναι σημαντικά πιο απαιτητική σε ενέργεια από την επεξεργασία, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το ποσό ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας είναι αμελητέο. Η βασική επιδίωξη είναι η επένδυση στην επεξεργασία μέσα στο δίκτυο όποτε αυτό είναι δυνατό, για να μειωθούν τα κόστη επικοινωνίας, γεγονός που οδηγεί στην ιδέα της εντός δικτύου επεξεργασίας και της συνάθροισης των δεδομένων.

2.6 Κατανάλωση ενέργειας αισθητήρων/ενεργοποιητών

Η παροχή δεδομένων σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας των αισθητήρων και των ενεργοποιητών είναι δύσκολη, λόγω της ευρείας γκάμας των συσκευών αυτών. Για μερικούς από τους αισθητήρες, όπως οι αισθητήρες θερμοκρασίας, η κατανάλωση μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα συγκριτικά με τα υπόλοιπα εξαρτήματα του κόμβου. Από την άλλη μεριά, η κατανάλωση ενεργητικών αισθητήρων, όπως οι σόναρ, είναι σημαντική και πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη διαστασιοποίηση της μπαταρίας του κόμβου, ώστε να μην υπερφορτωθεί. Για να υπάρξουν χρήσιμες εκτιμήσεις σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας, θα πρέπει να μελετηθεί η προς υλοποίηση εφαρμογή καθώς και τα είδη των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν.

Σημαντικό ρόλο παίζει φυσικά και ο ρυθμός δειγματοληψίας του κόμβου, αφού όχι μόνο απαιτείται περισσότερη ενέργεια για συχνότερη δειγματοληψία, αλλά αυξάνεται και ο όγκος των δεδομένων προς επεξεργασία και αποστολή.

Μερικά παραδείγματα αισθητήρων με τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον πίνακα του Σχήματος 2.3 [12].

ΤΥΠΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ (Hz)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ (msec)	ΡΕΥΜΑ (mA)
Φωτοαντιστάτης	2000	10	1.235
Υγρασίας	500	500 - 3000	0.775
Θερμίστορ	2000	10	0.126
Βαρομετρικής πίεσης	10	500	0.01

Σχήμα 2.3: Πίνακας χαρακτηριστικών ορισμένων τύπων αισθητήρων

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2

- [1] L. Ahling, J. Zander, "Principles of Wireless Communication", Studentlitteratur, 1997.
- [2] L. Benini, G. De Micheli, "Dynamic Power Management Design Techniques and CAD Tools", Kluwer, 1997.
- [3] A. Chandrakasan, R. Amirtharajah, C. S. Cho, J. Goodman, "Design Considerations for Distributed Microsensor Systems", Custom Integrated Circuits Conference, San Diego, CA, 1999.
- [4] A. Chandrakasan, S. Sheng, R. Brodersen, "Low-Power CMOS Digital Design", IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1992.
- [5] A.P. Chandrakasan, R. Min, M. Bhardwaj, S.-H. Cho, A. Wang, "Power Aware Wireless Microsensor Systems", Proceedings of the ESSCIRC 2002, Florence, Italy, September 2002.
- [6] J.P. Ebert, B. Burns, A. Wolisz, "A Trace-Based Approach for Determining the Energy Consumption of a WLAN Network Interface", Proceedings of the European Wireless, Florence, Italy, February 2002.
- [7] L.M. Feeney, M. Nilsson, "Investigating the Energy Consumption of a Wireless Network Interface in an Ad Hoc Networking Environment", Proceedings of the IEEE INFOCOM 2001, Anchorage, Alaska, AK, April 2001.
- [8] J. Hill, D. Culler, "MICA: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks", IEEE Micro, 2002.
- [9] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. E. Culler, K. S. J. Pister, "System Architecture Directions for Networked Sensors", Proceedings of the 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, Cambridge, MA, 2000.
- [10] H. Karl, A. Willig, "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks", John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2005.
- [11] M. Kubisch, H. Karl, A. Wolisz, "Are Classes of Nodes with Different Power Amplifiers Good for Wireless Multi-hop Networks?", Proceedings of the Personal Wireless Communications, Venice, Italy, September 2003.
- [12] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson, "Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring", Proceedings of the 1st ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Atlanta, GA, September 2002.
- [13] R. Min, M. Bhardwaj, S.-H. Cho, E. Shih, A. Sinha, A. Wang, A. Chandrakasan, "Low-Power Wireless Sensor Networks", Proceedings of the 14th International Conference on VLSI Design, Bangalore, India, 2001.
- [14] R. Min, A. Chandrakasan, "A Framework for Energy-Scalable Communication in High-Density Wireless Networks", Proceedings of the 2002 International Symposium on Low Power Electronics and Design, ACM Press, 2002.

- [15] R. Min, A. Chandrakasan, "MobiCom Poster: Top Five Myths About the Energy Consumption of Wireless Communication", ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2003.
- [16] R. Min, A. Chandrakasan, "A Framework for Energy-Scalable Communication in High-Density Wireless Networks", Proceedings of ISLPED '02, Monterey, CA, 2002.
- [17] G.J. Pottie, W.J. Kaiser, "Embedding the Internet: Wireless Integrated Network Sensors", Communications of the ACM, 2000.
- [18] J. Pouwelse, K. Langendoen, H. Sips, "Dynamic Voltage Scaling on a Low-Power Microprocessor", Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, ACM Press, Rome, Italy, July 2001.
- [19] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, M. B. Srivastava, "Energy-Aware Wireless Microsensor Networks", IEEE Signal Processing Magazine, 2002.
- [20] T.S. Rappaport, "Wireless Communications – Principles and Practice", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.
- [21] C. Schurgers, V. Raghunathan, M.B. Srivastava, "Power Management for Energy-Aware Communication Systems", Transactions on Embedded Computing Systems, 2003.
- [22] C. Schurgers, O. Aberthorne, M.B. Srivastava, "Modulation Scaling for Energy Aware Communication Systems", Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design, Huntington Beach, CA, August 2001.
- [23] A. Sinha, A. Chandrakasan, "Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks", IEEE Design and Test of Computers, 2001.
- [24] A. Wang, S.H. Cho, C.G. Sodini, A.P. Chandrakasan, "Energy-Efficient Modulation and MAC for Asymmetric Microsensor Systems", Proceedings of ISLPED 2001, Huntington Beach, CA, August 2001.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

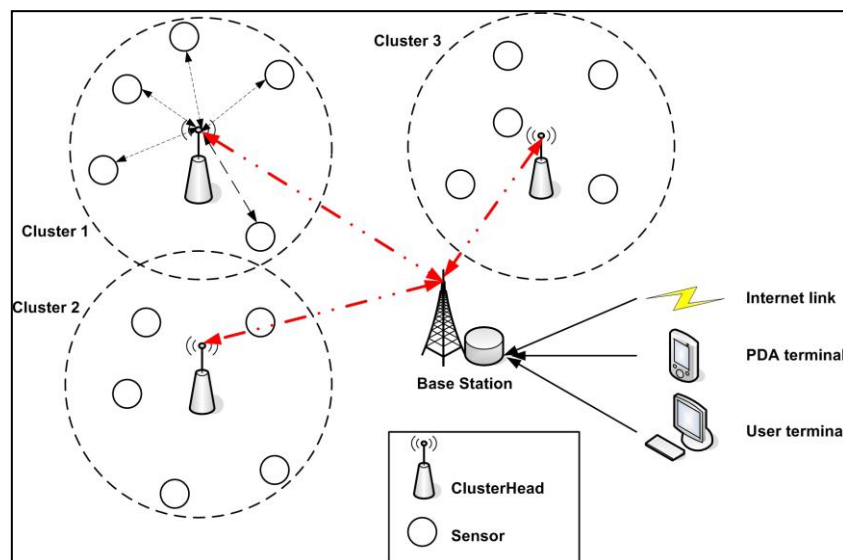
ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Όπως είναι εμφανές από τα προηγούμενα κεφάλαια, τα WSNs παρέχουν πληθώρα εφαρμογών σε διάφορους καινούργιους τομείς. Από τις στρατιωτικές εφαρμογές μέχρι τα έξυπνα σπίτια, οι εφαρμογές είναι αμέτρητες. Παρόλα αυτά, τα WSNs θέτουν πολλούς σχεδιαστικούς στόχους, που μέχρι πρόσφατα δε θεωρούνταν εφικτοί.

Λόγω του μεγάλου πλήθους κόμβων των WSNs, ένας αρκετά αποδοτικός τρόπος σχεδίασης που βοηθά στην κλιμάκωσή τους είναι η δημιουργία οργανωτικών δομών ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου αισθητήρων. Επειδή ένα από τα θεμελιώδη πλεονεκτήματα των WSNs είναι η δυνατότητα δημιουργίας του δικτύου με έναν ad hoc τρόπο, έχει διενεργηθεί μεγάλος όγκος έρευνας σχετικά με τη δημιουργία αυτών των οργανωτικών δομών ([4],[7],[10]), τις οποίες ονομάζουμε συστάδες (clusters).

Παρατηρώντας το Σχήμα 3.1 μπορούμε να συνειδητοποιήσουμε την αρχιτεκτονική ενός κοινού WSN [1] και να εξετάσουμε γιατί το φαινόμενο της ομαδοποίησης αποτελεί βασικό τμήμα της οργανωτικής δομής του δικτύου.



Σχήμα 3.1: Αρχιτεκτονική κοινού WSN

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.1, το δίκτυο αποτελείται από:

1. Κόμβους αισθητήρων: Ο κόμβος αισθητήρων αποτελεί, όπως προκύπτει και από τα προηγούμενα κεφάλαια, το κύριο συστατικό ενός WSN και μπορεί να επιτελέσει εργασίες όπως απλή παρατήρηση, αποθήκευση, δρομολόγηση και επεξεργασία δεδομένων.
2. Συστάδες: Οι συστάδες είναι οργανωτικές δομές του δικτύου και τα όριά τους συμβολίζονται στο Σχήμα 4.1 με διακεκομμένες γραμμές. Η μεγάλη πυκνότητα που παρουσιάζουν συχνά τα WSNs δημιουργεί την ανάγκη να τα χωρίσουμε σε μικρότερα τμήματα, τις συστάδες, για να απλοποιήσουμε λειτουργίες όπως η επικοινωνία.
3. Επικεφαλής συστάδας (clusterhead): Ο επικεφαλής συστάδας είναι ο υπεύθυνος για τη συστάδα και συχνά απαιτείται να οργανώνει τις δραστηριότητές της. Τέτοιες δραστηριότητες είναι η συνάθροιση δεδομένων (data aggregation) και ο χρονοπρογραμματισμός της επικοινωνίας της συστάδας, χωρίς να σημαίνει ότι περιορίζεται μόνο σε αυτές.
4. Σταθμός βάσης (base station): Ο σταθμός βάσης παρέχει την σύνδεση μεταξύ του δικτύου και του τελικού χρήστη (μιας καταβόθρας που βρίσκεται εκτός δικτύου) για να μπορούν να επικοινωνούν.

3.2 Περιοριστικοί παράγοντες

Η δημιουργία συστάδων παίζει σημαντικό ρόλο όχι μόνο στην οργάνωση του δικτύου, αλλά μπορεί να επηρεάσει σε βάθος και την απόδοσή του. Υπάρχουν βέβαια ορισμένοι βασικοί περιορισμοί στα WSNs, τους οποίους πρέπει να λάβουμε υπόψη κατά τον σχεδιασμό των συστάδων, έτσι ώστε να επιτευχθεί βελτίωση στη συνολική απόδοση του δικτύου. Τέτοιοι περιορισμοί είναι:

1. Περιορισμένη ενέργεια: Σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα, τα WSNs έχουν περιορισμένα ποσά αποθηκευμένης ενέργειας. Η αποδοτική χρήση αυτής της ενέργειας καθορίζει την γκάμα των εφαρμογών που μπορούν να υλοποιήσουν. Με σωστή επιλογή συστάδων μπορούμε να μειώσουμε τη συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο.
2. Διάρκεια ζωής δικτύου: Η περιορισμένη ενέργεια στους κόμβους οδηγεί σε περιορισμένη διάρκεια ζωής του δικτύου. Εφόσον οι συστάδες βελτιώνουν την κατανάλωση ενέργειας, αυξάνουν ταυτόχρονα τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

3. Περιορισμένες δυνατότητες: Το μικρό μέγεθος και η μικρή ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας περιορίζουν πολλές από τις δυνατότητες του κόμβου σε ό,τι αφορά την επεξεργασία και την επικοινωνία. Ένας αποδοτικός αλγόριθμος ομαδοποίησης οφείλει να εκμεταλλεύεται τους κοινούς πόρους της συστάδας, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει υπόψη τις δυνατότητες κάθε μεμονωμένου κόμβου.
4. Εξάρτηση από εφαρμογές: Συχνά κάποια εφαρμογή θα βασίζεται αρκετά στην οργάνωση των συστάδων. Όμως, κατά τον σχεδιασμό των αλγορίθμων ομαδοποίησης πρέπει να δίνεται έμφαση στην ευρωστία τους, αφού ένας αποδοτικός αλγόριθμος πρέπει να προσαρμόζεται σε διαφορετικές απαιτήσεις.

3.3 Σχεδιασμός συστάδων

Οι αλγόριθμοι ομαδοποίησης παίζουν εξέχοντα ρόλο στην επίτευξη των σχεδιαστικών στόχων για μια δοσμένη εφαρμογή. Υπάρχουν αρκετά βασικά χαρακτηριστικά που οι σχεδιαστές πρέπει να αναλογιστούν κατά την ομαδοποίηση, γιατί έχουν μεγάλη σημασία για τη λειτουργία των WSNs. Αυτά είναι:

1. Κόστος ομαδοποίησης: Παρόλο που η ομαδοποίηση είναι βασική για την οργάνωση της τοπολογίας του δικτύου, χρειάζονται αρκετοί πόροι (όπως εργασίες επεξεργασίας και επικοινωνίας) για τη δημιουργία και τη συντήρηση της τοπολογίας των συστάδων.
2. Επιλογή συστάδων και επικεφαλών συστάδων: Μελετώντας την εκάστοτε εφαρμογή, πρέπει να γίνει προσεκτικός σχηματισμός των συστάδων στο δίκτυο. Οι απαιτήσεις των εφαρμογών μπορεί να περιέχουν περιορισμούς για τον αριθμό των κόμβων κάθε συστάδας ή για το μέγεθός της. Οι παραπάνω παράγοντες μπορεί να καθορίζουν και την επιλογή του επικεφαλής της συστάδας.
3. Λειτουργία σε πραγματικό χρόνο: Σε μερικές εφαρμογές, όπως σε περιπτώσεις παρακολούθησης τροχιάς, είναι σημαντική η έγκαιρη απόκτηση των δεδομένων. Έτσι, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην καθυστέρηση που προκαλούν τα σχήματα ομαδοποίησης που χρησιμοποιούνται. Επίσης, ο χρόνος που απαιτείται για τους μηχανισμούς διόρθωσης των συστάδων είναι σημαντικός και πρέπει να ληφθεί υπόψη.
4. Συγχρονισμός: Ένας από τους βασικότερους περιοριστικούς παράγοντες των WSNs είναι η περιορισμένη ενέργεια των κόμβων, όπως έχει αναλυθεί και προηγουμένως. Τα σχήματα μετάδοσης που χρησιμοποιούν χρονοσχισμές, όπως το TDMA,

επιτρέπουν στους κόμβους να προγραμματίζουν το πότε θα μπουν σε κατάσταση ύπνου ανάμεσα σε δύο μεταδόσεις για εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτά τα σχήματα απαιτούν μηχανισμούς συγχρονισμού για να δημιουργήσουν και να συντηρήσουν το πρόγραμμα μεταδόσεων. Ο συγχρονισμός και ο χρονοπρογραμματισμός έχουν μια σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής του δικτύου και τη συνολική απόδοσή του.

5. Συνάθροιση δεδομένων: Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των WSNs είναι η δυνατότητα συνάθροισης των δεδομένων. Σε ένα πυκνό δίκτυο υπάρχουν πολλοί κόμβοι που συλλέγουν παρόμοια δεδομένα. Η συνάθροιση των δεδομένων αυτών διαχωρίζει τα άχρηστα δεδομένα από τα χρήσιμα δεδομένα. Η διαδικασία της συνάθροισης, η οποία καθίσταται δυνατή με την εντός δικτύου επεξεργασία των δεδομένων, είναι πλέον θεμελιώδης για τα WSNs, αφού η ενέργεια που απαιτείται γι' αυτή είναι σημαντικά λιγότερη από αυτή που χρειάζεται για την επικοινωνία. Πολλοί αλγόριθμοι ομαδοποίησης προσφέρουν δυνατότητες συνάθροισης δεδομένων, οπότε η απαίτηση συνάθροισης δεδομένων πρέπει να μελετηθεί κατά την επιλογή του αλγορίθμου.
6. Μηχανισμοί διόρθωσης: Η φύση των WSNs τα καθιστά επιρρεπή σε κινητικότητα, ακρήστευση κόμβων και παρεμβολές. Όλες αυτές οι καταστάσεις μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφή των συνδέσμων επικοινωνίας. Γι' αυτό, είναι σημαντικό στα σχήματα ομαδοποίησης να αναζητάμε μηχανισμούς υπεύθυνους για την ανάκτηση συνδέσμων επικοινωνίας και την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων.

3.4 Αλγόριθμοι ομαδοποίησης

Οι αλγόριθμοι ομαδοποίησης μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες, οι οποίες παρουσιάζονται εποπτικά στο Σχήμα 3.2 και αναλύονται παρακάτω.

3.4.1 Ευρετικοί Αλγόριθμοι (Heuristic Algorithms)

Ευρετικός ονομάζεται ο αλγόριθμος που έχει ένα ή και τους δύο από τους παρακάτω στόχους κατά την επίλυση ενός προβλήματος:

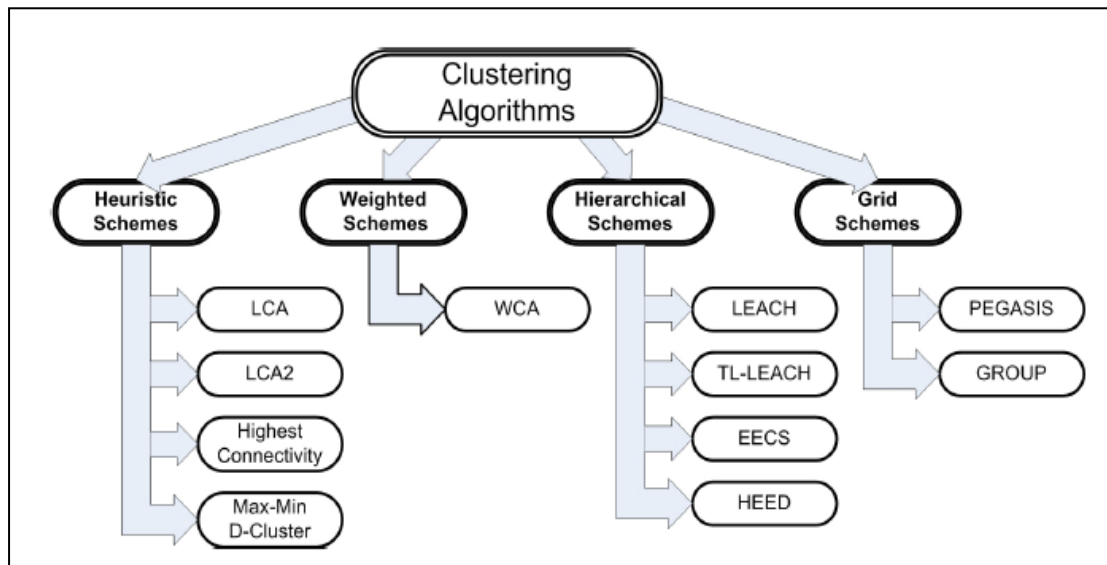
- εύρεση αλγορίθμου με λογική διάρκεια τρεξίματος
- εύρεση βέλτιστης λύσης.

Αυτό σημαίνει ότι ένας ευρετικός αλγόριθμος έχει λογική απόδοση και δε βασίζεται σε συγκεκριμένες μετρήσεις.

Υπάρχουν πολλοί τύποι ευρετικών αλγορίθμων για την επιλογή των κόμβων επικεφαλών συστάδων. Κάθε αλγόριθμος ασχολείται μόνο με ένα υποσύνολο παραμέτρων που επιβάλλουν περιορισμούς στο σύστημα. Υπό αυτή την έννοια, ο καθένας από αυτούς τους αλγορίθμους είναι κατάλληλος περισσότερο για συγκεκριμένες εφαρμογές, παρά για ένα τυχαίο WSN.

3.4.1.1 Linked Cluster Algorithm (LCA)

Ο LCA ([2], [3], [22]) ήταν από τους πρώτους αλγορίθμους ομαδοποίησης που αναπτύχθηκαν. Αρχικά είχε σχεδιαστεί για ενσύρματα δίκτυα, αλλά στην συνέχεια εφαρμόστηκε στα WSNs. Στον LCA κάθε κόμβος έχει ένα μοναδικό αριθμό ταυτοποίησης (ID number) και μπορεί να γίνει επικεφαλής συστάδας με δύο τρόπους: είτε να διαθέτει το μεγαλύτερο ID στο σύνολο που περιλαμβάνει όλους τους γειτονικούς του κόμβους και τον εαυτό του, είτε να μην είναι κανένας από τους γείτονές του επικεφαλής.



Σχήμα 3.2: Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων ομαδοποίησης

3.4.1.2 Linked Cluster Algorithm 2 (LCA2)

Ο LCA2 ([2], [22]) προτάθηκε για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της εκλογής περιττών επικεφαλών του LCA. Εδώ, λειτουργούμε με την ιδέα των καλυμμένων και ακάλυπτων κόμβων. Ένας κόμβος θεωρείται καλυμμένος αν κάποιος από τους γείτονές του είναι επικεφαλής. Η εκλογή των επικεφαλών ξεκινάει με τον κόμβο που έχει το μικρότερο ID ανάμεσα στους ακάλυπτους γείτονες.

3.4.1.3 Highest-Connectivity Cluster Algorithm

Αυτός ο αλγόριθμος είναι παρόμοιος με τον LCA. Σε αυτό το σχήμα [22], ο αριθμός των γειτόνων του κάθε κόμβου γνωστοποιείται στους περιβάλλοντες κόμβους. Έτσι, αντί να γίνεται η επιλογή του επικεφαλής από το ID, γίνεται σύμφωνα με το πλήθος των γειτόνων του. Δηλαδή, ο κόμβος με τους περισσότερους γείτονες (υψηλότερη συνδεσιμότητα) γίνεται επικεφαλής και μόνο σε περίπτωση ισοπαλίας μετράει το χαμηλότερο ID.

3.4.1.4 Max-Min D-Cluster Algorithm

Αυτός ο αλγόριθμος προτείνει ένα νέο καταναμημένο τρόπο επιλογής του επικεφαλής συστάδας, όπου κάθε κόμβος απέχει το πολύ d (κατώφλι που ορίζεται από τον αλγόριθμο) hops από τον επικεφαλής της συστάδας του [2]. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνουμε ισορροπία στο φορτίο των επικεφαλών.

Κάθε κόμβος ξεκινάει $2d$ γύρους υπερχειλίσσης (flooding) και τα αποτελέσματά τους καταγράφονται. Από αυτή την διαδικασία προκύπτουν τα κριτήρια για την επιλογή των επικεφαλών. Στη συνέχεια, κάθε κόμβος ακολουθεί ορισμένους κανόνες και αποφασίζει τον επικεφαλής. Οι πρώτοι d γύροι της υπερχειλίσσης ονομάζονται floodmax και διαδίδουν τα μεγαλύτερα ID των κόμβων. Οι επόμενοι d γύροι ονομάζονται floodmin και επιτρέπουν στους κόμβους με μικρότερο ID να διεκδικήσουν μια περιοχή. Μετά από τους γύρους υπερχειλίσσης, κάθε κόμβος αξιολογεί τα καταγεγραμμένα αποτελέσματά τους ακολουθώντας τους εξής κανόνες:

- Κανόνας 1: Κάθε κόμβος τσεκάρει αν έχει δεχτεί το δικό του ID κατά την διάρκεια του floodmin. Αν αυτό έχει συμβεί, τότε γίνεται επικεφαλής και δεν προχωράει στους επόμενους κανόνες. Διαφορετικά, συνεχίζει με τον Κανόνα 2.
- Κανόνας 2: Κάθε κόμβος ψάχνει για ζεύγη κόμβων και μόλις τα εντοπίσει, επιλέγει το μικρότερο για επικεφαλής. Αν δεν υπάρχει ζεύγος κόμβων, τότε συνεχίζει με τον Κανόνα 3.
- Κανόνας 3: Επιλέγει τον κόμβο με το μεγαλύτερο ID στους πρώτους d γύρους της υπερχειλίσσης ως επικεφαλής.

Αφού έχουν ακολουθηθεί οι παραπάνω κανόνες, ο κόμβος πρέπει να αποφασίσει αν είναι κόμβος πύλη (gateway node), δηλαδή κόμβος που οι περισσότεροι ή όλοι οι γείτονές του έχουν διαφορετικό επικεφαλής από αυτόν. Προκειμένου να γίνει αυτό, κάθε κόμβος ενημερώνει με μήνυμα ευρυεκπομπής τους γείτονές του σχετικά με τον επικεφαλής που έχει επιλέξει. Αφού απαντήσουν όλοι οι γείτονες, γνωρίζουμε ποιοι είναι οι κόμβοι πύλες. Όταν ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, ξεκινάει η επικοινωνία των κόμβων με τους επικεφαλείς τους. Η επικοινωνία αυτή

πραγματοποιείται με αποστολή μηνύματος από το σύνορο της συστάδας (δηλαδή τον κόμβο πύλη) προς το εσωτερικό της. Το μήνυμα περιέχει το ID του κόμβου και τους γειτονικούς του κόμβους διόδους με τους αντίστοιχους επικεφαλείς τους. Καθώς αυτό το μήνυμα προωθείται προς τους επικεφαλείς, κάθε κόμβος προσθέτει τα δικά του στοιχεία.

Ο αλγόριθμος αυτός παρέχει έγκυρα αποτελέσματα αν ισχύουν δύο υποθέσεις: πρώτον ότι κατά τη διάρκεια της υπερχειλίσισης κανένα ID δεν διαδίδεται παραπάνω από d hops από την πηγή του και δεύτερον ότι οι κόμβοι που επιβιώνουν από το floodmax εκλέγονται επικεφαλείς.

3.4.2 Σταθμισμένα Σχήματα (Weighted Schemes)

Ένα τέτοιο σχήμα είναι ο Weighted Clustering Algorithm (WCA) [6]. Ο WCA είναι μια απεριοδική διαδικασία για την επιλογή επικεφαλών συστάδων, που υλοποιείται κάθε φορά που είναι απαραίτητη η αναδιάταξη της τοπολογίας του δικτύου. Ο αλγόριθμος προσπαθεί να βρει μια ανθεκτική αρχιτεκτονική κατά τη διάρκεια της πρώτης επιλογής των επικεφαλών και όταν κάποιος κόμβος χάσει την επαφή με τον επικεφαλή της συστάδας του, ξαναεκτελείται για τη δημιουργία καινούργιας τοπολογίας. Με αυτό τον τρόπο εξοικονομείται ενέργεια, αφού η διαδικασία ομαδοποίησης γίνεται λιγότερο συχνά. Ο WCA βασίζεται στην εκτίμηση ενός συνδυασμού παραμέτρων του δικτύου ανάλογα με την εφαρμογή, όπως το ιδανικό πλήθος, την ισχύ εκπομπής, την κινητικότητα και το επίπεδο των ενεργειακών αποθεμάτων των κόμβων. Μια ακόμα βασική ιδιότητα του αλγορίθμου είναι ότι όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια ευθύνη να αναλάβουν επικεφαλείς, δηλαδή ο αλγόριθμος είναι πλήρως καταναμημένος.

Η επιλογή των επικεφαλών βασίζεται σε μια γενική παράμετρο που ονομάζεται συνδυαστικό βάρος και δίνεται από τον τύπο $W_v = w_1 \Delta_v + w_2 D_v + w_3 M_v + w_4 P_v$, όπου w_1 , w_2 , w_3 και w_4 είναι οι συντελεστές βάρη για τις αντίστοιχες παραμέτρους του δικτύου, οι οποίοι επιλέγονται ανάλογα με την εφαρμογή. Το συνδυαστικό βάρος W_v υπολογίζεται από κάθε κόμβο ξεχωριστά και γνωστοποιείται στο δίκτυο: ο κόμβος με το μικρότερο W_v γίνεται επικεφαλής. Ο πρώτος όρος $w_1 \Delta_v$ του συνδυαστικού βάρους συνεισφέρει στη λειτουργικότητα των MAC πρωτοκόλλων, αφού πάντα είναι χρήσιμο να υπάρχει άνω όριο στο πλήθος των κόμβων της συστάδας. Ο δεύτερος όρος D_v είναι η μέση απόσταση του κόμβου από τους γείτονες και συνδέεται αυστηρά με την κατανάλωση ισχύος, αφού είναι γνωστό ότι χρειάζεται περισσότερη ισχύς για επικοινωνίες μακρινών αποστάσεων. Ο τρίτος όρος αναφέρεται στην κινητικότητα των κόμβων: είναι επιθυμητό ο επικεφαλής να κινείται αργά για να έχουμε μια σταθερή αρχιτεκτονική συστάδων. Ο τελευταίος όρος αφορά στη διαθέσιμη ενέργεια του κόμβου: αν ένας κόμβος είναι επικεφαλής, τότε θα έχει καταναλώσει ένα μεγάλο μέρος της διαθέσιμης ενέργειάς του και δεν θα πρέπει να είναι υποψήφιος για την επόμενη επιλογή επικεφαλής συστάδας. Οι συντελεστές βάρη μπορούν να επιλεγούν ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Για παράδειγμα, ο έλεγχος της ισχύος είναι πολύ σημαντικός σε CDMA δίκτυα, οπότε ο αντίστοιχος συντελεστής

βάρος μπορεί να αυξηθεί. Αυτή η ευχέρεια στη ρύθμιση των συντελεστών αυξάνει την προσαρμοστικότητα του αλγορίθμου σε διαφορετικές εφαρμογές.

Ο χρόνος που απαιτείται για την επιλογή του κόμβου με το μικρότερο W_v εξαρτάται από την υλοποίηση του αλγορίθμου. Επειδή δεν υπάρχει κάποιος συγκεντρωτικός server στα ad hoc δίκτυα, ο αλγόριθμος προτείνει οι κόμβοι να γνωστοποιούν και τον αναγνωριστικό τους αριθμό μαζί με την τιμή του W_v τους. Κάθε κόμβος λαμβάνει αυτές τις πληροφορίες από τους γείτονές του και τις αποθηκεύει. Αυτή η διαδικασία ανταλλαγής πληροφοριών ανάμεσα στους γειτονικούς κόμβους συνεχίζεται μέχρι να ενημερωθούν όλοι οι κόμβοι για το ποιος έχει το μικρότερο W_v . Είναι προφανές ότι ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία εξαρτάται από το μέγεθος του δικτύου.

3.4.3 Ιεραρχικά Σχήματα (Hierarchical Schemes)

3.4.3.1 Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)

Ο LEACH [10] αποτέλεσε μια σημαντική βελτίωση σε σύγκριση με τις συμβατικές προσεγγίσεις της ομαδοποίησης στα WSNs. Οι συμβατικοί αλγόριθμοι, όπως ο MTE (Minimum-Transmission-Energy) [18] ή ο αλγόριθμος άμεσης μετάδοσης (direct-transmission) δεν οδηγούν σε ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας παντού στο δίκτυο. Ο LEACH προσφέρει μια ισορροπημένη χρησιμοποίηση ενέργειας με εναλλαγή των επικεφαλών. Ο αλγόριθμος είναι σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συγχώνευση των δεδομένων για τη μείωση του όγκου των μεταδιδόμενων πληροφοριών.

Η απόφαση για το αν ένας κόμβος αναβαθμίζεται σε επικεφαλή λαμβάνεται δυναμικά σε κάθε γύρο και κάθε κόμβος τη λαμβάνει μόνος του, ανεξάρτητα από τους άλλους για να ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος εγκαθίδρυσης των επικεφαλών. Η απόφαση αυτή είναι μια συνάρτηση του ποσοστού των βέλτιστων επικεφαλών (αποφασίζεται εκ των προτέρων ανάλογα με την εφαρμογή) στο δίκτυο σε συνδυασμό με το πόσο συχνά και ποια ήταν η τελευταία φορά που ο κόμβος ήταν επικεφαλής συστάδας. Η συνάρτηση κατωφλίου ορίζεται ως εξής:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P(r \bmod \frac{1}{p})}, & \text{αν } n \in G \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Όπου n είναι ο κόμβος που εξετάζουμε, P είναι η εκ των προτέρων ορισμένη πιθανότητα να γίνει ένας κόμβος επικεφαλής συστάδας, r είναι ο αριθμός του τρέχοντος γύρου και G είναι το σύνολο των κόμβων που δεν έχουν εκλεγεί επικεφαλές για τους τελευταίους $1/p$ γύρους. Σε αυτό

το σημείο πρέπει να διευκρινιστεί ότι η πιθανότητα να γίνει ένας κόμβος επικεφαλής συστάδας P είναι το πηλίκο του πλήθους των επικεφαλών που είναι επιθυμητό να έχει το δίκτυο προς το συνολικό αριθμό των κόμβων που μπορούν να εκλεγούν επικεφαλείς.

Κάθε κόμβος κατά τη διάρκεια της επιλογής επικεφαλών παράγει ένα τυχαίο αριθμό ανάμεσα στο 0 και το 1. Αν αυτός ο αριθμός είναι μικρότερος από το αντίστοιχο κατώφλι του κόμβου $T(n)$, τότε αναλαμβάνει επικεφαλής συστάδας. Στην συνέχεια, ο νέος επικεφαλής συστάδας θα ενημερώσει για την ιδιότητά του τους γειτονικούς κόμβους. Αυτοί με την σειρά τους θα αποφασίσουν σε ποιον επικεφαλή θέλουν να υπάγονται με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ενέργειας για μετάδοση, και θα γνωστοποιήσουν την επιθυμία τους αυτή. Τα μηνύματα ευρυεκπομπής που στέλνει ο επικεφαλής συστάδας για να ενημερώσει σχετικά με την ιδιότητά του, καθώς και τα μηνύματα εγκαθίδρυσης των συστάδων εκπέμπονται με CSMA (Carrier Sense Multiple Access) για να ελαχιστοποιηθούν οι συγκρούσεις στο δίαυλο. Μετά το σχηματισμό των συστάδων, οι επικεφαλείς τους δημιουργούν ένα πρόγραμμα εκπομπών, το οποίο αποτελείται από TDMA χρονοσχισμές για κάθε κόμβο, και το στέλνουν σε όλους τους κόμβους της συστάδας. Αυτό το πρόγραμμα εκπομπών συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας, αφού οι κόμβοι μπορούν να απενεργοποιούν τον πομποδέκτη τους κατά τη διάρκεια όλων των χρονοσχισμών που δεν τους ανήκουν.

3.4.3.2 Two-Level Hierarchy LEACH (TL-LEACH)

Ο TL-LEACH [16] προτάθηκε ως επέκταση του αλγορίθμου LEACH και αξιοποιεί δύο επίπεδα επικεφαλών, τους βασικούς και τους δευτερεύοντες. Σε αυτή την υλοποίηση, οι βασικοί επικεφαλείς επικοινωνούν με τους δευτερεύοντες, οι οποίοι με τη σειρά τους επικοινωνούν με όλους τους κόμβους που ανήκουν στην υποσυστάδα τους. Όπως και στον LEACH, η επικοινωνία μέσα στη συστάδα πραγματοποιείται με χρήση TDMA χρονοσχισμών και μπορεί να εφαρμοστεί συγχώνευση δεδομένων.

Κάθε γύρος ξεκινάει με την επιλογή των βασικών και δευτερευόντων επικεφαλών ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με τον LEACH, αλλά με την εκ των προτέρων πιθανότητα να εκλεγεί ένας κόμβος δευτερεύων επικεφαλής μεγαλύτερη απ' το να εκλεγεί βασικός. Η επικοινωνία και μεταφορά των δεδομένων από τις πηγές στην καταβόθρα επιτυγχάνεται σε δύο στάδια · αρχικά οι δευτερεύοντες επικεφαλείς συλλέγουν όλα τα δεδομένα από τις υποσυστάδες τους και στην συνέχεια οι βασικοί επικεφαλείς συλλέγουν τα δεδομένα από τους δευτερεύοντες επικεφαλείς της συστάδας τους. Και στα δύο στάδια μπορεί να γίνει συγχώνευση των δεδομένων από τους επικεφαλείς.

Η δύο επιπέδων αρχιτεκτονική του TL-LEACH μειώνει το πλήθος των κόμβων που πρέπει να εκπέμπουν στον σταθμό βάσης και με αυτό τον τρόπο μειώνει αποδοτικά τη χρησιμοποίηση της ενέργειας.

3.4.3.3 Energy Efficient Clustering Scheme (EECS)

Ο EECS [24] είναι ένας αλγόριθμος ομαδοποίησης όπου οι υποψήφιοι επικεφαλείς διαγωνίζονται για την ανάδειξή τους σε επικεφαλή σε κάθε γύρο. Ο διαγωνισμός αυτός απαιτεί από τους υποψήφιους να ενημερώσουν με ευρυεκπομπή τους γειτονικούς υποψήφιους κόμβους σχετικά με την εναπομένουσα ενέργειά τους. Αν ο υποψήφιος δεν εντοπίσει κόμβο με περισσότερη εναπομένουσα ενέργεια, τότε γίνεται επικεφαλής. Εδώ ο σχηματισμός των συστάδων εκτελείται με διαφορετικό τρόπο απ' ό,τι στον LEACH. Στον LEACH δημιουργούνται συστάδες με βάση την απόσταση των κόμβων από τους επικεφαλείς, ενώ ο EECS επεκτείνει αυτή την λογική με την δημιουργία δυναμικών σε μέγεθος συστάδων με βάση την απόστασή τους από τον σταθμό βάσης. Έτσι, προκύπτει ένας αλγόριθμος που ανταποκρίνεται στο εξής πρόβλημα: οι συστάδες που βρίσκονται μακριά από τον σταθμό βάσης απαιτούν περισσότερη ενέργεια για μετάδοση από αυτές που είναι πιο κοντά. Ουσιαστικά, ο αλγόριθμος βελτιώνει την κατανομή της ενέργειας στο δίκτυο, με αποτέλεσμα την καλύτερη χρησιμοποίηση των πόρων του και την επέκταση της ζωής του.

3.4.3.4 Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering (HEED)

Ο HEED [25] είναι ένας multi-hop αλγόριθμος ομαδοποίησης για WSNs. Δίνει έμφαση στην αποδοτική δημιουργία συστάδων με κατάλληλη επιλογή των επικεφαλών τους, η οποία βασίζεται στη φυσική απόσταση μεταξύ των κόμβων.

Οι κύριες επιδιώξεις του HEED είναι η καταναεμημένη κατανάλωση ενέργειας για μεγάλη διάρκεια ζωής του δικτύου, η ελαχιστοποίηση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της επιλογής των επικεφαλών και η ελαχιστοποίηση του κόστους για έλεγχο του δικτύου.

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του HEED είναι ο τρόπος επιλογής των επικεφαλών. Οι επικεφαλείς επιλέγονται με βάση δύο βασικές παραμέτρους:

- Η *εναπομένουσα ενέργεια* σε κάθε κόμβο χρησιμοποιείται για την πιθανοτική επιλογή του αρχικού συνόλου επικεφαλών.
- Το *κόστος της επικοινωνίας εντός συστάδας* χρησιμοποιείται για να αποφασίσουν οι κόμβοι σε ποια συστάδα θα ανήκουν. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο κριτήριο αν ο κόμβος βρίσκεται μέσα στην εμβέλεια δύο ή περισσότερων επικεφαλών. Στον HEED είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε την εμβέλεια κάθε κόμβου σε ό,τι αφορά τα επίπεδα ισχύος του, αφού ο εκάστοτε κόμβος διαθέτει πολλαπλά διακριτά επίπεδα ισχύος εκπομπής. Το επίπεδο της ισχύος που χρησιμοποιείται από ένα κόμβο για τις ανακοινώσεις εντός

συστάδας και κατά τη διάρκεια της ομαδοποίησης αναφέρεται σαν επίπεδο ισχύος συστάδας. Χαμηλά επίπεδα ισχύος συστάδας προωθούν την αύξηση της χωρικής επαναχρησιμοποίησης, ενώ υψηλά επίπεδα ισχύος συστάδας απαιτούνται για επικοινωνία εντός συστάδας, αφού συνδέουν δύο ή περισσότερες περιοχές της συστάδας. Γι' αυτό, κατά την επιλογή συστάδας, ο κόμβος θα επικοινωνήσει με τον κατάλληλο επικεφαλή, ώστε να έχει το μικρότερο δυνατό κόστος επικοινωνίας εντός συστάδας. Το κόστος αυτό εκτιμάται με χρήση του μεγέθους AMPR (Average Minimum Reachability Power). Το AMPR είναι το μέσο από τα μικρότερα επίπεδα ισχύος που απαιτούνται για να επικοινωνήσει αποδοτικά κάθε κόμβος μέσα σε περιοχή της συστάδας ακτίνας R με τον επικεφαλή της i . Αν ένας κόμβος γίνει επικεφαλής, το AMPR του θεωρείται το μέτρο της αναμενόμενης ενέργειας που καταναλώνεται για επικοινωνία εντός συστάδας. Έτσι, η χρήση του AMPR σαν δεύτερη παράμετρος επιλογής είναι πιο αποδοτική από το να επιλέγει ο κόμβος με βάση την απόσταση.

3.4.4 Σχήματα Πλέγματος (Grid Schemes)

3.4.4.1 Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS)

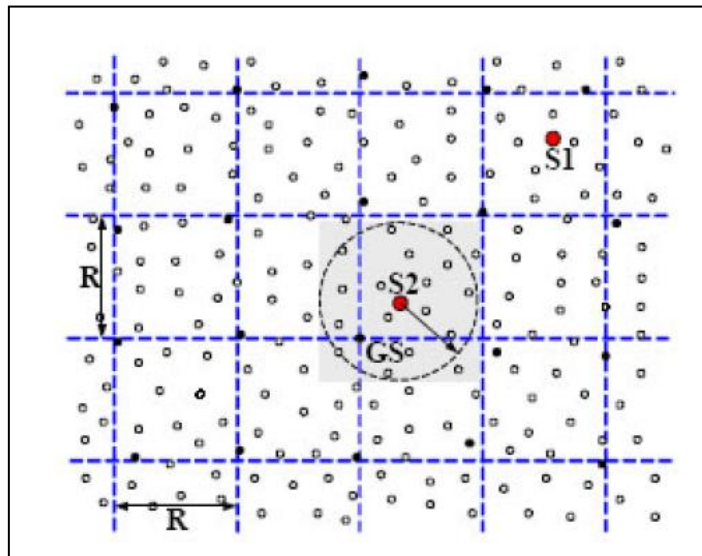
Ο PEGASIS [15] είναι ένας αλγόριθμος συνάθροισης δεδομένων, ο οποίος βασίζεται στην ιδέα ότι η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να γίνει αποφεύγοντας την άμεση δημιουργία συστάδων. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο, αν οι κόμβοι δημιουργήσουν μια αλυσίδα από την πηγή προς την καταβόθρα, μόνο ένας κόμβος σε κάθε χρονοσχισημή θα εκπέμπει προς τον σταθμό βάσης. Επίσης, συγχώνευση των δεδομένων πραγματοποιείται σε κάθε κόμβο, με αποτέλεσμα να επιτρέπεται στα ωφέλιμα δεδομένα να διαδίδονται μέσα στο δίκτυο. Έχει αποδειχτεί ότι η μέση ακτίνα εκπομπής που απαιτείται από ένα κόμβο ώστε να αναμεταδώσει πληροφορίες μπορεί να είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με του LEACH. Έτσι, έχουμε βελτίωση στη χρησιμοποίηση της ενέργειας σε σχέση με την προσέγγιση της ιεραρχικής ομαδοποίησης.

3.4.4.2 GROUP

Ο GROUP [26] είναι ένας αλγόριθμος ομαδοποίησης βασισμένος σε αρχιτεκτονική πλέγματος. Στον GROUP μια από τις καταβόθρες, η οποία ονομάζεται βασική καταβόθρα, δυναμικά και τυχαία δημιουργεί ένα πλέγμα συστάδων. Οι επικεφαλές των συστάδων είναι τοποθετημένοι σε αρχιτεκτονική πλέγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Ο κόμβος Grid Seed (GS) που παρατηρούμε στο Σχήμα 3.3 είναι ένας κόμβος με

δοσμένη ακτίνα από τη βασική καταβόθρα και επιλέγεται σε συγκεκριμένο γύρο από αυτή με κριτήριο την εναπομένουσα ενέργεια. Η προώθηση των αιτημάτων για δεδομένα από την καταβόθρα στις πηγές γίνεται από τον GS προς τον επικεφαλή της αντίστοιχης συστάδας.

Αφού επιλεγεί ο GS, επιλέγονται από αυτόν οι επικεφαλείς κατά μήκος των γωνιών του πλέγματος και σε ακτίνα R. Καθένας από αυτούς τους επικεφαλείς θα επιλέξει επιπλέον επικεφαλείς κατά μήκος του πλέγματος μέχρι να συμπληρωθεί ο επιθυμητός αριθμός. Αυτές οι επιλογές εξαρτώνται από την εναπομένουσα ενέργεια των κόμβων που βρίσκονται κοντά στις γωνίες του πλέγματος.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα πλέγματος συστάδων στον GROUP

Η εκπομπή δεδομένων στον GROUP εξαρτάται από το είδος των δεδομένων που συλλέγονται. Σε περίπτωση αιτήματος δεδομένων που δεν εξαρτώνται από τη θέση του κόμβου αισθητήρων, το αίτημα μεταφέρεται από την καταβόθρα στον κοντινότερο επικεφαλή και από εκεί στους επικεφαλείς γείτονές του με ευρυεκπομπή. Σε αντίθετη περίπτωση, το αίτημα προωθείται μέσω της αλυσίδας των επικεφαλών στην περιοχή που πρέπει με χρήση πακέτων μονής εκπομπής (unicast). Και στις δύο περιπτώσεις τα δεδομένα αποστέλλονται προς την καταβόθρα μέσω της αλυσίδας των επικεφαλών που προέκυψε κατά την διάρκεια της δημιουργίας των συστάδων.

Η εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω της μικρότερης απόστασης εκπομπής όταν αποστέλλονται τα δεδομένα στην καταβόθρα. Για παράδειγμα, στον LEACH κάθε επικεφαλής πρέπει να εκπέμπει τα δεδομένα απευθείας στον σταθμό βάσης, ενώ στον GROUP τα δεδομένα εκπέμπονται σε μικρές αποστάσεις από επικεφαλή σε επικεφαλή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks", IEEE Communications Magazine 40, August 2002.
- [2] A. Amis, R. Prakash, T. Vuong, and D. Huynh, "Max-Min D-Cluster Formation in Wireless Ad Hoc Networks," IEEE INFOCOM, March 2000.
- [3] D.J. Baker, A. Ephremides, "The Architectural Organization of a Mobile Radio Network via a Distributed Algorithm", IEEE Transactions on Communications, 1981.
- [4] S. Bandyopadhyay, E.J. Coyle, "An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks", IEEE INFOCOM, April 2003.
- [5] S. Basagni, "Distributed and Mobility-Adaptive Clustering for Multimedia Support in Multi-Hop Wireless Networks", Proceedings of Vehicular Technology Conference 2, 1999.
- [6] M. Chatterjee, S.K. Das, D. Turgut, "WCA: A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks", Clustering Computing 5, 2002.
- [7] C.F. Chiasserini, I. Chlamtac, P. Monti, A. Nucci, "Energy Efficient Design of Wireless Ad Hoc Networks", Proceedings of European Wireless, February 2002.
- [8] C.Y. Chong, S. Mori, K.C. Chang, "Distributed multitarget multisensory tracking", Multitarget Multisensor Tracking: Advanced Applications, 1990.
- [9] D.J. Dechene, A. El Jardali, M. Luccini, A. Sauer, "A Survey of Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks"
- [10] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy Efficient Communication Protocol for Wireless Micro Sensor Networks", Proceedings of IEEE HICSS, January 2000.
- [11] V. Hsu, M. Kahn, K.S.J. Pister, "Wireless Communication for Smart Dust", Electronic Research Laboratory Technical Memorandum, February 1998.
- [12] C. Intanagonwiwat et al., "Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking", IEEE/ACM Transaction on Networking 11, February 2003.
- [13] J.M. Kahn, R.H. Katz, K. Pister, "Next Century Challenges Mobile Networking for Smart Dust", 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, August 1999.
- [14] W.C.Y. Lee, "Overview of Cellular CDMA", IEEE Trans. on Vehicular Technology 40, May 1991.
- [15] S. Lindsey, C.S. Raghavendra, "PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Networks", Computer Systems Research Department, Aerospace Corporation.

- [16] V. Loscri, G. Morabito, S. Marano, "A Two-Level Hierarchy for Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy", DEIS Department, University of Calabria.
- [17] A. Mainwaring et al., "Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring", Proceedings of the 1st ACM International Workshop on WSN, 2002.
- [18] T. Meng and R. Volkan, "Distributed Network Protocols for Wireless Communication", Proc. IEEE ISCAS, May 1998.
- [19] S. Meyer, A. Rakotonirainy, "A Survey of Research on Context-Aware Homes", Workshop on Wearable, Invisible, Context-Aware, Ambient, Pervasive and Ubiquitous Computing, Adelaide Australia, 2003.
- [20] C.E. Nishimura, D.M. Conlon, "IUSS dual use: Monitoring of whales and earthquakes using SOSUS", Mar. Technol. Soc. J., 27, 1994.
- [21] A.K. Parekh, "Selecting Routers in Ad Hoc Wireless Networks", Proceedings of the SBT/IEEE International Symposium, August 1994.
- [22] P. Tsigas, "Project on Mobile Ad Hoc Networking and Clustering for the Course EDA390 Computer Communication and Distributed Systems", Manual for University Course.
- [23] B. Warneke, M. Last, B. Liebowitz, Kristofer, S. Pister, "Smart Dust: Communicating with a Cubic-Millimeter Computer", Computer Magazine 34, January 2001.
- [24] M. Ye, C. Li, G. Chen, J. Wu, "EECS: An Energy Efficient Clustering Scheme in Wireless Sensor Networks", National Laboratory of Novel Software Technology, Nanjing University, China.
- [25] O. Younis, S. Fahmy, "HEED: A Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks", IEEE Transactions on Mobile Computing 3, October-December 2004.
- [26] L. Yu, N. Wang, W. Zhang, C. Zheng, "GROUP: A Grid-Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", East China Normal University.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΘΕΩΡΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΠΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

4.1 Εισαγωγή

Η θεωρία βέλτιστης παύσης (optimal stopping theory) ασχολείται με προβλήματα επιλογής της κατάλληλης χρονικής στιγμής για να εκτελεστούν ορισμένες επιθυμητές ενέργειες με βάση την παρατήρηση διαδοχικών τυχαίων μεταβλητών. Φυσικά, η επιλογή της κατάλληλης χρονικής στιγμής γίνεται με σκοπό τη μεγιστοποίηση των προσδοκώμενων κερδών ή αντίστοιχα την ελαχιστοποίηση του προσδοκώμενου κόστους. Προβλήματα τέτοιου τύπου υπάρχουν σε διάφορους τομείς, όπως για παράδειγμα στον τομέα της στατιστικής, όπου η ενέργεια που πρέπει να υλοποιηθεί είναι η εκτίμηση κάποιας παραμέτρου ή ο έλεγχος μιας υπόθεσης. Επίσης, στον τομέα επιχειρηματικής έρευνας, όπου η ενέργεια που πρέπει να γίνει είναι η αντικατάσταση κάποιου μηχανήματος ή η πρόσληψη μιας γραμματέως. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα παρουσιαστεί μαθηματικά το πρόβλημα με παραδείγματα και εφαρμογές.

4.2 Μαθηματική παρουσίαση του προβλήματος

Τα προβλήματα ανεύρεσης κανόνα παύσης (stopping rule) ορίζονται [13] από δύο βασικές παραμέτρους:

- Μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών X_1, X_2, \dots με γνωστή από κοινού κατανομή
- Μια ακολουθία συναρτήσεων ανταμοιβής $y_0, y_1(x_1), y_2(x_1, x_2), \dots, y_\infty(x_1, x_2, \dots)$ που μπορούν να πάρουν πραγματικές τιμές

Με δεδομένες τις παραπάνω δύο παραμέτρους, μπορεί να περιγραφεί το πρόβλημα ανεύρεσης κανόνα παύσης, όπως ακολουθεί.

Ο παρατηρητής μπορεί να παρατηρήσει την ακολουθία X_1, X_2, \dots για όσο διάστημα επιθυμεί. Για κάθε $n = 1, 2, \dots$, αφού έχει πραγματοποιηθεί η παρατήρηση των μεταβλητών $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$, ο παρατηρητής μπορεί να σταματήσει και να λάβει τη γνωστή ανταμοιβή $y_n(x_1, \dots, x_n)$, η οποία μπορεί να είναι και αρνητική, ή μπορεί να συνεχίσει παρατηρώντας τη μεταβλητή X_{n+1} . Αν επιλέξει να μη γίνει καμία παρατήρηση, τότε λαμβάνει ως ανταμοιβή τη σταθερή ποσότητα y_0 , ενώ αν επιλέξει να μη σταματήσει ποτέ την παρατήρηση λαμβάνει $y_\infty(x_1, x_2, \dots)$.

Το πρόβλημα έγκειται στην επιλογή της χρονικής στιγμής που θα σταματήσει η παρατήρηση ώστε να μεγιστοποιηθεί η λαμβανόμενη ανταμοιβή. Η επιλογή αυτή μπορεί να γίνει μέσω τυχαίων αποφάσεων. Πιο συγκεκριμένα, με δεδομένο ότι ο παρατηρητής έχει φτάσει στο

στάδιο n , όπου έχουν παρατηρηθεί $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$, μπορεί να επιλεγεί μια πιθανότητα παύσης που να εξαρτάται από τις παρατηρήσεις και συμβολίζεται με $\varphi_n(x_1, \dots, x_n)$. Ένας τυχαίος κανόνας παύσης αποτελείται από την ακολουθία τέτοιων πιθανοτήτων παύσης, δηλαδή

$$\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_0, \varphi_1(x_1), \varphi_2(x_1, x_2), \dots) \quad (4.1)$$

όπου για όλα τα n και x_1, \dots, x_n ισχύει $0 \leq \varphi_n(x_1, \dots, x_n) \leq 1$. Ο κανόνας παύσης δε θεωρείται τυχαίος όταν κάθε μια από τις συναρτήσεις $\varphi_n(x_1, \dots, x_n)$ είναι 0 ή 1.

Επομένως, η συνάρτηση φ_0 αντιπροσωπεύει την πιθανότητα να μη γίνει καμία παρατήρηση. Αφού έχει γίνει η πρώτη παρατήρηση $X_1 = x_1$, η συνάρτηση $\varphi_1(x_1)$ αντιπροσωπεύει την πιθανότητα να σταματήσει η διαδικασία παρατήρησης ακριβώς μετά την πρώτη παρατήρηση και ούτω καθεξής. Ο κανόνας παύσης $\boldsymbol{\varphi}$ και η ακολουθία των παρατηρήσεων $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots)$ ορίζουν τη χρονική στιγμή N κατά την οποία σταματάει η παρατήρηση, με $0 \leq N \leq \infty$. Στην περίπτωση που ισχύει $N = \infty$, τότε η παρατήρηση δε σταματάει ποτέ. Ο κανόνας παύσης $\boldsymbol{\varphi}$ μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της τυχαίας χρονικής στιγμής παύσης N όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\varphi_N(X_1, \dots, X_n) = P(N = n | N \geq n, \mathbf{X} = \mathbf{x}), n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.2)$$

Η συνάρτηση μάζας πιθανότητας για το N δεδομένου $\mathbf{X} = \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots)$ συμβολίζεται με $\boldsymbol{\psi} = (\psi_0, \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_\infty)$, όπου

$$\psi_n(x_1, \dots, x_n) = P(N = n | \mathbf{X} = \mathbf{x}), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.3)$$

$$\psi_\infty(x_1, x_2, \dots) = P(N = \infty | \mathbf{X} = \mathbf{x})$$

Η πιθανότητα να μη σταματήσει ποτέ η παρατήρηση με δεδομένες όλες τις παρατηρήσεις είναι $\psi_\infty(x_1, x_2, \dots)$. Η σχέση που συνδέει τον κανόνα παύσης $\boldsymbol{\varphi}$ με τη συνάρτηση μάζας πιθανότητας $\boldsymbol{\psi}$ είναι:

$$\psi_0 = \varphi_0$$

$$\psi_1(x_1) = (1 - \varphi_0) \varphi_1(x_1)$$

⋮

⋮

⋮

$$\psi_n(x_1, \dots, x_n) = \left[\prod_{j=1}^{n-1} (1 - \varphi_j(x_1, \dots, x_j)) \right] \varphi_n(x_1, \dots, x_n) \quad (4.4)$$

⋮

⋮

⋮

$$\psi_\infty(x_1, x_2, \dots) = 1 - \sum_{j=1}^{\infty} \psi_j(x_1, \dots, x_j)$$

Το πρόβλημα της βέλτιστης παύσης ανάγεται στην επιλογή του κανόνα παύσης $\boldsymbol{\varphi}$ ώστε να μεγιστοποιηθεί η προσδοκώμενη ανταμοιβή $V(\boldsymbol{\varphi})$, η οποία ορίζεται ως εξής:

$$V(\boldsymbol{\varphi}) = E y_N(X_1, \dots, X_N) = E \sum_{j=1}^{=\infty} \psi_j(X_1, \dots, X_j) y_j(X_1, \dots, X_j) \quad (4.5)$$

όπου το “ $= \infty$ ” πάνω από το άθροισμα σημαίνει ότι το j μπορεί να λάβει όλες τις τιμές από το 0 ως και το ∞ .

4.3 Παραδείγματα προβλημάτων βέλτιστης παύσης

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα προβλήματα βέλτιστης παύσης με σημαντικές εφαρμογές [13]. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα προβλήματα ανεύρεσης κανόνα παύσης ορίζονται από δύο ακολουθίες: την ακολουθία των παρατηρήσεων X_1, X_2, \dots και την ακολουθία των συναρτήσεων ανταμοιβής $y_0, y_1(x_1), y_2(x_1, x_2), \dots, y_\infty(x_1, x_2, \dots)$. Επομένως, σε κάθε ένα από τα προβλήματα που ακολουθούν ορίζονται ξεκάθαρα οι παρατηρήσεις X_1, X_2, \dots και η από κοινού κατανομή τους, καθώς και η συνάρτηση ανταμοιβής (ή κόστους) $y_n(x_1, \dots, x_n)$ που αντιστοιχεί στην παύση κατά το στάδιο n . Συχνά χρησιμοποιείται ο συμβολισμός $Y_n = y_n(X_1, \dots, X_n)$ που υποδηλώνει την τυχαία ανταμοιβή που λαμβάνεται από την παύση στο στάδιο n .

4.3.1 Το πρόβλημα πώλησης σπιτιού

Έστω ότι υπάρχει ένα σπίτι διαθέσιμο προς πώληση και σε καθημερινή βάση λαμβάνεται μια διαφορετική προσφορά για την αγορά του. Έστω ακόμα ότι X_n είναι το χρηματικό ποσό της προσφοράς που ήρθε τη μέρα n . Παρότι το ύψος κάθε προσφοράς δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων, αλλά ανακοινώνεται την ώρα που καταχωρείται η προσφορά, μπορεί να υποθεθεί ότι οι προσφορές είναι ανεξάρτητες και έχουν την ίδια γνωστή κατανομή. Κάθε προσφορά που παρουσιάζεται έχει ένα κόστος παρατήρησης $c > 0$, το οποίο μπορεί να ερμηνευθεί σαν κόστος ζωής. Για κάθε προσφορά X_n που παρουσιάζεται πρέπει να αποφασιστεί αν θα γίνει αποδεκτή ή αν θα απορριφθεί εν αναμονή μιας μελλοντικής καλύτερης προσφοράς. Προφανώς κάποια στιγμή θα εμφανιστεί μια υψηλότερη από την τρέχουσα προσφορά, αλλά θα πρέπει η διαφορά τους να καλύπτει τα κόστη παρατήρησης που θα έχουν καταβληθεί μέχρι τότε.

Σε ό,τι αφορά την ακολουθία των παρατηρήσεων, οι παρατηρήσεις X_1, X_2, \dots θεωρούνται ανεξάρτητες και ακολουθούν την ίδια γνωστή κατανομή. Επιπλέον, για την ακολουθία των συναρτήσεων ανταμοιβής υπάρχουν δύο περιπτώσεις ανάλογα με το αν υπάρχει η δυνατότητα ανάκλησης και αποδοχής μιας προηγούμενης προσφοράς αφού έχει παρατηρηθεί τουλάχιστον μια επόμενη.

Αν δεν υπάρχει δυνατότητα ανάκλησης προηγούμενων προσφορών, τότε οι συναρτήσεις ανταμοιβής είναι:

$$y_0 = 0$$

$$y_n(x_1, \dots, x_n) = x_n - nc, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$y_\infty(x_1, x_2, \dots) = -\infty$$

Έτσι, αφού έχει αφαιρεθεί το κόστος παρατήρησης για την προσφορά X_n , είτε αυτή γίνεται αποδεκτή, είτε απορρίπτεται και πληρώνεται το κόστος παρατήρησης για την επόμενη προσφορά, δηλαδή την X_{n+1} .

Αντιθέτως, αν υπάρχει δυνατότητα ανάκλησης προηγούμενων προσφορών, οι συναρτήσεις ανταμοιβής διαμορφώνονται ως εξής:

$$y_0 = 0$$

$$y_n(x_1, \dots, x_n) = \max(x_1, \dots, x_n) - nc, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$y_\infty(x_1, x_2, \dots) = -\infty$$

Σε αυτή την περίπτωση, όποτε και αν αποφασιστεί η παύση της διαδικασίας παρατήρησης, επιλέγεται η υψηλότερη προσφορά που έχει εμφανιστεί. Τα προβλήματα με δυνατότητα ανάκλησης εισήχθησαν από τους MacQueen & Miller (1960), Derman & Sacks (1961), Chow & Robbins (1961) και Karlin (1962).

Στη βιβλιογραφία των οικονομικών επιστημών, το πρόβλημα αυτό αναφέρεται ως πρόβλημα ανεύρεσης εργασίας και αποδίδεται στον George Stigler (1961, 1962). Το πρόβλημα ανεύρεσης εργασίας αφορά έναν άνεργο άνθρωπο που αναζητά μια θέση εργασίας. Κάθε αναζήτηση εργασίας κοστίζει μια συγκεκριμένη ποσότητα σε χρόνο και χαμένες απολαβές. Όταν βρεθεί μια διαθέσιμη θέση εργασίας ανακοινώνονται οι εργασιακοί όροι, συμπεριλαμβανομένου και του μισθού. Επομένως, το πρόβλημα είναι πόσες αναζητήσεις πρέπει να κάνει ο υποψήφιος πριν διαλέξει την καλύτερη προσφορά εργασίας που έχει εμφανιστεί.

4.3.2 Το πρόβλημα μεγιστοποίησης μέσου όρου

Έστω ότι γίνεται παρατήρηση διαδοχικών ριψεων ενός δίκαιου νομίσματος. Η παρατήρηση μπορεί να σταματήσει ανά πάσα στιγμή και τότε επιστρέφεται σαν ανταμοιβή ο μέσος όρος των κορόνων που παρατηρήθηκαν. Επομένως, αν στην πρώτη ρίψη έρθει κορόνα θα πρέπει να σταματήσει η παρατήρηση, αφού η ανταμοιβή είναι ίση με 1 και κατ'επέκταση η μεγαλύτερη που θα υπάρξει. Από την άλλη μεριά, ο νόμος των μεγάλων αριθμών επιβάλλει ότι ο μέσος όρος των κορόνων συγκλίνει σχεδόν σίγουρα στο $\frac{1}{2}$, οπότε δεν θα ήταν δυνατή η παύση της

παρατήρησης όταν ο μέσος όρος των κορόνων είναι μικρότερος ή ίσος του $\frac{1}{2}$. Το πρόβλημα εδώ έγκειται στην επιλογή του κανόνα παύσης που θα μεγιστοποιήσει την ανταμοιβή, δηλαδή το μέσο όρο.

Τέτοιου είδους προβλήματα μελετήθηκαν πρώτα από τους Y.S. Chow & H. Robbins (1965), οι οποίοι περιέγραψαν έναν κανόνα παύσης που επιτυγχάνει μέσο όρο μεγαλύτερο από 0,79 στο πρόβλημα που παρουσιάστηκε παραπάνω.

Το πρόβλημα μεγιστοποίησης μέσου όρου μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή ενός κανόνα παύσης ως εξής. Έστω X_1, X_2, \dots ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την ίδια γνωστή κατανομή και έχουν πεπερασμένο μέσο όρο μ . Οι συναρτήσεις ανταμοιβής θα είναι:

$$y_0 = \mu$$

$$y_n(x_1, \dots, x_n) = (x_1 + \dots + x_n)/n, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$y_\infty(x_1, x_2, \dots) = \mu$$

Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αν δε γίνει καμία παρατήρηση η ανταμοιβή που θα επιστραφεί είναι ο μέσος όρος μ . Επιπλέον, αν η παρατήρηση δεν σταματήσει ποτέ, η ανταμοιβή θα είναι $\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{X}_n = \mu$.

4.3.3 Το πρόβλημα του κουλοχέρη (one-armed bandit problem)

Ας υποθέσουμε ότι υπάρχουν δύο διαφορετικές θεραπείες για την αντιμετώπιση μιας ασθένειας. Η κλασική θεραπεία T2 έχει τη γνωστή πιθανότητα επιτυχίας p_0 , ενώ η θεραπεία T1 έχει μια άγνωστη πιθανότητα επιτυχίας p που ακολουθεί γνωστή κατανομή. Συνολικά n ασθενείς θα αντιμετωπισθούν διαδοχικά με μια από τις δύο διαθέσιμες θεραπείες και πρέπει να αποφασιστεί ποια θεραπεία θα χορηγηθεί στον καθένα. Προφανώς, αν ισχύει $p > p_0$ θα πρέπει να χορηγηθεί η θεραπεία T1 σε κάθε ασθενή. Αφού όμως είναι άγνωστη η πιθανότητα επιτυχίας p της θεραπείας T1, πρέπει μέσω της παρατήρησης του ποσοστού επιτυχίας της στους ασθενείς που χορηγήθηκε, να προκύψουν κάποια συμπεράσματα για την τιμή της. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι οι ανταποκρίσεις των ασθενών στην εκάστοτε θεραπεία είναι ανεξάρτητες και άμεσες, καθώς επίσης και ότι η απόφαση για τη θεραπεία που θα χορηγηθεί μπορεί να βασίζεται σε προηγούμενα αποτελέσματα. Αν η θεραπεία T1 φαίνεται καλύτερη από την T2, επειδή έχει θεραπεύσει ένα ποσοστό ασθενών μεγαλύτερο από p_0 , τότε θα πρέπει να συνεχιστεί η θεραπεία των ασθενών με T1. Σκοπός του προβλήματος είναι η θεραπεία όσο το δυνατόν περισσότερων ασθενών και η ανταμοιβή είναι ο αριθμός των ασθενών που θεραπεύτηκαν.

Αυτό το πρόβλημα ονομάζεται το πρόβλημα του κουλοχέρη και το μελέτησαν οι Bradt, Johnson & Karlin (1956). Οι Bradt, Johnson &

Karlin απέδειξαν ότι αν κριθεί βέλτιστη η θεραπεία T2 σε κάποιο ασθενή, τότε θα είναι βέλτιστο και όλοι οι επόμενοι ασθενείς να ακολουθήσουν τη θεραπεία T2. Γι' αυτό έχει νόημα να οριστούν κανόνες για αν και το πότε θα ξεκινήσει η θεραπεία T2. Κατ' επέκταση, το πρόβλημα του κουλοχέρη εκφράζεται ως ένα πρόβλημα ανεύρεσης κανόνα παύσης, όπου η παύση αντικατοπτρίζει την αρχή της εφαρμογής της θεραπείας T2 στους ασθενείς.

Έστω ότι η θεραπεία T1 χορηγείται στον ασθενή j , τότε θα ισχύει $X_j = 1$ αν ήταν επιτυχής και $X_j = 0$ αν απέτυχε. Επομένως, μπορεί να υποθεθεί ότι δεδομένου p οι παρατηρήσεις X_1, \dots, X_n είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την κατανομή Bernoulli, οπότε ισχύει $P(X_j = 1) = p$. Αν αποφασιστεί να αλλάξει η θεραπεία από T1 σε T2 μετά την παρατήρηση των X_1, \dots, X_k , τότε ο αριθμός των ασθενών που έχουν θεραπευτεί είναι $Y_k = X_1 + \dots + X_k + Z_{k+1} + \dots + Z_n$, όπου το Z_j ισούται με 1 ή 0 ανάλογα με το αν ο ασθενής θεραπεύτηκε ή όχι με τη χορηγία της θεραπείας T2. Επειδή οι τιμές των Z_j δεν είναι γνωστές όταν αποφασίζεται η παύση της χορήγησης της θεραπείας T1, μπορούν να αντικατασταθούν χωρίς βλάβη της γενικότητας από τις προσδοκώμενες τιμές τους με βάση p_0 . Τελικά, η ανταμοιβή από την παύση στο στάδιο k είναι:

$$Y_k = X_1 + \dots + X_k + (n - k)p_0, \quad k = 0, 1, \dots, n$$

Το πρόβλημα είναι η επιλογή κανόνα παύσης με $N \leq n$ ώστε να μεγιστοποιηθεί η ποσότητα $E(Y_N)$. Σε αυτού του είδους τα προβλήματα δεν επιδιώκεται ο υπολογισμός της πιθανότητας p , αλλά η μεγιστοποίηση του αθροίσματος των παρατηρήσεων.

4.3.4 Το πρόβλημα ανίχνευσης σημείου αλλαγής

Αυτό το πρόβλημα έχει μελετηθεί από τον Shiryaev (1963). Έστω ότι παρατηρείται μια ακολουθία ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών X_1, X_2, \dots που ακολουθούν την ίδια γνωστή κατανομή F_0 . Κάποια άγνωστη στους παρατηρητές χρονική στιγμή T , της οποίας η κατανομή θεωρείται γνωστή, η κατανομή των τυχαίων μεταβλητών θα αλλάξει σε μια άλλη γνωστή κατανομή F_1 . Με την αλλαγή αυτή πρέπει να σημάνει ένας συναγερμός όσο πιο σύντομα γίνεται. Αν το κόστος παύσης αφού έχει γίνει η αλλαγή της κατανομής των τυχαίων μεταβλητών είναι ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα στην αλλαγή και το συναγερμό και το κόστος ενός λάθους συναγερμού είναι μια θετική σταθερά c , τότε το συνολικό κόστος είναι:

$$Y_n = cI\{n < T\} + (n - T)I\{n \geq T\}, \quad n = 0, 1, \dots$$

$$Y_\infty = \infty$$

όπου η συνάρτηση $I\{A\}$ είναι η δείκτρια συνάρτηση (indicator function) επί του συνόλου A , δηλαδή η συνάρτηση $I\{n < T\}$ ισούται με 1 αν $n < T$ και με 0 αν $n \geq T$. Εφαρμογές αυτού του προβλήματος περιλαμβάνουν την παρακολούθηση καρδιοπαθών ασθενών για αλλαγή του παλμού τους, παρακολούθηση γραμμών παραγωγής για αλλαγή στην ποιότητα παραγωγής, παρακολούθηση πυραύλων για αλλαγή στην πορεία και άλλες.

4.3.5 Προβλήματα ακολουθιακής στατιστικής απόφασης Bayes (Bayes sequential statistical decision problems)

Τα προβλήματα κανόνα παύσης προέρχονται από τη θεωρία της ακολουθιακής στατιστικής ανάλυσης (sequential statistical analysis), όπως αυτή αναπτύχθηκε από τον Wald (1947). Τα προβλήματα ακολουθιακής στατιστικής απόφασης του Bayes παρέχουν παραδείγματα προβλήματα ανεύρεσης κανόνα παύσης με εξαρτημένες μεταβλητές X_1, X_2, \dots .

Σε αυτού του είδους τα προβλήματα επιλέγεται μια παράμετρος θ από ένα χώρο παραμέτρων θ με βάση μια αρχική κατανομή τ . Στο τέλος, ο παρατηρητής θα πρέπει να επιλέξει μια δράση α από ένα δοσμένο χώρο δράσεων A , η οποία θα επιβάλλει μια ζημιά $L(\theta, \alpha)$. Ωστόσο, ο παρατηρητής μπορεί να παρατηρήσει τις διαδοχικές τυχαίες μεταβλητές X_1, X_2, \dots για όσο επιθυμεί προτού διαλέξει τη δράση α , με κόστος c για κάθε παρατήρηση. Οι τυχαίες μεταβλητές X_1, X_2, \dots θεωρούνται ανεξάρτητες και ακολουθούν την ίδια κατανομή γνωστής μορφής $F(x|\theta)$, όπου το θ είναι γνωστό. Αν ο παρατηρητής επιλέξει να σταματήσει την παρατήρηση μετά τις μεταβλητές X_1, \dots, X_n , τότε θα διαλέξει τη δράση $\alpha \in A$ έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει την προσδοκώμενη ζημιά, η οποία θα είναι:

$$\rho_n(X_1, \dots, X_n) = \inf_{\alpha \in A} E\{L(\theta, \alpha) | X_1, \dots, X_n\}, \quad n = 0, 1, \dots$$

Ο κανόνας επιλογής της δράσης $\alpha \in A$ μετά την παρατήρηση των μεταβλητών X_1, \dots, X_n ονομάζεται κανόνας τελικής απόφασης και μπορεί να επιλεγεί ανεξάρτητα από τον κανόνα παύσης της παρατήρησης. Πέρα από τη ζημιά που προκύπτει από την επιλογή της δράσης $\alpha \in A$, υπάρχει και ένα κόστος παρατήρησης, οπότε το συνολικό κόστος του προβλήματος αν σταματήσει η παρατήρηση στο στάδιο n είναι:

$$y_n(x_1, \dots, x_n) = \rho_n(X_1, \dots, X_n) + nc, \quad n = 0, 1, \dots$$

$$y_\infty(x_1, x_2, \dots) = +\infty$$

4.4 Προβλήματα πεπερασμένου χρονικού ορίζοντα

Ένα πρόβλημα κανόνα παύσης θεωρείται πεπερασμένου χρονικού ορίζοντα αν υπάρχει άνω όριο στον αριθμό των σταδίων κατά τα οποία μπορεί να σταματήσει η παρατήρηση. Αν μετά την παρατήρηση των X_1, \dots, X_T πρέπει να σταματήσει η διαδικασία της παρατήρησης, λέγεται ότι το πρόβλημα έχει χρονικό ορίζοντα T . Ένα πρόβλημα πεπερασμένου χρονικού ορίζοντα μπορεί να προκύψει από τα γενικά προβλήματα κανόνα παύσης που παρουσιάστηκαν προηγουμένως με την παραδοχή $y_{T+1} = \dots = y_\infty = -\infty$.

Θεωρητικά, τέτοιου είδους προβλήματα μπορούν να λυθούν με τη μέθοδο της αντίστροφης επαγωγής (backward induction). Εφόσον πρέπει να σταματήσει η παρατήρηση στο στάδιο T , υπολογίζεται πρώτα ο βέλτιστος κανόνας στο στάδιο $T - 1$. Στη συνέχεια, με δεδομένο τον βέλτιστο κανόνα στο στάδιο $T - 1$, υπολογίζεται ο βέλτιστος κανόνας στο στάδιο $T - 2$ και ούτω καθεξής μέχρι το αρχικό στάδιο, δηλαδή το στάδιο 0. Έστω ότι $V_T^{(T)}(x_1, \dots, x_T) = y_T(x_1, \dots, x_T)$, τότε θα ισχύει επαγωγικά από $j = T - 1$ μέχρι $j = 0$:

$$\begin{aligned} V_j^{(T)}(x_1, \dots, x_j) &= \\ &= \max \left\{ y_j(x_1, \dots, x_j), E \left(V_{j+1}^{(T)}(x_1, \dots, x_j, X_{j+1}) \mid X_1 = x_1, \dots, X_j = x_j \right) \right\} \quad (4.6) \end{aligned}$$

Επαγωγικά, το $V_j^{(T)}(x_1, \dots, x_j)$ αντιπροσωπεύει το μέγιστο κέρδος που μπορεί να επιστραφεί ξεκινώντας από το στάδιο j έχοντας παρατηρήσει $X_1 = x_1, \dots, X_j = x_j$. Στο στάδιο j , γίνεται σύγκριση του κέρδους $y_j(x_1, \dots, x_j)$ σε περίπτωση παύσης με το προσδοκώμενο κέρδος που μπορεί να επιστραφεί με χρήση των βέλτιστων κανόνων για τα στάδια $j + 1$ μέχρι T , το οποίο για το στάδιο j είναι $E(V_{j+1}^{(T)}(x_1, \dots, x_j, X_{j+1}) \mid X_1 = x_1, \dots, X_j = x_j)$. Το μέγιστο κέρδος επομένως, είναι η μεγαλύτερη από αυτές τις δύο ποσότητες. Η παύση θεωρείται βέλτιστη στο στάδιο j αν ισχύει $V_j^{(T)}(x_1, \dots, x_j) = y_j(x_1, \dots, x_j)$, ενώ σε αντίθετη περίπτωση συμφέρει η συνέχιση της παρατήρησης.

4.5 Το πρόβλημα της γραμματέως

Το πιο διάσημο από τα προβλήματα ανεύρεσης κανόνα παύσης με πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα είναι το πρόβλημα της γραμματέως. Υπάρχει, όπως είναι αναμενόμενο, μεγάλη βιβλιογραφία που ασχολείται με το πρόβλημα της γραμματέως αλλά και με διάφορες παραλλαγές του.

Η προέλευση του προβλήματος είναι ασαφής. Οι Gilbert & Mosteller (1966) αναφέρουν ότι ο A. Gleason (1960) έθεσε πρώτος το πρόβλημα, αφού του το είχε μεταφέρει κάποιος άλλος. Η πρώτη

δημοσιευμένη λύση του κλασικού προβλήματος της γραμματέως ανήκει στον D.V. Lindley (1961) [18].

Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί τόσο το κλασικό πρόβλημα της γραμματέως και η λύση του, όσο και διάφορες παραλλαγές του.

4.5.1 Το κλασικό πρόβλημα της γραμματέως

Σύμφωνα με το κλασικό πρόβλημα της γραμματέως ([13], [15]) πρόκειται να παρουσιαστούν διαδοχικά n διαφορετικά αντικείμενα με τυχαία σειρά και με όλους τους $n!$ διαφορετικούς συνδυασμούς να είναι ισοπίθανοι. Ο παρατηρητής μπορεί να αξιολογεί και να ταξινομεί τα αντικείμενα που του έχουν παρουσιαστεί μέχρι στιγμής. Μετά την παρουσίαση κάθε αντικειμένου, ο παρατηρητής μπορεί είτε να το επιλέξει, σταματώντας έτσι τη διαδικασία παρατήρησης, είτε να το απορρίψει, οπότε και παρουσιάζεται το επόμενο αντικείμενο. Φυσικά, αν παρουσιαστεί το τελευταίο αντικείμενο ο παρατηρητής είναι υποχρεωμένος να το επιλέξει.

Σκοπός του παρατηρητή είναι να μεγιστοποιήσει την πιθανότητα να είναι το αντικείμενο που επέλεξε το καλύτερο από τα n διαθέσιμα. Εφόσον ο παρατηρητής δεν μπορεί ποτέ να γυρίσει πίσω και να επιλέξει ένα αντικείμενο που έχει παρουσιαστεί στο παρελθόν και αποδεικνύεται το καλύτερο, πρέπει να ισορροπήσει μεταξύ του κινδύνου να σταματήσει την παρατήρηση νωρίς επιλέγοντας ένα αντικείμενο που δεν είναι τόσο επιθυμητό, ενώ ένα καλύτερο αντικείμενο θα μπορούσε να εμφανιστεί στη συνέχεια, και του κινδύνου να περιμένει πολύ συνειδητοποιώντας ότι το καλύτερο αντικείμενο έχει απορριφθεί πιο πριν.

Προφανώς, το όνομα του προβλήματος προέρχεται από την εφαρμογή του στην επιλογή του καταλληλότερου υποψήφιου για μια θέση εργασίας. Παρόλα αυτά, στη βιβλιογραφία παρουσιάζεται το ίδιο πρόβλημα σε διαφορετικές εφαρμογές, όπως το πρόβλημα του γάμου, του διαγωνισμού ομορφιάς, της προίκας και άλλα.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν δύο λύσεις του κλασικού προβλήματος της γραμματέως. Σύμφωνα με την πρώτη λύση, κάθε στάδιο της διαδικασίας παρατήρησης μπορεί να περιγραφεί από το ζεύγος αριθμών (r, s) , όπου r είναι ο αριθμός των αντικειμένων που έχουν παρουσιαστεί μέχρι στιγμής και s είναι η κατάταξη του τελευταίου αντικειμένου που παρουσιάστηκε συγκριτικά με αυτά που έχουν προηγηθεί. Αν $s \neq 1$ δεν υπάρχει λόγος να επιλεγεί το r -οστό αντικείμενο, αφού δε θα είναι το καλύτερο, ενώ αν $s = 1$ το r -οστό αντικείμενο καθίσταται υποψήφιο προς επιλογή. Η πιθανότητα το r -οστό αντικείμενο να είναι όντως το καλύτερο ανάμεσα στα n διαφορετικά αντικείμενα είναι $\frac{r}{n}$. Μετά την παρουσίαση του επόμενου αντικειμένου θα ισχύει $(r + 1, s')$ με το s' να μπορεί ισοπίθανα να λάβει μία εκ των τιμών $1, 2, \dots, r + 1$. Έστω $V(r, s)$ η μέγιστη προσδοκώμενη πιθανότητα επιλογής του βέλτιστου αντικειμένου στο στάδιο (r, s) , τότε οι αρχές του δυναμικού προγραμματισμού υποδεικνύουν τις εξής εξισώσεις:

$$V(r, 1) = \max \left\{ \frac{r}{n}, \frac{1}{r+1} \sum_{s'=1}^{r+1} V(r+1, s') \right\} \quad (4.7)$$

$$V(r, s) = \frac{1}{r+1} \sum_{s'=1}^{r+1} V(r+1, s'), \quad s = 2, 3, \dots, r \quad (4.8)$$

όπου $V(n, s) = 1$ αν $s = 1$ και $V(n, s) = 0$ σε άλλη περίπτωση. Ο Lindley (1961) έλυσε τις παραπάνω εξισώσεις με αντίστροφη αναδρομή (backward recursion) για $r = n, n-1, \dots, 1$. Ορίζεται η βοηθητική μεταβλητή α_r :

$$\alpha_r = \frac{1}{r} + \frac{1}{r+1} + \dots + \frac{1}{n-1}$$

Η βέλτιστη επιλογή στο στάδιο $(r, 1)$ είναι να σταματήσει η παρατήρηση αν $\alpha_r < 1$ και να συνεχίσει αν $\alpha_r > 1$. Κατ' επέκταση, αν r^* είναι η ακέραια τιμή r για την οποία ισχύει $\alpha_{r-1} \geq 1 > \alpha_r$, τότε η βέλτιστη πολιτική είναι να απορριφθούν τα πρώτα $r^* - 1$ αντικείμενα και να επιλεγεί το πρώτο αντικείμενο από εκεί και μετά που θα είναι καλύτερο από όλα τα προηγούμενα. Η πιθανότητα επιτυχίας, δηλαδή επιλογής του καλύτερου αντικειμένου ανάμεσα στα n , χρησιμοποιώντας αυτή τη μεθοδολογία είναι $\frac{(r^*-1)\alpha_{r^*-1}}{n}$. Για $n \rightarrow \infty$, τόσο η πιθανότητα επιτυχίας όσο και η ποσότητα $\frac{r^*}{n}$ τείνουν στο $e^{-1} = 0,368$.

Μια εναλλακτική λύση στηρίζεται σε ένα διαφορετικό εργαλείο. Ο E.B. Dynkin (1963) [12] αντί να χρησιμοποιήσει άμεσες αλγεβρικές μεθόδους, στηρίχτηκε στις αλυσίδες Markov. Πιο συγκεκριμένα, τα στάδια $r(0) = 1, r(1), r(2), \dots$ κατά τα οποία παρουσιάζονται αντικείμενα που θεωρούνται υποψήφια προς επιλογή, δηλαδή ισχύει $s = 1$ για αυτά, δημιουργούν μια αλυσίδα Markov. Αυτό συμβαίνει διότι η πιθανότητα $P(r(i+1) = l | r(0) = 1, r(1) = a, \dots, r(i) = k)$ το l -οστό αντικείμενο που θα παρουσιαστεί να είναι καλύτερο από το k -οστό και ταυτόχρονα τα αντικείμενα $k+1, k+2, \dots, l-1$ να μην είναι καλύτερα από το k -οστό, δεν εξαρτάται από τα στάδια $r(0), \dots, r(i-1)$. Επομένως, η παραπάνω πιθανότητα γίνεται:

$$P_{kl} = P(r(i+1) = l | r(i) = k) = \frac{P(r(i) = k \text{ και } r(i+1) = l)}{P(r(i) = k)} = \frac{1/l(l-1)}{1/k}$$

όπου $1 \leq k < l \leq n$. Αν σταματήσει η παρατήρηση στο στάδιο $r(i) = k$, η πιθανότητα επιτυχίας είναι $\frac{k}{n}$, ενώ αν συνεχιστεί μέχρι το στάδιο $r(i+1)$ και σταματήσει εκεί, η πιθανότητα επιτυχίας είναι:

$$\sum_{l=k+1}^n P_{kl} \frac{l}{n} = \frac{k}{n} \alpha_k$$

Ο κανόνας του “ενός βήματος μπροστά” (one-step-ahead rule) συγκρίνει τις παραπάνω πιθανότητες και αποτελεί τη βέλτιστη πολιτική, εφόσον πληρούνται οι προϋποθέσεις μονοτονίας των Chow, Robbins & Siegmund (1971) [9].

4.5.2 Ελαχιστοποίηση προσδοκώμενης κατάταξης του επιλεγμένου αντικειμένου

Η περίπτωση του κλασικού προβλήματος που μελετήθηκε παραπάνω έχει σαν στόχο τη μεγιστοποίηση της πιθανότητας επιλογής του καλύτερου αντικειμένου, το οποίο σημαίνει ότι η συνάρτηση χρησιμότητας παίρνει την τιμή 1 αν όντως επιλέχθηκε το καλύτερο αντικείμενο και την τιμή 0 σε κάθε άλλη περίπτωση. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι δεν είναι χρήσιμο στον παρατηρητή τίποτα άλλο πέρα από το καλύτερο αντικείμενο.

Μια πιο ρεαλιστική περίπτωση συνάρτησης χρησιμότητας λαμβάνει την τιμή $n - i$ αν το αντικείμενο που επιλέχθηκε είναι το i -οστό καλύτερο σε σειρά προτίμησης. Σε αυτή την περίπτωση, η μεγιστοποίηση της προσδοκώμενης χρησιμότητας αντιστοιχεί στην ελαχιστοποίηση της προσδοκώμενης κατάταξης του αντικειμένου που επιλέχθηκε. Αν ο παρατηρητής αποφασίσει να σταματήσει στο στάδιο (r, s) και επιλέξει το τρέχον αντικείμενο που είναι το s -οστό καλύτερο ανάμεσα στα πρώτα r , τότε η πιθανότητα η τελική κατάταξη του επιλεγμένου αντικειμένου να είναι i είναι:

$$P_{i,n}(r, s) = \frac{\binom{i-1}{s-1} \binom{n-i}{r-s}}{\binom{n}{r}}, \quad i = s, s+1, \dots, n+s-r \quad (4.9)$$

Έτσι, η προσδοκώμενη χρησιμότητα είναι:

$$U(r, s) = \sum_{i=s}^{n+s-r} (n-i) P_{i,n}(r, s) = n - \frac{n+1}{r+1} s \quad (4.10)$$

Οι εξισώσεις δυναμικού προγραμματισμού (4.7) και (4.8) γίνονται με βάση τα παραπάνω:

$$V(r, s) = \max \left\{ U(r, s), \frac{1}{r+1} \sum_{s'=1}^{r+1} V(r+1, s') \right\} \quad (4.11)$$

$$V(n, s) = n - s \quad (4.12)$$

Εφόσον ο πρώτος όρος στην εξίσωση (4.11) είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του s και ο δεύτερος είναι ανεξάρτητος του s , τότε η βέλτιστη πολιτική ακολουθεί την εξής λογική: για κάθε r επιλέγεται το τελευταίο αντικείμενο που έχει παρουσιαστεί αν για την τρέχουσα κατάταξη του ισχύει $s \leq s^*(r)$ και απορρίπτεται αν $s > s^*(r)$. Το $s^*(r)$ υπολογίζεται μέσω μιας εξίσωσης αναδρομής (recurrence equation) που σχημάτισε ο Lindley (1961) [28].

4.5.3 Παραλλαγές του κλασικού προβλήματος της γραμματέως

Υπάρχει πολύ μεγάλη βιβλιογραφία που ασχολείται με διάφορες παραλλαγές του κλασικού προβλήματος της γραμματέως. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρχει κάποια πιθανότητα q το επιλεγμένο αντικείμενο να μην είναι διαθέσιμο. Επίσης, στο πρόβλημα του γάμου μπορεί να είναι συμφερότερο να μην παντρευτεί ο παρατηρητής από το να επιλέξει τον λάθος άνθρωπο.

Τα προβλήματα στα οποία είναι εντελώς άγνωστη η κατανομή των τυχαίων μεταβλητών X_1, X_2, \dots ονομάζονται προβλήματα καμίας πληροφορίας (no-information problems), όπως είναι και το κλασικό πρόβλημα της γραμματέως, ενώ αυτά που οι τυχαίες μεταβλητές X_1, X_2, \dots είναι ανεξάρτητες και ακολουθούν την ίδια γνωστή κατανομή λέγονται προβλήματα πλήρους πληροφορίας (full-information problems), αφού ο παρατηρητής γνωρίζει σε κάθε στάδιο τα μέγιστα για το επόμενο αντικείμενο. Υπάρχουν, τέλος, και τα προβλήματα μερικής πληροφορίας (partial-information problems), τα οποία ακολουθούν μια μέση οδό, όπου η κατανομή που ακολουθούν οι τυχαίες μεταβλητές X_1, X_2, \dots είναι γνωστής μορφής, αλλά με κάποιες άγνωστες παραμέτρους. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες παραλλαγές του κλασικού προβλήματος με τις λύσεις τους.

4.5.3.1 Αβέβαιη διαθεσιμότητα και ανάκληση προηγούμενων αντικειμένων

Ο Smith (1975) [25] εισήγαγε το ενδεχόμενο το επιλεγμένο αντικείμενο να μην είναι διαθέσιμο, οπότε και ο παρατηρητής θα πρέπει να το προσπεράσει και να συνεχίσει με το επόμενο. Ο Yang (1974) [28] έδωσε τη δυνατότητα στον παρατηρητή να μπορεί σε κάθε στάδιο να επιστρέφει σε περασμένα αντικείμενα και να επιχειρεί να τα επιλέξει. Αν το αντικείμενο είναι διαθέσιμο τότε επιλέγεται και σταματάει η παρατήρηση, ενώ αν δεν είναι διαθέσιμο παραμένει σε αυτή την κατάσταση για το υπόλοιπο της παρατήρησης και ο παρατηρητής πρέπει να συνεχίσει την διαδικασία με καινούργιο αντικείμενο.

Αυτές τις δύο δυνατότητες τις συνδύασε ο Petrucelli (1981) [20]. Και σε αυτή την περίπτωση κάθε στάδιο περιγράφεται από το ζεύγος (r, s) με τη διαφορά ότι το s εδώ υποδηλώνει τον αριθμό των αντικειμένων πριν το r -οστό που εμφανίστηκαν σαν καλύτερα. Αν το καλύτερο αντικείμενο

δεν είναι διαθέσιμο, τότε τίθεται $s = \infty$. Είναι προφανές ότι ο παρατηρητής επιδιώκει να επιλέξει το καλύτερο αντικείμενο που έχει εμφανιστεί μέχρι στιγμής. Η πιθανότητα το αντικείμενο να είναι διαθέσιμο είναι $q(s)$, όπου $q(\infty) = 0$ και $q(0) \leq 1$. Η εξίσωση δυναμικού προγραμματισμού και οι συνοριακές συνθήκες είναι:

$$V(r, s) = \max \left\{ \frac{r}{n} q(s) + V(r, \infty)(1 - q(s)), \frac{1}{r+1} V(r+1, 0) + \frac{r}{r+1} V(r+1, s+1) \right\} \quad (4.13)$$

$$V(r, \infty) = \frac{1}{r+1} V(r+1, 0) + \frac{r}{r+1} V(r+1, \infty) \quad (4.14)$$

$$V(n, s) = q(s) \quad (4.15)$$

Στην εξίσωση (4.13) ο πρώτος όρος αντικατοπτρίζει την προσπάθεια αποδοχής του καλύτερου μέχρι στιγμής αντικειμένου και ο δεύτερος την παρατήρηση του επόμενου αντικειμένου.

Ο Petrucelli απέδειξε τρεις γενικές ιδιότητες της βέλτιστης πολιτικής και έδωσε ξεκάθαρες λύσεις για δύο σημαντικές ειδικές περιπτώσεις, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

- Περίπτωση 1^η: Ισχύει $q(0) = q$ και $q(s) = p$ για $s = 1, 2, \dots, n$ με $0 < p < q$. Η βέλτιστη πολιτική εδώ είναι να απορρίψει ο παρατηρητής τα πρώτα $r^* - 1$ αντικείμενα και να δοκιμάσει να επιλέξει από εκεί και μετά κάθε αντικείμενο που εμφανίζεται ως πρώτο στην τρέχουσα κατάταξη. Αν παρουσιάστηκαν και τα n αντικείμενα και το καλύτερο βρισκόταν στα $r^* - 1$ πρώτα, τότε ο παρατηρητής μπορεί να δοκιμάσει να το επιλέξει. Το r^* είναι ο μικρότερος ακέραιος αριθμός r για τον οποίο ισχύει

$$\prod_{k=r}^{n-1} \left(1 + \frac{1-q}{k} \right) \leq \frac{q-p(1-q)}{q^2}$$

Για $n \rightarrow \infty$, η ποσότητα $\frac{r^*}{n}$ τείνει στην τιμή $V = \left(\frac{q^2}{q-p(1-q)} \right)^{(1-q)^{-1}}$ και η μέγιστη πιθανότητα επιτυχίας τείνει στην τιμή $\frac{V\{q-p(1-q)\}}{q}$.

- Περίπτωση 2^η: Ισχύει $q(r) = qp^r$, οπότε τα αντικείμενα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να μην είναι διαθέσιμα όσο πιο μπροστά στην ακολουθία βρίσκονται. Επομένως, ο παρατηρητής δεν έχει την πολυτέλεια να παρατηρήσει όλα τα αντικείμενα και να επιστρέψει στο καλύτερο, εκτός αν η τιμή του p είναι πολύ κοντά στο 1. Η βέλτιστη πολιτική που ακολουθείται σε αυτή την περίπτωση είναι:

- Αν ισχύει $\frac{q}{1-p} < n - 1$, τότε παρουσιάζονται τα πρώτα r^* αντικείμενα και ο παρατηρητής δοκιμάζει να επιλέξει το καλύτερο από αυτά. Αν δεν είναι διαθέσιμο, τότε συνεχίζεται η παρατήρηση και ο παρατηρητής επιχειρεί να δεχτεί από εκεί και μετά κάθε αντικείμενο που εμφανίζεται ως πρώτο στην τρέχουσα κατάταξη.
- Αν ισχύει $\frac{q}{1-p} > n - 1$, τότε παρουσιάζονται τα n αντικείμενα και στη συνέχεια ο παρατηρητής δοκιμάζει να επιλέξει το καλύτερο.

Μια παρόμοια εκδοχή της ανάκλησης περασμένων αντικειμένων παρουσιάστηκε από τους Smith & Deely (1975) [26], σύμφωνα με την οποία καθένα από τα m τελευταία αντικείμενα που παρουσιάστηκαν είναι διαθέσιμο και μπορεί να επιλεγεί. Αν όμως ο παρατηρητής χρησιμοποιήσει την επιλογή της ανάκλησης, τότε η διαδικασία παρατήρησης σταματάει, με αποτέλεσμα την εξαφάνιση του όρου $V(r, \infty)(1 - q(s))$ από την εξίσωση (4.13). Ο παρατηρητής πρέπει να σκεφτεί αν θα σταματήσει όταν $s = m - 1$, όταν δηλαδή το καλύτερο αντικείμενο μέχρι στιγμής πρόκειται να μην είναι διαθέσιμο. Όπως έγινε και στις προηγούμενες πολιτικές, τα πρώτα r^* αντικείμενα πρέπει να απορριφθούν. Δεν είναι δυνατόν να δοθεί μια κλειστή έκφραση για τον υπολογισμό του r^* , αλλά υπάρχει ένας αλγόριθμος που δίνει τόσο το r^* , όσο και τη μέγιστη πιθανότητα επιτυχίας. Αν $\frac{m}{n} = a \geq \frac{1}{2}$, τότε $r^* = m$ και η πιθανότητα επιτυχίας είναι $V(1,1) = 2 - \frac{m}{n} - \alpha_m \rightarrow 2 - a - \log a$ όταν $n \rightarrow \infty$. Επιπλέον, αν το m είναι σταθερό οι ποσότητες $\frac{r^*}{n}$ και $V(1,1)$ τείνουν στο e^{-1} , οπότε δεν υπάρχει κάποιο πλεονέκτημα σε σχέση με το κλασικό πρόβλημα χωρίς ανάκληση.

4.5.3.2 Μειωμένο κέρδος

Οι Rasmussen & Pliska (1976) [22] εισήγαγαν ένα παράγοντα μείωσης d του προσδοκώμενου κέρδους, έτσι ώστε αν σταματήσει η παρατήρηση στο στάδιο $(r, 1)$ να προκύψει κέρδος $d^r \binom{r}{n}$. Με αυτή την αλλαγή στην εξίσωση (4.7), η βέλτιστη πολιτική παραμένει ίδια με αυτή του κλασικού προβλήματος με μόνη διαφορά ότι το r^* τώρα είναι ο μικρότερος ακέραιος r τέτοιος ώστε:

$$\sum_{k=r}^{n-1} \frac{d^{k+1-r}}{k} \leq 1$$

Ο παράγοντας μείωσης d αναγκάζει τον παρατηρητή να σταματήσει νωρίτερα σε σχέση με το κλασικό πρόβλημα και αν το n είναι μεγάλο του δίνει μικρό περιθώριο επιλογής του καλύτερου αντικειμένου.

4.5.3.3 Άγνωστος αριθμός αντικειμένων n με γνωστή κατανομή

Αν το n δεν είναι γνωστό στον παρατηρητή, τότε ελλοχεύει ο επιπλέον κίνδυνος κάθε φορά που απορρίπτει ένα αντικείμενο να είναι το τελευταίο, οπότε και δεν έχει κάποιο κέρδος.

Έστω N ο πραγματικός και άγνωστος προς τον παρατηρητή αριθμός των αντικειμένων, τότε θεωρούνται γνωστές οι πιθανότητες $P_i = P(N = i)$. Επίσης, ισχύει $\pi_k = P(N \geq k) = \sum_{i=k}^{\infty} P_i$. Οι Presman & Sonin (1972) [21] αντιμετώπισαν αυτό το πρόβλημα με την προσέγγιση του Dynkin. Οι πιθανότητες μετάβασης της ενταγμένης αλυσίδας Markov είναι:

$$P(k, l) = \frac{k\pi_l}{l(l-1)\pi_k}, \quad k < l < \infty$$

$$P(k, \infty) = \sum_{i=k}^{\infty} \frac{k}{i} \frac{P_i}{\pi_k}$$

Πρέπει να εισηγηθεί η κατάσταση “ ∞ ” για να καλύψει την περίπτωση $k \leq N < l$. Σε αυτή την περίπτωση, το k -οστό αντικείμενο είναι το καλύτερο και η πιθανότητα να συμβεί αυτό δεδομένου ότι είναι μέχρι στιγμής το καλύτερο, είναι $P(k, \infty)$.

Η πολιτική του “ενός βήματος μπροστά” δεν είναι πλέον η βέλτιστη. Το σύνολο Γ των καταστάσεων k στις οποίες είναι βέλτιστο να σταματήσει η παρατήρηση μπορούν να θεωρηθούν ως μια διαδοχή από “νησάκια” που τα χωρίζει μια θάλασσα από καταστάσεις συνέχισης της παρατήρησης. Η δημιουργία του συνόλου Γ συνδέεται με τους αριθμούς

$$c_k = \sum_{i=k}^{\infty} \left(P_i - \sum_{j=i+1}^{\infty} \frac{P_j}{j} \right) \frac{1}{i} = \sum_{i=k}^{\infty} \frac{d_i}{i}$$

Αν υπάρχει κάποιο k^* τέτοιο ώστε $c_k \geq 0$ για όλα τα $k \geq k^*$, τότε όλες οι καταστάσεις από το k^* ως το ∞ ανήκουν στο σύνολο Γ και η βέλτιστη πολιτική αποτελείται από πεπερασμένο αριθμό από “νησάκια”. Επιπλέον, αν η ακολουθία $\{d_i\}$ αλλάζει πρόσημο από το $-$ στο $+$ N_0 φορές, τότε το σύνολο Γ δεν περιέχει πάνω από N_0 “νησάκια”. Για τις ειδικές περιπτώσεις όπου το N ακολουθεί την ομοιόμορφη, την γεωμετρική ή την Poisson κατανομή, η αλλαγή πρόσημου στην ακολουθία $\{d_i\}$ συμβαίνει ακριβώς μια φορά, οπότε η βέλτιστη πολιτική επιστρέφει στην κλασική της μορφή.

4.5.3.4 Τυχαίες αφίξεις

Άγνωστος μπορεί να θεωρηθεί ο αριθμός των αντικειμένων n και στην περίπτωση που οι χρονικές στιγμές στις οποίες παρουσιάζονται τα αντικείμενα είναι μέρος μιας διαδικασίας Poisson με γνωστό ρυθμό λ και ο παρατηρητής πρέπει να κάνει την επιλογή του πριν από τη γνωστή χρονική στιγμή T . Σε αυτή την περίπτωση, η απόφασή του για κάθε αντικείμενο επηρεάζεται βαρύτερα από τον εναπομείναντα χρόνο t που έχει στην διάθεσή του για να επιλέξει κάποιο επόμενο αντικείμενο.

Οι Cowan & Zabczyk (1978) [10], χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του Dynkin, ορίζουν μια ομογενή διαδικασία Markov $\{X_n\}$ με $X_n = (r, t)$, το οποίο σημαίνει ότι το r -οστό αντικείμενο παρατηρήθηκε τη χρονική στιγμή $T - t$ και είναι ο n -οστός υποψήφιος. Η πολιτική του “ενός βήματος μπροστά” αποτελεί και πάλι τη βέλτιστη πολιτική και υποδεικνύει στον παρατηρητή να σταματήσει στον πρώτο υποψήφιο για τον οποίο ισχύει $\lambda t \leq x(r)$, όπου το $x(r)$ είναι η μοναδική λύση της εξίσωσης:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n! (r+n)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n! (r+n)} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k+r-1}$$

Για την παράμετρο $x(r)$ υπάρχει πίνακας τιμών μέχρι και για $r = 45$.

Ο Stewart (1981) [27] μελετάει ένα διαφορετικό σενάριο · άγνωστος αριθμός N αντικειμένων έχει χρόνους αφίξεων που είναι ανεξάρτητοι και ακολουθούν την εκθετική κατανομή με μέσο όρο $\frac{1}{\lambda}$. Με δεδομένη μια αρχική κατανομή $P_0(n) = P(N = n)$, οι χρόνοι αφίξεως t_1, \dots, t_r των πρώτων r αντικειμένων δίνουν πληροφορίες σχετικά με το N και σχηματίζουν την τρέχουσα κατανομή $P_r(n|t_1, \dots, t_r) = P(N = n|T_1 = t_1, \dots, T_r = t_r)$ μέσω του θεωρήματος Bayes. Αν η αρχική κατανομή είναι ομοιόμορφη για $n = 0, 1, \dots, M$ και $M \rightarrow \infty$, τότε θα ισχύει:

$$P_r(n|t_1, \dots, t_r) = \begin{cases} \binom{n}{r} \{1 - \exp(-\lambda t_r)\}^{r+1} \exp\{-(n-r)\lambda t_r\}, & n \geq r \\ 0, & n < r \end{cases}$$

Κάθε στάδιο της διαδικασίας περιγράφεται από τις παραμέτρους (r, s, t_r) και η εξίσωση του δυναμικού προγραμματισμού γίνεται

$$V(r, s, t_r) = \max \left\{ E_{N|r, t_r} \left(\frac{r}{n} \right), E_{S_{r+1}, T_{r+1}|r, s, t_r} \{V(r+1, s_{r+1}, t_{r+1})\} \right\}$$

αφού η κατάταξη s_{r+1} του $(r+1)$ -οστού αντικειμένου και η χρονική στιγμή t_{r+1} κατά την οποία θα παρουσιαστεί, εξαρτώνται από το N . Παρόλα αυτά, δεν εξαρτώνται από την κατάταξη των r πρώτων αντικειμένων, οπότε ο δεύτερος όρος δεν εξαρτάται από το s . Ο πρώτος όρος είναι $1 - \exp(-\lambda t_r)$ αν $s_r = 1$ και 0 διαφορετικά. Επομένως, η βέλτιστη πολιτική είναι να επιλεγεί το πρώτο αντικείμενο για το οποίο θα

ισχύει $s_r = 1$ και $t_r > \tau^* = \frac{0,4587}{\lambda}$. Εδώ παρατηρείται μια στενή συνάφεια με το κλασικό πρόβλημα, αφού, δοθέντος $N = n$, ο αριθμός των αντικειμένων που θα παρουσιαστούν πριν τη χρονική στιγμή τ^* και κατ' επέκταση θα απορριφθούν, είναι $\frac{n}{e}$ και η πιθανότητα επιτυχίας τείνει στην τιμή $\frac{1}{e}$ καθώς $n \rightarrow \infty$.

4.5.3.5 Επιλογή k αντικειμένων

Ένα διαφορετικό πρόβλημα είναι το πρόβλημα που επιτρέπει την επιλογή k αντικειμένων, με επιτυχημένη επίλυση αν κάποιο από αυτά είναι το καλύτερο αντικείμενο. Ο Sakaguchi (1978) χρησιμοποίησε την προσέγγιση του Dynkin και απέδειξε ότι η πολιτική του “ενός βήματος μπροστά” είναι βέλτιστη. Ορίζουμε την κατάσταση (r, s) που αντιπροσωπεύει την παρατήρηση του r -οστού αντικειμένου που είναι υποψήφιο για επιλογή και τη δυνατότητα του παρατηρητή να επιλέξει ακόμα s αντικείμενα. Επιπλέον, πρέπει να προστεθούν η κατάσταση (∞, s) που υποδηλώνει ότι έχει παρατηρηθεί και το τελευταίο αντικείμενο, το οποίο δεν είναι υποψήφιο για επιλογή, και η κατάσταση $(0, s)$ που υποδηλώνει ότι έχουν γίνει και οι k επιλογές. Στην περίπτωση που ο παρατηρητής επιλέξει το τρέχον αντικείμενο, η πιθανότητα μετάβασης από την κατάσταση (r, s) στην κατάσταση $(j, s - 1)$ είναι $\frac{r}{j(j-1)}$, ενώ προς την κατάσταση $(\infty, s - 1)$ είναι $\frac{r}{n}$. Αντιθέτως, αν ο παρατηρητής απορρίψει το τρέχον αντικείμενο, μεταβαίνει με τις παραπάνω πιθανότητες στις καταστάσεις (j, s) και (∞, s) αντίστοιχα. Η εξίσωση δυναμικού προγραμματισμού είναι

$$V(r, s) = \max \left\{ \frac{r}{n} + \sum_{i=r+1}^n \frac{r}{j(j-1)} V(j, s-1), \sum_{i=r+1}^n \frac{r}{j(j-1)} V(j, s) \right\}$$

και η βέλτιστη πολιτική μπορεί να εκτιμηθεί για $s = 1, 2, \dots$ διαδοχικά. Έτσι, προκύπτει ένα σύνολο αριθμών $r_k^* \leq r_{k-1}^* \leq \dots \leq r_2^* \leq r_1^*$ τέτοιο ώστε ο παρατηρητής να επιλέξει για την $(k - s + 1)$ -οστή επιλογή του τον πρώτο υποψήφιο που θα εμφανιστεί μετά το $r_s^* - 1$ αντικείμενο. Οι Gilbert & Mosteller έχουν δώσει αριθμητικά αποτελέσματα για μέχρι $k = 8$ και έχουν αποδείξει ότι η αποδοχή των πρώτων k υποψήφιων αντικειμένων που εμφανίζονται μετά από το αντικείμενο $r^* - 1$ (με το r^* να έχει επιλεγεί βέλτιστα) έχει πολύ κοντινά αποτελέσματα με την βέλτιστη πολιτική.

4.5.3.6 Επιλογή 2 αντικειμένων, επιτυχία αν είναι τα δύο καλύτερα αντικείμενα

Αυτό το πρόβλημα έχει επιλυθεί από τον Nikolaev (1977) [19] και πιο αναλυτικά από τον Tamaki (1979). Η βέλτιστη πολιτική υποδεικνύει την επιλογή των δύο πρώτων υποψηφίων που θα εμφανιστούν μετά τα πρώτα $r_1^* - 1$ αντικείμενα. Εναλλακτικά, για δεύτερη επιλογή ο παρατηρητής μπορεί να αποδεχτεί το πρώτο αντικείμενο που θα εμφανιστεί με τρέχουσα κατάταξη 2 μετά τα πρώτα $r_2^* - 1$ αντικείμενα. Για $n \rightarrow \infty$, οι ποσότητες $\frac{r_1^*}{n}, \frac{r_2^*}{n}$ τείνουν στις τιμές 0,2291 και 0,6065 αντίστοιχα, οπότε η πιθανότητα επιτυχίας τείνει στην τιμή 0,2254.

Ο Sakaguchi (1979) [24] γενίκευσε αυτό το πρόβλημα, υποθέτοντας ότι κάθε αντικείμενο έχει πιθανότητα q να μην είναι διαθέσιμο αν επιλεγεί, όπως έχει παρουσιαστεί προηγουμένως. Η μορφή της βέλτιστης πολιτικής παραμένει ίδια, αλλά η ποσότητα $\frac{r_1^*}{n}$ τείνει στην τιμή θ που είναι η μοναδική ρίζα μιας πολύπλοκης εξίσωσης του q και η ποσότητα $\frac{r_2^*}{n}$ τείνει στην τιμή $\varphi = q^{1/\{2(1-q)\}}$ για $n \rightarrow \infty$. Η πιθανότητα επιτυχίας τείνει στην τιμή $\frac{\theta}{2-q} (2\varphi^{2-q} - q\theta^{2-q})$.

4.5.3.7 Πεπερασμένη μνήμη

Οι Rubin & Samuels (1977) [23] παρουσίασαν το πρόβλημα όπου ο παρατηρητής μπορεί να θυμάται μόνο ένα από τα αντικείμενα που έχουν παρουσιαστεί. Επομένως, το μόνο που μπορεί να γνωρίζει ο παρατηρητής όταν του παρουσιάζεται ένα αντικείμενο είναι το αν είναι καλύτερο ή χειρότερο από αυτό που θυμάται.

Για κάθε αντικείμενο που παρουσιάζεται, ο παρατηρητής έχει τρεις επιλογές: να το επιλέξει και να σταματήσει η παρατήρηση, να το απορρίψει ή να επιλέξει να το απομνημονεύσει και να ξεχάσει το προηγούμενο που θυμόταν. Η βέλτιστη πολιτική μπορεί να περιγραφεί από μια ακολουθία αποφάσεων $\{W_r/B_r, r = 2, 3, \dots, n-1\}$, όπου τα W_r και B_r συμβολίζουν οποιαδήποτε από τις τρεις επιλογές του παρατηρητή σε περίπτωση που το r -οστό αντικείμενο είναι χειρότερο ή καλύτερο από αυτό που θυμάται αντίστοιχα. Για παράδειγμα, η βέλτιστη πολιτική για το κλασικό πρόβλημα είναι:

$$W_r/B_r = \begin{cases} \text{απόρριψη/απομνημόνευση αντικειμένου,} & r \leq r^* \\ \text{απόρριψη/αποδοχή αντικειμένου,} & r > r^* \end{cases}$$

Για την ελαχιστοποίηση της προσδοκώμενης κατάταξης του αντικειμένου, η βέλτιστη πολιτική είναι της μορφής:

$$W_r/B_r = \begin{cases} \text{απόρριψη/απομνημόνευση αντικειμένου} , & r < a_n \\ \text{απόρριψη/αποδοχή αντικειμένου} , & a_n \leq r < r_n \\ \text{απομνημόνευση/απομνημόνευση αντικειμένου} , & r = r_n \\ W'_{r-r_n}/B'_{r-r_n} , & r > r_n \end{cases}$$

όπου $\{W'_i/B'_i, i = 1, \dots, n - r_n\}$ είναι η βέλτιστη πολιτική για το ίδιο πρόβλημα με $n - r_n + 1$ αντικείμενα. Τα a_n και r_n υπολογίζονται από αναδρομικές εξισώσεις.

4.5.3.8 Παρατήρηση με αντίπαλο

Οι Gilbert & Mosteller (1966) [17] μελέτησαν το κλασικό πρόβλημα όπου ο παρατηρητής παίζει ενάντια σε έναν αντίπαλο, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να επιλέγει τη σειρά παρουσίασης των αντικειμένων με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα επιτυχίας του παρατηρητή.

Αν ο αντίπαλος μπορεί να επιλέξει ελεύθερα τη σειρά παρουσίασης των αντικειμένων, τότε θα πρέπει να επιλέξει τυχαία μια σειρά από το κυκλικό $n \times n$ λατινικό τετράγωνο, αφού έτσι μειώνεται η πιθανότητα επιτυχίας του παρατηρητή στη μικρότερη δυνατή τιμή $\frac{1}{n}$ ανεξάρτητα με τη στρατηγική που θα υιοθετηθεί. Έστω, όμως, ότι ο αντίπαλος μπορεί να επιλέξει μόνο τη θέση του καλύτερου αντικειμένου στη σειρά παρουσίασης και όλα τα υπόλοιπα αντικείμενα μπορούν να βρίσκονται σε μια από τις $(n - 1)!$ ισοπίθανες δυνατές διατάξεις. Αν το καλύτερο αντικείμενο τοποθετηθεί στη θέση r , τότε η στρατηγική αυτή συμβολίζεται με T_r και με T συμβολίζεται η γενικευμένη στρατηγική του αντιπάλου που γίνεται η T_r με πιθανότητα P_r . Επιπρόσθετα, υποθέτουμε ότι ο παρατηρητής μπορεί να χρησιμοποιήσει στρατηγικές της μορφής S_i , όπου απορρίπτει τα i πρώτα αντικείμενα και στη συνέχεια επιλέγει το πρώτο αντικείμενο που θα εμφανιστεί με την καλύτερη τρέχουσα κατάταξη. Έστω S η γενικευμένη στρατηγική του παρατηρητή που γίνεται η S_i με πιθανότητα π_i .

Αν ο παρατηρητής χρησιμοποιήσει τη στρατηγική S_i και ο αντίπαλος την T_r , τότε η πιθανότητα επιτυχίας είναι 0 για $i \geq r$ και $\frac{i}{r-1}$ για $i < r$. Η πιθανότητα επιτυχίας για $i < r$ συμβολίζει το ενδεχόμενο το καλύτερο από τα πρώτα $r - 1$ αντικείμενα να βρίσκεται μέσα στα πρώτα i . Κατ' επέκταση, η πιθανότητα επιτυχίας του παρατηρητή χρησιμοποιώντας τη στρατηγική S_i είναι:

$$P_{observer} = \sum_{r=i+1}^n P_r \frac{i}{r-1}$$

Ο αντίπαλος θα διαλέξει φυσικά με τέτοιο τρόπο την πιθανότητα P_r ώστε να μην έχει διαφορά για κανένα i , οπότε θα ισχύει $P_r = \frac{K}{r}$ και $P_n = K$ με

$K = \left\{1 + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{j}\right\}^{-1}$. Σε αυτή την περίπτωση η πιθανότητα επιτυχίας του παρατηρητή είναι ίση με K .

Ομοίως, αν ο αντίπαλος επιλέξει τη στρατηγική T_r η πιθανότητα επιτυχίας του είναι:

$$P_{opponent} = \sum_{i=0}^{r-1} \pi_i \frac{i}{r-1}$$

Ο παρατηρητής θα διαλέξει φυσικά και αυτός με τέτοιο τρόπο την πιθανότητα π_i ώστε να μην έχει διαφορά για κανένα r , οπότε θα ισχύει $\pi_i = \frac{K}{i}$ και $\pi_0 = K$. Και πάλι η πιθανότητα επιτυχίας είναι ίση με K . Επομένως, αυτή είναι η minimax λύση του προβλήματος των δύο παικτών. Για μεγάλα n η τιμή αυτή είναι ασυμπτωτικά $\{1 + \gamma + \log(n-1)\}^{-1}$, όπου γ είναι η σταθερά του Euler. Επομένως, για $n \rightarrow \infty$ η τιμή τείνει στο 0.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4

- [1] A.R. Abdel-Hamid, J.A. Bather, G.B. Trustrum, "The secretary problem with an unknown number of candidates", *Journal of Applied Probability* 19, 1982.
- [2] R. Bartoszynski, "Some remarks on the secretary problem", *Commentationes Mathematicae Prace Matematycz*, 1976.
- [3] R. Bartoszynski, Z. Govindarajulu, "The secretary problem with interview cost", *Sankhyd*, 1978.
- [4] L. Breiman, "Stopping rule problems", *Applied Combinatorial Mathematics*, Wiley, 1964.
- [5] A. Cayley, "Mathematical questions and their solutions", *Educational Times* 22, 1875.
- [6] W.C. Chen, N. Starr, "Optimal stopping in an urn", *Annals of Probability* 8, 1980.
- [7] Y.S. Chow, H. Robbins, "On optimal stopping rules", *Z. Wahr.* 2, 1963.
- [8] Y.S. Chow, S. Moriguti, H. Robbins, S.M. Samuels, "Optimal selection based on relative rank (the "secretary problem")", *Israel Journal of Mathematics* 2, 1964.
- [9] Y.S. Chow, H. Robbins, D. Siegmund, "Great Expectations: The Theory of Optimal Stopping", Houghton Mifflin Co., 1971.
- [10] R. Cowan, J. Zabczyk, "An optimal selection problem associated with the Poisson process", *Theory of Probability and its Applications* 23, 1978.
- [11] M.H. DeGroot, "Some problems of optimal stopping", *Journal of the Royal Statistical Society B* 30, 1968.
- [12] E.B. Dynkin, "The optimal choice of the stopping moment for a Markov process", *Dokl. Akad. Nauk. SSSR* 150, 1963.
- [13] T.S. Ferguson, "Optimal stopping and applications", Mathematics Department, UCLA.
- [14] A.Q. Frank, S.M. Samuels, "On an optimal stopping problem of Gusein-Zade", *Stochastic Processes and their Applications* 10, 1980.
- [15] P.R. Freeman, "The Secretary Problem and Its Extensions: A Review", *International Statistical Review* 51, 1983.
- [16] J. Gianini, "The secretary problem with random number of individuals", 1976.
- [17] J. Gilbert, F. Mosteller, "Recognizing the maximum of a sequence", *Journal of the American Statistical Association* 61, 1966.
- [18] D.V. Lindley, "Dynamic programming and decision theory", *Applied Statistics* 10, 1961.
- [19] M.L. Nikolaev, "On a generalisation of the best choice problem", *Theory of Probability and its Applications* 22, 1977.
- [20] J.D. Petrucelli, "Best-choice problems involving uncertainty of selection and recall of observations", *Journal of Applied Probability* 18, 1981.

- [21] E.L. Presman, I.M. Sonin, "The best choice problem for a random number of objects", *Theory of Probability and its Applications* 17, 1972.
- [22] W.T. Rasmussen, S.R. Pliska, "Choosing the maximum from a sequence with a discount function", *Applied Mathematics and Optimization* 2, 1976.
- [23] H. Rubin, S.M. Samuels, "The finite memory secretary problem", *Annals of Probability* 5, 1977.
- [24] M. Sakaguchi, "A generalised secretary problem with uncertain employment", *Mathematica Japonica* 23, 1979.
- [25] M.H. Smith, "A secretary problem with uncertain employment", *Journal of Applied Probability* 12, 1975.
- [26] M.H. Smith, J.J. Deely, "A secretary problem with finite memory", *Journal of the American Statistical Association* 70, 1975.
- [27] T.J. Stewart, "The secretary problem with an unknown number of options", *Operations Research* 29, 1981.
- [28] M.C.K. Yang, "Recognising the maximum of a random sequence based on relative rank with backward solicitation", *Journal of Applied Probability* 11, 1974.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ

ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1 Στόχος του αλγορίθμου

Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στα προηγούμενα κεφάλαια, η περιορισμένη μπαταρία των κινητών συσκευών, όπως είναι οι φορητοί υπολογιστές και οι κόμβοι αισθητήρων, είναι ένας βασικός περιοριστικός παράγοντας των δυνατοτήτων τους. Γι' αυτό το λόγο, γίνονται πολλές προσπάθειες βελτίωσης της κατανάλωσης ενέργειας και επομένως της διάρκειας ζωής της συσκευής, τόσο μέσω της βελτίωσης του υλικού, όσο και του λογισμικού.

Δεδομένου ότι η επικοινωνία σε ένα ασύρματο δίκτυο είναι αρκετά δαπανηρή σε ενέργεια, ο προτεινόμενος αλγόριθμος στοχεύει στη μείωση αυτής ακριβώς της ενέργειας που απαιτείται για την επικοινωνία των κόμβων ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Με την καλύτερη χρησιμοποίηση της μπαταρίας τους, οι κόμβοι αυξάνουν τη διάρκεια ζωής τους και συνεπώς τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

Ένας τρόπος εξοικονόμησης της ενέργειας επικοινωνίας των ασύρματων κόμβων αισθητήρων για την περίπτωση ενός single-hop δικτύου, βασίζεται στη μείωση της απόστασης επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων. Εφόσον η ισχύς εκπομπής εξαρτάται από την απόσταση πομπού – δέκτη, με τη μείωση αυτής της απόστασης μειώνεται το επίπεδο ισχύος εκπομπής και κατ' επέκταση η κατανάλωση ενέργειας.

Για την περίπτωση ενός multi-hop δικτύου, όμως, η μείωση της απόστασης επικοινωνίας δεν οδηγεί απαραίτητα σε εξοικονόμηση ενέργειας. Σε τέτοια δίκτυα, η κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται επίσης και από την κατάσταση και την πυκνότητα του δικτύου. Για παράδειγμα, αν το δίκτυο είναι αρκετά αραιό, τότε μια ενδεχόμενη μείωση της φυσικής απόστασης των κόμβων μπορεί να προκαλέσει τη μείωση της απόστασης επικοινωνίας ανάμεσα στους κόμβους.

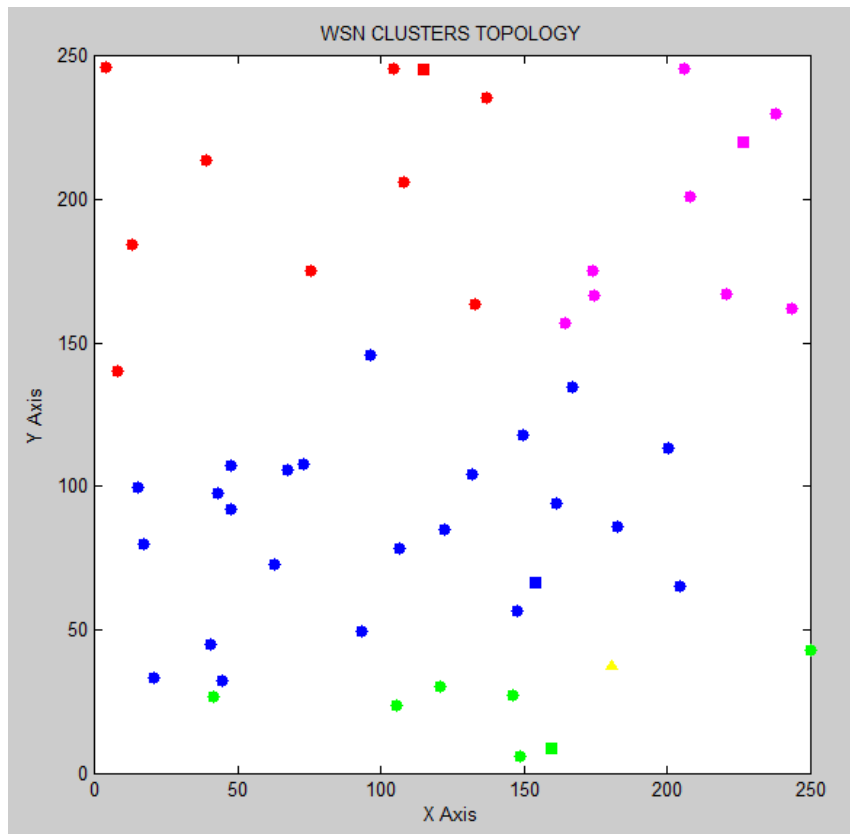
Και στις δύο περιπτώσεις, λοιπόν, τίθεται το ζήτημα πρόβλεψης του πότε δύο κινητοί κόμβοι θα πλησιάσουν, μειώνοντας έτσι την μεταξύ τους απόσταση. Αν μπορούσε κανείς να γνωρίζει πότε θα συμβεί αυτό, τότε θα μπορούσε να αναβάλλει την επικοινωνία τους μέχρι να ελαχιστοποιηθεί η απόσταση επικοινωνίας μέσα στα πλαίσια ανοχής της εφαρμογής. Με βάση τα παραπάνω, στόχος του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι ο χρονοπρογραμματισμός της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων του WSN και η οργάνωση του δικτύου σε συστάδες, έτσι ώστε να επεκταθεί η διάρκεια ζωής του. Πιο συγκεκριμένα αυτό θα επιτευχθεί με την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου που θα χρησιμοποιεί τη θεωρία βέλτιστης παύσης και θα βοηθάει τους κόμβους να αποφασίσουν ποια χρονική στιγμή είναι η βέλτιστη για να επικοινωνήσουν. Η απόφαση αυτή θα

βασίζεται στις απώλειες του καναλιού, οι οποίες προκύπτουν όχι μόνο από την απόσταση επικοινωνίας, αλλά γενικότερα από τις απώλειες διάδοσης και τις διαλείψεις σκίασης. Η εύρεση καλύτερου καναλιού θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος για τη μετάδοση των ίδιων δεδομένων. Επιπρόσθετα, η οργάνωση σε συστάδες πραγματοποιείται ώστε η επικοινωνία να πραγματοποιείται κλιμακωτά σε μικρότερες αποστάσεις. Τέλος, θα αναπτυχθεί πρόγραμμα προσομοίωσης ώστε να επαληθευτεί η θεωρητική ανάλυση του αλγορίθμου.

5.2 Περιγραφή του μοντέλου συστήματος

Το μοντέλο συστήματος που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει ένα WSN που αποτελείται από 51 κόμβους αισθητήρων συνολικά, οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι σε περιοχή προσομοίωσης με διαστάσεις 250 m × 250 m. Από τους 51 κόμβους, ο ένας είναι καταβόθρα που μπορεί να κινείται, και οι υπόλοιποι κόμβοι είναι πηγές σε ακλόνητες θέσεις. Παρότι οι θέσεις των κόμβων του δικτύου είναι τυχαίες, θεωρείται ως υπόθεση ότι οι κόμβοι μπορούν να γνωρίζουν τόσο τη θέση τους, όσο και τη θέση της καταβόθρας. Ο στόχος των κόμβων είναι να μεταδώσουν τα δεδομένα τους εντός ενός ανεκτού διαστήματος k χρονοσχισμών, δηλαδή με μέγιστη καθυστέρηση k χρονοσχισμές. Δεδομένου αυτού του διαστήματος ανοχής, οι κόμβοι μπορούν να αναβάλουν την επικοινωνία τους με την ελπίδα να βρουν καλύτερο κανάλι επικοινωνίας και συνεπώς να εκπέμψουν με λιγότερη ενέργεια τα ίδια δεδομένα.

Οι κόμβοι του δικτύου χρησιμοποιούν ένα σχήμα ομαδοποίησης για την επικοινωνία τους, το οποίο χωρίζει την επικοινωνία του δικτύου σε δύο ροές · η μία ροή περιλαμβάνει την επικοινωνία από τις πηγές κάθε συστάδας προς τον επικεφαλής κόμβο της συστάδας και η άλλη από τους επικεφαλείς κάθε συστάδας προς την καταβόθρα. Θεωρούμε ότι όταν ένας κόμβος εκτελεί χρέη επικεφαλής συστάδας δεν συλλέγει δεδομένα όπως οι άλλες πηγές, αλλά εκπληρώνει μόνο τις λειτουργίες της συνάθροισης και μετάδοσης των δεδομένων που του έστειλαν. Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται αναλυτικά ένα στιγμιότυπο της τοπολογίας του WSN που χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την ανάπτυξη του αλγορίθμου και του προγράμματος προσομοίωσης. Η κάθε συστάδα έχει το δικό της χρώμα και με τετράγωνο σχήμα φαίνονται οι επικεφαλείς της κάθε συστάδας. Επιπλέον, το κίτρινο τρίγωνο απεικονίζει την καταβόθρα.



Σχήμα 5.1: Τοπολογία του WSN

5.3 Εφαρμογή του προβλήματος της γραμματέως

Έστω ότι ένας κόμβος του δικτύου θέλει να επικοινωνήσει με την κινητή καταβόθρα και η επικοινωνία θα πρέπει να πραγματοποιηθεί εντός των επομένων k χρονοσχισμών, δηλαδή υποθέτουμε ένα περιορισμό μέγιστης καθυστέρησης της επικοινωνίας k . Δεδομένου του ιστορικού κίνησης της καταβόθρας και του ιστορικού του καναλιού επικοινωνίας, πρέπει να γίνει μια πρόβλεψη για την μελλοντική κατάσταση του καναλιού επικοινωνίας και να αποφασιστεί αν η αναβολή της επικοινωνίας για k το πολύ χρονοσχισμές θα έχει ως αποτέλεσμα την εύρεση καλύτερου καναλιού επικοινωνίας, οπότε και θα μειωθεί η ενέργεια επικοινωνίας. Αν με βάση το ιστορικό του καναλιού υπάρχει μια αρκετά μεγάλη πιθανότητα να εμφανιστεί μελλοντικά καλύτερο κανάλι, τότε ο εκάστοτε κόμβος αναβάλλει την επικοινωνία μέχρις ότου βρεθεί η κατάλληλη στιγμή μέσα στις επόμενες k το πολύ χρονοσχισμές. Φυσικά ο κόμβος πρέπει να επιλέξει την καλύτερη στιγμή για επικοινωνία με βάση κάποιο κριτήριο. Αν τύχει και δε βρεθεί καλύτερο κανάλι μεταξύ των δύο κόμβων μέσα στις επόμενες $k-1$ χρονοσχισμές, τότε ο κόμβος αναγκάζεται να επικοινωνήσει στην k -οστή χρονοσχισμή χωρίς να περιμένει άλλο. Σε αυτή την περίπτωση, εφόσον οι κόμβοι έχουν χειρότερο κανάλι, θα καταλήξει να καταναλωθεί περισσότερη ενέργεια από τον κόμβο, η οποία εκφράζει την ποινή για τη λάθος πρόβλεψη.

Υπάρχουν πολλά κριτήρια με βάση τα οποία μπορεί ο κόμβος να αποφασίσει πότε θα επικοινωνήσει. Η στρατηγική που ακολουθεί ο κόμβος είναι απλή: εφόσον αναβληθεί η επικοινωνία, εφαρμόζεται το επιλεγμένο κριτήριο απόφασης για κάθε μία από τις επόμενες $k - 1$ χρονοσχισμές μειώνοντας το χρονικό περιθώριο επικοινωνίας κατά ένα σε κάθε βήμα.

Το πρόβλημα επιλογής της κατάλληλης χρονικής στιγμής για επικοινωνία μπορεί να θεωρηθεί ανάλογο του κλασικού προβλήματος της γραμματέως [2] που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Σε αναλογία με το πρόβλημα της γραμματέως, ο κόμβος έχει την επιλογή σε κάθε χρονοσχισμή να επικοινωνήσει ή να αναβάλλει την επικοινωνία του. Παρουσιάζεται λοιπόν στον κόμβο μια πεπερασμένη ακολουθία δυνατών επιλογών και ό,τι και να επιλέξει δεν μπορεί να ανακληθεί στη συνέχεια.

Το πρόβλημα της γραμματέως, όπως φάνηκε και από την ανάλυσή του στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ένα καλά μελετημένο πρόβλημα. Μια από τις λύσεις του δίνεται από τον αλγόριθμο καλύτερης επιλογής. Σύμφωνα με αυτό τον αλγόριθμο, απορρίπτονται οι πρώτες $r - 1$ υποψήφια γραμματείς και στη συνέχεια επιλέγεται η πρώτη που θα εμφανιστεί ως καλύτερη στην τρέχουσα κατάταξη των υποψηφίων που έχουν εξεταστεί μέχρι τώρα. Έχει αποδειχτεί ότι η βέλτιστη λύση του προβλήματος προκύπτει για $r = \frac{1}{e} = 0,368 = 37\%$. Αυτή η λύση είναι γνωστή και ως κανόνας του 37%.

Βασίζομενοι στον κανόνα του 37%, σχηματίζουμε το κριτήριο απόφασης που χρησιμοποιούν οι κόμβοι για να αποφασίσουν ποια χρονική στιγμή θα στείλουν το πακέτο τους. Ο αλγόριθμος που εκτελούν οι κόμβοι ακολουθεί την εξής λογική: Κάθε φορά που ο κόμβος έχει διαθέσιμο πακέτο να στείλει, παρατηρεί το κανάλι και υπολογίζει τις συνολικές απώλειες, δηλαδή τις απώλειες διάδοσης και τις διαλείψεις σκίασης, που προκύπτουν αν επικοινωνήσει εκείνη τη στιγμή. Το πρώτο 37% των χρονικών στιγμών που έχει στη διάθεσή του για να επικοινωνήσει, αποφασίζει πάντα να αναβάλλει την επικοινωνία και διατηρεί ιστορικό των απωλειών που μέτρησε. Από αυτό το ιστορικό προκύπτουν οι ελάχιστες απώλειες L_{min} που παρατηρήθηκαν. Στη συνέχεια, για κάθε χρονική στιγμή που απομένει, ο κόμβος παρατηρεί τις συνολικές απώλειες του καναλιού L και στέλνει το πακέτο την πρώτη χρονική στιγμή για την οποία θα ισχύει $L \leq L_{min}$. Αν δεν εκπληρωθεί αυτή η συνθήκη, ο κόμβος στέλνει αναγκαστικά το πακέτο του την k -οστή χρονική στιγμή. Παρακάτω, παρουσιάζεται αναλυτικότερα ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία των κόμβων του δικτύου.

5.4 Μοντέλο κινητικότητας καταβόθρας

Στο Κεφάλαιο 1.4.3 παρουσιάστηκαν τα διάφορα είδη κινητικότητας που μπορούν να υπάρξουν στα πλαίσια μίας εφαρμογής WSN. Στην προσομοίωση που υλοποιείται εδώ, ο κόμβος καταβόθρα μπορεί να κινείται μέσα στα όρια της περιοχής προσομοίωσης ακολουθώντας το

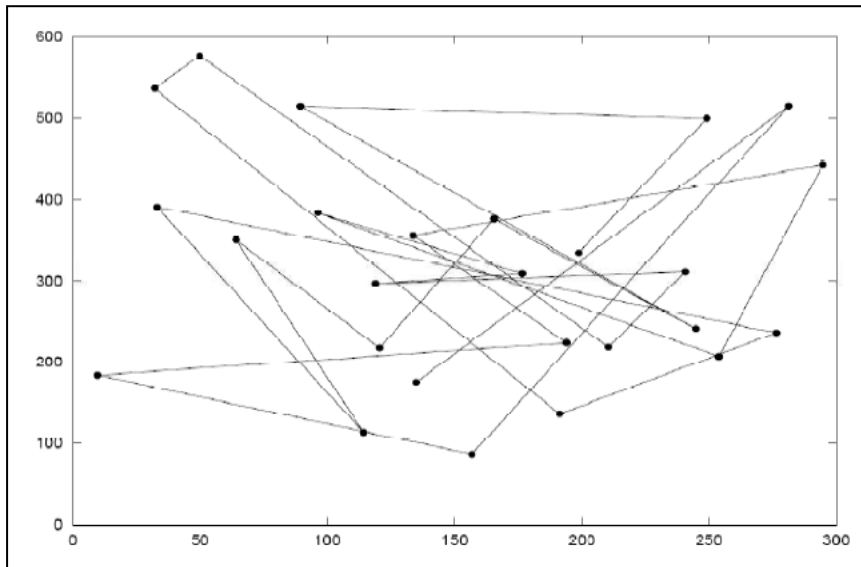
μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων (random waypoint mobility model).

Τα μοντέλα κινητικότητας χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς ad hoc δικτύων και προσπαθούν να αναπαραστήσουν την πραγματική κίνηση των κινητών κόμβων, δηλαδή τον τρόπο μεταβολής της θέσης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσής τους μέσα στο χρόνο. Επομένως, βασική επιδίωξη των μοντέλων κινητικότητας είναι η όσο το δυνατόν ακριβέστερη και ρεαλιστική εξομοίωση της κίνησης που παρουσιάζουν οι πραγματικοί κινητοί κόμβοι. Γι' αυτό το λόγο, τα μοντέλα κινητικότητας πρέπει να περιλαμβάνουν μεταβολές τόσο στην ταχύτητα κίνησης των κόμβων, όσο και στην κατεύθυνσή της.

Το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων υπάγεται στην κατηγορία των τυχαίων ατομικών μοντέλων κινητικότητας. Στα τυχαία μοντέλα κινητικότητας οι κόμβοι επιλέγουν τυχαία και ανεξάρτητα από τους άλλους κόμβους τα χαρακτηριστικά της κίνησής τους. Επιπλέον, κάθε φορά που ο κόμβος καλείται να επιλέξει οποιοδήποτε χαρακτηριστικό της κίνησής του, δεν λαμβάνεται υπ' όψη κάποια από τις προγενέστερες επιλογές του, δηλαδή τα μοντέλα αυτά χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα της έλλειψης μνήμης (memoryless models).

Το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Johnson & Maltz [1] και είναι το πλέον διαδεδομένο μοντέλο κινητικότητας για την αξιολόγηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης των κινητών ad hoc δικτύων (Mobile Ad hoc NETWORKS – MANETS). Σύμφωνα με το μοντέλο, κάθε κόμβος επιλέγει τυχαία ένα προορισμό μέσα στην περιοχή προσομοίωσης και στη συνέχεια οδεύει προς αυτόν με σταθερή ταχύτητα, επίσης επιλεγμένη τυχαία από το ομοιόμορφο διάστημα $[V_{min}, V_{max}]$, όπου V_{min} και V_{max} είναι η ελάχιστη και μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα αντίστοιχα. Τόσο η ταχύτητα, όσο και η κατεύθυνση που επιλέγεται από τον εκάστοτε κόμβο είναι πλήρως ανεξάρτητη από τους υπόλοιπους κόμβους. Όταν ο κόμβος φτάσει στον προορισμό του, σταματάει την κίνησή του και παραμένει στην τρέχουσα θέση του για χρονικό διάστημα T_{pause} , το οποίο ονομάζεται χρόνος παύσης. Φυσικά, αν ισχύει $T_{pause} = 0$, τότε ο κόμβος βρίσκεται σε συνεχή κίνηση. Μετά την εκπνοή του χρόνου παύσης T_{pause} , ο κόμβος επαναλαμβάνει τη διαδικασία από την αρχή επιλέγοντας τον επόμενο προορισμό του. Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται το διάγραμμα κίνησης ενός κόμβου που ακολουθεί το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων.

Οι παράμετροι V_{min} , V_{max} και T_{pause} καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό, όπως είναι προφανές, τη συμπεριφορά των κόμβων. Αν οι κόμβοι κινούνται με μικρές ταχύτητες και έχουν μεγάλους χρόνους παύσης, η τοπολογία του ad hoc δικτύου γίνεται πολύ σταθερή. Αντιθέτως, αν οι κόμβοι κινούνται με μεγάλες ταχύτητες και οι χρόνοι παύσης είναι σύντομοι, η τοπολογία του δικτύου που προκύπτει είναι έντονα δυναμική. Με τη διαφοροποίηση αυτών των παραμέτρων, και ιδίως της ταχύτητας, δημιουργείται μια μεγάλη ποικιλία σεναρίων κινητικότητας.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα κίνησης κόμβου που ακολουθεί το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων

Το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων είναι σχεδιασμένο να μιμείται την κίνηση των κινητών κόμβων με ένα απλοποιημένο τρόπο. Γι' αυτό το λόγο είναι και ευρέως διαδεδομένο. Παρόλα αυτά, δεν είναι σε θέση να αποτυπώσει επαρκώς ορισμένα χαρακτηριστικά κινητικότητας, όπως για παράδειγμα τη χρονική και χωρική εξάρτηση της ταχύτητας και τους γεωγραφικούς περιορισμούς στην κίνηση. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά αυτά τα προβλήματα:

- Χρονική εξάρτηση ταχύτητας: Λόγω του γεγονότος ότι η ταχύτητα στο μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων είναι μια τυχαία χωρίς μνήμη διαδικασία, παρουσιάζονται συχνά ακραίες συμπεριφορές από τους κινητούς κόμβους, όπως απότομο σταμάτημα της κίνησης, απότομη επιτάχυνση και ξαφνικές στροφές. Αντιθέτως, η ταχύτητα των οχημάτων και των πεζών σε πραγματικά σενάρια κίνησης τείνει να αυξάνεται σταδιακά.
- Χωρική εξάρτηση ταχύτητας: Στο μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων ο κάθε κόμβος κινείται ατομικά, δηλαδή χωρίς να επηρεάζεται από την κίνηση των άλλων κόμβων. Παρόλα αυτά, σε ορισμένες εφαρμογές, όπως στη στρατιωτική επικοινωνία, η κίνηση του κόμβου μπορεί να επηρεάζεται από την κίνηση κάποιου κόμβου – αρχηγού που βρίσκεται στην περιοχή του.
- Γεωγραφικοί περιορισμοί της κίνησης: Στο μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων οι κόμβοι μπορούν να κινούνται ελεύθερα σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής προσομοίωσης, ενώ σε πραγματικές εφαρμογές η κίνηση του κόμβου μπορεί να διακόπτεται από εμπόδια, κτίρια, δρόμους ή αυτοκινητόδρομους.

Στο μοντέλο συστήματος που χρησιμοποιήθηκε θεωρείται κινητός μόνο ο κόμβος καταβόθρα, ο οποίος ακολουθεί το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων, όπως προαναφέρθηκε. Η καταβόθρα μπορεί να κινείται ελεύθερα μέσα στην τετραγωνική περιοχή προσομοίωσης με διαστάσεις 250 m × 250 m και οι παράμετροι του μοντέλου είναι:

- Η ταχύτητα κίνησης της καταβόθρας επιλέγεται τυχαία από το ομοιόμορφο διάστημα [5,10] m/sec.
- Ο χρόνος παύσης επιλέγεται τυχαία από το ομοιόμορφο διάστημα [5,15] sec.

5.5 Ομαδοποίηση σε συστάδες: Τροποποιημένος αλγόριθμος LEACH με ντετερμινιστική επιλογή επικεφαλών

Στο Κεφάλαιο 4.4.3 παρουσιάστηκε ο αλγόριθμος LEACH για την επιλογή των επικεφαλών κόμβων των συστάδων. Αν μελετηθεί ένας μεμονωμένος γύρος του LEACH, καθίσταται σαφές ότι η στοχαστική επιλογή των επικεφαλών δεν οδηγεί απαραίτητα σε ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της μεταφοράς δεδομένων για ένα δοσμένο σύνολο κόμβων. Αυτό συμβαίνει διότι μπορεί όλοι οι επικεφαλές να βρίσκονται στα όρια της συστάδας ή ακόμα να είναι γειτονικοί κόμβοι, οπότε οι υπόλοιποι κόμβοι θα πρέπει να καλύψουν μεγάλη απόσταση για να επικοινωνήσουν μαζί τους. Ωστόσο, αν εξεταστούν δύο ή περισσότεροι γύροι μαζί, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι μια ευνοϊκή επιλογή επικεφαλών σε ένα γύρο οδηγεί σε μια λιγότερο ευνοϊκή επιλογή σε επόμενο γύρο. Αυτό συμβαίνει επειδή ο LEACH προσπαθεί να καταναλώσει την κατανάλωση της ενέργειας σε όλους τους κόμβους.

Σε ό,τι αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και κατ' επέκταση την αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου, μπορούν να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα με τη χρήση ενός ντετερμινιστικού αλγορίθμου για την επιλογή των επικεφαλών αντί ενός στοχαστικού. Μια πρώτη αλλαγή που μπορεί να γίνει προς αυτή την κατεύθυνση είναι να λαμβάνει ο αλγόριθμος υπόψη του την εναπομένουσα ενέργεια κάθε κόμβου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση του κατώφλιου $T(n)$, με βάση το οποίο γίνεται η επιλογή των επικεφαλών. Όπως έχει αναφερθεί και κατά την ανάλυση του αλγορίθμου LEACH, το κατώφλι αυτό δίνεται από τον τύπο:

$$T(n) = \frac{P}{1 - P \left(r \bmod \frac{1}{P} \right)}$$

Για να συμπεριλαμβάνεται και ο παράγοντας της διαθέσιμης ενέργειας του κόμβου, πολλαπλασιάζεται το παραπάνω κατώφλι με μια ποσότητα που αντιπροσωπεύει αυτό ακριβώς:

$$T(n)_{new} = \frac{P}{1 - P \left(r \bmod \frac{1}{p} \right)} \frac{E_{n_current}}{E_{n_total}}$$

όπου $E_{n_current}$ είναι η τρέχουσα ενέργεια του κόμβου και E_{n_total} η αρχική του ενέργεια. Παρότι αυτή η αλλαγή του κατώφλιου έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην εξοικονόμηση ενέργειας συγκριτικά με τον κλασικό LEACH, παρουσιάζει ένα μεγάλο μειονέκτημα. Μετά από κάποιους γύρους το δίκτυο κολλάει, ενώ υπάρχουν ακόμα κόμβοι με επαρκή αποθέματα ενέργειας για μετάδοση προς το σταθμό βάσης ή την καταβόθρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μειώνεται η ενέργεια των κόμβων τόσο μικραίνει η τιμή του κατώφλιου και καθίσταται δύσκολη η εκλογή επικεφαλών.

Μια ενδεχόμενη λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η περαιτέρω βελτίωση της συνάρτησης κατώφλιου με την προσθήκη ενός ακόμα παράγοντα, ο οποίος αυξάνει το κατώφλι για τους κόμβους που δεν έχουν εκλεγεί επικεφαλές για τους τελευταίους $1/p$ γύρους [3]. Το κατώφλι λοιπόν γίνεται:

$$T(n)_{new} = \frac{P}{1 - P \left(r \bmod \frac{1}{p} \right)} \left[\frac{E_{n_current}}{E_{n_total}} + \left(r_s \bmod \frac{1}{p} \right) \left(1 - \frac{E_{n_current}}{E_{n_total}} \right) \right] \quad (5.1)$$

όπου r_s είναι ο αριθμός των συνεχόμενων γύρων για τους οποίους ο κόμβος δεν έχει εκλεγεί επικεφαλής. Όταν το r_s πάρει την τιμή $1/p$, τότε το κατώφλι λαμβάνει την τιμή που θα είχε αν δεν λαμβανόταν καθόλου υπόψη η ενέργεια. Με αυτό τον τρόπο, αυξάνεται η πιθανότητα εκλογής του κόμβου λόγω του υψηλότερου κατώφλιου. Προφανώς, το r_s τίθεται ίσο με 0 σε περίπτωση που ο κόμβος εκλεγεί επικεφαλής.

Για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, στον προτεινόμενο αλγόριθμο ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας χρησιμοποιείται αυτή η τροποποίηση του αλγορίθμου ομαδοποίησης LEACH.

5.6 Μοντέλο επικοινωνίας κόμβων και κατανάλωσης ενέργειας

Θεωρούμε ότι η συχνότητα λειτουργίας του δικτύου είναι $f = 2,4$ GHz, συνεπώς το μήκος κύματος είναι $\lambda = \frac{c}{f} = 0,125$ m. Σε ότι αφορά το ασύρματο περιβάλλον, θεωρούμε ότι το δίκτυο βρίσκεται σε περιοχή με συντελεστή απωλειών διάδοσης (path loss factor) $n = 4$.

Σύμφωνα με το μοντέλο διάδοσης, η λαμβανόμενη ισχύς σε απόσταση d από την κεραία εκπομπής είναι $P_r(d) = P_t G_t G_r \frac{1}{L(d)}$ (5.2), όπου P_t είναι η ισχύς εκπομπής, G_t και G_r είναι τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης αντίστοιχα και $L(d)$ είναι οι απώλειες του καναλιού σε απόσταση d από την κεραία εκπομπής. Δεδομένου ότι οι κεραιές των κόμβων είναι ιστροπικές με μήκος $D = \frac{\lambda}{4}$ και μοναδιαία κέρδη

($G_t = G_r = 1$), από τη σχέση (5.2) προκύπτει ότι οι απώλειες καναλιού είναι $L(d) = \frac{P_t}{P_r(d)}$.

Θεωρούμε ότι οι απώλειες διάδοσης ακολουθούν το μοντέλο δύο ακτινών, οπότε δίνονται από τον τύπο:

$$\overline{L(d)} = \frac{d^4}{h_r^2 h_t^2} = d^4 \quad (5.3)$$

όπου $h_r = h_t = 1$ m είναι τα ύψη των κεραιών εκπομπής και λήψης. Επιπλέον, η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων επηρεάζεται από λογαριθμοκανονικές διαλείψεις σκίασης (lognormal shadow fading) και κατ' επέκταση οι συνολικές απώλειες καναλιού δίνονται από τη σχέση:

$$L(d) = \overline{L(d)} 10^{x_\sigma/10} = d^4 10^{x_\sigma/10} \quad (5.4)$$

$$L_{dB}(d) = \overline{L_{dB}(d)} + x_\sigma = 10 \log_{10} d^4 + x_\sigma \quad (5.5)$$

όπου d είναι η απόσταση πομπού – δέκτη και x_σ είναι μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 dB και τυπική απόκλιση $\sigma = 6$ dB [10].

Κάθε λειτουργία που εκτελεί ένας κόμβος τροφοδοτείται από τη μπαταρία του και συνεπώς καταναλώνει ενέργεια. Τέτοιες λειτουργίες είναι η αποστολή και λήψη ενός πακέτου, η συνάθροιση των λαμβανόμενων πακέτων, ο έλεγχος του διαύλου επικοινωνίας και η αποστολή μηνύματος ευρυεκπομπής από τους επικεφαλείς προς όλους τους κόμβους της συστάδας τους. Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια που καταναλώνει ένας κόμβος για την αποστολή και τη λήψη ενός πακέτου δίνεται από τις σχέσεις (5.6) και (5.7) αντίστοιχα:

$$E_T(d) = l_p(e_{elec} + e_{amp} L(d)) \quad (5.6)$$

$$E_R = l_p e_{elec} \quad (5.7)$$

όπου $L(d)$ είναι οι απώλειες του καναλιού σε καθαρό αριθμό που δίνονται από τον τύπο (5.4), $e_{elec} = 50$ nJ/bit είναι η ενέργεια που χρειάζεται για τη λειτουργία των κυκλωμάτων εκπομπής και λήψης, $e_{amp} = 1$ nJ/bit/m⁴ είναι η ενέργεια που διαχέεται από τον ενισχυτή εκπομπής και $l_p = 2.000$ bits είναι το μέγεθος του πακέτου που παράγουν οι κόμβοι. Επιπλέον, η ενέργεια που ξοδεύει ο επικεφαλής συστάδας για τη συνάθροιση των πακέτων που λαμβάνει, είναι:

$$E_{aggr} = n l_p e_{fuse} \quad (5.8)$$

όπου n είναι ο αριθμός των πακέτων που έλαβε και $e_{fuse} = 5$ nJ/bit είναι η ενέργεια συνάθροισης ανά bit. Λόγω του αλγορίθμου που χρησιμοποιούν οι κόμβοι για να αποφασίσουν πότε θα στείλουν το

πακέτο τους και του σχήματος ομαδοποίησης που εφαρμόζεται, χρειάζεται να εκτελούνται δύο επιπλέον εργασίες οι οποίες καταναλώνουν ενέργεια · η αποστολή μηνύματος ευρυεκπομπής από τον επικεφαλή κάθε συστάδας προς τα μέλη της και ο έλεγχος των απωλειών του διαύλου επικοινωνίας, οι οποίες υπολογίζονται από τη λήψη του μηνύματος ευρυεκπομπής από κάθε κόμβο. Οι επικεφαλές σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης στέλνουν μήνυμα ευρυεκπομπής προς τους κόμβους της συστάδας τους και παράλληλα γίνεται ο έλεγχος του διαύλου σε κάθε χρονική στιγμή που ο κόμβος έχει πακέτο να στείλει και πρέπει να εξετάσει τις απώλειες διαδρομής, ώστε να αποφασίσει πότε θα στείλει. Η ενέργεια που καταναλώνουν αυτές οι δύο λειτουργίες δίνονται από τους τύπους (5.9) και (5.10) αντίστοιχα:

$$E_{broadcast} = l_p'(e_{elec} + e_{amp}L_{max}) \quad (5.9)$$

$$E_{channel} = l_p' e_{elec} \quad (5.10)$$

όπου $l_p' = 50$ bits είναι το μέγεθος του πακέτου που χρειάζεται για την εκτέλεση των ενεργειών αυτών και L_{max} είναι οι απώλειες διαδρομής για μετάδοση από τον εκάστοτε επικεφαλή μέχρι τον πιο απομακρυσμένο κόμβο της συστάδας του.

Όλες οι παραπάνω παράμετροι που αφορούν στο μοντέλο επικοινωνίας παρουσιάζονται συγκεντρωμένες στο Σχήμα 5.3.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
f	2,4 GHz
λ	0,125 m
n	4
σ	6 dB
l_p	2.000 bits
l_p'	50 bits
e_{elec}	50 nJ/bit
e_{amp}	1 nJ/bit/m ⁴
e_{fuse}	5 nJ/bit

Σχήμα 5.3: Παράμετροι μοντέλου επικοινωνίας

5.7 Ανάλυση αλγορίθμου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το σχήμα ομαδοποίησης που χρησιμοποιείται χωρίζει την επικοινωνία των κόμβων του δικτύου σε δύο ροές. Στη συνέχεια θα μελετηθεί κάθε ροή επικοινωνίας χωριστά και θα παρουσιαστούν όλες οι ενέργειες που εκτελούν οι κόμβοι κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου.

5.7.1 Επικοινωνία κόμβων – επικεφαλή συστάδας

Οι κόμβοι αισθητήρων του δικτύου έχουν φυσικά σαν σκοπό τους τη συλλογή δεδομένων ανά τακτά χρονικά διαστήματα και την προώθησή τους στην καταβόθρα για επεξεργασία και χρήση. Η προώθηση των πακέτων που δημιουργούν γίνεται μέσω του επικεφαλής της συστάδας τους, δηλαδή οι κόμβοι μεταδίδουν τα πακέτα τους στον επικεφαλής της συστάδας και αυτός με τη σειρά του τα στέλνει στην καταβόθρα.

Οι κόμβοι λειτουργούν σαν πηγές σταθερού ρυθμού δεδομένων (constant bit rate sources, cbr sources), οπότε παράγουν σταθερή τηλεπικοινωνιακή κίνηση ανά k χρονικές στιγμές. Πιο συγκεκριμένα, όλοι οι κόμβοι πηγές του δικτύου δημιουργούν ένα πακέτο μήκους $l_p = 2.000$ bits ανά k χρονικές στιγμές. Επειδή θεωρούμε ότι οι κόμβοι δεν διαθέτουν buffer για την αποθήκευση των πακέτων που παράγουν, πρέπει το κάθε πακέτο να σταλεί στον επικεφαλής της συστάδας πριν γεννηθεί το επόμενο πακέτο. Αυτό σημαίνει, λοιπόν, ότι κάθε κόμβος έχει στη διάθεσή του k χρονικές στιγμές για να στείλει το τρέχον πακέτο.

Ένας κόμβος πηγή ακολουθώντας το γενικό αλγόριθμο που παρουσιάστηκε παραπάνω, προβαίνει στις παρακάτω ενέργειες κάθε φορά που γεννάει νέο πακέτο:

- Αν δεν έχει συμπληρωθεί το 37 % των k χρονοσχισμών που έχει στη διάθεσή του, τότε καταναλώνει ενέργεια $E_{channel}$ προκειμένου να ελέγξει τις συνολικές απώλειες L του διαύλου επικοινωνίας και να αποθηκεύσει την τιμή στο ιστορικό απωλειών.
- Αν έχει συμπληρωθεί το 37 % των k χρονοσχισμών και δεν έχουν ξεπεραστεί οι $k - 1$ χρονοσχισμοί που έχει στη διάθεσή του, τότε καταναλώνει και πάλι ενέργεια $E_{channel}$ προκειμένου να ελέγξει τις συνολικές απώλειες L του διαύλου επικοινωνίας.
 - Αν οι τρέχουσες απώλειες L που μέτρησε ο κόμβος είναι μικρότερες ή ίσες από τις ελάχιστες απώλειες L_{min} που έχουν παρατηρηθεί μέχρι στιγμής, τότε στέλνει το πακέτο καταναλώνοντας από τη μπαταρία του ενέργεια E_T . Αντίστοιχα, ο επικεφαλής κόμβος καταναλώνει από τη μπαταρία του ενέργεια E_R για να παραλάβει το πακέτο.
 - Αν οι τρέχουσες απώλειες L που μέτρησε ο κόμβος είναι μεγαλύτερες από τις ελάχιστες απώλειες L_{min} που έχουν

παρατηρηθεί μέχρι στιγμής, τότε απλώς προσθέτει στο ιστορικό απωλειών του τις τρέχουσες απώλειες που παρατήρησε.

- Αν έχουν συμπληρωθεί οι $k - 1$ χρονοσχισμές που έχει στη διάθεσή του, τότε στέλνει αναγκαστικά το πακέτο καταναλώνοντας από τη μπαταρία του ενέργεια E_T . Αντίστοιχα, ο επικεφαλής κόμβος καταναλώνει και πάλι ενέργεια E_R για να παραλάβει το πακέτο.

Αν σε οποιοδήποτε από τα παραπάνω βήματα τελειώσει η μπαταρία του κόμβου, τότε αυτός σημειώνεται ως νεκρός και δεν ξαναχρησιμοποιείται. Φυσικά για να θεωρήσουμε ότι ένα πακέτο έχει προωθηθεί επιτυχώς στον επικεφαλής της συστάδας θα πρέπει ο κόμβος μετά την αφαίρεση της ενέργειας εκπομπής του πακέτου να μείνει με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός. Σε περίπτωση που απομείνει με μηδενική ενέργεια μετά την αποστολή του πακέτου, τότε θεωρείται μιν ότι το πακέτο στάλθηκε, αλλά επιπλέον σημειώνεται ότι ο κόμβος πέθανε αμέσως μετά.

Αν με την παραλαβή κάποιου πακέτου, τελειώσει η μπαταρία του επικεφαλής της συστάδας, τότε οι κόμβοι καλούνται να στέλνουν τα πακέτα τους από εκείνη τη στιγμή και μέχρι τον επανακαθορισμό των συστάδων απευθείας στην καταβόθρα. Αυτό προϋποθέτει ότι οι κόμβοι είναι σε θέση να υπολογίσουν κάθε φορά που θα χρειαστεί την απόστασή τους από την καταβόθρα, ώστε να μπορούν να υπολογίσουν τις απώλειες διαδρομής.

5.7.2 Επικοινωνία επικεφαλών συστάδας – καταβόθρας

Οι επικεφαλείς κόμβοι του δικτύου έχουν σαν σκοπό τους τη συλλογή των πακέτων από όλους τους κόμβους της συστάδας τους, τη συνάθροισή τους σε ένα πακέτο μήκους $l_p = 2.000$ bits και την προώθηση αυτού του πακέτου στην καταβόθρα.

Όπως ισχύει και για τους κόμβους πηγές, οι επικεφαλείς έχουν στη διάθεσή τους k χρονικές στιγμές μετά τη δημιουργία του συναθροισμένου πακέτου για να το στείλουν στην καταβόθρα. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι κάθε επικεφαλής μπορεί να λαμβάνει πακέτα από τους κόμβους της συστάδας του, ανεξάρτητα με το αν έχει στείλει το συναθροισμένο πακέτο που δημιούργησε από τα προηγούμενα πακέτα που γέννησαν οι κόμβοι πηγές.

Ένας επικεφαλής κόμβος ακολουθώντας το γενικό αλγόριθμο που παρουσιάστηκε παραπάνω, προβαίνει στις παρακάτω ενέργειες κάθε φορά μετά τη συνάθροιση των πακέτων που έλαβε από τους κόμβους της συστάδας του:

- Υπολογίζει την τρέχουσα απόστασή του από την καταβόθρα.
- Αν δεν έχει συμπληρωθεί το 37 % των k χρονοσχισμών που έχει στη διάθεσή του, τότε καταναλώνει ενέργεια $E_{channel}$ προκειμένου

να ελέγξει τις συνολικές απώλειες L του διαύλου επικοινωνίας και να αποθηκεύσει την τιμή στο ιστορικό απωλειών.

- Αν έχει συμπληρωθεί το 37 % των k χρονοσχισμών και δεν έχουν ξεπεραστεί οι $k - 1$ χρονοσχισμές που έχει στη διάθεσή του, τότε καταναλώνει και πάλι ενέργεια $E_{channel}$ προκειμένου να ελέγξει τις συνολικές απώλειες L του διαύλου επικοινωνίας.
 - Αν οι τρέχουσες απώλειες L που μέτρησε ο επικεφαλής κόμβος είναι μικρότερες ή ίσες από τις ελάχιστες απώλειες L_{min} που έχουν παρατηρηθεί μέχρι στιγμής, τότε στέλνει το πακέτο καταναλώνοντας από τη μπαταρία του ενέργεια E_T .
 - Αν οι τρέχουσες απώλειες L που μέτρησε ο επικεφαλής κόμβος είναι μεγαλύτερες από τις ελάχιστες απώλειες L_{min} που έχουν παρατηρηθεί μέχρι στιγμής, τότε απλώς προσθέτει στο ιστορικό απωλειών του τις τρέχουσες απώλειες διάδοσης που παρατήρησε.
- Αν έχουν συμπληρωθεί οι $k - 1$ χρονοσχισμές που έχει στη διάθεσή του, τότε στέλνει αναγκαστικά το πακέτο καταναλώνοντας από τη μπαταρία του ενέργεια E_T .

Επιπλέον, όταν ο επικεφαλής έχει παραλάβει όλα τα τρέχοντα πακέτα της συστάδας του καταναλώνει ενέργεια E_{aggr} προκειμένου να υλοποιήσει τη συνάθροισή τους. Μια ακόμα ενέργεια που εκτελούν οι επικεφαλείς είναι η εξής: σε κάθε γύρο προσομοίωσης καταναλώνουν ενέργεια $E_{broadcast}$, ώστε να βοηθήσουν του κόμβους της συστάδας τους στον υπολογισμό των απωλειών του αντίστοιχου καναλιού επικοινωνίας. Τέλος, σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι η καταβόθρα θεωρούμε ότι έχει αρκετά μεγαλύτερη μπαταρία από τους κόμβους του δικτύου και δεν υπάρχει περίπτωση να πεθάνει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Γι' αυτό και δεν αφαιρείται καθόλου ενέργεια από τη μπαταρία της για τη λήψη πακέτων ή για οποιαδήποτε άλλη λειτουργία της.

5.7.3 Επανακαθορισμός συστάδων

Δεδομένου ότι χρησιμοποιείται σχήμα ομαδοποίησης στον αλγόριθμο, οι κόμβοι ομαδοποιούνται περιοδικά σε συστάδες για να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες επικοινωνίας τους. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην προσομοίωση εφαρμόζεται μια παραλλαγή του αλγορίθμου LEACH με ντετερμινιστική επιλογή επικεφαλών και κατώφλι που δίνεται από τη σχέση (5.1).

Ξεκινώντας, δημιουργείται μια αρχική διάταξη συστάδων η οποία αλλάζει κάθε $2k$ χρονικές στιγμές. Όταν πρέπει να επανακαθοριστούν οι συστάδες του δικτύου, τότε έχουμε ένα μεταβατικό στάδιο ώστε να μπορέσουν οι κόμβοι να δημιουργήσουν νέες συστάδες. Κατά τη

διάρκεια αυτού του μεταβατικού σταδίου, όλοι οι κόμβοι πηγές και οι επικεφαλείς κόμβοι καλούνται να στείλουν άμεσα τυχόν πακέτα που έχουν, χωρίς να καταναλώσουν ενέργεια για τον έλεγχο του διαύλου.

Μετά από κάθε τέτοιο μεταβατικό στάδιο, οι εναπομείναντες κόμβοι του δικτύου ξεκινάνε τη διαδικασία δημιουργίας νέων συστάδων με την εκλογή επικεφαλών κόμβων. Στη συνέχεια, οι κόμβοι αποφασίζουν με βάση την απόστασή τους από τους εκλεγμένους επικεφαλείς, σε ποια συστάδα θέλουν να ανήκουν. Μετά την εγκαθίδρυση των συστάδων, η διαδικασία επικοινωνίας των κόμβων συνεχίζεται σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν παραπάνω.

5.8 Εναλλακτικοί ευρετικοί αλγόριθμοι

Προκειμένου να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν με τη χρήση της θεωρίας βέλτιστης παύσης ως εργαλείο απόφασης για το χρονοπρογραμματισμό της επικοινωνίας σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, εξετάζουμε δύο ακόμα διαφορετικά σενάρια τα οποία βασίζονται σε ευρετικούς αλγόριθμους. Διατηρώντας αμετάβλητη τη διαδικασία ομαδοποίησης που περιγράφηκε παραπάνω, αναπτύσσονται και εφαρμόζονται δύο ακόμα κριτήρια απόφασης για την επιλογή της χρονικής στιγμής κατά την οποία οι κόμβοι θα επικοινωνήσουν, τα οποία αναλύονται στις δύο επόμενες υποενότητες.

5.8.1 Χρονοπρογραμματισμός με τυχαία επιλογή χρονικής στιγμής επικοινωνίας

Το κριτήριο απόφασης που εφαρμόζει ο κάθε κόμβος για να αποφασίσει τη χρονική στιγμή που θα επικοινωνήσει βασίζεται στην τυχαία επιλογή από ένα ομοιόμορφο διάστημα $[t_{min}, t_{max}]$.

Οι κόμβοι λειτουργούν και σε αυτή την περίπτωση σαν πηγές σταθερού ρυθμού δεδομένων, παράγοντας πακέτα μήκους $l_p = 2.000$ bits ανά k χρονικές στιγμές. Όπως και πριν, οι κόμβοι δεν διαθέτουν buffer για την αποθήκευση των πακέτων που παράγουν, οπότε το κάθε πακέτο πρέπει να σταλεί στον επικεφαλή της συστάδας μέσα στις επόμενες k χρονικές στιγμές από τη δημιουργία του. Αυτό σημαίνει ότι το ομοιόμορφο διάστημα από το οποίο επιλέγεται η χρονική στιγμή εκπομπής του πακέτου είναι $[1, k]$ χρονικές στιγμές μετά τη γέννησή του. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κόμβος πηγή προβαίνει στις παρακάτω ενέργειες κάθε φορά που γεννάει νέο πακέτο:

- Επιλέγει από το διάστημα $[1, k]$ τον αριθμό των χρονικών στιγμών που θα πρέπει να περιμένει μέχρι να στείλει το πακέτο.
- Για κάθε χρονική στιγμή που περνάει μέχρι να γεννηθεί το επόμενο πακέτο, ελέγχει αν ήρθε η χρονική στιγμή που έχει επιλέξει για να στείλει το τρέχον πακέτο. Όταν έρθει η χρονική στιγμή να στείλει ο κόμβος το πακέτο του, τότε καταναλώνει από

τη μπαταρία του ενέργεια E_T . Αντίστοιχα, ο επικεφαλής κόμβος που λαμβάνει το πακέτο καταναλώνει από τη μπαταρία του ενέργεια E_R .

Αν η μπαταρία του κόμβου τελειώσει με την εκπομπή κάποιου πακέτου, τότε κατατάσσεται στους νεκρούς κόμβους. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση που ο επικεφαλής πεθάνει με τη λήψη κάποιου πακέτου. Επιπλέον, το ρόλο του νεκρού επικεφαλής αναλαμβάνει η καταβόθρα, στην οποία στέλνονται απευθείας τα υπόλοιπα πακέτα μέχρι τον επανακαθορισμό των συστάδων.

Οι επικεφαλείς κόμβοι του δικτύου, αφού λάβουν τα πακέτα από όλους τους κόμβους της συστάδας τους, καταναλώνουν ενέργεια E_{aggr} για τη συνάθροισή τους σε ένα πακέτο μήκους $l_p = 2.000$ bits. Μετά τη συνάθροιση των πακέτων, κάθε επικεφαλής εκτελεί τις εξής ενέργειες:

- Επιλέγει από το διάστημα $[1, k]$ τον αριθμό των χρονικών στιγμών που θα πρέπει να περιμένει μέχρι να στείλει το πακέτο.
- Για κάθε χρονική στιγμή που περνάει μέχρι να γεννηθεί το επόμενο πακέτο, ελέγχει αν ήρθε η χρονική στιγμή που έχει επιλέξει για να στείλει το τρέχον πακέτο. Όταν έρθει η χρονική στιγμή να στείλει ο επικεφαλής το πακέτο του, τότε καταναλώνει από τη μπαταρία του ενέργεια E_T .

Μια σημαντική διαφορά από τον αλγόριθμο που χρησιμοποιεί τη θεωρία βέλτιστης παύσης είναι ότι εδώ θεωρούμε ότι οι επικεφαλείς αποθηκεύουν σε buffer τα συναθροισμένα πακέτα προς αποστολή. Δηλαδή, όταν δημιουργείται ένα συναθροισμένο πακέτο ενώ δεν έχει σταλεί το προηγούμενο, υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσής του. Σε αυτή την περίπτωση, κατά την επιλογή της χρονικής στιγμής εκπομπής του τελευταίου πακέτου υπάρχει ο επιπλέον περιορισμός να σταλεί μετά από το προηγούμενό του και πριν λήξει φυσικά η διορία των k χρονικών στιγμών από τη δημιουργία του. Τέλος μία άλλη διαφορά είναι ότι δεν χρειάζεται να υπολογίζεται κάθε φορά η ποιότητα των καναλιών και κατ'επέκταση δεν χρειάζεται να καταναλώνονται οι ενέργειες $E_{channel}$ και $E_{broadcast}$.

5.8.2 Χρονοπρογραμματισμός με ντετερμινιστική επιλογή χρονικής στιγμής επικοινωνίας

Σε αυτή την περίπτωση, το κριτήριο απόφασης που εφαρμόζει ο κάθε κόμβος για να αποφασίσει τη χρονική στιγμή που θα επικοινωνήσει είναι ντετερμινιστικό.

Ακριβώς όπως και στην περίπτωση της τυχαίας επιλογής, οι κόμβοι γεννάνε πακέτα μήκους $l_p = 2.000$ bits ανά k χρονικές στιγμές και δεν είναι εφοδιασμένοι με buffer για την αποθήκευση των πακέτων που παράγουν. Σε αντίθεση, όμως, με το προηγούμενο κριτήριο, εδώ οι κόμβοι στέλνουν αναγκαστικά την k -οστή χρονική στιγμή το πακέτο τους

αντί να επιλέγουν τυχαία από ένα ομοιόμορφο διάστημα. Δηλαδή, ο κόμβος περιμένει κάθε φορά να έρθει η k -οστή χρονική στιγμή και καταναλώνοντας ενέργεια E_T το στέλνει στον επικεφαλής.

Από τη μεριά του ο επικεφαλής ξοδεύει ενέργεια E_R για κάθε πακέτο που λαμβάνει. Όταν λάβει όλα τα πακέτα από τους κόμβους της συστάδας του, τότε τα συναθροίζει όπως και στην προηγούμενη περίπτωση με ενεργειακό κόστος E_{aggr} . Από αυτή τη διαδικασία προκύπτει ένα πακέτο μήκους $l_p = 2.000$ bits, το οποίο θα εκπέμψει προς την καταβόθρα k χρονικές στιγμές μετά τη δημιουργία του, σπαταλώντας ενέργεια E_T . Μια σημαντική διαφορά από τον αλγόριθμο που χρησιμοποιεί τη θεωρία βέλτιστης παύσης είναι ότι δεν χρειάζεται να υπολογίζεται κάθε φορά η ποιότητα των καναλιών και κατ' επέκταση δεν χρειάζεται να καταναλώνονται οι ενέργειες $E_{channel}$ και $E_{broadcast}$.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5

- [1] J. Broch, D.A. Maltz, D.B. Johnson, Y.C. Hu, J. Jetcheva, “A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols”, Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom98), ACM, October 1998.
- [2] S. Chakraborty, Y. Dong, D.K.Y. Yau, J.C.S. Lui, “On the Effectiveness of Movement Prediction to Reduce Energy Consumption in Wireless Communication”, IEEE Transactions on Mobile Computing 5, February 2006.
- [3] M.J. Handy, M. Haase, D. Timmermann, “Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-Head Selection”, Institute of Applied Microelectronics and Computer Science, University of Rostock.
- [4] G. Liu, G. Maguire Jr., “A Class of Mobile Motion Prediction Algorithms for Wireless Mobile Computing and Communications”, ACM/Baltzer MONET 1, 1996.
- [5] T. Liu, P. Bahl, I. Chlamtac, “Mobility Modeling, Location Tracking and Trajectory Prediction in Wireless ATM Networks”, IEEE Journal of Selected Areas in Communications 16, August 1998.
- [6] V.D. Park, M.S. Corson, “A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks”, Proceedings of IEEE INFOCOM '97, April 1997.
- [7] W. Su, S.J. Lee, M. Gerla, “Mobility Prediction and Routing in Ad Hoc Wireless Networks”, International Journal of Network Management, 2000.
- [8] D.S. Tan, S. Zhou, J. Ho, J.S. Mehta, H. Tanabe, “Design and Evaluation of an Individually Simulated Mobility Model in Wireless Ad Hoc Networks”, Proceedings of Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation, 2002.
- [9] J.D. Hey, “Search for Rules for Search”, Journal of Economic Behaviour and Organization 3, 1982.
- [10] Α. Κανάτας, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Πάντος, “Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών”, Α. Παπασωτηρίου & ΣΙΑ Ο.Ε., Αθήνα 2008.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΚΑΙ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗΣ

Με βάση όσα παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, αναπτύχθηκαν προγράμματα προσομοιώσεων του προτεινόμενου αλγορίθμου και των εναλλακτικών ευρετικών αλγορίθμων με σκοπό την αξιολόγηση της λειτουργίας και της αποδοτικότητας τους, καθώς και τη μεταξύ τους σύγκριση. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και ο σχολιασμός τους.

6.1 Μετρικές αξιολόγησης

Η αξιολόγηση της διάρκειας ζωής ενός WSN εξαρτάται άμεσα από τις υπηρεσίες που προσφέρει, καθώς και από την εκάστοτε εφαρμογή που υλοποιείται. Γι' αυτό το λόγο, υπάρχουν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις που εκφράζουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

Σε κάποια δίκτυα είναι απαραίτητη η επιβίωση όλων των κόμβων για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, αφού η ποιότητα του δικτύου μειώνεται δραματικά όταν πεθαίνει ο πρώτος κόμβος. Επομένως, σε τέτοιες εφαρμογές μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε πότε πεθαίνει ο πρώτος κόμβος. Η μεταβλητή First Node Dies (FND) μετράει αυτό ακριβώς.

Σε άλλες περιπτώσεις, οι κόμβοι τοποθετούνται αρκετά κοντά και επομένως οι γειτονικοί κόμβοι μπορεί να καταγράφουν τις ίδιες ή παρόμοιες μετρήσεις. Κατ' επέκταση ο θάνατος ενός κόμβου δεν οδηγεί αυτόματα στη μείωση της ποιότητας της προσφερόμενης υπηρεσίας. Για τέτοιου είδους δίκτυα, πιο κατάλληλη μεταβλητή είναι η Half Nodes Die (HND), η οποία μετράει σε πόσο χρόνο έχουν πεθάνει οι μισοί κόμβοι του δικτύου.

Τέλος, η τρίτη μεταβλητή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της διάρκειας ζωής ενός δικτύου είναι η Last Node Dies (LND), η οποία αναφέρεται στο πότε πεθαίνει ο τελευταίος κόμβος του δικτύου και δίνει μια εκτίμηση της συνολικής διάρκειας ζωής του δικτύου. Στην περίπτωση μας που γίνεται χρήση σχήματος ομαδοποίησης δεν έχει σημασία να αναφερόμαστε στον τελευταίο κόμβο, αφού χρειάζονται τουλάχιστον δύο για να υπάρξει συστάδα. Αντί αυτού, θεωρούμε ότι αντίστοιχη ποιότητα δικτύου στη δική μας περίπτωση υπάρχει όταν έχει απομείνει ζωντανό το 20 % των κόμβων. Από εδώ και στο εξής όταν αναφερόμαστε στη μεταβλητή LND θα εννοούμε ότι έχει απομείνει ζωντανό το 20 % των κόμβων του δικτύου.

Μια άλλη παράμετρος που μας ενδιαφέρει είναι ο ρυθμός με τον οποίο πεθαίνουν οι κόμβοι κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, δηλαδή το πώς ελαττώνεται ο αριθμός των ζωντανών κόμβων όσο περνάνε οι γύροι προσομοίωσης. Τέλος θα εξεταστεί και η παράμετρος της μέσης κατανάλωσης ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο, ως μια

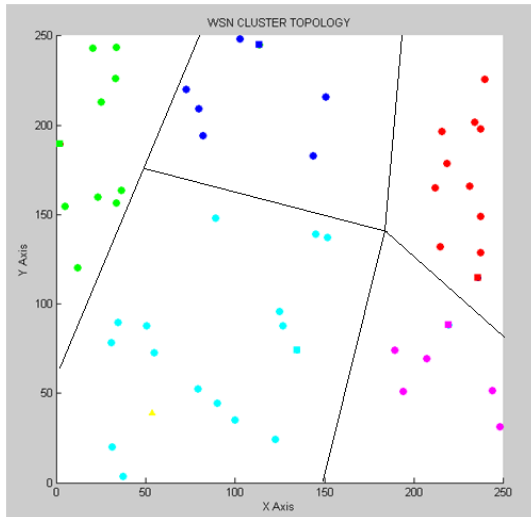
κανονικοποιημένη παράμετρος μέτρησης της καταναλισκόμενης ενέργειας.

6.2 Στιγμιότυπα προσομοίωσης

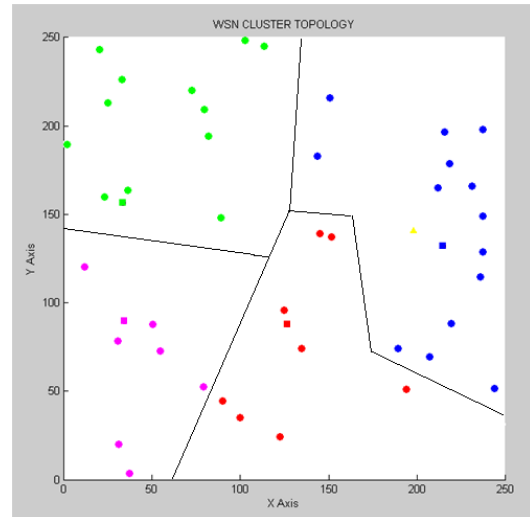
Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, παραθέτουμε ορισμένα στιγμιότυπα της τοπολογίας του δικτύου σε διάφορες χρονικές στιγμές, τα οποία δείχνουν πώς γίνεται η οργάνωσή του σε συστάδες με βάση τους εναπομείναντες κόμβους. Ανακεφαλαιώνοντας, σημειώνουμε τις βασικές παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στα στιγμιότυπα που ακολουθούν:

- Η περιοχή προσομοίωσης έχει διαστάσεις $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$.
- Το δίκτυο αποτελείται από 51 κόμβους, εκ των οποίων ο ένας είναι η καταβόθρα και οι υπόλοιποι είναι κόμβοι πηγές.
- Η καταβόθρα μπορεί να κινείται στην περιοχή προσομοίωσης ακολουθώντας το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων. Η ταχύτητα κίνησής της και ο χρόνος παύσης επιλέγονται τυχαία από τα ομοιόμορφα διαστήματα $[5,10] \text{ m/sec}$ και $[5,15] \text{ sec}$ αντίστοιχα.
- Οι κόμβοι είναι εφοδιασμένοι με μπαταρία 1000 J, ενώ θεωρούμε ότι η καταβόθρα έχει πολύ μεγαλύτερη μπαταρία από τους κόμβους και δεν πεθαίνει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- Οι κόμβοι δημιουργούν πακέτα κάθε $k = 10 \text{ sec}$ και οι συστάδες αλλάζουν κάθε $2k = 20 \text{ sec}$.
- Ο αλγόριθμος ομαδοποίησης που χρησιμοποιείται είναι ο τροποποιημένος LEACH με ντετερμινιστική επιλογή επικεφαλών, του οποίου το κατώφλι δίνεται από τη σχέση (5.1).
- Θέλουμε το δίκτυο να έχει 4 επικεφαλές, οπότε $P = 4/50 = 0,08$.
- Οι παράμετροι του μοντέλου επικοινωνίας των κόμβων φαίνονται στο Σχήμα 5.3.

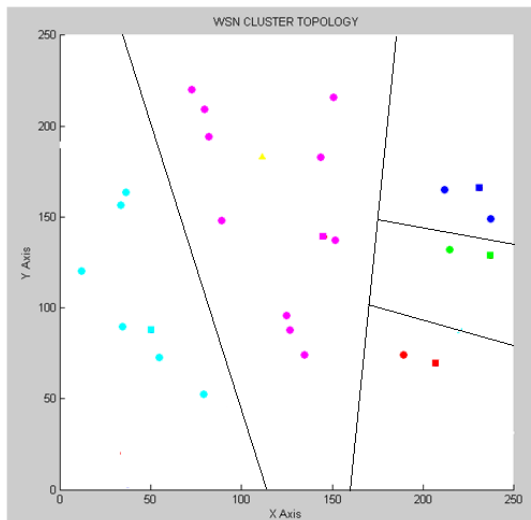
Στα Σχήματα 6.1 – 6.6 φαίνονται ορισμένα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα από όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.



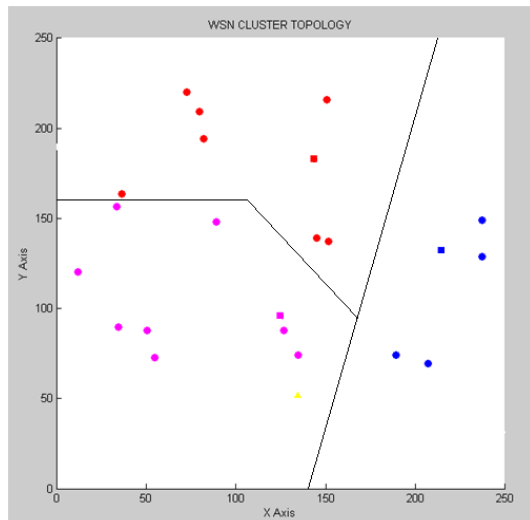
Σχήμα 6.1: Στιγμιότυπο προσομοίωσης 1/6



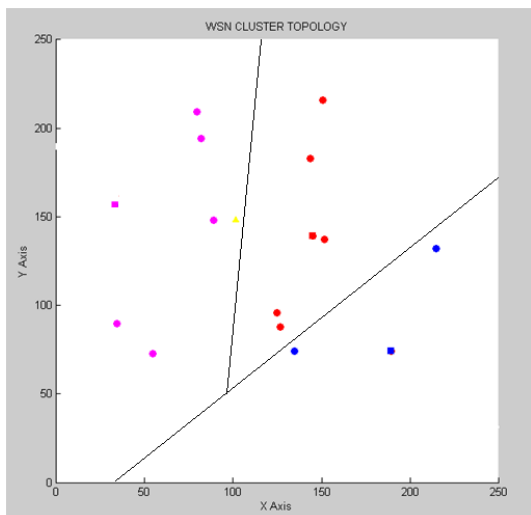
Σχήμα 6.2: Στιγμιότυπο προσομοίωσης 2/6



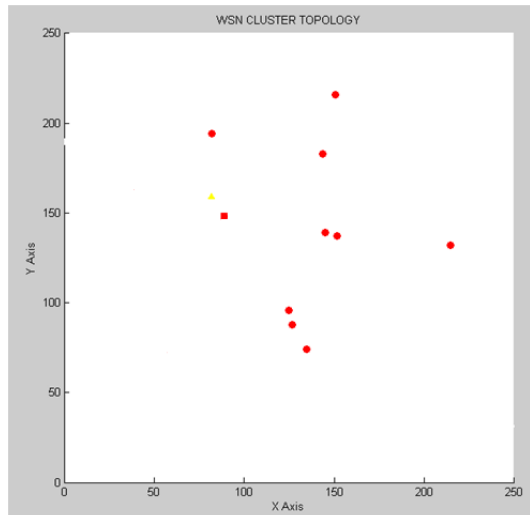
Σχήμα 6.3: Στιγμιότυπο προσομοίωσης 3/6



Σχήμα 6.4: Στιγμιότυπο προσομοίωσης 4/6



Σχήμα 6.5: Στιγμιότυπο προσομοίωσης 5/6



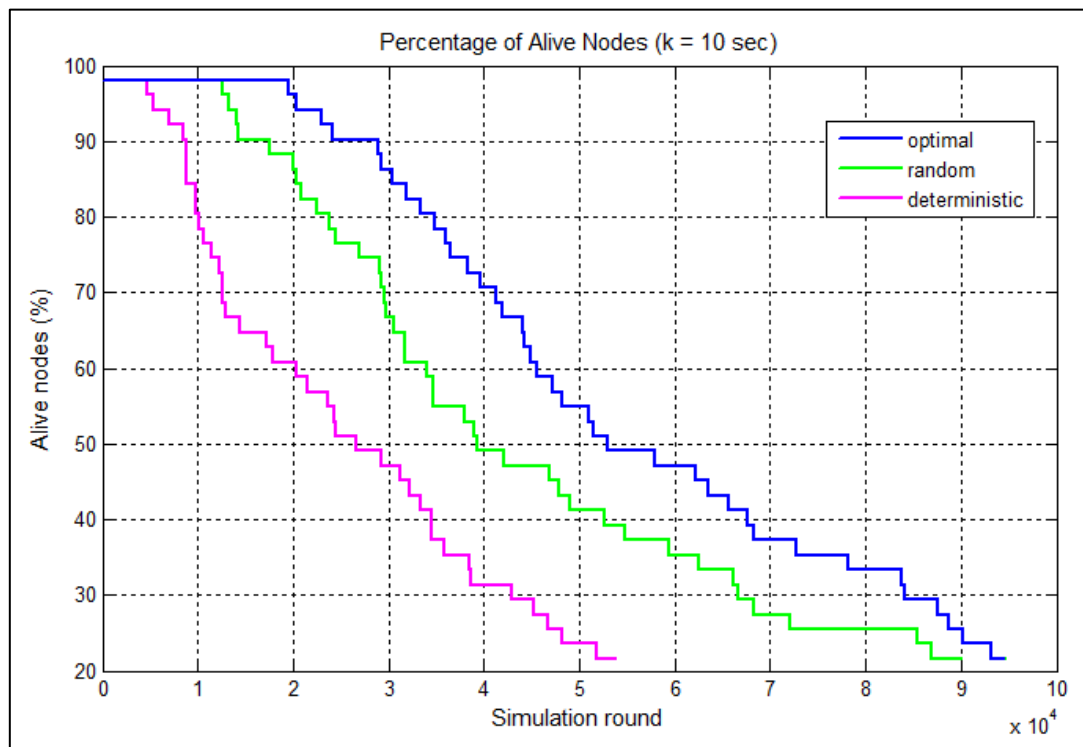
Σχήμα 6.6: Στιγμιότυπο προσομοίωσης 6/6

6.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

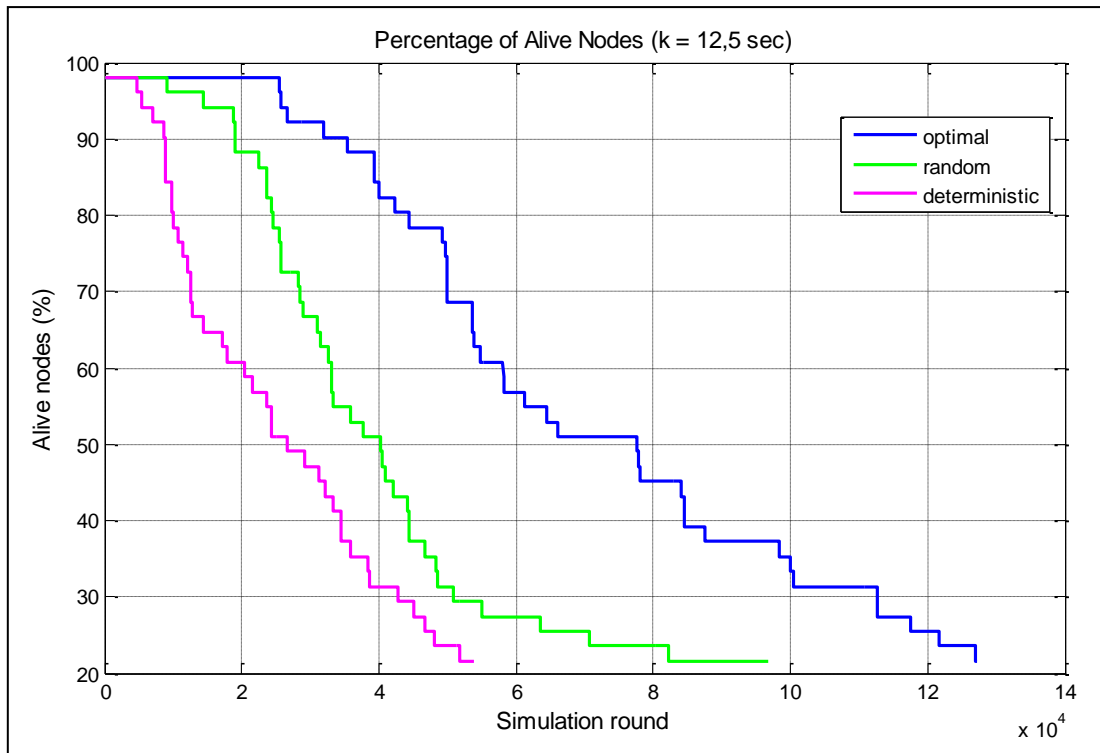
Κάθε προσομοίωση επαναλαμβάνεται 10 φορές, οπότε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια προκύπτουν από το μέσο όρο των 10 αυτών ανεξάρτητων προσομοιώσεων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι κάθε γύρος προσομοίωσης διαρκεί 0.5 sec. Επιπλέον, θεωρούμε ότι το δίκτυο συνολικά σταματάει τη λειτουργία του όταν έχει απομείνει ζωντανό το 20 % των κόμβων του.

Σε όλες τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν, τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα. Όπου χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά χαρακτηριστικά, θα σημειώνεται. Επίσης, για πρακτικούς λόγους θα αναφερόμαστε στον αλγόριθμο που χρησιμοποιεί τη θεωρία βέλτιστης παύσης ως αλγόριθμο optimal. Ομοίως, θα αναφερόμαστε στους αλγορίθμους που βασίζονται στην τυχαία και ντετερμινιστική επιλογή χρονικής στιγμής επικοινωνίας ως αλγόριθμο random και deterministic αντίστοιχα.

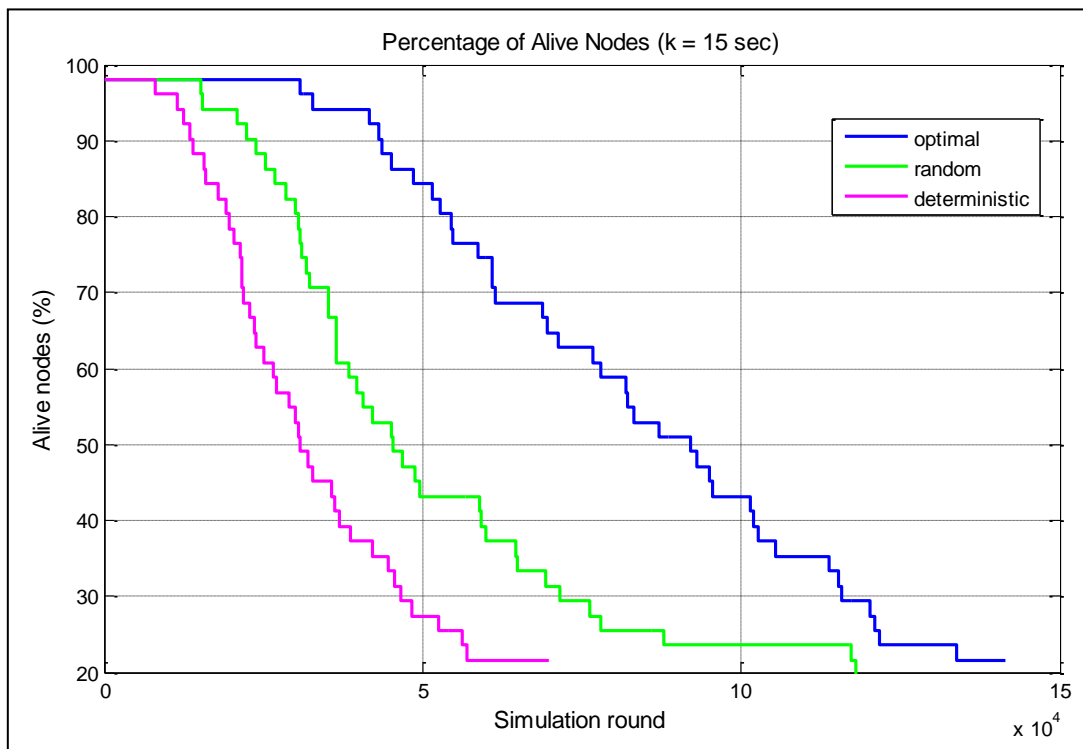
Στα Σχήματα 6.7 – 6.11 φαίνονται τα διαγράμματα του ποσοστού των ζωντανών κόμβων σε κάθε γύρο προσομοίωσης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου k που εκφράζει τη μέγιστη επιτρεπτή καθυστέρηση εκπομπής των πακέτων. Υπενθυμίζουμε ότι οι κόμβοι λειτουργούν σαν πηγές σταθερού ρυθμού δημιουργίας τηλεπικοινωνιακής κίνησης, δηλαδή παράγουν πακέτα ανά k χρονικές στιγμές και επιπλέον έχουν περιθώριο k χρονικές στιγμές για να τα στείλουν. Σε καθένα από τα παρακάτω διαγράμματα υπάρχουν τρεις καμπύλες: μια για κάθε αλγόριθμο και έχουν υλοποιηθεί για $k = 10, 12.5, 15, 17.5, 20$ sec.



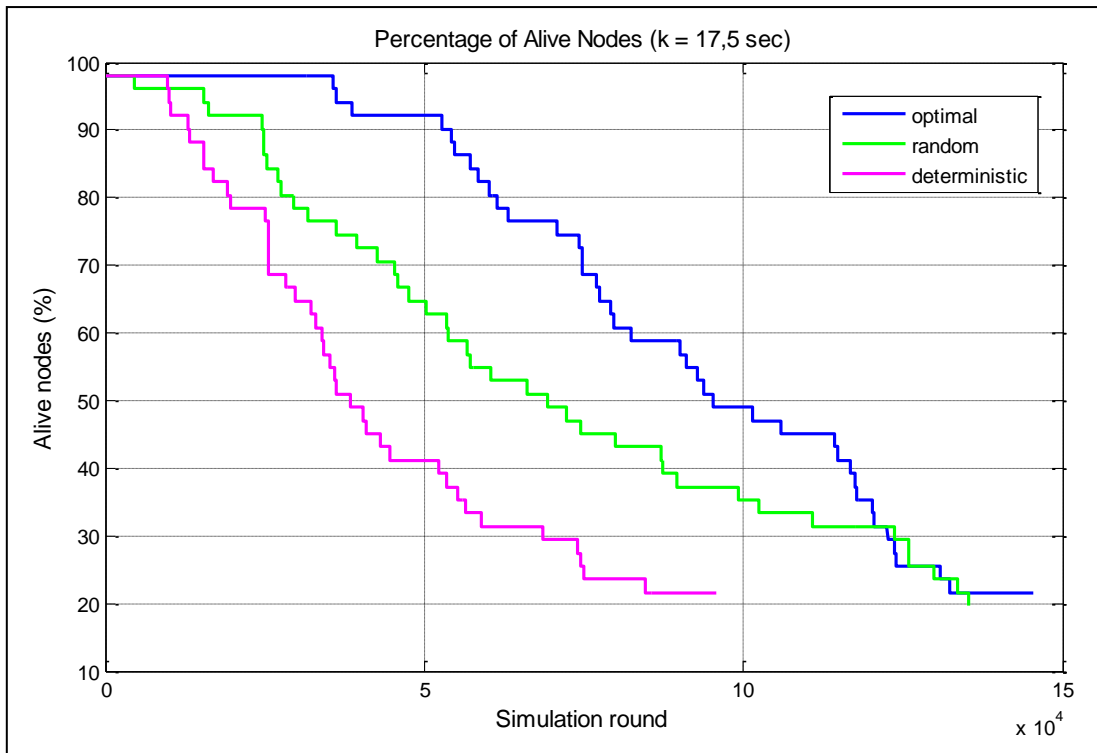
Σχήμα 6.7: Διάγραμμα ζωντανών κόμβων ανά γύρο προσομοίωσης για $k = 10$ sec



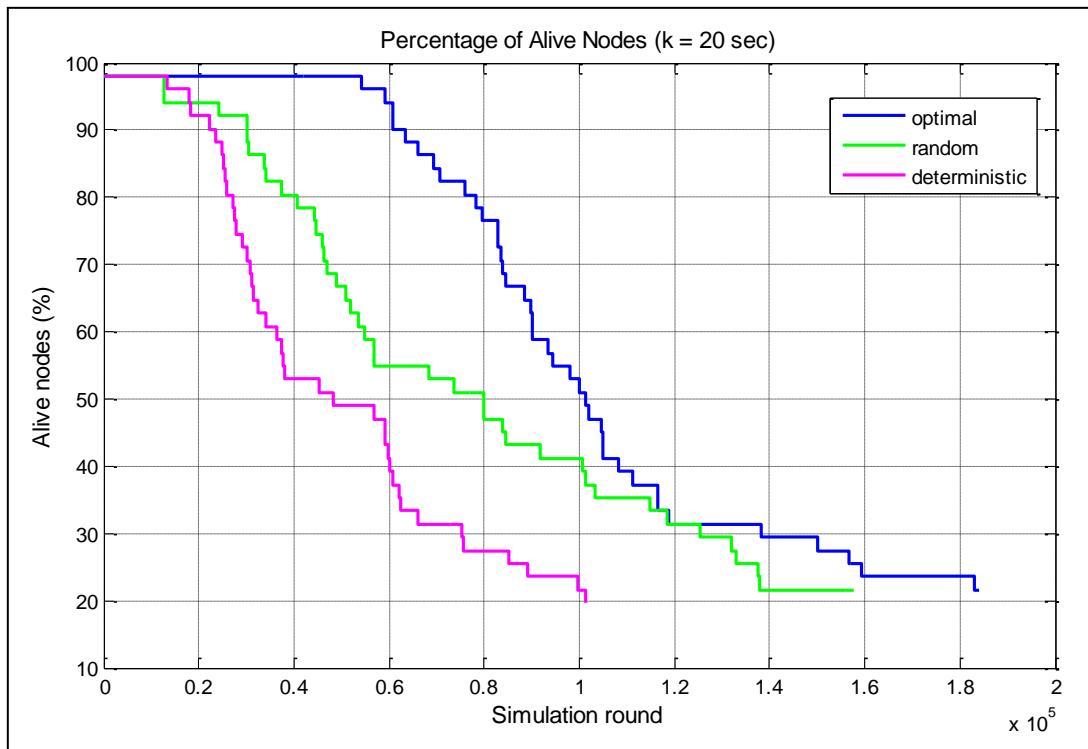
Σχήμα 6.8: Διάγραμμα ζωντανών κόμβων ανά γύρο προσομοίωσης για $k = 12,5 \text{ sec}$



Σχήμα 6.9: Διάγραμμα ζωντανών κόμβων ανά γύρο προσομοίωσης για $k = 15 \text{ sec}$



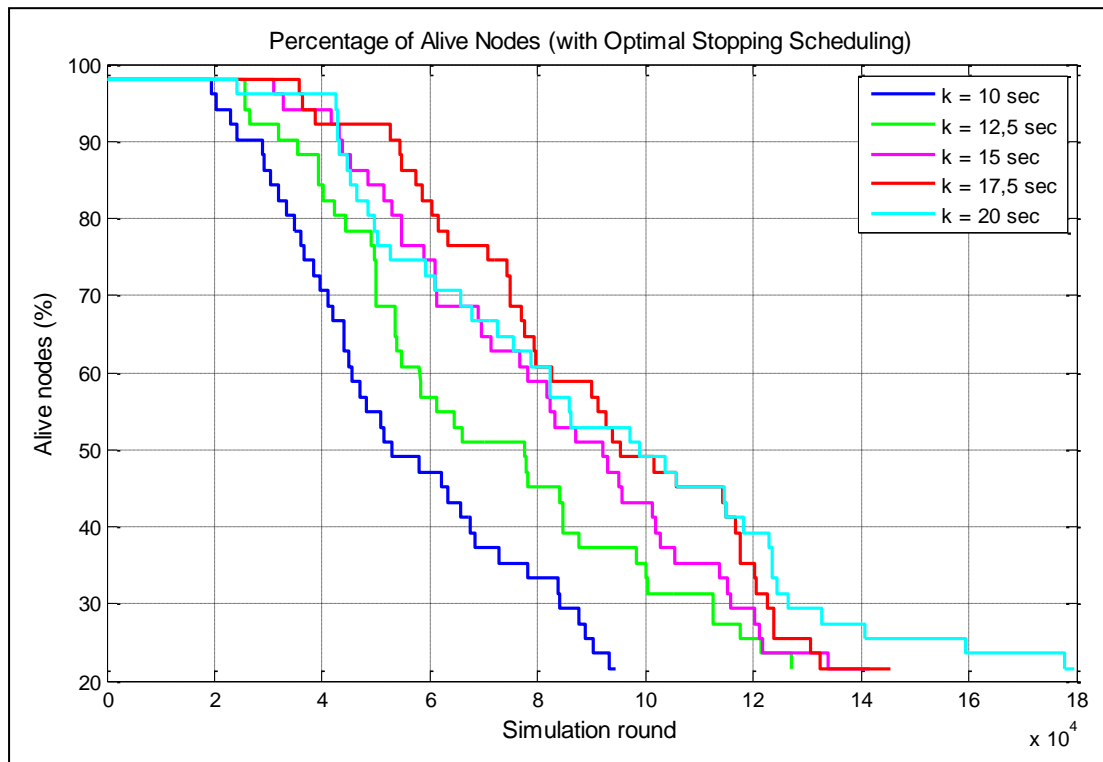
Σχήμα 6.10: Διάγραμμα ζωντανών κόμβων ανά γύρο προσομοίωσης για $k = 17,5 \text{ sec}$



Σχήμα 6.11: Διάγραμμα ζωντανών κόμβων ανά γύρο προσομοίωσης για $k = 20 \text{ sec}$

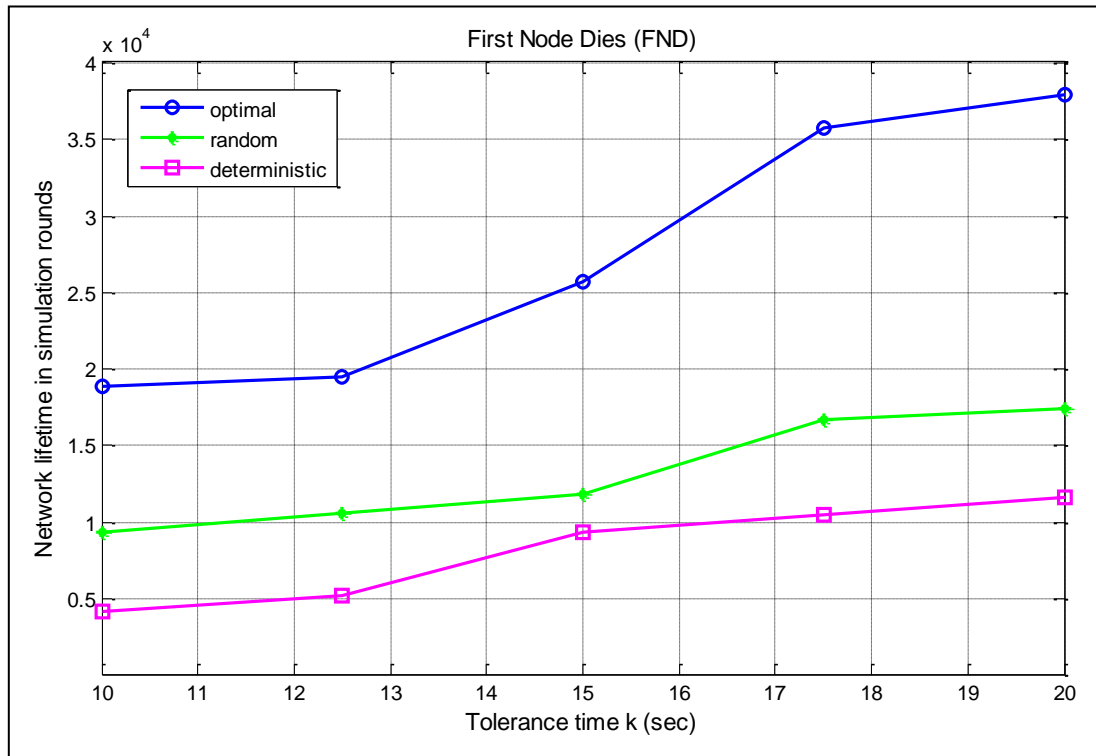
Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται σαφές ότι για όλες τις τιμές του k που εξετάστηκαν, ο αλγόριθμος *optimal* κάνει κόμβους με αρκετά μικρότερο ρυθμό σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Το γρηγορότερο ρυθμό θανάτων παρουσιάζει ο αλγόριθμος *deterministic*, ενώ ακολουθεί με ελαφρώς καλύτερο ρυθμό ο αλγόριθμος *random*. Παρότι σε ορισμένα σημεία ο αλγόριθμος *random* προσεγγίζει ή ακόμα και ταυτίζεται με το ρυθμό θανάτων του αλγορίθμου *optimal*, τελικά ο αλγόριθμος *optimal* εμφανίζει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Σε ό,τι αφορά τη συμπεριφορά του δικτύου όταν χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος *optimal* για διαφορετικά k , μπορούμε να παρατηρήσουμε το συγκεντρωτικό διάγραμμα του Σχήματος 6.12. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση των χρονικών στιγμών k μειώνεται ο ρυθμός θανάτων των κόμβων, γεγονός το οποίο συνδέεται με την αυξανόμενη διάρκεια ζωής του δικτύου και θα αναλυθεί παρακάτω.



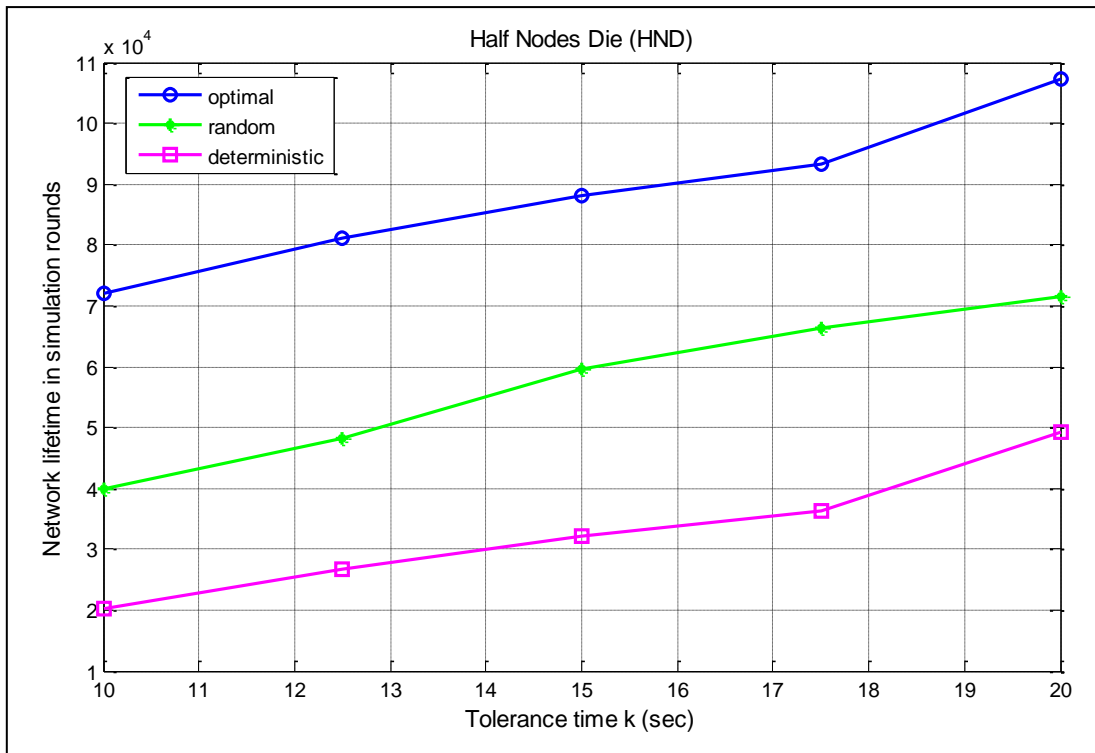
Σχήμα 6.12: Διάγραμμα ζωντανών κόμβων ανά γύρο προσομοίωσης με χρήση του αλγορίθμου *optimal* για διάφορες τιμές του k

Στην αρχή του κεφαλαίου περιγράφηκαν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για τη διάρκεια ζωής του δικτύου, οι οποίες εκφράζονται μέσω των παραμέτρων FND, HND και LND. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα αυτών των παραμέτρων, συναρτήσει της τιμής του k και για όλους τους αλγορίθμους (Σχήματα 6.13 – 6.15).

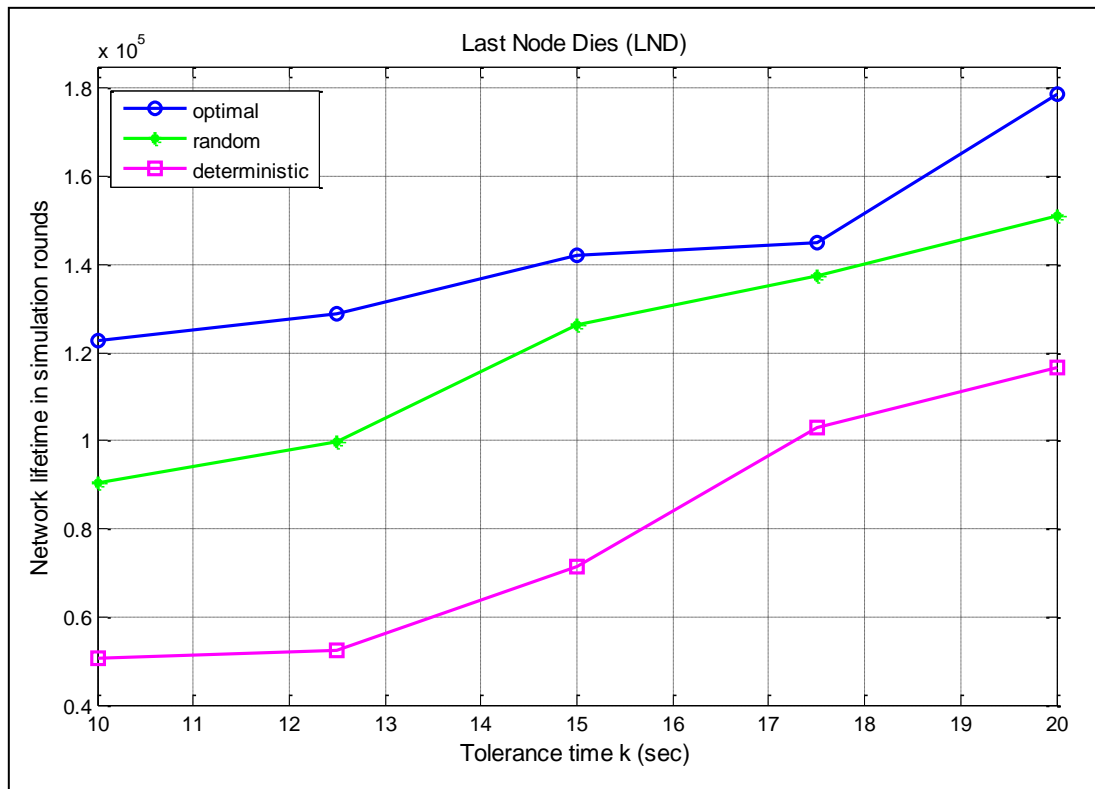


Σχήμα 6.13: Διάγραμμα FND συναρτήσει των τιμών του k

Εκ πρώτης όψεως, από τα Σχήματα 6.13 – 6.15 είναι εμφανές ότι η επίδοση του αλγορίθμου *optimal* είναι σαφώς καλύτερη σε όρους διάρκειας ζωής συγκριτικά με τους άλλους δύο για όλα τα k που εξετάστηκαν. Πιο συγκεκριμένα, στον πίνακα του Σχήματος 6.16 καταγράφονται αναλυτικά τα ποσοστά βελτίωσης της ζωής του δικτύου με τη χρήση του αλγορίθμου *optimal* σε σχέση με τις επιδόσεις των αλγορίθμων *random* και *deterministic*.



Σχήμα 6.14: Διάγραμμα HND συναρτήσει των τιμών του k



Σχήμα 6.15: Διάγραμμα LND συναρτήσει των τιμών του k

Μελετώντας τον πίνακα του Σχήματος 6.16 προκύπτει ότι για κάθε τιμή του k που εξετάστηκε υπάρχει σημαντική βελτίωση στη διάρκεια ζωής του δικτύου, η οποία είναι εντονότερη για τη μεταβλητή FND και ακολουθεί φθίνουσα πορεία για τις μεταβλητές HND και LND, με την τελευταία να παρουσιάζει τα χαμηλότερα ποσοστά βελτίωσης. Αναλυτικότερα, ο αλγόριθμος optimal επιτυγχάνει βελτίωση 83,44 – 117,07 % στη μεταβλητή FND, 40,89 – 80,88 % στη μεταβλητή HND και 5,46 – 35,57 % στη μεταβλητή LND συγκριτικά με τις επιδόσεις του αλγορίθμου random. Αντίστοιχα, τα ποσοστά βελτίωσης σε σχέση με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου deterministic αγγίζουν το 173,77 – 357,03 % στη μεταβλητή FND, 118,17 – 254,35 % στη μεταβλητή HND και 40,89 – 145,68 % στη μεταβλητή LND.

Αυτά τα ποσοστά βελτίωσης αντιπροσωπεύουν το κέρδος που αποκομίζουμε από την εφαρμογή του χρονοπρογραμματισμού επικοινωνίας των κόμβων με βάση τη θεωρία της βέλτιστης παύσης και συμφωνούν με τα αποτελέσματα που αναμέναμε.

k (sec)	Improvement in lifetime from random to optimal (%)			Improvement in lifetime from deterministic to optimal (%)		
	FND	HND	LND	FND	HND	LND
10	102,19	80,88	35,57	357,03	254,35	142,97
12,5	83,44	68,06	29,18	273,65	203,54	145,68
15	116,35	47,90	12,53	173,77	174,00	98,61
17,5	101,71	40,89	5,46	222,11	158,08	40,89
20	117,07	49,67	18,35	226,53	118,17	53,22

Σχήμα 6.16: Ποσοστά βελτίωσης της διάρκειας ζωής του δικτύου με χρήση του αλγορίθμου optimal σε σύγκριση με τους αλγορίθμους random και deterministic

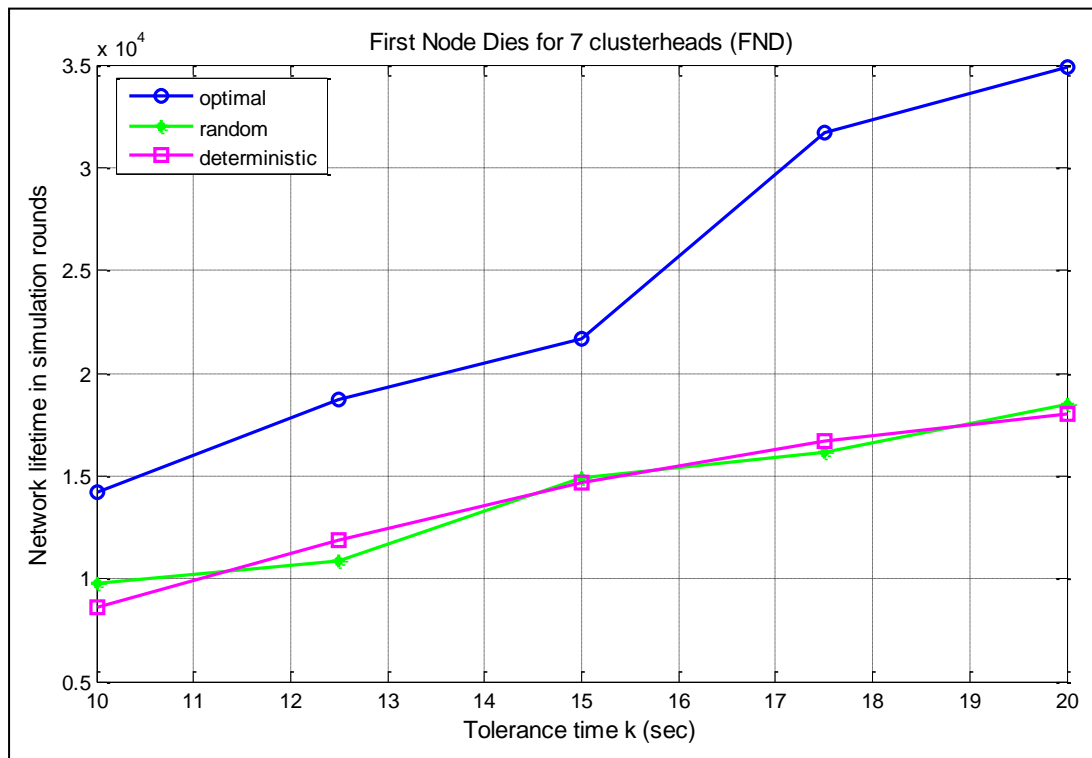
Επιπρόσθετα, από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η διάρκεια της ζωής του δικτύου επεκτείνεται με την αύξηση της τιμής του k . Αυτή η σχέση αποτυπώνεται στον πίνακα του Σχήματος 6.17, όπου είναι καταγεγραμμένη σε μορφή ποσοστού η βελτίωση της επίδοσης του αλγορίθμου optimal για κάθε διαδοχική μεταβολή της τιμής του k . Συνοπτικά, επιτυγχάνεται βελτίωση 2,98 – 31,99 % στη μεταβλητή FND, 5,93 – 14,81 % στη μεταβλητή HND και 2,11 – 23,32 % στη μεταβλητή LND.

Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, αφού με την αύξηση του χρονικού περιθωρίου που έχουν οι κόμβοι για να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, τους δίνεται η δυνατότητα να κρατήσουν μεγαλύτερο ιστορικό απωλειών. Το γεγονός αυτό οδηγεί με μεγαλύτερη πιθανότητα στην επιλογή της βέλτιστης χρονικής στιγμής για την αποστολή των πακέτων τους. Κατ' επέκταση οι κόμβοι καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και αυξάνεται η διάρκεια ζωής τους.

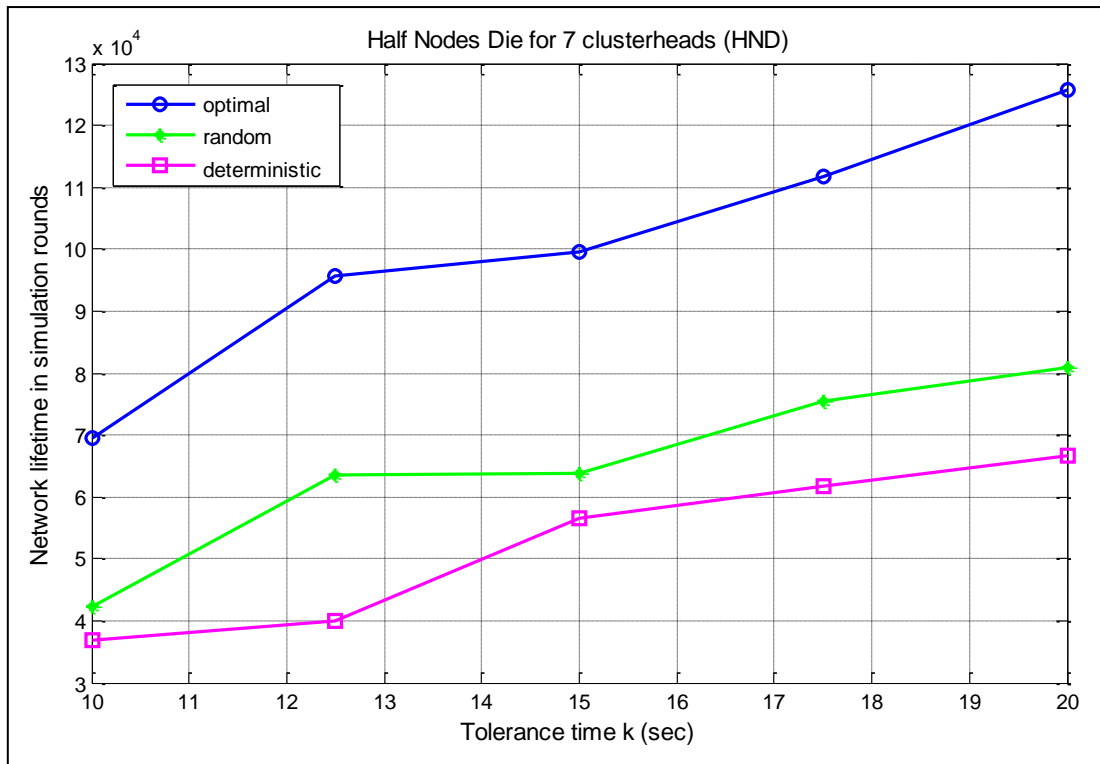
k (sec)	Improvement in lifetime from one k value to another for optimal (%)		
	FND	HND	LND
10 → 12,5	2,98	12,42	4,90
12,5 → 15	31,99	8,75	10,30
15 → 17,5	31,31	5,93	2,11
17,5 → 20	12,37	14,81	23,32

Σχήμα 6.17: Ποσοστά βελτίωσης της διάρκειας ζωής του δικτύου με χρήση του αλγορίθμου optimal συναρτήσει των τιμών του k

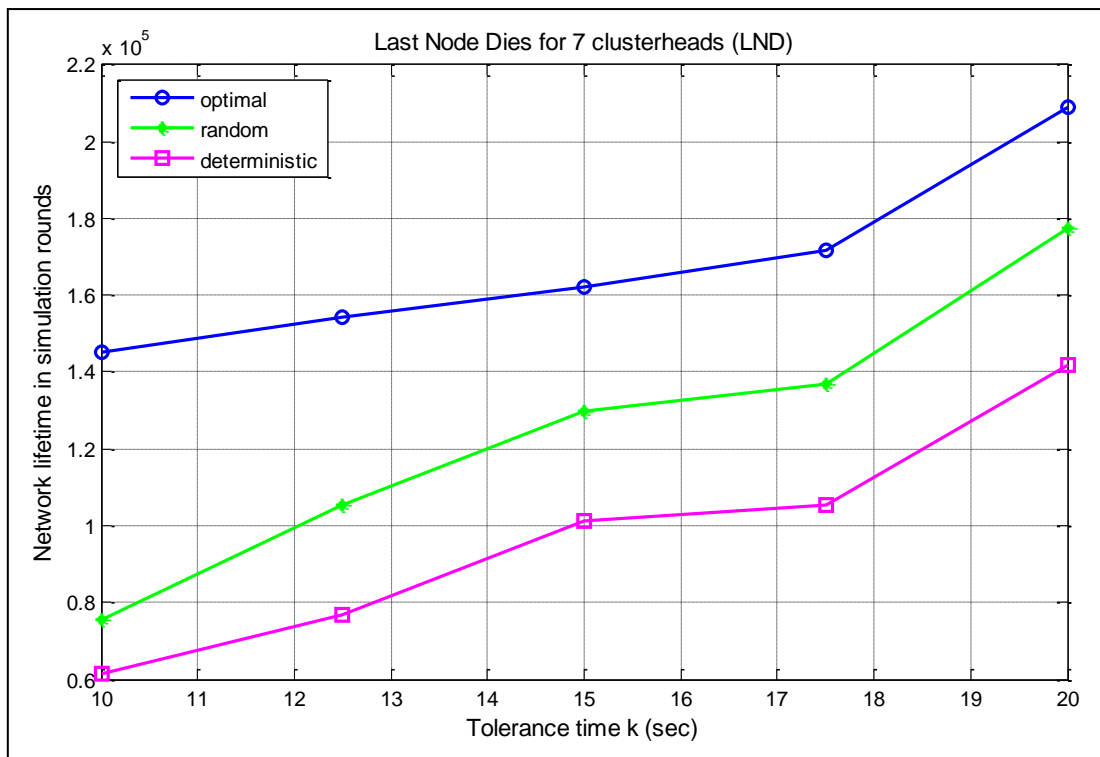
Τα διαγράμματα που ακολουθούν στα Σχήματα 6.18 – 6.20 αναφέρονται πάλι στη σχέση των μεταβλητών FND, HND και LND με το χρονικό περιθώριο επικοινωνίας k , με τη διαφορά ότι στις προσομοιώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί 7 συστάδες αντί για 4 που είχαν χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των παραπάνω αποτελεσμάτων. Η χρήση 7 συστάδων σημαίνει ότι η πιθανότητα που έχει ένας κόμβος να εκλεγεί επικεφαλής είναι $P = 7/50 = 0,14$.



Σχήμα 6.18: Διάγραμμα FND συναρτήσει των τιμών του k με 7 επικεφαλείς συστάδων



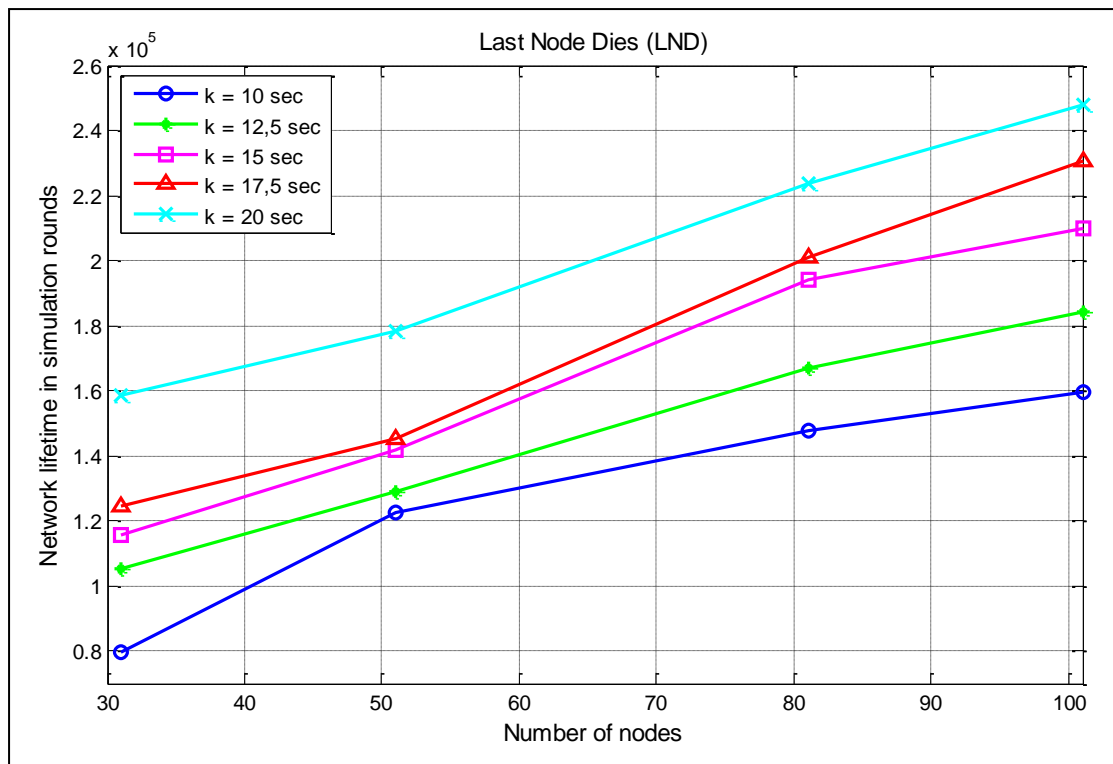
Σχήμα 6.19: Διάγραμμα HND συναρτήσει των τιμών του k με 7 επικεφαλείς συστάδων



Σχήμα 6.20: Διάγραμμα LND συναρτήσει των τιμών του k με 7 επικεφαλείς συστάδων

Όπως με τα διαγράμματα των Σχημάτων 6.13 – 6.15, μπορούμε και σε αυτά τα τρία διαγράμματα να παρατηρήσουμε ότι όσο αυξάνεται η τιμή της μεταβλητής k , τόσο μεγαλύτερη είναι η βελτίωση της επίδοσης του αλγορίθμου optimal. Επίσης, για κάθε k το δίκτυο σημειώνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής με τη χρήση του αλγορίθμου optimal απ’ ότι με τη χρήση των αλγορίθμων random και deterministic.

Εκτός από το χρονικό περιθώριο επικοινωνίας k που διαθέτουν οι κόμβοι, μια ακόμα ενδιαφέρουσα μεταβλητή του συστήματος είναι το πλήθος των κόμβων του δικτύου. Με δεδομένη την περιοχική προσομοίωση και όλα τα άλλα χαρακτηριστικά, όπως αυτά ορίστηκαν στην υποενότητα 6.2, στο Σχήμα 6.21 καταγράφεται η σχέση της μεταβλητής LND με το πλήθος των κόμβων του δικτύου με χρήση του αλγορίθμου optimal για διαφορετικές τιμές του k και για αριθμό κόμβων $N = 31, 51, 81, 101$.



Σχήμα 6.21: Διάγραμμα LND συναρτήσει του πλήθους των κόμβων του δικτύου για διάφορες τιμές του k με χρήση του αλγορίθμου optimal

Από το διάγραμμα του Σχήματος 6.21 προκύπτουν δύο βασικά συμπεράσματα. Κατά πρώτον, αν εξετάσουμε μεμονωμένα κάθε τιμή του πλήθους των κόμβων N είναι εμφανής η βελτίωση στη διάρκεια ζωής του δικτύου με την αύξηση της τιμής του k . Φυσικά, αυτή η παρατήρηση είναι αναμενόμενη δεδομένου ότι μεγαλύτερο k οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του κόμβου, όπως αναλύθηκε και προηγουμένως.

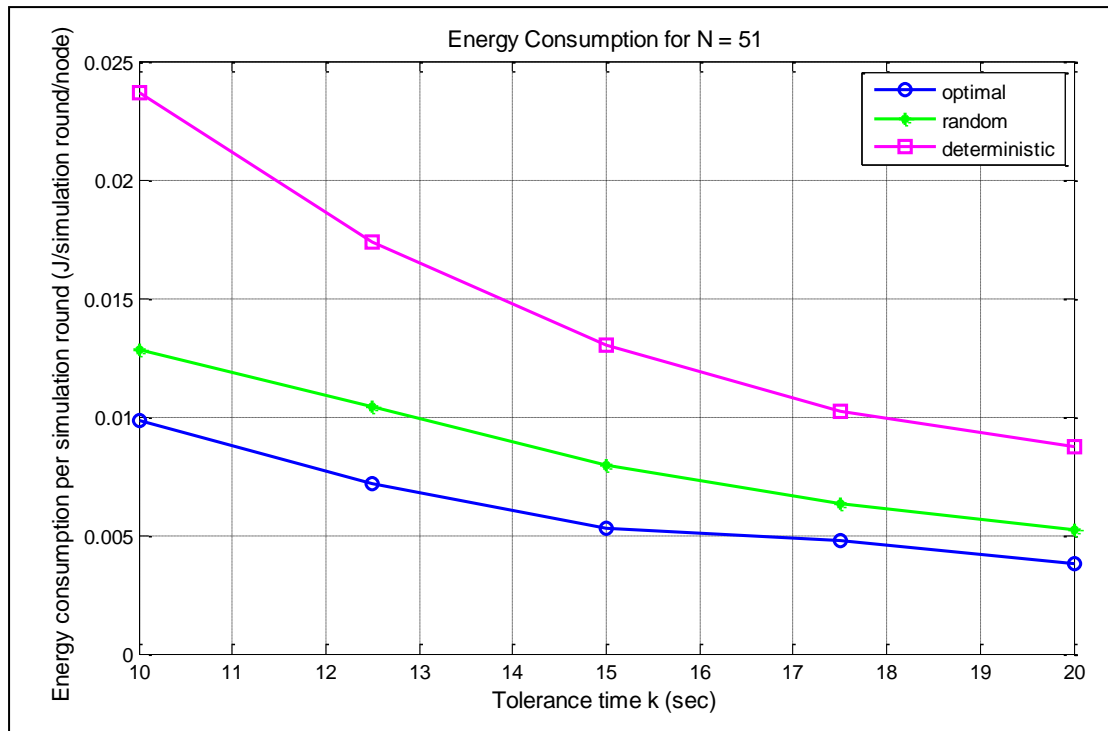
Επιπλέον, η αύξηση του αριθμού των κόμβων προκαλεί αύξηση και στη μεταβλητή LND για όλες τις τιμές του k που μελετήθηκαν. Διατηρώντας αμετάβλητη την περιοχή προσομοίωσης, η αύξηση των κόμβων του δικτύου ισοδυναμεί με αύξηση της πυκνότητάς του και προκαλεί μείωση της μέσης απόστασης επικοινωνίας. Αφού μειώνεται η απόσταση επικοινωνίας, ελαττώνεται και η ενέργεια που ξοδεύουν οι κόμβοι για την επικοινωνία τους επεκτείνοντας με αυτό τον τρόπο τη διάρκεια ζωής τους. Αυτό το φαινόμενο παρουσιάζει αναλυτικότερα ο πίνακας του Σχήματος 6.22, όπου καταγράφεται το ποσοστό βελτίωσης της μεταβλητής LND για κάθε διαδοχική μεταβολή του πλήθους των κόμβων του δικτύου N .

Σύμφωνα με αυτόν τον πίνακα έχουμε βελτίωση της μεταβλητής LND 12,43 – 54,42 % για αύξηση των κόμβων από 31 σε 51, 20,31 – 38,72 % για αύξηση από 51 σε 81 κόμβους και 7,95 – 14,61 % για αύξηση από 81 σε 101 κόμβους. Δηλαδή, για τη συγκεκριμένη περιοχή προσομοίωσης διαστάσεων 250 m × 250 m που μελετάται, η μέση απόσταση επικοινωνίας μειώνεται σημαντικά αν οι κόμβοι από 31 γίνουν 51, καθώς και αν από 51 αυξηθούν στους 81, ενώ σημειώνεται μικρότερη βελτίωση σε περίπτωση που από 81 κόμβους το δίκτυο αποκτήσει 101 κόμβους.

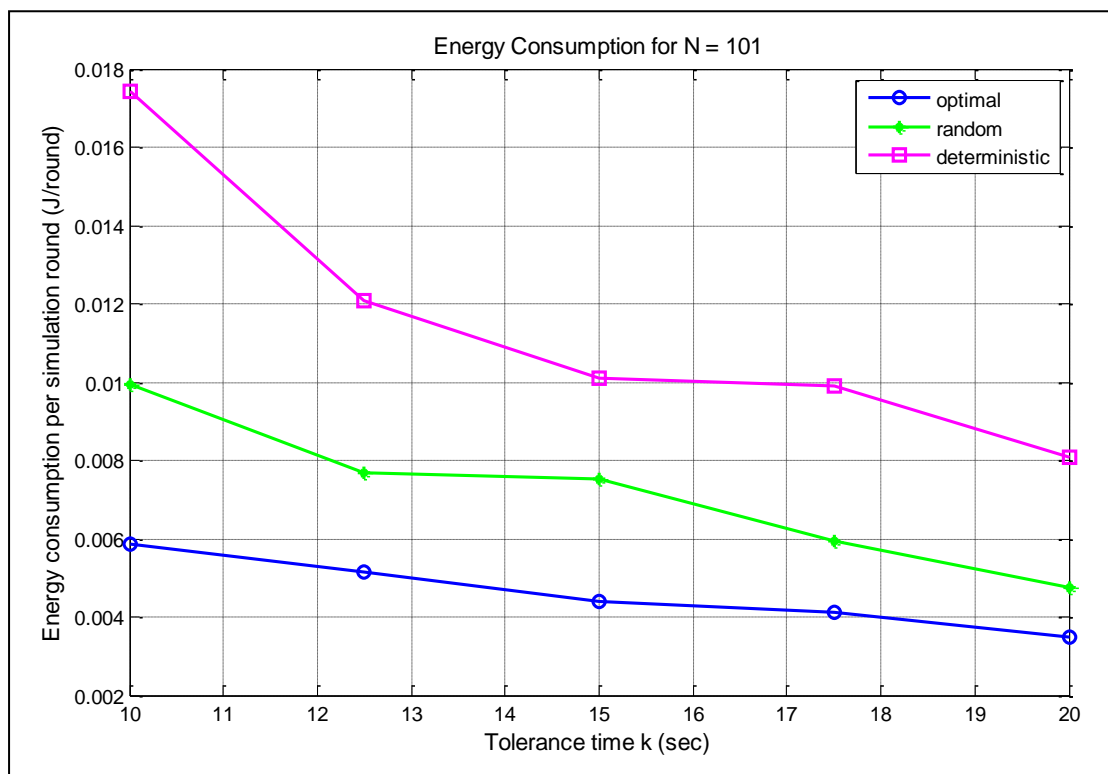
Number of nodes	Improvement in lifetime for optimal through number of nodes increase (%)				
	$k = 10 \text{ sec}$	$k = 12,5 \text{ sec}$	$k = 15 \text{ sec}$	$k = 17,5 \text{ sec}$	$k = 20 \text{ sec}$
31 → 51	54,42	22,07	22,64	16,53	12,43
51 → 81	20,31	29,68	36,83	38,72	25,27
81 → 101	7,95	10,30	8,08	14,61	10,85

Σχήμα 6.22: Διάγραμμα LND συναρτήσεως του πλήθους των κόμβων του δικτύου για διάφορες τιμές του k

Η τελευταία μεταβλητή που έχει ιδιαίτερη αξία να μελετήσουμε είναι η μέση ενέργεια ανά γύρο προσομοίωσης που καταναλώνει κάθε κόμβος του δικτύου με τη χρήση των αλγορίθμων που εξετάζουμε. Για το σκοπό αυτό στα Σχήματα 6.23 – 6.24 φαίνονται τα διαγράμματα της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο για διάφορες τιμές του k . Το πρώτο διάγραμμα μελετάει την περίπτωση που το δίκτυο αποτελείται από $N = 51$ κόμβους σε περιοχή προσομοίωσης με διαστάσεις 250 m × 250 m και το δεύτερο την περίπτωση που έχουμε $N = 101$ κόμβους στην ίδια περιοχή προσομοίωσης. Και στα δύο σενάρια δικτύου θεωρούμε ότι ενέργεια καταναλώνουν όλοι οι κόμβοι πλην της καταβόθρας, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια.



Σχήμα 6.23: Διάγραμμα καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο για διάφορες τιμές του k και $N = 51$



Σχήμα 6.24: Διάγραμμα καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο για διάφορες τιμές του k και $N = 101$

Από τη μελέτη των Σχημάτων 6.23 – 6.24 προκύπτει ότι για $N = 51$ και $N = 101$, οι κόμβοι που χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο *optimal* παρουσιάζουν μειωμένη μέση καταναλισκόμενη ενέργεια ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο για όλες τις τιμές του k . Στον πίνακα του Σχήματος 6.25 φαίνεται το ποσοστό μείωσης της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο με τη χρήση του αλγορίθμου *optimal* συγκριτικά με τους άλλους δύο αλγορίθμους για όλες τις τιμές του k .

k (sec)	Decrease in energy consumption per simulation round per node (%)			
	$N = 51$		$N = 101$	
	random	deterministic	random	deterministic
10	22,66	58,05	40,40	66,09
12,5	30,77	58,62	32,47	57,02
15	33,75	59,23	41,33	56,44
17,5	23,81	52,94	31,67	58,59
20	26,92	56,82	25,53	56,79

Σχήμα 6.25: Ποσοστά μείωσης της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο με χρήση του αλγορίθμου *optimal* σε σύγκριση με τους αλγορίθμους *random* και *deterministic*

Με τη χρήση του αλγορίθμου *optimal* επιτυγχάνεται εξοικονόμηση μέσης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης ανά κόμβο από 22,66 – 33,75 % σε σχέση με τον αλγόριθμο *random* και 52,94 – 59,23 % σε σχέση με τον αλγόριθμο *deterministic* στην περίπτωση που το δίκτυο έχει 51 κόμβους. Αντίστοιχα, όταν το δίκτυο έχει 101 κόμβους ο αλγόριθμος *optimal* παρουσιάζει ποσοστά μείωσης της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο 31,67 – 41,33 % σε σχέση με τον αλγόριθμο *random* και 56,44 – 66,09 % σε σχέση με τον αλγόριθμο *deterministic*.

Όσον αφορά στην επίδοση του αλγορίθμου *optimal* συναρτήσει της αύξησης των κόμβων του δικτύου, μπορούμε να σημειώσουμε ότι για $k = 10$ sec έχουμε τη μεγαλύτερη βελτίωση της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο, η οποία ανέρχεται στο 40,40 %. Επίσης, όσο αυξάνεται η τιμή του k έχουμε σαφή αλλά με φθίνουσα πορεία βελτίωση, όπως φαίνεται και στον πίνακα του Σχήματος 6.26. Αυτά τα αριθμητικά στοιχεία επιβεβαιώνουν τα όσα αναλύθηκαν προηγουμένως για τη σχέση που συνδέει το πλήθος των κόμβων με τη μέση απόσταση επικοινωνίας στο δίκτυο και επομένως την κατανάλωση των κόμβων.

Τέλος, θα σχολιάσουμε τη βελτίωση που επιφέρει η χρήση του αλγορίθμου *optimal* στη μέση καταναλισκόμενη ενέργεια ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο συναρτήσει της αύξησης της τιμής του k

για $N = 51$ και $N = 101$. Τα σχετικά στοιχεία που προκύπτουν από το Σχήμα 6.24 βρίσκονται συγκεντρωμένα στον πίνακα του Σχήματος 6.27.

k (sec)	Decrease in energy consumption per simulation round per node through number of nodes increase for optimal (%)
10	40,40
12,5	27,78
15	16,98
17,5	14,58
20	7,89

Σχήμα 6.26: Ποσοστά μείωσης της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο συναρτήσει της αύξησης των κόμβων του δικτύου

k (sec)	Improvement in energy consumption per simulation round per node from one k value to another for optimal (%)	
	$N = 51$	$N = 101$
10 → 12,5	27,27	11,86
12,5 → 15	26,39	15,38
15 → 17,5	9,43	6,82
17,5 → 20	20,83	14,63

Σχήμα 6.27: Ποσοστά μείωσης της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο με χρήση του αλγορίθμου optimal συναρτήσει των τιμών του k

Μελετώντας τον πίνακα του Σχήματος 6.27, παρατηρούμε ότι για $N = 51$ έχουμε μείωση της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο κατά 9,43 – 27,27 % ανάλογα με τη μεταβολή του k , ενώ για $N = 101$ το ποσοστό αυτό πέφτει στο 6,82 – 15,38 %.

6.4 Συμπεράσματα

Με βάση τα όσα αναλύθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα, παρουσιάζουμε συγκεντρωτικά τα εξής συμπεράσματα:

- Ο αλγόριθμος *optimal* που αναπτύξαμε επιτυγχάνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων συγκριτικά με τους αλγορίθμους *random* και *deterministic*.
- Η βελτίωση που επιφέρει στη μεταβλητή FND ο αλγόριθμος *optimal* ανέρχεται σε ποσοστά 83,44 – 117,07 % και 173,77 – 357,03 % συγκριτικά με τις επιδόσεις των αλγορίθμων *random* και *deterministic* αντίστοιχα. Αυτό τον καθιστά καταλληλότερο για εφαρμογές που έχει μεγάλη σημασία το πότε πεθαίνει ο πρώτος κόμβος του δικτύου.
- Η βελτίωση που επιφέρει στη μεταβλητή HND ο αλγόριθμος *optimal* ανέρχεται σε ποσοστά 40,89 – 80,88 % και 118,17 – 254,35 % συγκριτικά με τις επιδόσεις των αλγορίθμων *random* και *deterministic* αντίστοιχα.
- Η βελτίωση που επιφέρει ο αλγόριθμος *optimal* στη μεταβλητή LND ανέρχεται σε ποσοστά 5,46 – 35,57 % και 40,89 – 145,68 % συγκριτικά με τις επιδόσεις των αλγορίθμων *random* και *deterministic* αντίστοιχα.
- Η αύξηση του χρονικού περιθωρίου k που έχουν οι κόμβοι στη διάθεσή τους για να στείλουν το πακέτο τους μπορεί να επιφέρει βελτίωση 2,98 – 31,99 % στη μεταβλητή FND, 5,93 – 14,81 % στη μεταβλητή HND και 2,11 – 23,32 % στη μεταβλητή LND. Αυτό επιβεβαιώνει τον καθοριστικό ρόλο που έχει το μέγεθος του ιστορικού απωλειών που διατηρούν οι κόμβοι.
- Με την αύξηση του πλήθους των κόμβων του δικτύου μπορούμε να έχουμε σημαντική βελτίωση στη διάρκεια ζωής του, όπως αποδεικνύει ο πίνακας του Σχήματος 6.22, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της μέσης απόστασης επικοινωνίας των κόμβων.
- Τέλος, τα αριθμητικά αποτελέσματα για τη μέση καταναλισκόμενη ενέργεια ανά γύρο προσομοίωσης και ανά κόμβο του δικτύου, τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα του Σχήματος 6.26, αποδεικνύουν ότι ο αλγόριθμος *optimal* πετυχαίνει σημαντικά ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας σε σχέση με τους δύο ευρετικούς αλγορίθμους.