



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ

***ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ***

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ Χ. ΞΕΝΑΚΗΣ

ΒΟΛΟΣ, 30 ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 2014

Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως κενή

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

- 1. Δρ. Σταμούλης Γεώργιος**
Καθηγητής Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ Π.Θ.
- 2. Δρ. Θεοφάνης Γέμπος**
Καθηγητής Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος Π.Θ.
- 3. Δρ. Κωνσταντίνος Κίττας**
Καθηγητής Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος Π.Θ.

Επταμελής Επιτροπή

| | |
|--|--|
| 1. Δρ. Γεώργιος Σταμούλης, Καθηγητής ΗΜΜΥ , Π.Θ. | 5. Δρ. Παναγιώτα Τσομπανοπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια ΗΜΜΥ, Π.Θ. |
| 2. Δρ. Θεοφάνης Γέμπος, Καθηγητής ΓΦΠΑΠ ,Π.Θ. | 4. Δρ. Νέστωρ Ευμορφόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΗΜΜΥ, Π.Θ. |
| 3. Δρ. Κωνσταντίνος Κίττας, Καθηγητής ΓΦΠΑΠ, Π.Θ. | 7. Δρ. Γεώργιος Καρέτσος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΤΕΙ Θεσσαλίας |
| 4. Δρ. Ηλίας Χούστης, Ομότιμος Καθηγητής ΗΜΜΥ , Π.Θ. | |
| | |

Ευχαριστίες

Θεωρώ ιδιαίτερο χρέος μου να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση αυτής της διδακτορικής διατριβής και με στήριξαν όλο το χρονικό διάστημα της εκπόνησής της. Συγκεκριμένα:

Τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Γεώργιο Σταμούλη, καθώς και όλα τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, καθηγητές Δρ. Κωνσταντίνο Κίττα και Δρ. Θεοφάνη Γέμπτο για τις πολύτιμες συμβουλές τους και την αμέριστη συμπαράσταση που μου έδειξαν καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου έρευνας. Ευχαριστώ επίσης τον καθηγητή μου, Δρ. Ιωάννη Κατσαβουνίδα για την καθοδήγησή του, τις πρακτικές του παρατηρήσεις και την καλοσύνη του να με εντάξει ως μέλος στο επιστημονικό γκρουπ ανταλλαγής απόψεων. Ευχαριστώ επίσης όλα τα μέλη της επταμελούς επιτροπής για την αξιολόγηση της διατριβής μου, όσο και για τα πολύτιμα σχόλιά τους.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον φίλο και συνάδελφο ερευνητή Δρ. Φώτη Φουκαλά για τις εύστοχες παρατηρήσεις, συμβουλές και κατευθυντήριες γραμμές που μου υπέδειξε καθόλη την διάρκεια εκπόνησης του ερευνητικού μου έργου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους, συναδέλφους και συγγενείς που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν, κυρίως στις δυσκολίες που προέκυπταν. Ιδιαίτερα ευχαριστώ την οικογένειά μου που με στήριξε σε όλες μου τις αποφάσεις.

... .. Αφιερωμένο σε όσους μάχονται στα πεδία της έρευνας

Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως κενή

Περίληψη

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Α.Δ.Α.) έχουν συγκεντρώσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών τα τελευταία χρόνια, δεδομένου ότι προσφέρουν μοναδικά πλεονεκτήματα και ευελιξία σχετικά με την ανίχνευση και μέτρηση φυσικών ποσοτήτων, ανοίγοντας το δρόμο για εφαρμογές χαμηλού κόστους και ισχύος οι οποίες δεν χρειάζονται ανθρώπινη παρέμβαση. Οι εφαρμογές αυτές μπορεί να είναι στρατιωτικές, περιβαντολλογικές, βιομηχανική και οικιακή αυτοματοποίηση, υγείας και άλλες πολλές εμπορικές (παρακολούθηση κόπωσης υλικών, ρομποτικά συστήματα, μεταφορές, smart grid). Τα Α.Δ.Α δημιουργούνται και αυτο-οργανώνονται από τη συλλογή μεγάλου αριθμού κόμβων, οι οποίοι διασυνδέονται μεταξύ τους στο ασύρματο μέσο. Οι απλοί κόμβοι είναι ενσωματωμένα συστήματα με ολοκληρωμένα κυκλώματα που τους επιτρέπουν να λαμβάνουν σήματα, να επεξεργαστούν δεδομένα και να τα αποστείλουν σε έναν ή πολλούς τελικούς ή ενδιάμεσους προορισμούς. Κάθε κόμβος νοείται ως ένα ανεξάρτητο ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα το οποίο διαθέτει περιορισμένα αποθέματα ενέργειας, τις περισσότερες φορές χωρίς τη δυνατότητα ανανέωσής τους. Ο κυριότερος λοιπόν περιοριστικός παράγοντας για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός Α.Δ.Α. είναι η ενέργεια.

Σημαντικές έρευνες έχουν λάβει χώρα στον τομέα των τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας, πολλές από τις οποίες επικεντρώνονται μόνο σε συγκεκριμένα επίπεδα της OSI αρχιτεκτονικής (physical layer, data link layer, network layer). Πολλές από τις λύσεις και τα πρωτόκολλα που εφαρμόζονται για την ενεργειακή διαχείριση σε κόμβους είναι δανεισμένα από λύσεις που αφορούν ασύρματα ad hoc δίκτυα και δεν έχουν προταθεί λύσεις βασισμένες σε cross-layer τεχνικές, λαμβάνοντας υπόψη τα μοναδικά χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των Α.Δ.Α. Προς αυτή την κατεύθυνση κινείται η μελέτη σε αυτή την διδακτορική διατριβή.

Στόχος της διατριβής είναι μέσω εφαρμογής τεχνικών cross-layer, μεθόδου βελτιστοποίησης, βέλτιστης χωροταξικής τοποθέτησης κόμβων και έξυπνης

διαχείρισης ενεργειακών αποθεμάτων στους κόμβους να επιμηκυνθεί η συνολική διάρκεια ζωής ενός Α.Δ.Α. Αρχικά μελετήθηκαν τρόποι τοποθέτησης κόμβων σε εφαρμογές γεωργίας ακριβείας και προτάθηκαν τοπολογίες που ικανοποιούν κάποιους περιορισμούς, μειώνοντας την συνολική ενεργειακή κατανάλωση και αξιοποιώντας καλύτερα την διαθέσιμη ρυθμαπόδοση (throughput). Το πρόβλημα τοποθέτησης κόμβων σε χώρο συγκεκριμένων διαστάσεων, αφορά οποιαδήποτε εφαρμογή.

Στη συνέχεια, προτείνουμε έναν αλγόριθμο, ο οποίος ανισοκατανέμει το συνολικό ενεργειακό απόθεμα ενός Α.Δ.Α στους διάφορους κόμβους, λαμβάνοντας υπόψη του την τοποθέτηση και τον ρόλο τους εντός της τοπολογίας του δικτύου. Αποδεικνύουμε ότι η διάρκεια ζωής του δικτύου επιμηκύνεται σε σημαντικό βαθμό. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο άνισης φόρτισης, ορίζουμε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που έχει ως στόχο να αυξήσει την κάλυψη του δικτύου (network coverage) και να επιμηκύνει την συνολική διάρκειά του (network lifetime). Λύνουμε το πρόβλημα αυτό μέσω τεχνικής βελτιστοποίησης Simulated Annealing η οποία χρησιμοποιείται σε πολύπλοκα συστήματα και NP complete προβλήματα. Αυτό που προτείνουμε είναι μία βέλτιστη χωροταξική τοποθέτηση των κόμβων στις δύο διαστάσεις, ικανοποιώντας τους περιορισμούς του προβλήματος. Για την στατιστική ευρωστεία των αποτελεσμάτων μας, εφαρμόζουμε ιδέες από την θεωρία αξιοπιστίας (reliability theory), όπου προτείνουμε το καλύτερο set up το οποίο λύνει το πρόβλημα βελτιστοποίησης που ορίστηκε.

Τέλος, προτείνουμε μία cross layer προσέγγιση βελτιστοποίησης ελέγχου ισχύος εκπομπής, μήκους πακέτου δεδομένων και τοπολογίας με στόχο την ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο. Αποδεικνύουμε ότι το πρόβλημα που ορίζουμε είναι NP-Complete και το λύνουμε με ευρετικό τρόπο (heuristic). Στόχος μας είναι η ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης όταν εφαρμοστούν τεχνικές error correction στο data link layer του OSI model. Προτείνουμε συνεπώς μία τελική και βέλτιστη τοπολογία κόμβων, τιμή μήκους πακέτου εκπομπής και τιμή ισχύος εκπομπής, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς του προβλήματος βελτιστοποίησης που ορίσαμε.

Ως μελλοντική και φυσική συνέχεια της παρούσας εργασίας θα ήταν η 3D τοποθέτηση των κόμβων, ικανοποιώντας περισσότερους περιορισμούς και

μεταβλητές που προκύπτουν από μία μορφοποίηση προβλήματος μέσω cross-layer τεχνικών.

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSNs) have received the scientific attention of many researchers in the last years, because they offer unique advantages and flexibility concerning the sensing, detection and measurement of physical quantities, paving the way towards low cost and low power applications which do not require human intervention. These applications could be military, environmental monitoring, industrial and home automation, health monitoring and many other commercial (materials fatigue monitoring, building health monitoring, robotic systems, transportations and smart grid). WSNs are self-organized networks and are created from the collection of large number of sensor nodes, which are interconnected through the wireless medium. Simple nodes are embedded systems with integrated circuits that allow them to receive signals, to process data and to send them to one or several intermediate destinations. Each node is perceived as an individual electromechanical system which has limited energy reserves, most of the times without the capability to renew them. To this end, the main constraint factor for the design and development of a WSN is energy.

Major research has been conducted in the field of energy saving techniques, many of which focus and rely only on particular layers of OSI (Open System Interconnection) architecture (such as physical layer, data link layer and network layer). Many of the proposed solutions and protocols for node energy consumption management stem from protocols applied in ad hoc networks. Most of them are not based on cross-layer optimization techniques and do not try to optimize several variables jointly, taking into account the unique characteristics and constraints imposed in WSNs. In contrast, this PhD dissertation thesis is based on cross-layer optimization techniques.

Therefore, this PhD thesis aims to prolong and maximize the total network lifetime and network coverage by applying cross-layer optimization, joint variable optimization, nodes placement optimization and energy efficiency algorithms.

Initially, placement techniques were studied in precision agriculture applications and empirical topology placements techniques were proposed which satisfy certain constraints, reducing the overall network energy consumption and utilizing optimally network throughput. The problem of node placement and topology creation to cover a 2-D space applies to every of the aforementioned WSN applications.

In the sequel, we propose an algorithm which distributes and total network energy reserves unequally among sensor nodes, taking into account the nodes placements and role in the network topology. The output of this algorithm is a final energy charge per node. We call this algorithm *Unequal Charge Distribution (UCD)* algorithm. Using UCD, we define an optimization problem which intends to prolong both the network coverage and network lifetime. We maximize these variables jointly by solving our problem using Simulated Annealing optimization technique, which is preferred for complex systems and NP-Complete problems. We therefore propose an optimal placement scheme in 2D space satisfying certain constraints. For the statistical robustness of our results, we conduct a statistical analysis applying Reliability Theory and reach the best set up scenario which is appropriate for the aforementioned optimization problem.

Finally, we study the joint optimization problem of transmit power, packet length and topology deployment with the goal to minimize the total network energy consumption. To this end, we formulate a problem which we prove that is NP-Complete and we solve it using heuristic algorithms. Our goal is to minimize total energy consumption by applying error correction code techniques in the data link layer of the OSI model. Therefore we propose a final and near optimal topology, packet length and transmit power solution while satisfying the constraints imposed by the optimization problem.

As a future continuation of this thesis would be the 3D topology control and energy optimization problem solution, satisfying much more constraints and variables as derived from the problem formulation through cross-layer design techniques.

Ευρετήριο Περιεχομένων Τόμου

| | |
|---|----|
| 1 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ – ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (Α.Δ.Α.) | 18 |
| 1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ Α.Δ.Α | 18 |
| 1.2 ΥΛΙΚΟ ΚΟΜΒΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ..... | 21 |
| 1.3 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ Α.Δ.Α..... | 22 |
| 1.4 ΜΕΣΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕΕΕ 802.15.4 | 23 |
| 1.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ Α.Δ.Α. | 25 |
| 1.5.1 Μοντέλα Ασύρματου Μέσου..... | 25 |
| 1.5.2 Ο γράφος της τοπολογίας δικτύου | 27 |
| 1.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ Α.Δ.Α. και ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ | 28 |
| 1.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ..... | 29 |
| 2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ WSN ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ..... | 31 |
| 2.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΣΕ Α.Δ.Α ΒΑΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ..... | 31 |
| 2.1.1 Εισαγωγή..... | 31 |
| 2.1.2 Γεωργία Ακριβείας (Precision Agriculture) | 32 |
| 2.1.3 Τεχνολογία Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων..... | 33 |
| 2.1.4 Πλεονεκτήματα από την εφαρμογή Α.Δ.Α. σε Καλλιέργειες | 34 |
| 2.1.5 Μέθοδοι και Εργαλεία | 34 |
| 2.1.6 Ζώνες Διαχείρισης (Management Zones) | 35 |
| 2.1.7 Φαινομενική Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC _a) και Σύστημα Veris..... | 36 |
| 2.1.8 Σχεδιασμός Αποδοτικής Τοπολογίας Α.Δ.Α. | 37 |
| 2.1.9 Προτεινόμενη Τοπολογία..... | 37 |
| 2.1.10 Προσομοιωτής PROWLER/RMAZE | 41 |
| 2.1.11 Logical Grid Αλγόριθμος Δρομολόγησης (LGR)..... | 46 |
| 2.1.12 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων | 47 |
| 2.1.13 Συμπεράσματα..... | 52 |
| 2.2 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΣΕ Α.Δ.Α ΒΑΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ LOGICAL GRID ROUTING | 53 |
| 2.2.1 Εισαγωγή..... | 53 |
| 2.2.2 Δομή του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων | 53 |

| | |
|--|-----|
| 2.2.3 Γεωργία Ακριβείας και Ζώνες Διαχείρισης..... | 54 |
| 2.2.4 Δείκτες FPI/NCE | 55 |
| 2.2.5 Υπολογισμός πλήθους κόμβων σε 2D πλέγμα (GRID) | 55 |
| 2.2.6 Προτεινόμενη μεθοδολογία τοποθέτησης κόμβων | 57 |
| 2.2.7 Αποτελέσματα προσομοιώσεων | 59 |
| 2.2.8 Συμπεράσματα..... | 63 |
| 2.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ | 63 |
| 3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΝΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΟΜΒΩΝ ΣΕ Α.Δ.Α. | 66 |
| 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 66 |
| 3.2 ΟΡΙΣΜΟΙ..... | 66 |
| 3.2.1 Κάλυψη Δικτύου και Συνδεσιμότητα Κόμβων | 67 |
| 3.2.2 Διάρκεια ζωής Δικτύου (Network Lifetime) | 68 |
| 3.3 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΠΑΡΑΤΑΣΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ Α.Δ.Α | 70 |
| 3.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ..... | 71 |
| 3.4.1 Μοντέλο Κατανάλωσης Ενέργειας..... | 72 |
| 3.4.2 Μοντέλο Δικτύου..... | 72 |
| 3.5 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ (Forwarding Strategies) | 74 |
| 3.6 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΝΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΟΜΒΩΝ | 76 |
| 3.6.1 Ορισμός Προβλήματος..... | 76 |
| 3.6.2 Γνωρίσματα | 77 |
| 3.6.3 Χαρακτηριστικά και Λειτουργία Αλγορίθμου | 78 |
| 3.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..... | 80 |
| 3.7.1 Σενάριο και Τοπολογία Προσομοίωσης..... | 81 |
| 3.7.2 Προσομοίωση Τυχαίων Τοπολογιών | 86 |
| 3.8 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ | 96 |
| 3.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 101 |
| 3.10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ | 102 |
| 4 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΣΕ Α.Δ.Α ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΛΥΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ..... | 104 |
| 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 104 |
| 4.2 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ..... | 105 |
| 4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ..... | 108 |
| 4.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΛΥΣΗ | 109 |
| 4.3.1 Μοντελοποίηση Προβλήματος..... | 109 |
| 4.3.2 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Simulated Annealing | 111 |

| | |
|---|-----|
| 4.3.3 Απεικόνιση του προβλήματος στα δομικά συστατικά του SA | 113 |
| 4.3.4 Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα | 116 |
| 4.4. ΜΕΛΕΤΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ (Reliability Study) | 123 |
| 4.4.1 Θεωρία Αξιοπιστίας (Reliability Theory) | 123 |
| 4.4.2 Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα | 124 |
| 4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ | 128 |
| 4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ | 129 |
| 5 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΣΕ Α.Δ.Α ΜΕΣΩ CROSS LAYER OPTIMIZATION | 131 |
| 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 131 |
| 5.2 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΚΗ ΜΑΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ..... | 132 |
| 5.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ (ECC Techniques) | 135 |
| 5.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ..... | 136 |
| 5.4.1 Μοντελοποίηση Καναλιού | 136 |
| 5.4.2 Υπολογισμός Bit and Packet Error Rate | 137 |
| 5.4.3 Μοντέλο Δικτύου..... | 139 |
| 5.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ CROSS LAYER ΤΕΧΝΙΚΗ | 141 |
| 5.5.1 Cross Layer Design and Optimization | 141 |
| 5.5.2 Cross Layer τεχνική βελτιστοποίησης σε Α.Δ.Α..... | 143 |
| 5.5.3 Υπολογισμός συνολικής κατανάλωσης ενέργειας επικοινωνίας | 145 |
| 5.5.4 ARQ Κατανάλωση Ενέργειας | 146 |
| 5.5.5 FEC Κατανάλωση Ενέργειας | 150 |
| 5.5.6 HARQ Κατανάλωση Ενέργειας | 152 |
| 5.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΛΥΣΗ | 153 |
| 5.6.1 Μοντελοποίηση Προβλήματος..... | 153 |
| 5.6.2 Λύση μέσω Simulated Annealing (SA) και Random Sampling (RS)..... | 155 |
| 5.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 163 |
| 5.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ | 170 |
| 5.9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ | 171 |
| 6 ΕΠΙΛΟΓΟΣ..... | 175 |
| 6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ..... | 175 |
| 6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ..... | 177 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ..... | 178 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : | 178 |

| | |
|--|-----|
| A1. ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΔΕΙΞΗ NP-COMPLETENESS | 178 |
| A2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ Α.Δ.Α σε C++..... | 181 |
| A3. MATLAB SCRIPTS ΓΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ | 186 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: | 188 |
| B1. ΤΙΜΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ..... | 188 |
| B2. ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ:..... | 190 |

Ευρετήριο Εικόνων

Κεφάλαιο 1

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1: Ανάπτυξη Α.Δ.Α. για ανίχνευση ποσοτήτων | 18 |
| Εικόνα 2: Η στοίβα πρωτοκόλλων OSI για Α.Δ.Α..... | 20 |
| Εικόνα 3: Τα τμήματα υλικού ενός κόμβου – αισθητήρα..... | 21 |
| Εικόνα 4: Τοπολογίες Α.Δ.Α..... | 22 |
| Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική προτύπου IEEE 802.15.4..... | 23 |
| Εικόνα 6: Ζώνες συχνοτήτων IEEE 802.15.4 στο φυσικό μέσο..... | 24 |
| Εικόνα 7: Two ray propagation model, between sender and receiver in distance d..... | 27 |

Κεφάλαιο 2

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική Ασυρμάτου Δικτύου Αισθητήρων..... | 33 |
| Εικόνα 2: Παράδειγμα Ζωνών Διαχείρισης..... | 35 |
| Εικόνα 3: Grid τοπολογία με 56 κόμβους και 1 Σταθμό Βάσης (gateway)..... | 39 |
| Εικόνα 4: Veris τοπολογία με 16 κόμβους και 1 Σταθμό Βάσης (gateway)..... | 39 |
| Εικόνα 5: Απλοποιημένο MAC layer model του Prowler..... | 45 |
| Εικόνα 6: Συνολική καθυστέρηση πακέτων (Network latency) από την πηγή στον προορισμό σε seconds, για grid και veris τοπολογία..... | 48 |
| Εικόνα 7: Ρυθμαπόδοση (Network Throughput), για grid και veris τοπολογία..... | 49 |
| Εικόνα 8: Επιτυχής ποσοστιαία παράδοση πακέτων (Network Success Rate), για grid και veris τοπολογία..... | 50 |
| Εικόνα 9: Ανεπιτυχής ποσοστιαία παράδοση πακέτων (Network Loss Rate), για grid και veris τοπολογία..... | 51 |
| Εικόνα 10: Συνολική κατανάλωση ενέργειας (Network Energy Consumption) για τις επικοινωνίες δεδομένων, για grid και veris τοπολογία..... | 52 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 11: Τοπολογία πλέγματος (GRID) με 48 κόμβους και 1 σταθμό βάσης στο (0,0)..... | 56 |
| Εικόνα 12: Προτεινόμενη Τοπολογία βασιζόμενη στον LGR με 14 κόμβους και 1 σταθμό βάσης στο (0,0)..... | 58 |
| Εικόνα 13: Καθυστέρηση Παράδοσης πακέτων (Network Latency)..... | 59 |
| Εικόνα 14: Συνολική ρυθμαπόδοση δικτύου (Network Throughput)..... | 60 |
| Εικόνα 15: Ρυθμός επιτυχούς παράδοσης πακέτων..... | 61 |
| Εικόνα 16: Ποσοστό ανεπιτυχούς παράδοσης πακέτων (Network Loss Rate).... | 62 |
| Εικόνα 17: Συνολική κατανάλωση ενέργειας (Network Energy Consumption)..... | 62 |

Κεφάλαιο 3

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1: Αλγόριθμος UCD..... | 78 |
| Εικόνα 2: Τυχαία τοπολογία δικτύου αισθητήρων 30 κόμβων με τα ID τους..... | 81 |
| Εικόνα 3: Εναπομείνουσα ενέργεια κόμβων (res value)..... | 82 |
| Εικόνα 4: Συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου 30 κόμβων για STR1, STR2..... | 82 |
| Εικόνα 5: Βέλτιστο σχήμα φόρτισης κόμβων..... | 84 |
| Εικόνα 6: Σύγκριση της συνολικής διάρκειας δικτύου 30 κόμβων με βέλτιστο σχήμα φόρτισης κόμβων..... | 85 |
| Εικόνα 7: Ιστόγραμμα IF 500 τυχαίων και συνδεδεμένων τοπολογιών με 20 κόμβους και 1 σταθμό βάσης..... | 87 |
| Εικόνα 7α : 1st best τοπολογία #256 με IF=3,55 - 20 nodes..... | 87 |
| Εικόνα 7β : 2nd best τοπολογία #155 με IF=3,17 - 20 nodes..... | 88 |
| Εικόνα 7γ : 3rd best τοπολογία #338 με IF=3,11 - 20 nodes..... | 88 |
| Εικόνα 7δ : 1st worst τοπολογία #499 με IF=1,17 - 20 nodes..... | 88 |
| Εικόνα 7ε : 2nd worst τοπολογία #57 με IF=1,18 - 20 nodes..... | 89 |
| Εικόνα 7στ : 3rd worst τοπολογία #269 με IF=1,22 - 20 nodes..... | 89 |
| Εικόνα 8: Ιστόγραμμα IF 500 τυχαίων και συνδεδεμένων τοπολογιών με 30 κόμβους και 1 σταθμό βάσης..... | 89 |
| Εικόνα 8α : 1st best τοπολογία #287 με IF=3,52 - 30 nodes..... | 90 |
| Εικόνα 8β : 2nd best τοπολογία #459 με IF=3,46 - 30 nodes..... | 90 |
| Εικόνα 8γ : 3rd best τοπολογία #34 με IF=3,40 - 30 nodes..... | 91 |
| Εικόνα 8δ : 1st worst τοπολογία #209 με IF=1,194 - 30 nodes..... | 91 |
| Εικόνα 8ε : 2nd worst τοπολογία #339 με IF=1,205 - 30 nodes..... | 91 |
| Εικόνα 8στ : 3rd worst τοπολογία #243 με IF=1,206 - 30 nodes..... | 92 |
| Εικόνα 9: Ιστόγραμμα IF 500 τυχαίων και συνδεδεμένων τοπολογιών με 40 κόμβους και 1 σταθμό βάσης..... | 92 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 9α : 1st best τοπολογία #289 με IF=3,44 - 40 nodes..... | 93 |
| Εικόνα 9β : 2nd best τοπολογία #416 με IF=3,39 - 40 nodes..... | 93 |
| Εικόνα 9γ : 3rd best τοπολογία #65 με IF=3,37 - 40 nodes..... | 93 |
| Εικόνα 9δ : 1st worst τοπολογία #482 με IF=1,27 - 40 nodes..... | 94 |
| Εικόνα 9ε : 2nd worst τοπολογία #67 με IF=1,30 - 40 nodes..... | 94 |
| Εικόνα 9στ : 3rd worst τοπολογία #19 με IF=1,32 - 40 nodes..... | 94 |
| Εικόνα 10: Τοπολογία με 30 κόμβους και 1 σταθμό βάσης (GW)..... | 97 |
| Εικόνα 11: Διάρκεια ζωής του δικτύου (εφαρμόζοντας UCD) για διάφορες τιμές του δείκτη απώλειας διαδρομής a..... | 97 |
| Εικόνα 12: Μέγιστες τιμές διάρκειας ζωής για κάθε τιμή a..... | 98 |
| Εικόνα 13: Βέλτιστο σχήμα φόρτισης για κάθε κόμβο της τοπολογίας ανάλογα με την τιμή a..... | 99 |
| Εικόνα 14: Ποσοστιαία (%) Μ.Ο. απώλεια στην διάρκεια ζωής του δικτύου από την εφαρμογή διαφορετικού a..... | 101 |
| Κεφάλαιο 4 | |
| Εικόνα 1: Αρχική τοπολογία με 30 κόμβους (black dots) , 1 σταθμό βάσης (red dot) και 59% συνολική κάλυψη δικτύου..... | 109 |
| Εικόνα 2: Αλγόριθμος Simulated Annealing σε ψευδοκώδικα | 115 |
| Εικόνα 3: Ιστόγραμμα τιμών αντικειμενικής συνάρτησης F για 500 τυχαίες συνδεδεμένες τοπολογίες με στατιστικές τιμές Mean = 560.25 και Std = 143.18 | 118 |
| Εικόνα 4: Βέλτιστη τοποθέτηση (τελική προτεινόμενη τοπολογία) με 30 κόμβους (μαύρες κουκίδες με IDs), 1 σταθμό βάσης (κόκκινη κουκίδα) και 70% συνολική κάλυψη | 119 |
| Εικόνα 5: Μείωση res για την τελική τοπολογία..... | 121 |
| Εικόνα 6: Τελικό σχήμα φόρτισης κόμβων της προτεινόμενης τοπολογίας..... | 121 |
| Εικόνα 7: Σύγκριση της διάρκειας ζωής (network lifetime) της προτεινόμενης τοπολογίας για τις στρατηγικές προώθησης Strategy 1 (ECD Algorithm) και Strategy 2 (UCD Algorithm)..... | 122 |
| Εικόνα 8: Μέσοι όροι και τυπική απόκλιση τιμών αντικειμενικής συνάρτησης F για 500 τυχαίες τοπολογίες..... | 125 |
| Εικόνα 9: Συνάρτηση Επιβίωσης (Survival Probability Function)..... | 126 |
| Εικόνα 10: Συνάρτηση Επιβίωσης (Survival Probability Function) – Σε λογαριθμική κλίμακα..... | 127 |
| Κεφάλαιο 5 | |
| Εικόνα 1: Τυπικό MAC frame format Δεδομένων στο 802.15.4 [3]..... | 138 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 2: Αρχική τοπολογία με 10 ενεργούς κόμβους (μαύρες κουκίδες) και έναν GW (κόκκινη κουκίδα)..... | 141 |
| Εικόνα 3: ARQ σχήμα σε λειτουργία [41-42]..... | 147 |
| Εικόνα 4: Πλήθος επαναμεταδόσεων ανά επίπεδο SNR, για τεχνική ARQ..... | 148 |
| Εικόνα 5α: Πλήθος πακέτων DATA (μαύρη) και TOTAL (κόκκινη) για $N_{tr}=1$ μέχρι $E = 0$ | 149 |
| Εικόνα 5β Πλήθος πακέτων DATA (μαύρη) και TOTAL (κόκκινη) για $N_{tr}=3$ μέχρι $E = 0$ | 149 |
| Εικόνα 5γ: Πλήθος πακέτων DATA (μαύρη) και TOTAL (κόκκινη) για $N_{tr}=5$ μέχρι $E = 0$ | 149 |
| Εικόνα 6: Πλήθος πακέτων DATA (μαύρη) και TOTAL (κόκκινη) για ARQ/FEC μέχρι $E = 0$ | 152 |
| Εικόνα 7: Simulated Annealing Αλγόριθμος..... | 156 |
| Εικόνα 8: Ψευδοκώδικας βημάτων ελέγχου εγκυρότητας τοπολογίας..... | 158 |
| Εικόνα 9: Μείωση θερμοκρασίας για κάθε cooling schedule ως συνάρτηση της temperature cycle για: $T_0=15$, $T_{final} = [10]^{(-6)}$, $\alpha=0.98$, $L=10$, $n=0,002$ και $d=2$ | 162 |
| Εικόνα 10: Random Sampling Αλγόριθμος..... | 163 |
| Εικόνα 11: Μέση κατανάλωση ενέργειας δικτύου (in Joules) εφαρμόζοντας ARQ ως συνάρτηση της temperature cycle..... | 164 |
| Εικόνα 12: Μέση κατανάλωση ενέργειας δικτύου (in Joules) εφαρμόζοντας HARQ ως συνάρτηση της temperature cycle..... | 165 |
| Εικόνα 13: Μέση ενεργειακή κατανάλωση δικτύου (Joules) για όλα τα cooling schedules όταν εφαρμόζεται SA..... | 166 |
| Εικόνα 14: Σύγκριση SA και RS σχετικά με την μέση ενεργειακή κατανάλωση για ARQ, FEC και HARQ..... | 168 |
| Εικόνα 15: Σύγκριση μεταξύ SA και RS όσο αφορά τον παράγοντα κάλυψη της βέλτιστης τοπολογίας και της αρχικής για όλα τα cooling schedules..... | 169 |
| Εικόνα 16: Τελική προτεινόμενη βέλτιστη τοπολογία του SA..... | 169 |

Ευρετήριο Πινάκων

Κεφάλαιο 3

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 1: Τιμές φόρτισης (σε Joules) ανά κόμβο..... | 85 |
| Πίνακας 2: Τιμές συντελεστή (εκθέτη) απώλειας διαδρομής για διάφορα περιβάλλοντα..... | 96 |
| Πίνακας 3: Διάρκεια ζωής για διάφορες τιμές του συντελεστή (εκθέτη) απώλειας διαδρομής..... | 98 |
| Πίνακας 4: Απώλεια (Μ.Ο.) σε διάρκεια ζωής δικτύου από την εφαρμογή διαφορετικών σχημάτων φόρτισης (ανά τιμή του a)..... | 100 |

Κεφάλαιο 4

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 1: Αντιστοιχία εννοιών physical annealing και Combinatorial Optimization..... | 112 |
| Πίνακας 2: Τιμές μεταβλητών προσομοίωσης..... | 117 |
| Πίνακας 3: Τιμές φόρτισης κόμβων για την προτεινόμενη SA τοπολογία..... | 122 |
| Πίνακας 4: Set up ρυθμίσεις ($w_1=0.5, w_2=0.5$)..... | 125 |

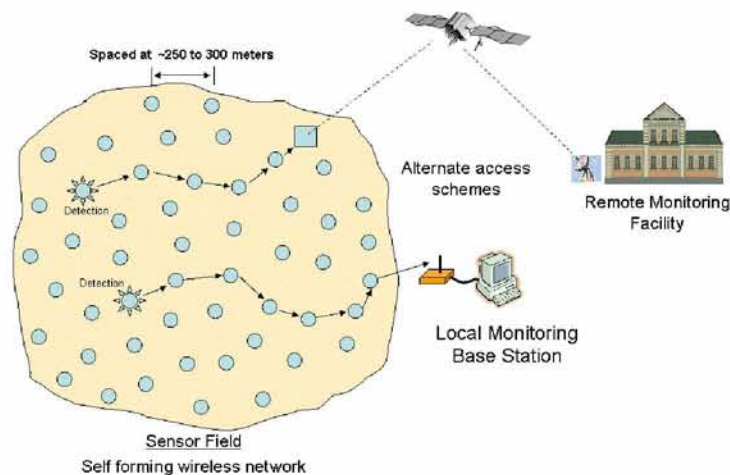
Κεφάλαιο 5

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 1: Συνολικός αριθμός καταστάσεων που παράγονται ανά cooling schedule για: $T_0=15$, $T_{final}=10^{-6}$, $\alpha=0.98$, $L=10$, $n=0,002$ και $d=2$ | 161 |
| Πίνακας 2: Τιμή ενέργειας αντικειμενικής συνάρτησης, τιμή πακέτου, τιμή ισχύς εκπομπής, μέση τιμή και τυπική απόκλιση από την εφαρμογή SA (geometric cooling) για ARQ, FEC, HARQ..... | 165 |
| Πίνακας 3: Τιμή ενέργειας αντικειμενικής συνάρτησης, τιμή πακέτου, τιμή ισχύς εκπομπής, μέση τιμή και τυπική απόκλιση από την εφαρμογή RS..... | 167 |

1 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ – ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (Α.Δ.Α.)

1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ Α.Δ.Α

Η πρόοδος στην τεχνολογία των μικρο – ηλεκτρομηχανικών συστημάτων, στις ασύρματες επικοινωνίες και στα ψηφιακά ηλεκτρονικά έχει δώσει την δυνατότητα για την ανάπτυξη κόμβων αισθητήρων χαμηλού κόστους, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και πολλών λειτουργιών, οι οποίοι είναι μικροί σε μέγεθος και επικοινωνούν, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση ή επιτήρηση, μεταξύ τους σε μικρές αποστάσεις. Αυτοί οι μικροσκοπικοί κόμβοι αισθητήρων, που αποτελούνται από υποσυστήματα αίσθησης, επεξεργασίας δεδομένων και επικοινωνιών, οδηγούν στην ιδέα των δικτύων αισθητήρων που βασίζονται στην συνεργατική λειτουργία ενός μεγάλου συνόλου κόμβων [1].



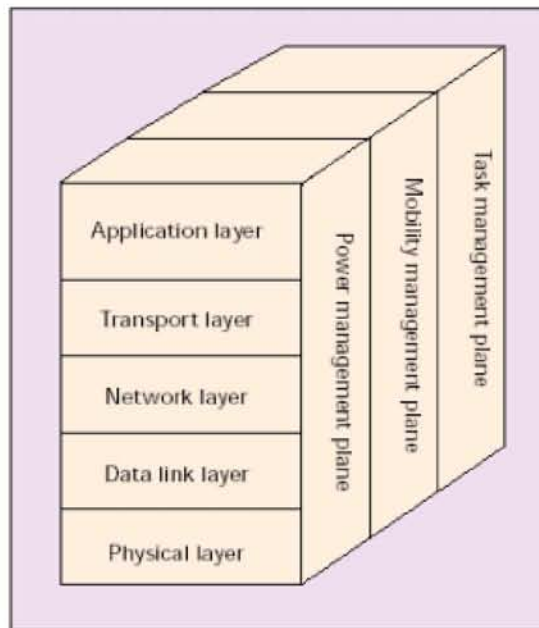
Εικόνα 1: Ανάπτυξη Α.Δ.Α. για ανίχνευση ποσοτήτων

Ένα Α.Δ.Α, όπως φαίνεται και από την εικόνα 1, αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων, οι οποίοι αναπτύσσονται πυκνά, είτε μέσα στο φαινόμενο είτε πολύ κοντά σε αυτό. Η θέση των κόμβων αισθητήρων δεν είναι ανάγκη να προσχεδιαστεί ή να προαποφασιστεί. Αυτό επιτρέπει την τυχαία εξάπλωσή τους σε μη προσβάσιμα εδάφη ή σε επιχειρήσεις για την αντιμετώπιση καταστροφών. Από την άλλη πλευρά, αυτό σημαίνει ότι τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι των δικτύων αισθητήρων πρέπει να διαθέτουν αυτό – οργανωτικές δυνατότητες. Ένα άλλο μοναδικό χαρακτηριστικό των δικτύων αισθητήρων είναι η συνεργατική λειτουργία των κόμβων αισθητήρων.

Στην βιβλιογραφία [2] είναι κοινώς αποδεκτή η ακόλουθη τεχνική ορολογία σχετικά με Α.Δ.Α:

- *Κόμβος – Αισθητήρας (Sensor Node)*: Είναι η συσκευή που εκτελεί την λειτουργία της ανίχνευσης φυσικών ποσοτήτων, δημιουργεί πακέτο πληροφορίας και το αποστέλει μέσω του ασυρμάτου μέσου.
- *Παρατηρητής (observer)*: Είναι ο τελικός χρήστης – αποδέκτης της πληροφορίας μετρήσεων για περαιτέρω ανάλυση. Ο παρατηρητής μπορεί να γνωστοποιεί τις αιτήσεις του για δεδομένα και το δίκτυο να ανταποκρίνεται μέσω του σταθμού βάσης.
- *Φαινόμενο ή ποσότητα παρατήρησης (Phenomenon)*: Είναι η φυσική ποσότητα προς μέτρηση. Ανάλογα με τον τύπο αισθητήρα που έχει ο κάθε κόμβος μπορεί να μετρήσει: θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, ηλιακή ακτινοβολία, επίπεδα θορύβου, συχνότητα κίνησης, ταχύτητα ανέμου κτλ.

Οι ασύρματοι κόμβοι κατανέμονται σε ένα πεδίο όπως φαίνεται και στην εικόνα 1 κάθε ένας από αυτούς συλλέγει δεδομένα, τα επεξεργάζεται και τα στέλνει πίσω σε ένα κεντρικό σημείο και από εκεί καταλήγουν στους ενδιαφερόμενους χρήστες. Η στοίβα πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται από το κεντρικό σημείο αλλά και από όλους τους κόμβους φαίνεται στην εικόνα 2 [1].

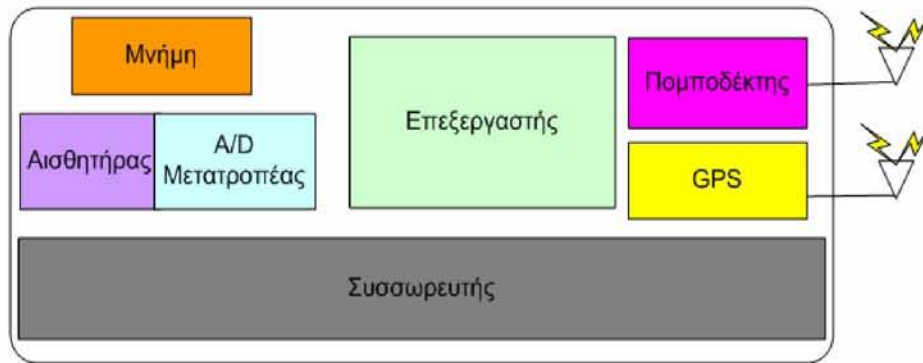


Εικόνα 2: Η στοίβα πρωτοκόλλων OSI για Α.Δ.Α.

Οι στοίβες αυτές διατρέχουν όλα τα επίπεδα και βοηθούν στο συντονισμό των αισθητήρων με απώτερο σκοπό την συνολική μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και στην αύξηση της αποδοτικότητας του δικτύου. Ειδικότερα η στοίβα διαχείρισης ενέργειας (power management plane) ρυθμίζει τον τρόπο που ένας κόμβος χρησιμοποιεί την ενέργεια του καθώς και τα μηνύματα που ανταλλάσσει με τους γύρω του κόμβους σχετικά με την ενεργειακή του κατάσταση. Η στοίβα διαχείρισης της κινητικότητας (mobility management plane) είναι υπεύθυνη για την συνεχή καταγραφή της τοπολογίας του δικτύου και γενικότερα για τον εντοπισμό βέλτιστων διαδρομών σε αυτό. Τέλος η στοίβα διαχείρισης λειτουργιών (task management plane) ρυθμίζει την διάρκεια της λειτουργίας ανίχνευσης ενός κόμβου σε μία περιοχή. Σε μία περιοχή παρατήρησης δεν χρειάζεται την ίδια χρονική στιγμή όλοι οι κόμβοι να ανιχνεύουν το ίδιο φαινόμενο/ποσότητα. Εάν γινόταν αυτό, τότε θα είχαμε πολλαπλά όμοια πακέτα. Όλα τα παραπάνω management planes είναι απαραίτητα ώστε ένας κόμβος να μπορεί να συνεργάζεται με άλλους με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο και να προωθεί τα δεδομένα του.

1.2 ΥΛΙΚΟ ΚΟΜΒΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Ένας κόμβος αισθητήρας όπως φαίνεται και στην εικόνα 3 αποτελείται κατά βάση από τέσσερα τμήματα: μια μονάδα αισθήσεως, μια μονάδα επεξεργασίας, ένα πομποδέκτη και μια μονάδα ενέργειας.



Εικόνα 3: Τα τμήματα υλικού ενός κόμβου - αισθητήρα

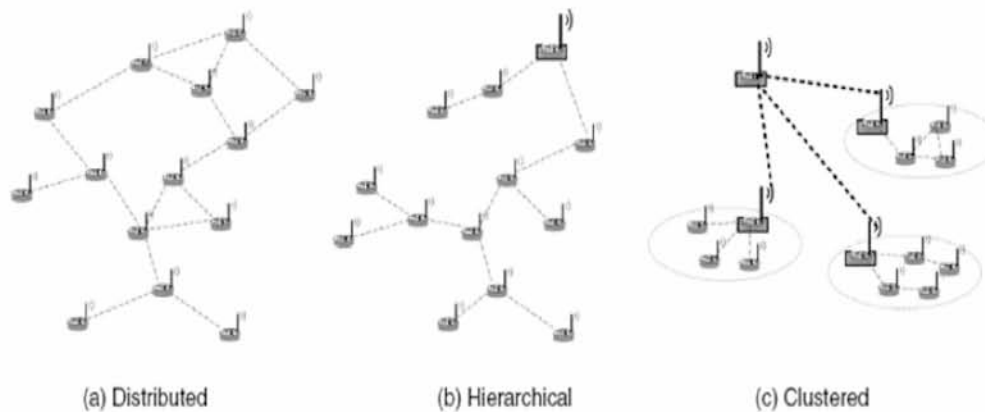
Ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται μπορεί να διαθέτει επιπλέον τμήματα όπως *σύστημα εντοπισμού θέσης*, *μονάδα παραγωγής ενέργειας* και *μονάδα κίνησης*. Η μονάδα αισθητήρα συνήθως αποτελείται από δύο υπομονάδες: τους *αισθητήρες* και τους *αναλογικό – ψηφιακούς μετατροπείς (Α/D μετατροπείς)*. Τα αναλογικά σήματα που παράγονται από τα αισθητήρια όργανα και βασίζονται στα παρατηρούμενα φαινόμενα, μετατρέπονται σε ψηφιακά σήματα από τους αναλογικό – ψηφιακούς μετατροπείς και κατόπιν μεταφέρονται στην μονάδα επεξεργασίας. Αυτή η μονάδα, που γενικά σχετίζεται με μια μικρή μονάδα αποθήκευσης, διαχειρίζεται τις διαδικασίες που κάνουν τον αισθητήριο κόμβο να συνεργάζεται με άλλους κόμβους για να φέρει σε πέρας τους προσδιορισμένους στόχους. Η μονάδα του πομποδέκτη συνδέει τον αισθητήριο κόμβο στο δίκτυο. Ένα από τα πιο σημαντικά τμήματα του αισθητήριου κόμβου είναι η μονάδα ενέργειας. Απαραίτητος σχεδιαστικός περιορισμός των κόμβων είναι:

- Να καταναλώνουν ελάχιστα ποσά ενέργειας κατά τις εργασίες τους
- Να μπορούν να συνεργάζονται με άλλους κόμβους

Αφού η ανανέωση των ενεργειακών αποθεμάτων των κόμβων είναι ιδιαίτερα δύσκολη και καθίσταται αδύνατη σε πολλές περιπτώσεις, η διάρκεια ζωής του δικτύου (network lifetime) εξαρτάται από τα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων.

1.3 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ Α.Δ.Α.

Στα δίκτυα αισθητήρων οι βασικότερες τοπολογίες που χρησιμοποιούνται φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4: Τοπολογίες Α.Δ.Α.

Σύμφωνα με την εικόνα 4, μία τοπολογία μπορεί να είναι καταναμημένη (distributed). Στην εικόνα 4(a) όλοι οι κόμβοι είναι ομότιμοι και επικοινωνούν όλοι με όλους. Δεν υπάρχει κάποιος κόμβος ο οποίος να παίζει το ρόλο του σταθμού βάσης (gateway node). Στην εικόνα 4(b) απεικονίζεται μία ιεραρχική τοπολογία. Στην τοπολογία αυτή όλοι οι κόμβοι επικοινωνούν και προωθούν την πληροφορία προς ένα κεντρικό κόμβο, ο οποίος έχει το ρόλο ενός τοπικού σταθμού βάσης. Ο κόμβος αυτός μπορεί να επεξεργάζεται όλα τα πακέτα και να στέλνει ένα αντιπροσωπευτικό πακέτο στον γείτονά του (aggregated or fused packet).

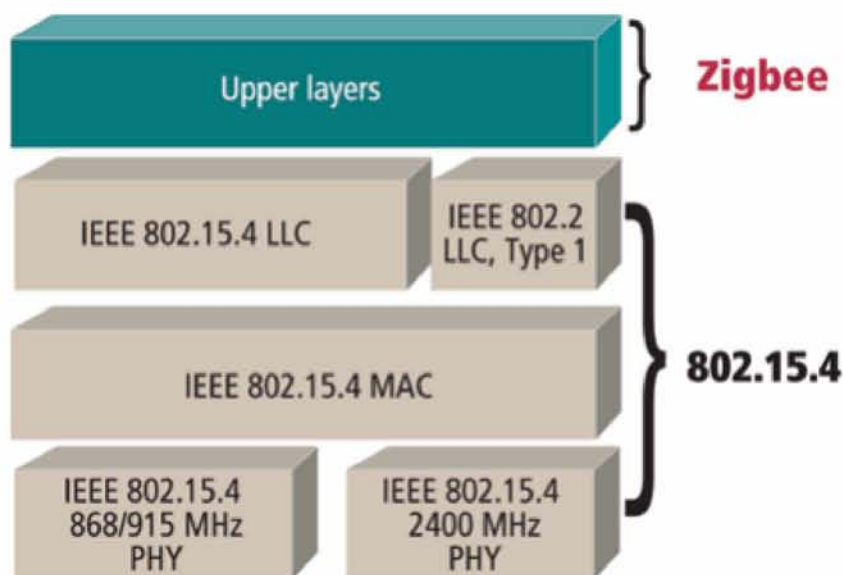
Στην εικόνα 4(c) παρουσιάζεται μία τοπολογία συστάδας (cluster). Στην τοπολογία αυτή οι αισθητήρες είναι χωρισμένοι σε ομάδες – συστάδες με σκοπό την ενεργειακά βέλτιστη δρομολόγηση και κατανομή της πληροφορίας. Σε κάθε συστάδα υπάρχει ένας κόμβος που παίζει το ρόλο του κεντρικού κόμβου (cluster – head node) για τη συστάδα στην οποία ανήκει. Αυτός και μόνο αυτός από κάθε συστάδα συγκεντρώνει όλες τις πληροφορίες από τους υπόλοιπους κόμβους της συστάδας και αναλαμβάνει την επεξεργασία και την αποστολή τους στον σταθμό βάσης. Αυτή η τοπολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στις περιπτώσεις όπου υπάρχει πολύ μεγάλος αριθμός κόμβων και ιδιαίτερα στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας. Όλοι οι

κόμβοι μίας συστάδας εκτός από τον κεντρικό μπορούν να είναι μικρής ισχύος, τέτοιας ώστε να είναι δυνατή η επικοινωνία μέχρι τον κεντρικό κόμβο και μόνο. Ο μόνος κόμβος υψηλής ισχύος θα είναι ο κεντρικός, ο οποίος ενδεχομένως να έχει και ισχυρότερη υπολογιστική ισχύ.

1.4 ΜΕΣΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 802.15.4

Σε ένα Α.Δ.Α , οι επικοινωνούντες κόμβοι συνδέονται ασύρματα. Αυτές οι ζεύξεις μπορούν να υλοποιηθούν από ραδιοσυχνότητες, υπέρυθρα ή οπτικά μέσα. Προκειμένου να έχουμε λειτουργία σε παγκόσμιο επίπεδο πρέπει να διαλέξουμε ένα μέσο το οποίο θα είναι διαθέσιμο παντού στον κόσμο.

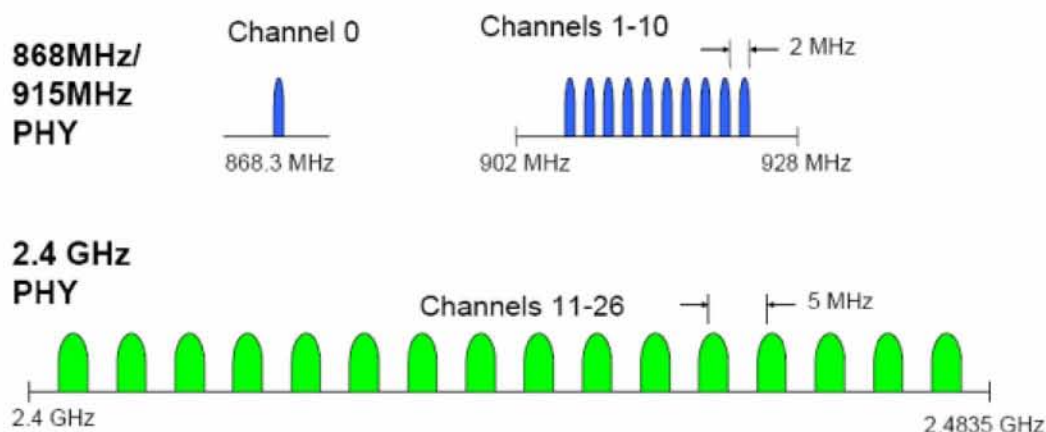
Το IEEE 802.15.4 είναι ένα πρότυπο σχεδιασμένο για ασύρματα δίκτυα προσωπικής χρήσης χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Στοχεύει στη χαμηλή κατανάλωση ισχύος και στο χαμηλό κόστος ασύρματης δικτύωσης. Για το λόγο αυτό προσφέρει υπηρεσίες και πρότυπα που συμπεριλαμβάνουν το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο MAC, καθώς και εφαρμογές που προσανατολίζονται σε δίκτυα που έχουν τις αντίστοιχες απαιτήσεις, όπως στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η αρχιτεκτονική του προτύπου αυτού [6-9]:



Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική προτύπου IEEE 802.15.4

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 προσφέρει δύο επιλογές που εξαρτώνται από τη ζώνη συχνοτήτων. Και οι δύο εκδοχές βασίζονται στην άμεση ακολουθία εξάπλωσης του φάσματος (DSSS). Ο ρυθμός δεδομένων είναι 250kbps στα 2.4GHz με διαμόρφωση OQPSK, 40kbps στα 915MHz και 20kbps στα 868MHz με διαμόρφωση BPSK. Ο μεγαλύτερος ρυθμός αποστολής δεδομένων στα 2.4GHz οφείλεται στο διαφορετικό τύπο διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Οι χαμηλότερες συχνότητες παρέχουν μεγαλύτερο εύρος κάλυψης που οφείλεται σε λιγότερες απώλειες λόγω καθυστέρησης. Επίσης οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερη δυνατότητα ευαισθησίας στο δέκτη [6-9].

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι ζώνες συχνοτήτων στο φυσικό επίπεδο βάση του προτύπου IEEE 802.15.4 [3]



Εικόνα 6: Ζώνες συχνοτήτων IEEE 802.15.4 στο φυσικό μέσο

Αναφορικά με τις ζώνες συχνοτήτων υπάρχει ένα μοναδικό κανάλι ανάμεσα στα 868 και 868.6MHz, 10 κανάλια ανάμεσα στα 902,0 και 928.0MHz και 16 κανάλια ανάμεσα στα 2,4 και 2.4835GHz, όπως φαίνεται στην εικόνα 6. Επίσης, πολλά κανάλια σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων επιτρέπουν τον επαναπροσδιορισμό τους εντός του φάσματος.

1.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ Α.Δ.Α.

1.5.1 Μοντέλα Ασύρματου Μέσου

Οι κόμβοι των δικτύων αισθητήρων επικοινωνούν μέσω του ασυρμάτου μέσου σε διάφορες συχνότητες. Ένα ασύρματο κανάλι επικοινωνίας μεταξύ ενός πομπού u και ενός δέκτη v νοείται εάν και μόνο αν η ισχύς σήματος που λαμβάνεται από τον δέκτη είναι μεγαλύτερη ενός ορίου, που ονομάζεται όριο ευαισθησίας λήψης (sensitivity threshold). Τυπικά, υπάρχει μία άμεση ασύρματη σύνδεση (direct wireless link) μεταξύ u και v εάν $P_r \geq \beta$, όπου P_r η λαμβανόμενη ισχύς σήματος στον δέκτη και β συμβολίζει το όριο ευαισθησίας. Η ακριβής τιμή του β εξαρτάται από διάφορα χαρακτηριστικά του ασύρματου πομποδέκτη και του ρυθμού επικοινωνίας δεδομένων (communication data rate). Η λαμβανόμενη ισχύς P_r , εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής του πομπύ P_t και του παράγοντα απώλειας διαδρομής (path loss exponent), που χαρακτηρίζει την εξασθένηση του σήματος λόγω της απόστασης d_{uv} . Συνεπώς ο συντελεστής απώλειας διαδρομής συμβολίζεται με $PL(u, v)$, και άρα η P_r δίνεται από την σχέση [10-11]:

$$P_r = \frac{P_t}{PL(u, v)} \quad (1)$$

Οι μηχανισμοί που ρυθμίζουν την διάδοση του ραδιοσήματος ανήκουν στις κατηγορίες: *αντανάκλαση* (reflection), *περίθλαση* (diffraction) και *σκέδαση* (scattering).

Free Space Propagation Model

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για να προβλέψει την διάδοση του ραδιοσήματος ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη, όταν η διαδρομή (path) μεταξύ τους είναι χωρίς εμπόδια (clear and unobstructed line-of-sight, LOS path). Συμβολίζοντας με $P_r(d)$ την ισχύ του σήματος που λαμβάνεται σε απόσταση d , έχουμε [10-11]:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}, \quad (2)$$

όπου G_t, G_r αποτελούν το κέρδος της κεραίας του πομπού και του δέκτη, L είναι ένας παράγοντας απώλειας συστήματος (που δεν σχετίζεται με την απώλεια διαδρομής) και λ το μήκος κύματος σε μέτρα. Από την στιγμή που δεν ενδιαφερόμαστε για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του πομποδέκτη, μπορούμε να απλοποιήσουμε την σχέση (2) ως εξής:

$$P_r(d) = C_f \cdot \frac{P_t}{d^2}, \quad (3)$$

όπου C_f είναι μία σταθερά που ενσωματώνει τα χαρακτηριστικά του πομποδέκτη.

Two-ray ground model

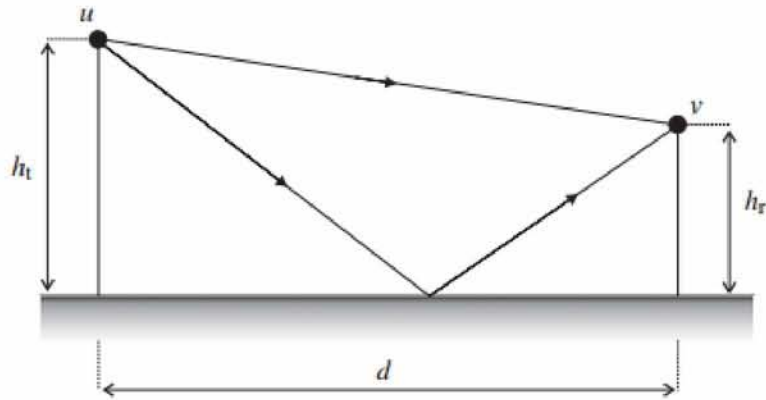
Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογών, η ύπαρξη σύνδεσης LOS δεν υφίσταται και το παραπάνω μοντέλο καθίσταται ανακριβές. Για να βελτιωθεί η ακρίβεια, ένα άλλο μοντέλο υπάρχει στην βιβλιογραφία, το οποίο μοντελοποιεί την ύπαρξη δύο ξεχωριστών διαδρομών διάδοσης μεταξύ πομπού και δέκτη. Στην περίπτωση αυτή, η ισχύς στον δέκτη δίνεται από την σχέση [10-11]:

$$P_r(d) = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4}, \quad (4)$$

Όπου h_t, h_r είναι τα ύψη των κεραίων πομπού και δέκτη. Η σχέση (4) απλοποιείται εάν αφαιρέσουμε λεπτομέρειες χαρακτηριστικών γνωρισμάτων πομποδεκτών ως εξής:

$$P_r(d) = C_t \cdot \frac{P_t}{d^4}, \quad (5)$$

Παρατηρούμε ότι η απώλεια σήματος λόγω της απόστασης είναι πολυωνυμική συνάρτηση της απόστασης με εκθέτη δύναμης 4 και άρα το σήμα εξασθενεί με μεγαλύτερο ρυθμό. Στην εικόνα 7, φαίνεται σχηματικά το μοντέλο:



Εικόνα 7: Two ray propagation model, between sender and receiver in distance d .

Log – distance path model

Το μοντέλο αυτό έχει δημιουργηθεί από αναλυτικά και εμπειρικά μοντέλα. Οι εμπειρικές μέθοδοι αφορούν μετρήσεις στο πεδίο και βασίζονται σε reverse curve fitting των πειραματικών δεδομένων μέτρησης εξαρθένης του σήματος. Το μοντέλο αυτό νοείται ως μία γενίκευση των free space και two-ground ray και υποδεικνύει ότι η απώλεια σήματος εξαρτάται από την απόσταση σε μία δύναμη α , η οποία ονομάζεται εκθέτης απώλειας διαδρομής (path loss exponent) ή distance – power gradient. Η ισχύς στον δέκτη δίνεται από την σχέση [10-11]:

$$P_r(d) \propto \frac{P_t}{d^\alpha}. \quad (6)$$

Όπου ο συντελεστής α εξαρτάται (και αντιπροσωπεύει) από περιβαντολλογικούς παράγοντες.

1.5.2 Ο γράφος της τοπολογίας δικτύου

Ο επικοινωνιακός γράφος δικτύου (communication graph) ορίζει μία τοπολογία δικτύου, δηλαδή ένα σύνολο ασυρμάτων ζεύξεων μέσω των οποίων οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους. Η ύπαρξη μίας ασύρματης ζεύξης ανάμεσα στον u και v εξαρτάται από: 1) τη σχετική απόσταση (ευκλείδεια απόσταση) d_{uv} , 2) την ισχύ εκπομπής του πομπού P_t και 3) το περιβάλλον (εμπόδια, καιρικές συνθήκες).

1.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ Α.Δ.Α. και ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε στρατιωτικές, υγείας, περιβάλλοντος, οικιακές και εμπορικές, αυτοματισμού, γεωργίας ακριβείας κτλ. Ενδεικτικά αναφέρουμε [1-2]:

- *Στρατιωτικές εφαρμογές*, όπως παρακολούθηση πεδίου μάχης, αποτίμηση ζημιάς σε μάχη, αναγνώριση αντίπαλων δυνάμεων και εφάφους.
- *Περιβαλλοντικές εφαρμογές*, όπως ανίχνευση δασικών πυρκαγιών, βιοσυνθετότητας περιβάλλοντος, κτλ.
- *Υγείας*, όπως απομακρυσμένη παρακολούθηση παραμέτρων υγείας, παρακολούθηση κίνησης ιατρών και νοσηλευτών σε χώρο νοσοκομείου
- *Οικιακές εφαρμογές*, όπως έξυπνοι χώροι, οικιακοί αυτοματισμοί, κτλ.
- *Διαφόρων ειδών εμπορικές*, όπως ενεργειακός έλεγχος σε κτήριο, ανίχνευση και εντοπισμός οχήματος, κτλ.

Ανεξάρτητα όμως από την εφαρμογή, σε όλες τις περιπτώσεις κατά τον σχεδιασμό ενός Α.Δ.Α οι ακόλουθοι παράγοντες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη [4]:

- *Εξοικονόμηση Ενέργειας (energy conservation)*: Λόγω της περιορισμών στα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων και λόγω των απαιτητικών για κάποιες εφαρμογές λειτουργιών που επιτελούν, αποδοτικοί μέθοδοι διαχείρισης ενέργειας απαιτούνται επειδή είναι τις περισσότερες φορές αδύνατη η ανανέωση των αποθεμάτων τους. Οι μέθοδοι αφορούν: *έλεγχο ισχύος εκπομπής και διαχείριση τοπολογίας*.
- *Περιορισμένο εύρος ζώνης (limited bandwidth)*: Τα ασύρματα δίκτυα γενικά χαρακτηρίζονται από περιορισμένο διαθέσιμο εύρος ζώνης στους κόμβους. Ο λόγος είναι κυρίως οι ραδιοπαρεμβολές (radio interference) από τις ταυτόχρονες επικοινωνίες στην ίδια ζώνη συχνοτήτων.
- *Τοπολογία χρονικά μεταβαλλόμενη (time varying topology)*: Σε πολλές εφαρμογές που δεν απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός της τοπολογίας δικτύου, οι κόμβοι τοποθετούνται αυθαίρετα εντός του χώρου παρακολούθησης. Συνεπώς ο γράφος των συνδέσεων που χαρακτηρίζει το

δίκτυο αυτό είναι αδόμετος. Επιπροσθέτως λόγω των πιθανών μετακινήσεων, συχνών φαινομένων αστοχίας υλικού των κόμβων, παρεμβολών και εμποδίων η τοπολογία (όσο αφορά τις συνδέσεις και την μορφή της) μπορεί να αλλάξει.

- Χαμηλής ποιότητας επικοινωνία (low quality communications): Η ποιότητα επικοινωνίας στο ασύρματο μέσο είναι λιγότερο αξιόπιστη σε σχέση με το ενσύρματο. Επιπροσθέτως η ποιότητα της επικοινωνίας επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από περιβαντολλογικούς παράγοντες [5], οι οποίοι είναι χωρο - χρονικά μεταβαλλόμενοι.

1.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, “Wireless Sensor Networks: A Survey”, in *Computer Networks Journal*, vol. 38, pp.393 – 422, 2002
- [2] S. Tilak, N. B. Abu – Ghazaleh and W. Heinzelman, “A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models”, in *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol.6, issue 2, Apr. 2002
- [3] P. Baronti, P. Pillai, V. Chook, S. Chessa, A. Gotta and Y. Fun Hu, “Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards”, in *Computer Communications Elsevier*, vol. 30, pp. 1655 – 1695, 2007
- [4] P. Santi, “Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks”, in *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 37, issue 2, pp. 164 – 194, 2005
- [5] G. Anastasi, E. Borgia, M. Conti, E. Gregori and A. Passarella, “Understanding the real behavior of Mote and 802.11 ad hoc networks: an experimental approach”, in *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 1, pp.237 – 256, 2005
- [6] M. Petrova, J. Riihijarvi, P. Mahonen and S. LaBell, “Performance Study of IEEE 802.15.4 Using Measurements and Simulations”, in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2006)*, vol.1, pp.487 – 492, 2006

- [7] A. Koubaa, M. Alves, B. Inefzi and Ye-Qiuing Song, “Improving the IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA MAC for Time-Critical Events in Wireless Sensor Networks”, in *Proceeding of Real-Time Networks (RTN 2006)*, 2006
- [8] IEEE Std 802.15.4a, “Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)”, 2007.
- [9] Ms. Dharmistha and D. Vishwakarma, “IEEE 802.15.4 and ZigBee: A Conceptual Study”, in *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 1, issue. 7, 2012
- [10] Theodore S. Rappaport, “Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Edition)
- [11] P. Santi, “Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks”, Wiley, 2009

2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ WSN ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παραθέτουμε δύο μεθοδολογίες τοποθέτησης κόμβων στο επίπεδο (2-διαστάσεις). Οι μεθοδολογίες αυτές που βασίζονται σε αλγόριθμο κατασκευής τοπολογίας, προορίζονται κυρίως για γεωργικές εφαρμογές ακριβείας, με την έννοια ότι βασικό στοιχείο για την λειτουργία τους είναι η διάθεση χαρτών διαχείρισης της παραλλακτικότητας του εδάφους. Οι χάρτες αυτοί δεν είναι αντικείμενο της μελέτης, αλλά βασικό συστατικό για τους αλγορίθμους που σχεδιάζουν τοπολογίες δικτύων αισθητήρων (topology control algorithms).

2.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΣΕ Α.Δ.Α ΒΑΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

2.1.1 Εισαγωγή

Σε πολλές εφαρμογές των WSNs στην Γεωργία Ακριβείας (ΓΑ), η τοποθέτηση των κόμβων για μέτρηση υγρασίας, θερμοκρασίας βασίζεται σε τοποθέτηση πλέγματος (grid placements). Ο σχεδιασμός ενός δικτύου αισθητήρων που θα καλύψει μία γεωγραφική περιοχή βασίζεται σε πολλά κριτήρια, όπως είδος και δυνατότητες κόμβων, επιλογή πρωτοκόλλων δρομολόγησης, είδος και πλήθος αισθητήρων ανά κόμβο, κατανάλωση ενέργειας, χρήση επαναληπτών (relays) και βέλτιστη τοποθέτηση κόμβων.

Στο παρόν κεφάλαιο ένας νέος τρόπος τοποθέτησης κόμβων εντός 2 διαστάσεων έκτασης προτείνεται, ο οποίος βασίζεται στην μέτρηση της φαινομενικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Electrical Conductivity – EC_a) του εδάφους. Εκμεταλλευόμενοι την παραλλακτικότητα του εδάφους για την μηχανική σύσταση, την οργανική ουσία, τα ιόντα και την υγρασία, από τις μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας προκύπτουν οι ζώνες διαχείρισης. Ο διαχωρισμός του εδάφους σε χωραφιού ή ζώνες, όπου η κατά μέσο όρο μετρήσεις υγρασίας δεν έχουν μεγάλες διαφορές, δείχνει τον τρόπο για έναν διαφορετικό και μη ομοιόμορφο τρόπο

τοποθέτησης κόμβων σε πλέγμα. Συνεπώς, δεν είναι απαραίτητο να εισάγουμε πολλούς κόμβους εντός της ίδιας ζώνης, διότι όλοι τους θα μετρούν όμοιες τιμές. Ο νέος τρόπος τοποθέτησης που προτείνουμε, ανισοκατανέμει τους κόμβους εντός περιοχής και τους τοποθετεί σε χαρακτηριστικά σημεία για τη μέτρηση υγρασίας.

Επιπροσθέτως, για τεχνικούς λόγους οι κόμβοι συλλέκτες προτείνονται να τοποθετούνται κοντά στα όρια (borders) των ζωνών ώστε να μπορούν να ανταλλάσσουν πακέτα μεταξύ τους και να δρομολογούν σωστά την πληροφορία. Όλες οι μετρήσεις στέλνονται σε κάποιον σταθμό βάσης (gateway node) είτε απευθείας (1-hop) είτε μέσω επαναληπτών (relays) με multi-hop. Μέσω ενός WSN, η παρατήρηση και διαχείριση μίας περιοχής και του εδάφους γίνεται εφικτή. Σε αντίθεση με την τοποθέτηση πλεοναζόντων κόμβων σε διάταξη πλέγματος (grid), η προτεινόμενη προσέγγιση κατευθυνόμενης τοποθέτησης των κόμβων χρησιμοποιεί έως και 70% λιγότερους κόμβους.

2.1.2 Γεωργία Ακριβείας (Precision Agriculture)

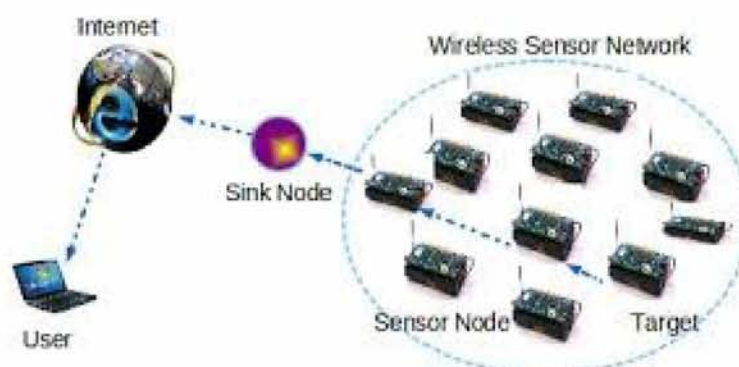
Η Γεωργία Ακριβείας (ΓΑ) αναφέρεται στη χρήση ενός συστήματος πληροφοριών για την ενδο-εδαφική διαχείριση των καλλιεργειών [1 - 3]. Αυτό πρακτικά σημαίνει να μπορεί να προσθέτει ο καλλιεργητής την σωστή ποσότητα λιπάσματος στο σωστό χρόνο και στην ακριβή τοποθεσία εντός της καλλιεργούμενης έκτασης εδάφους. Δηλαδή κάθε σημείο της καλλιέργειας αντιμετωπίζεται με διαφορετικό τρόπο και όχι ως ένα ολόκληρο και εννιαίο όσο αφορά την διαχείρισή του τμήμα. Η εφαρμογή τεχνικών ΓΑ συνεπάγεται ορισμένα από τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Ακρίβεια στην ποσότητα άρδευσης και διαχείρισης των υδάτων.
- Στοχευμένη χρήση και εφαρμογή φυτοφαρμάκων στους τομείς ενός αγρού.
- Έλεγχο στην ποσότητα του λιπάσματος.
- Ακριβής χρονικός προσδιορισμός σποράς και συγκομιδής.
- Μείωση των εξόδων της καλλιέργειας και καλύτερη διαχείριση των πόρων.

Η χρήση τεχνικών ΓΑ, δίνει στους αγρότες τη δυνατότητα να εφαρμόσουν νέες και συνεχώς αναπτυσσόμενες τεχνολογίες καλλιέργειας που τους βοηθούν να διαχειριστούν καλύτερα την παραγωγή. Ορισμένες από αυτές τις τεχνολογίες είναι: το *Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS)* [13], το *Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS)*, η *τηλεπισκόπηση*, οι συστοιχίες έξυπνων αισθητήρων και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) [4 - 5].

2.1.3 Τεχνολογία Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων

Με σκοπό την μέτρηση και καταγραφή περιβαλλοντικών δεδομένων, μία σειρά από αισθητήρες τοποθετούνται κατάλληλα ώστε να καλύψουν όλο το πεδίο παρατήρησης. Η λειτουργία και επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων είναι απαραίτητη για την λειτουργία ενός δικτύου αισθητήρων. Οι αισθητήρες μπορούν να προγραμματιστούν για να λάβουν μετρήσεις που αφορούν θερμοκρασία, υγρασία, ηλιοφάνεια, πίεση κτλ. Όλα τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες, τροφοδοτούνται σε έναν σταθμό βάσης (Sink Node ή Base Station) μέσω ασύρματης μετάδοσης και χρήση πρωτοκόλλων δρομολόγησης [6]. Ο σταθμός βάσης είναι συνήθως ένας κόμβος ή Η/Υ με πρακτικά απεριόριστα αποθέματα ενέργειας και συνδέεται με άλλα δίκτυα είτε ενσύρματα είτε ασύρματα. Τα δεδομένα μέσω αυτού, καταλήγουν στους τελικούς χρήστες για περαιτέρω ανάλυση [1][7] όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική Ασυρμάτου Δικτύου Αισθητήρων

(Πηγή: virtual-labs.ac.in)

2.1.4 Πλεονεκτήματα από την εφαρμογή Α.Δ.Α. σε Καλλιέργειες

Η χρήση ενός Α.Δ.Α. ως εργαλείο για την εφαρμογή τεχνικών Γ.Α. συνεπάγεται τα παρακάτω οφέλη, σε συνδιασμό με τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η Γ.Α. στους γεωπόνους και καλλιεργητές:

- Ικανότητα παρατήρησης της κατάστασης της καλλιέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Άμεση και ακριβής ενημέρωση της κατάστασης του αγρού και δυνατότητα παρέμβασης σε περίπτωση άμεσης ανάγκης.
- Λήψη αποφάσεων από απόσταση.
- Δυνατότητα αποθήκευσης πληροφοριών προκειμένου να δημιουργηθεί μία βάση δεδομένων με πληροφορίες για τον αγρό.
- Δυνατότητα για ακριβή αξιολόγηση των μεθόδων και τεχνικών συγκομιδής.
- Φίλικό γραφικό περιβάλλον του συστήματος παρακολούθησης και καταγραφής μετρήσεων.
- Συλλογή δεδομένων για τον έλεγχο της ομαλής λειτουργίας του δικτύου και της επικοινωνίας των κόμβων.
- Ευκολία εγκατάστασης.
- Ασφάλεια στην επικοινωνία και ακεραιότητα των δεδομένων.

2.1.5 Μέθοδοι και Εργαλεία

Η Γεωργία Ακριβείας βασίζεται κυρίως στην διαχείριση της παραλλακτικότητας του εδάφους και των φυτών. Η παραλλακτικότητα στην παραγωγή καθορίζεται από τη μεταβλητότητα στη δομή του εδάφους του αγρού, π.χ. από την οργανική ύλη, από το επίπεδο του αλατούχου διαλύματος και από τα επίπεδα υγρασίας (ποσότητα νερού), από το γενετικό υλικό των φυτών και από τους κλιματικούς παράγοντες. Για τη διαχείριση του εδάφους με διαφορετικούς τρόπους, λεπτομερείς χάρτες διαχείρισης του εδάφους θα πρέπει να παράγονται, στους οποίους απεικονίζεται η παραλλακτικότητα. Η πληροφορία των χαρτών διαχείρισης μπορούν να υποδείξουν με έμμεσο τρόπο την τοπολογική απεικόνιση ενός δικτύου αισθητήρων. Ο λόγος είναι ότι εντός του πεδίου της εδαφικής ζώνης με μετρήσεις

παραμέτρων του εδάφους ή της φυτείας, ένας ή περισσότεροι αισθητήρες είναι απαραίτητοι για την συλλογή μετρήσεων. Διαφορετικά στην ίδια ζώνη λόγω του ότι οι μετρήσεις έχουν μεγάλη συσχέτιση, δεν είναι απαραίτητη η τοποθέτηση πολλών αισθητήρων. Συνεπώς, οι χάρτες διαχείρισης λειτουργούν ως κριτήριο στα χέρια του σχεδιαστή ενός Α.Δ.Α., που έχει σκοπό την τοποθέτηση κόμβων όχι με την κλασσική διάταξη πλέγματος (grid placement), αλλά βάση πιο ευέλικτου και μη ομοιόμορφου τοπολογικού διαγράμματος.

2.1.6 Ζώνες Διαχείρισης (Management Zones)

Οι ζώνες διαχείρισης εδάφους είναι μικρότερα τμήματα του αγρού που παρουσιάζουν ορισμένες διαφοροποιήσεις μεταξύ τους και η καθεμία τους επιδέχεται διαφορετική μεταχείριση και τακτική καλλιέργειας. Το κριτήριο δημιουργίας των ζωνών αυτών δεν είναι μόνο ένα και δεν είναι πάντα σταθερό. Η τμηματοποίηση και ο χωρισμός του εδάφους καλλιέργειας σε ζώνες εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως υγρασία, οργανική ύλη και επίπεδα αργίλου στο χώμα, οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη από τους γεωπόνους. Στην ακόλουθη εικόνα, διακρίνονται χαρακτηριστικά 4 ζώνες, κάθε μία εκ των οποίων έχουν τα δικά τους γνωρίσματα:



Εικόνα 2: Παράδειγμα Ζωνών Διαχείρισης

Το μέγεθος και το πλήθος των ζωνών εξαρτάται από τα κριτήρια που εφαρμόζει ο γεωπόνος, τις μετρήσεις που έχει στη διάθεσή του και έχει εμπειρικό χαρακτήρα. Συνεπώς δεν υπάρχει αυστηρά καθορισμένος κανόνας. Επιπλέον, το σχήμα των ζωνών εξαρτάται από την εκάστοτε μέτρηση χημικής ουσίας στο έδαφος

και η οποία καθορίζει την μεταβλητότητα του εδάφους. Για την σωστή εφαρμογή της Γ.Α. οι ζώνες θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό καλύτερα και ξεκάθαρα καθορισμένες. Αυτό το σημείο είναι καθοριστικό για την διαμόρφωση της τοπολογίας ενός δικτύου αισθητήρων, καθώς και το πλήθος των κόμβων προς τοποθέτηση.

2.1.7 Φαινομενική Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC_a) και Σύστημα Veris

Η φαινομενική ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC_a) ορίζει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα διαπερνά το έδαφος. Η τιμή της είναι συνάρτηση κυρίως των αλάτων, της σύστασης του εδάφους, των επιπέδων αργίλου, την οργανική ουσία και το νερό. Εδαφικές περιφέρειες με τις ίδιες τιμές αγωγιμότητας ανήκουν με μεγάλη πιθανότητα στο ίδιο εδαφικό τύπο και επομένως η παραγωγή χαρτών διαχείρισης μπορεί να βασιστεί στην μέτρηση της EC_a . Περιοχές με την ίδια (ή με μεγάλη συσχέτιση) τιμή της EC_a θεωρούνται ότι ανήκουν στην ίδια ζώνη [8]. Συνεπώς, ο σχεδιασμός της τοπολογίας του δικτύου μπορεί να βασιστεί στα επίπεδα EC_a που θα καθορίσουν και τις ζώνες παραλλακτικότητας. Η φαινομενική Ηλεκτρική Αγωγιμότητα αποτελεί μία μετρήσιμη ιδιότητα του εδάφους που εξαρτάται από εγγενή χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως ενσωματώνονται στην παρακάτω σχέση:

$$EC_a = f(\text{Clay}, \text{Sand}, \text{OM}, \text{Water}, \text{Salt})$$

Περιοχές με ίδιες τιμές EC_a κατά πάσα πιθανότητα ανήκουν στον ίδιο εδαφικό τύπο. Σύμφωνα με έρευνες και εκτενείς μετρήσεις, κύριος παράγοντας επηρεασμού και καθορισμού των τιμών EC_a είναι η υγρασία [23]. Εάν καταφέρουμε να έχουμε ομοιόμορφη υγρασία πχ με μέτρηση μετά από βροχή τότε οι διαφορές της EC_a προέρχονται κυρίως από τη μηχανική σύσταση του εδάφους και ουσιαστικά από τη περιεκτικότητα σε άργιλο. Δεδομένου ότι η μηχανική σύσταση του εδάφους είναι σταθερή, τότε και το διαμορφούμενη τοπολογία δικτύου είναι σταθερή. Ωστόσο, κάθε φορά που τα επίπεδα υγρασίας αλλάζουν, το δίκτυο δεν χρειάζεται να επανασχεδιαστεί, διότι τα επίπεδα αλλάζουν ομοιόμορφα, άρα δεν μεταβάλλονται οι ζώνες διαχείρισης. Ένα από τα πλέον χρησιμοποιούμενα συστήματα για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι το Veris 3100 [23]. Αυτή η συσκευή συνοδεύεται μαζί με έναν υποδοχέα GPS, έτσι ώστε κάθε μέτρηση να καταγράφεται με ακρίβεια εντοπισμού θέσης και να συλλέγεται σε μια κεντρική μονάδα. Ένα αρχείο δεδομένων παράγεται για κάθε εδαφική περιοχή που σαρώνεται και περιλαμβάνει μέτρηση της

EC_a με τις συντεταγμένες του σημείου που λήφθηκε η μέτρηση. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα, τα δεδομένα να αναπαρασταθούν με γραφικό τρόπο, έτσι ώστε οι περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά μπορούν να ταξινομηθούν, να διακριθούν και να γίνουν ξεκάθαρες. Αυτό απαιτεί την επεξεργασία των δεδομένων από εξειδικευμένο λογισμικό του συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών (GIS).

2.1.8 Σχεδιασμός Αποδοτικής Τοπολογίας Α.Δ.Α.

Η ιδέα για τον σχεδιασμό ενός δικτύου αισθητήρων με λιγότερους κόμβους τοποθετημένους σε στρατηγικά σημεία μετρήσεων βασίζεται στην εμπειρική παραγωγή χαρτών διαχείρισης εδάφους βάση επιπέδων EC_a. Η τελική τοπολογία δικτύου δεν ακολουθεί την λογική του πλέγματος (grid placement), στο οποίο τοποθετούνται περισσότεροι κόμβοι, και οι οποίοι έχουν μεγάλη πιθανότητα να λάβουν μετρήσεις με αυξημένη συσχέτιση εντός της ίδιας ζώνης. Προτείνουμε την ακόλουθη μεθοδολογία η οποία μας οδηγεί σε μη ομοιόμορφη διανομή κόμβων εντός περιοχής 2 διαστάσεων (2D field):

- Σάρωση του εδάφους με το Veris
- Διαχωρισμός των ζωνών βάση επιπέδων EC_a
- Καταγραφή των σημείων που αποτελούν φυσικά εμπόδια για την ασύρματη επικοινωνία κόμβων (π.χ. λόφοι)
- Τοποθέτηση κόμβων σε σημεία όπου: 1) Είναι επιτυχής η μεταξύ των κόμβων ασύρματη σύνδεση και επικοινωνία με σκοπό την προώθηση πακέτων δεδομένων στον σταθμό βάσης και 2) Εκφράζουν το μέσο όρο των μετρήσεων EC_a της ζώνης στην οποία ανήκουν.

2.1.9 Προτεινόμενη Τοπολογία

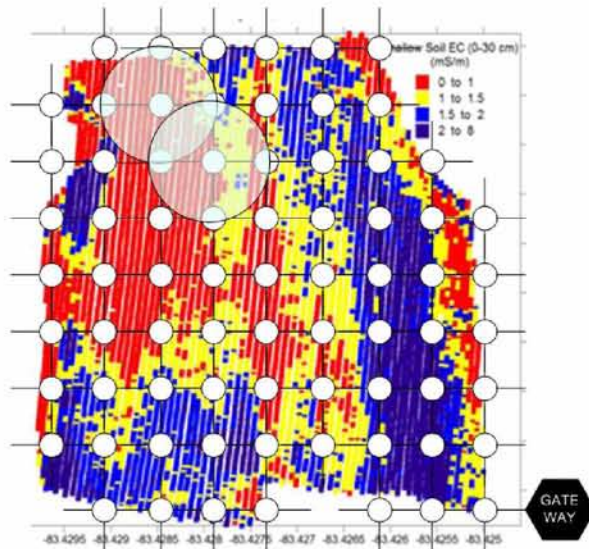
Για τον έλεγχο της προτεινόμενης μεθοδολογίας έγινε μία σειρά από προσομοιώσεις, λαμβάνοντας υπόψη τα ακόλουθες σενάρια:

- Μία τοπολογία πλέγματος (grid topology) με 56 κόμβους και απόσταση 32m μεταξύ τους. Την ονομάζουμε “grid” .

- Προτεινόμενη τοπολογία (proposed topology), όπως προκύπτει από την προαναφερθείσα μεθοδολογία τοποθέτησης κόμβων και τις μετρήσεις EC_a. Την ονομάζουμε “veris”. Στην τοπολογία αυτή, τοποθετούμε κόμβους μόνο σε αντιπροσωπευτικές περιοχές εσωτερικά μίας ζώνης διαχείρισης.

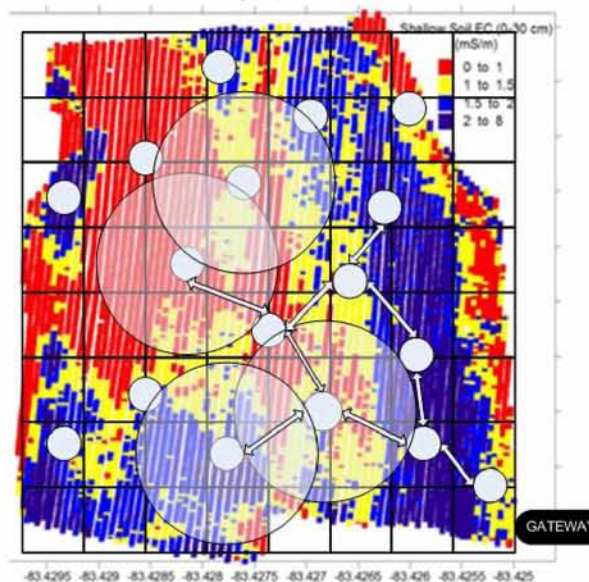
Για να γίνει πιο αληθοφανές το σενάριο προσομοίωσης, απεικονίζουμε τους δύο τύπους τοπολογιών σε ένα χωράφι με καλλιέργεια βαμβακιού, στην περιοχή της Καρδίτσας (Κεντρική Ελλάδα). Σύμφωνα με την [8], υπάρχουν μετρήσεις για την EC_a μέσω του Veris σε βάθος εδάφους 0 - 90cm και τα 50 στρέμματα κατηγοριοποιούνται σε πέντε διακριτές ζώνες.

Η απόσταση επικοινωνίας (communication distance) κάθε κόμβου εξαρτάται από την τεχνολογία της κεραίας του (RF Technology), το κέρδος της κεραίας (antenna gain), τα επίπεδα εξασθένησης του σήματος (signal path loss) λόγω απόστασης, ανάκλασης και απορρόφησης (signal fading phenomena), τον καιρό (environmental factor) και τα φυσικά εμπόδια μεταξύ πομπού – δέκτη. Θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν εμπόδια και ότι οι κόμβοι δεν τοποθετούνται στην μέγιστη δυνατή απόσταση επικοινωνίας τους. Τους τοποθετούμε στα σημεία όπου κατόπιν μέτρησης ποιότητας σήματος τα επίπεδα σήματος προς θόρυβο (SNR) είναι μεγαλύτερα από κάποιο όριο (reception signal threshold). Στόχος είναι να τοποθετηθεί ο (σχεδόν) βέλτιστος (near optimal) αριθμός των κόμβων, οι οποίοι θα εγγυηθούν τη μέτρηση των χαρακτηριστικών ποσοτήτων της κάθε ζώνης καθώς επίσης και την εύρωστη λειτουργία του δικτύου. Υπάρχει ένα trade-off μεταξύ πλήθους κόμβων, ποιότητα καταγραφής μετρήσεων και λειτουργίας δικτύου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η αρχική grid τοπολογία:



Εικόνα 3: Grid τοπολογία με 56 κόμβους και 1 Σταθμό Βάσης (gateway)

Οι ζώνες ανάλογα με τις τιμές EC_a , φαίνονται στην Εικόνα 3 με το αντίστοιχο χρώμα. Η grid τοποθέτηση αφορά χρήση περισσότερων κόμβων εντός μίας ζώνης. Σε αντίθεση, στην veris τοπολογία που φαίνεται στην Εικόνα 4, οι κόμβοι τοποθετήθηκαν βάση της προαναφερθείσας τεχνικής, ένας στο κέντρο της κάθε ζώνης:



Εικόνα 4: Veris τοπολογία με 16 κόμβους και 1 Σταθμό Βάσης (gateway)

Συγκρίνοντας τις δύο τοπολογίες, παρατηρούμε ότι η μείωση του αριθμού των κόμβων στην veris φτάνει το 70% σε σχέση με την grid. Αυτός είναι ο ελάχιστος

δυνατός αριθμός κόμβων που χρειάζεται για να καλύψουμε την περιοχή, δεδομένων των ζωνών που υπάρχουν. Εάν κριθεί σκόπιμο, και για θέματα μείωσης κατανάλωσης ενέργειας κατά την μετάδοση πακέτων δεδομένων, επιπρόσθετοι κόμβοι επαναλήπτες (relays) μπορούν να τοποθετηθούν σε θέσεις – κλειδιά για την επικοινωνία εντός της ζώνης. Στην εικόνα 4, βλέπουμε ότι τα βέλη απεικονίζουν τον τρόπο επικοινωνίας των κόμβων ως multi – hop. Αυτός κρίνεται σκόπιμος όταν οι κόμβοι είναι σε μακρινές αποστάσεις τόσο για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας όσο και για την μείωση της πιθανότητας εξασθένησης του σήματος.

Ένα βασικό σημείο στο σχεδιασμό του δικτύου είναι να ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως η σκέδαση, η απορρόφηση και η αποδυνάμωση του σήματος που εξαρτώνται κάθε φορά από το είδος της καλλιέργειας, το ύψος της φυλλικής επιφάνειας, όπως επίσης και από λοφίσκους και μηχανοκίνητα συστήματα εντός του εδάφους, καθώς επίσης και εξωτερικές πηγές θορύβου όπως καλώδια υψηλής τάσης. Άλλοι παράγοντες είναι η τεχνολογία των αισθητήρων (hardware και σύστημα κεραίας) καθώς επίσης οι κλιματολογικές συνθήκες (μικροκλίμα αγρού) που επικρατούν στην περιοχή. Μειονέκτημα της προτεινόμενης (veris) τοπολογίας αποτελεί το γεγονός ότι για να μεταφέρουν όλες οι μετρήσεις στο σταθμό βάσης, περνούν από λιγότερους κόμβους, που σημαίνει ότι καταναλώνεται συνολικά περισσότερη ενέργεια για την επικοινωνία τους αφού αφορά μεγαλύτερες αποστάσεις. Στο σημείο αυτό ένα trade-off ανάμεσα στο συνολικό κόστος λύσης (budget) και ενεργειακής κατανάλωσης. Μία λύση είναι να χρησιμοποιήσουμε ηλιακά panels στους κόμβους για φόρτιση της μπαταρίας τους (solar energy harvesting) ή να φορτίσουμε τους κόμβους με μη ομοιόμορφο τρόπο ανάλογα με την τοποθεσία τους, το πλήθος των κόμβων – γειτόνων τους και την απόσταση μεταξύ τους.

Στην δική μας μελέτη λάβαμε ως δεδομένες και έγκυρες τις ζώνες διαχείρισης που παράγει το σύστημα Veris 3100 και έπειτα μελετήσαμε τα τηλεπικοινωνιακά χαρακτηριστικά του συστήματος δικτύων αισθητήρων. Βασιστήκαμε επίσης στο γεγονός ότι κατά κύριο λόγο η αγωγιμότητα επηρεάζεται από τα επίπεδα υγρασίας, τα οποία παραμένουν αναλογικά σταθερά σε περίπτωση βροχόπτωσης και άρα τα επίπεδα υγρασίας επηρεάζουν όλη την έκταση ομοιόμορφα. Αυτό έχει ως συνέπεια οι ζώνες να μην μεταβάλλονται και άρα ούτε και η τοπολογία που προτείνεται να χρειάζεται να επανασχεδιαστεί.

2.1.10 Προσομοιωτής PROWLER/RMAZE

Διάφορα περιβάλλοντα προσομοίωσης για ad-hoc ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ελεύθερα διαθέσιμα [9]. Μερικά παραδείγματα είναι: 1) ns – 2 είναι ίσως ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος και δωρεάν προσομοιωτής για δίκτυα ενσύρματα και ασύρματα και υποστηρίζει και δίκτυα αισθητήρων, 2) Ο TOSSIM , που δημιουργήθηκε για δίκτυα αισθητήρων και στον οποίο μπορεί να εκτελεστεί ο κώδικας σε TinyOS που έχει γραφτεί για φυσικές συσκευές, 3) Ο Emstar που είναι γραμμένος σε γλώσσα C και είναι κατάλληλος για ανάπτυξη εξειδικευμένων εφαρμογών υλικού για κόμβους 4) Ο OMNET++, οποίος είναι discrete event simulator βασισμένος σε C++ και με την υποστήριξη του πακέτου CASTALIA, γίνεται κατάλληλος για A.Δ.Α. που υποστηρίζουν πρωτόκολλο IEEE 802.15.4. Η μερική αυτή λίστα των διαθέσιμων εργαλείων προσομοίωσης αποδεικνύει ότι δεν υπάρχει απόλυτη και σωστή λύση. Η τελική επιλογή εξαρτάται από τον σκοπό του δικτύου προς ανάπτυξη, τα κριτήρια λειτουργίας του και την εφαρμογή.

Επιπροσθέτως, λόγω του ότι υπάρχει μία μεγάλη ποικιλία αλγορίθμων δρομολόγησης για ad hoc ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, και ο καθένας έχει το δικό του σενάριο λειτουργίας, είναι δύσκολο να συγκριθούν όλοι οι αλγόριθμοι και να αποφασιστεί ο κατάλληλος. Για να συγκριθεί και να αξιολογηθεί η λειτουργία προτεινόμενων αλγορίθμων δρομολόγησης για A.Δ.Α, κρίνεται σκόπιμη η high-level (in OSI layer) διεξαγωγή προσομοίωσης. Τέτοιου είδους προσομοιώσεις διευκολύνουν την ταχεία ανάπτυξη και ανάλυση αλγορίθμων, χωρίς να εμμένουν σε τεχνικές λεπτομέρειες υλοποίησης επιπέδου υλικού. Ακόμη, μπορεί κανείς να εφαρμόσει διαφορετικά μοντέλα ασύρματης επικοινωνίας (radio models) με σκοπό να κάνει το σενάριο προσομοίωσης περισσότερο ρεαλιστικό. Την λύση την δίνει ο PROWLER [10], ένας πιθανοκρατικός προσομοιωτής για ασύρματα δίκτυα και δίκτυα αισθητήρων, που έχει αναπτυχθεί για να εξυπηρετεί τον σκοπό αυτό.

Ο PROWLER μπορεί να ρυθμιστεί είτε να λειτουργεί με ντετερμινιστικό τρόπο αναπαράγοντας τα ίδια αποτελέσματα, είτε πιθανοκρατικά, όπου προσομοιώνει ρεαλιστικά το μη-ντετερμινιστικό χαρακτήρα της ασύρματης επικοινωνίας και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου των δικτύων αισθητήρων. Το περιβάλλον PROWLER παρέχει ένα σύνολο πιθανοκρατικών (probabilistic) και απλών radio/MAC models από τα οποία ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει ανάλογα με

την εφαρμογή. Το βασικό στοιχείο των μοντέλων είναι το μοντέλο διάδοσης σήματος (signal propagation model) το οποίο καθορίζει την ποιότητα του σήματος σε ένα σημείο του χώρου από όλους τους transmitters. Σε ιδανικές συνθήκες χωρίς εμπόδια, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος εξασθενεί λόγω της απόστασης μεταξύ του sender/receiver, βάση της ακόλουθης πολυωνυμικής συνάρτησης [15] :

$$P_{rec,ideal}(d) = P_{tx} \frac{1}{1+d^\gamma} \quad (1)$$

όπου P_{tx} είναι η ισχύς του σήματος του αποστολέα, $P_{rec,ideal}(d)$ είναι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος στον παραλήπτη σε απόσταση d και γ είναι ο παράγοντας εξασθένης με τυπικές τιμές $2 \leq \gamma \leq 5$, και εξαρτάται από εμπόδια και περιβαλλοντολογικές συνθήκες [24]. Ωστόσο η διάδοση των σημάτων σε πραγματικές συνθήκες συμπεριφέρονται με διαφορετικό τρόπο και η απώλεια ισχύος μετράται λόγω της σχέσης (1) μόνο στατιστικά [10]. Η ισχύς ενός σήματος μπορεί να παρουσιάζει μεγάλες παραλλαγές (variations) λόγω της απόστασης καθώς επίσης σε μακρυνότερη απόσταση να είναι ποιοτικά καλύτερο το σήμα από άλλο σήμα σε κοντινότερη. Επίσης, ακόμη και σε περίπτωση σταθερής απόστασης ένα σήμα μπορεί να εμφανίσει διαφοροποίηση στην ποιότητά του. Αυτό το fading effect μοντελοποιείται στο radio model του PROWLER τροποποιώντας την σχέση (1) ως εξής:

$$P_{rec}(i,j) = P_{rec,ideal}(d_{ij})[1 + a(d_{ij})][1 + \beta(t)] \quad (2)$$

όπου d_{ij} είναι η απόσταση μεταξύ του κόμβου i και του j , a και β είναι τυχαίες μεταβλητές (random variables) με κανονικές κατανομές $N(0, \sigma_a)$ και $N(0, \sigma_\beta)$ αντίστοιχα. Η τυχαία μεταβλητή a εξαρτάται από τις συντεταγμένες τοποθεσίας των κόμβων i, j και της απόστασής τους, άρα υπολογίζεται ξανά σε περίπτωση που μεταβληθούν οι θέσεις τους. Η τυχαία μεταβλητή β είναι συναρτώμενη του χρόνου, άρα υπολογίζεται συνεχώς στην αρχή κάθε αποστολής πακέτου.

Με τη χρήση μοντέλων διάδοσης σήματος (propagation models), η ισχύς του σήματος μπορεί να υπολογιστεί στον παραλήπτη. Η επιτυχής λήψη και αποκωδικοποίηση ενός σήματος εξαρτάται από την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος P_{rec} και από την πιθανή παρεμβολή (interference) που προκαλείται από ταυτόχρονες και μη συγχρονισμένες απόπειρες αποστολής πακέτων όταν συμπίπτουν στον χρόνο.

Ο PROWLER κάνει χρήση των ακόλουθων μοντέλων για την εκτίμηση του σήματος στον παραλήπτη:

- Model 1: Είναι το απλό και βασικό μοντέλο το οποίο συγκρίνει την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος με ένα προκαθορισμένο όριο (reception threshold). Ένας κόμβος j μπορεί να λάβει ένα πακέτο από έναν κόμβο i εάν:

$$P_{rec}(i, j) \geq D_{rec} \quad (3) \text{ και } P_{rec}(k, j) < D_{rec}, \forall k \in \Lambda_i \setminus i \quad (4)$$

όπου D_{rec} είναι το reception threshold και Λ_i είναι το σύνολο των κόμβων η μετάδοση των οποίων συμπίπτει χρονικά με αυτή του κόμβου i .

- Model 2: Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο Rayleigh fading model [15] και λαμβάνει υπόψη ένα πολυπλοκότερο τρόπο αντιμετώπισης συγκρούσεων (collisions). Ο υπολογισμός της ποιότητας σήματος λαμβάνει υπόψη το λόγο Signal to Interference and Noise Ratio (SINR) στον receiver. Η τιμή SINR για τον transmitter i και τον receiver j υπολογίζεται:

$$SINR = \frac{P_{rec}(j, i)}{\sigma_n^2 + \sum_{k \neq i} P_{rec}(j, k)} \quad (5)$$

Όπου σ_n^2 αντιπροσωπεύει την noise variance parameter και προκύπτει από μία κανονική κατανομή. Η συνολική ισχύς του σήματος στον κόμβο παραλήπτη j από κάθε κόμβο $k \neq i$ είναι:

$$P_{tot}(j) = \sum_k P_{rec}(j, k) \quad (6)$$

Το σήμα λαμβάνεται εάν το SINR στον παραλήπτη είναι μεγαλύτερο από ένα reception threshold καθόλη την διάρκεια της μετάδοσης. Το κανάλι θεωρείται idle εάν η συνολική ισχύς σήματος της σχέσης (6) είναι μικρότερη από κάποιο όριο, το οποίο είναι συνάρτηση της διακύμανσης θορύβου (noise variance) στον αποδέκτη. Σύγκρουση (collision) νοείται όταν η τιμή SINR στον receiver είναι μικρότερη από κάποιο reception όριο κάθε χρονική στιγμή t .

Το μοντέλο 1 είναι πιο απλό και οι υπολογισμοί του γίνονται γρηγορότερα, ενώ το μοντέλο 2 είναι περισσότερο ακριβές. Υπάρχει ένα trade-off ανάμεσα στην ταχύτητα και την ακρίβεια στους υπολογισμούς. Τα radio models στον PROWLER είναι παράμετροι επιλογής σε μία προσομοίωση για τον σχεδιαστή του δικτύου.

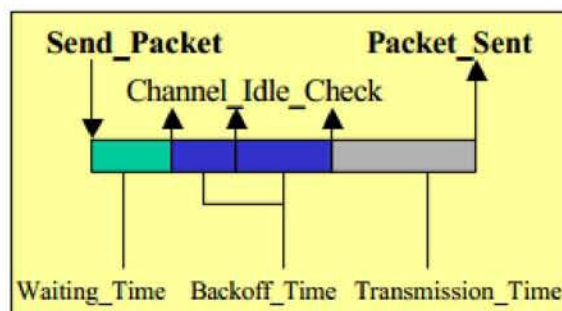
Μία από τις εφαρμογές του PROWLER που ολοκληρώνει την λειτουργία του είναι το RMAZE [11], ένα περιβάλλον μοντελοποίησης αλγορίθμων δρομολόγησης. Είναι γραμμένο σε MATLAB και είναι η βασική εφαρμογή που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις των τοπολογιών μας. Τα συστατικά του είναι τα ακόλουθα:

- Network Topology Generator: Η λειτουργία αυτή επιτρέπει στον σχεδιαστή του δικτύου να παράγει είτε τυχαίες τοπολογίες μέσω στατιστικής κατανομής είτε στατικές τοπολογίες με μεταβαλλόμενο πλήθος κόμβων.
- Routing Scenario Generator: Χρησιμοποιείται για να δημιουργεί διάφορα πρότυπα επικοινωνίας (communication patterns), όπως peer-to-peer, multicast of convergecast. Επίσης για την επιλογή ζεύγους κόμβου sender/receiver που είναι είτε στατικοί είτε κινούνται, καθώς επίσης ταχύτητα κίνησης και κατεύθυνση.
- Performance Metrics: Κοινές μετρικές απόδοσης (performance metrics) σε ένα ασύρματο δίκτυο για σύγκριση της απόδοσης των αλγορίθμων δρομολόγησης είναι τα εξής: καθυστέρηση (latency), ρυθμαπόδοση (throughput), επιτυχής παράδοση πακέτου (success rate) και κατανάλωση ενέργειας (energy consumption).

Μέσω του RMAZE ο PROWLER υποστηρίζει λειτουργίες που σχετίζονται τόσο με το MAC layer όσο με το Application layer του OSI. Ένα συστατικό του RMAZE χειρίζεται τα γεγονότα (events) όπως Packet Reception, Packet Sent και Clock Tick και εκτελεί κατάλληλες εντολές, όπως π.χ. Send Packet. Έτσι κατά την λογική της διαστρωμάτωσης του OSI, τα events προωθούνται στα ανώτερα στρώματα και οι εντολές στα κατώτερα.

Οι λειτουργίες στο επίπεδο πρόσβασης του μέσου (MAC layer) του OSI, μοντελοποιούνται βάση ενός απλοποιημένου event channel, όπως φαίνεται στην εικόνα 5. Το MAC layer του growler προσομοιώνει την λειτουργία CSMA/CA για την αποφυγή συγκρούσεων στην αποστολή/λήψη πακέτου ενσωματώνοντας γνωρίσματα όπως *random waiting time*, *channel idle checking* και *backoff intervals*. Όταν ένας κόμβος θέλει να στείλει ένα πακέτο, το application layer σηματοδοτεί ένα *Packet Sent* event μετά από ένα τυχαίο χρονικό διάστημα αναμονής και αφού έχει εξεταστεί εάν το κανάλι είναι αδρανές (idle) ή όχι το στέλνει. Εάν δεν εντοπιστεί

δραστηριότητα στο κανάλι, τότε στέλει το πακέτο, αλλιώς περιμένει για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα, η διάρκεια του οποίου ορίζεται από το *backoff time*. Κατά την επιτυχή αποστολή του πακέτου, μετά το πέρας του *transmission time* το application layer του αποστολέα σηματοδοτεί το *packet sent* event, και ανάλογα εάν το πακέτο παραδόθηκε σωστά ή όχι, σηματοδοτείται ένα *packet received* ή *collided packet received* event. Οι παράμετροι *waiting time* και *backoff time* που χρησιμοποιούνται για την λειτουργία CSMA/CA είναι τυχαίες παράμετροι, ομοιόμορφα καταμενημένες εντός προκαθορισμένων ορίων, ενώ η *transmission time* έχει σταθερή τιμή.



Εικόνα 5: Απλοποιημένο MAC layer model του Prowler

Τέλος, ο PROWLER και η επέκτασή του RMAZE έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν:

- Εξαιρετικά εύκολο στην χρήση και φιλικό για τον χρήστη (user friendly) περιβάλλον προσομοίωσης.
- Γρήγορη εφαρμογή και προτυποποίηση διαφόρων εφαρμογών δικτύων αισθηρήτων.
- Εύκολη χρήση του εργαλείου χωρίς την απαίτηση εξειδικευμένων γνώσεων ή χαρακτηριστικών φυσικής συσκευής κόμβου.
- Υψηλής πιστότητας εργαλείο προσομοίωσης με δυνατότητες παραμετροποίησης και χρήσης πρωτοκόλλων τόσο στο data link όσο και στο network layer.
- Ευκολία στην επέκταση υπάρχοντων μοντέλων για την κάλυψη αναγκών τόσο στο σχεδιασμό και την συμπεριφορά του δικτύου ανάλογα με την εφαρμογή.

2.1.11 Logical Grid Αλγόριθμος Δρομολόγησης (LGR)

Ο LGR είναι ένας αλγόριθμος δρομολόγησης πακέτων που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα Α.Δ.Α. για προώθηση πακέτων προς τον κόμβο βάση από οποιονδήποτε άλλον κόμβο εντός της τοπολογίας [14]. Στον LGR, οι κόμβοι μπορούν να τοποθετούνται αυθαίρετα σε φυσικές τοποθεσίες με συντεταγμένες (x,y) εντός περιοχής 2 διαστάσεων, αλλά αναπαριστώνται σαν να ακολουθούν ένα λογικό $N \times M$ πλέγμα (logical grid), όπου $N = M$ ή $N \neq M$ οι διαστάσεις της περιοχής ανάπτυξης του Α.Δ.Α. Ο κάθε κόμβος έχει τις συντεταγμένες του σε μορφή (x,y) , όπου $x = 0 \dots M-1$ και $y = 0 \dots N-1$. Ο σταθμός βάσης τοποθετείται στο $(0,0)$.

Ο αλγόριθμος δημιουργεί έναν άκυκλο γράφο (spanning tree), του οποίου ρίζα είναι ο κόμβος βάση στο $(0,0)$. Ο άκυκλος γράφος δημιουργείται ως εξής: Αρχικά κάθε κόμβος αποκτά ένα μοναδικό αναγνωριστικό (identifier), που είναι οι συντεταγμένες του. Κατόπιν, ο κάθε κόμβος εκτός από τον σταθμό βάσης, χρησιμοποιεί το αναγνωριστικό του για να υπολογίσει τους “πιθανούς γονείς (potential parents)” του στο spanning tree. Στο επόμενο βήμα, ο σταθμός βάσης αρχίζει και στέλνει περιοδικά “connected messages”. Όταν ένας κόμβος λάβει ένα connected message από οποιονδήποτε από τους potential parents του, τότε ο κόμβος συνδέεται με τον γονέα αυτόν στον γράφο και οι δύο τους ανταλλάσσουν περιοδικά connected messages. Όταν ένας κόμβος με συντεταγμένες (x,y) θέλει να στείλει πακέτα στον σταθμό βάσης στο $(0,0)$ τότε προωθεί τα πακέτα του σε έναν από τους potential parents του με συντεταγμένες (x',y') . Η σχέση μεταξύ των συντεταγμένων του κόμβου και του γονέα του πρέπει να ικανοποιούν μία από τις εξής συνθήκες:

1. $x > x'$ και $y > y'$
2. $x = x'$ και $y > y'$
3. $x > x'$ και $y = y'$

Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο δρομολόγησης έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλους αλγορίθμους:

1. Το overhead του πρωτοκόλλου είναι πολύ μικρό
2. Υποστηρίζει load balancing
3. Υποστηρίζει security features
4. Δείχνει καλή ανοχή σε σφάλματα (fault tolerance)

Για τους παραπάνω λόγους και για το ότι ο LGR έχει συγκριθεί με άλλα distance vector πρωτόκολλα δρομολόγησης στο [14] και έχει επιδείξει 34% μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχούς παράδοσης πακέτων, τον επιλέξαμε για τις προσομοιώσεις μας.

2.1.12 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

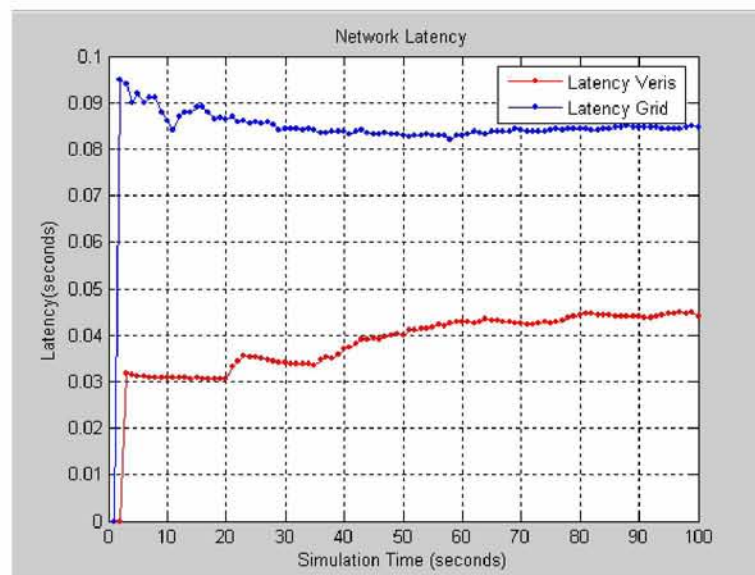
Στο σημείο αυτό παραθέτουμε τα αποτελέσματα σύγκρισης των τοπολογιών κάνοντας χρήση των μετρικών απόδοσης (performance metrics) τόσο για την *grid* τοπολογία όσο και για την προτεινόμενη τοπολογία *veris*. Οι ορισμοί και οι παραδοχές γύρω από τις μετρικές χρήσης είναι οι ακόλουθες:

- Συνολική καθυστέρηση δικτύου (Network Latency): Ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την αποστολή ενός πακέτου από την πηγή στον προορισμό. Σε περίπτωση που έχουμε περισσότερους από έναν προορισμούς (gateways) εντός της τοπολογίας, αν η πακέτα έχουν παραληφθεί, τότε η συνολική καθυστέρηση υπολογίζεται ως: $\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{n}$ όπου d_i είναι η καθυστέρηση για το i^{th} -πακέτο. Η συνολική καθυστέρηση που χαρακτηρίζει το δίκτυο προκύπτει ως μέσος όρος των καθυστερήσεων για κάθε προορισμό.
- Ρυθμαπόδοση δικτύου (Network Throughput): Ορίζεται ως το πλήθος των πακέτων που παραλαμβάνονται στην μονάδα του χρόνου (s). Η συνολική ρυθμαπόδοση του δικτύου υπολογίζεται ως άθροισμα των ρυθμαποδόσεων για κάθε τελικό παραλήπτη, εάν έχουμε παραπάνω από έναν στην τοπολογία.
- Επιτυχής ποσοστιαία παράδοση πακέτων (Network Success Rate): Ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός πακέτων που έχουν παραληφθεί σε σχέση με το συνολικό αριθμό πακέτων που έχουν σταλθεί από τους κόμβους αποστολείς. Ο υπολογισμός γίνεται ποσοστιαία.
- Ανεπιτυχής ποσοστιαία παράδοση πακέτων (Network Loss Rate): Ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός πακέτων που χάθηκαν και δεν παραλήφθηκαν (π.χ. λόγω συμφόρησης ή συγκρούσεων ή παρεμβολών) προς τον συνολικό των αναμενόμενων πακέτων για τον ίδιο προορισμό. Ο υπολογισμός γίνεται ποσοστιαία και εκφράζει την ποιότητα επικοινωνίας. Συνέπεια ενός υψηλού ποσοστού παραπέμπει

σε ελλιπείς μετρήσεις ή χαμηλά ποσοστά ανίχνευσης γεγονότων στο δίκτυο.

- Συνολική κατανάλωση ενέργειας (Network Energy Consumption): Ορίζεται ως το άθροισμα της κατανάλωσης ενέργειας για όλους τους κόμβους του δικτύου. Ο υπολογισμός ενέργειας αφορά κυρίως λειτουργίες στην επικοινωνία ενός κόμβου, όπως αποστολή πακέτου (transmission), αποδοχή πακέτου (reception) και κατάσταση αδράνειας (idle state), κατά την οποία ο κόμβος ούτε στέλνει, ούτε λαμβάνει πακέτα.

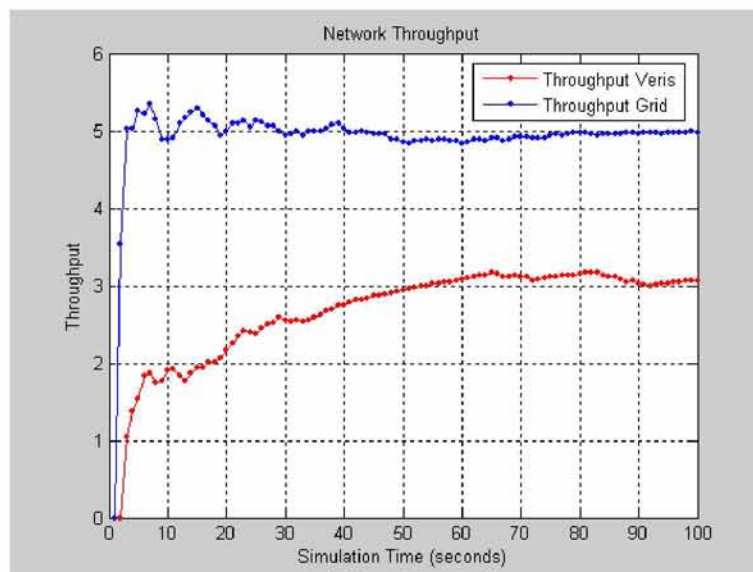
Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις αναπαριστούν τις μετρήσεις που προέκυψαν από τις χρησιμοποιούμενες μετρικές απόδοσης και αφορούν τις τοπολογίες grid και veris.



Εικόνα 6: Συνολική καθυστέρηση πακέτων (Network latency) από την πηγή στον προορισμό σε seconds, για *grid* και *veris* τοπολογία

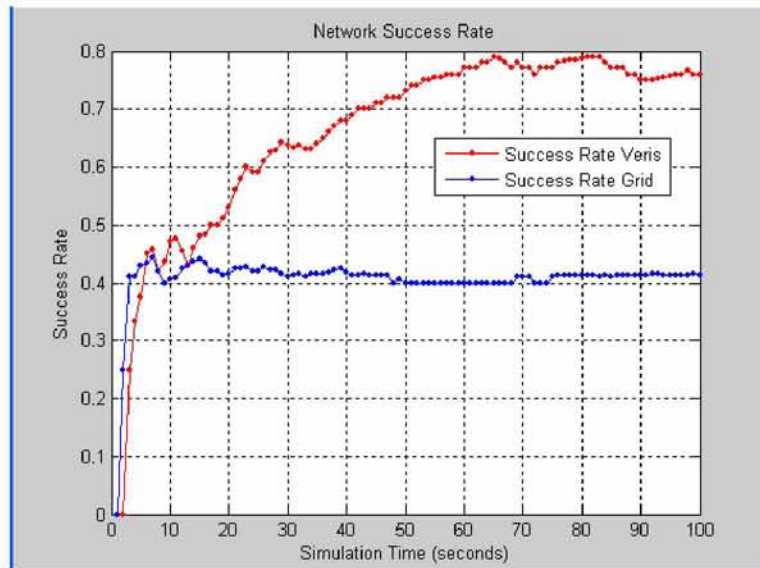
Στην εικόνα 6 απεικονίζεται η συνολική καθυστέρηση για την παράδοση πακέτων στον προορισμό. Στην *veris* τοπολογία η καθυστέρηση είναι κατά μέσο όρο 55% μικρότερη σε σχέση με την *grid*. Ο λόγος είναι ότι τα πακέτα ακολουθούν συντομότερα μονοπάτια στην περίπτωση της *multi-hop* επικοινωνίας και έτσι δεν καθυστερούν. Σε αντίθεση, στην *grid* τοπολογία, τα μονοπάτια δρομολόγησης (routing paths) είναι μεγαλύτερα, οι κόμβοι είναι περισσότεροι, η πιθανότητα

παρεμβολών μεταξύ κόμβων μεγαλύτερη, άρα και η συνολική καθυστέρηση αυξημένη.



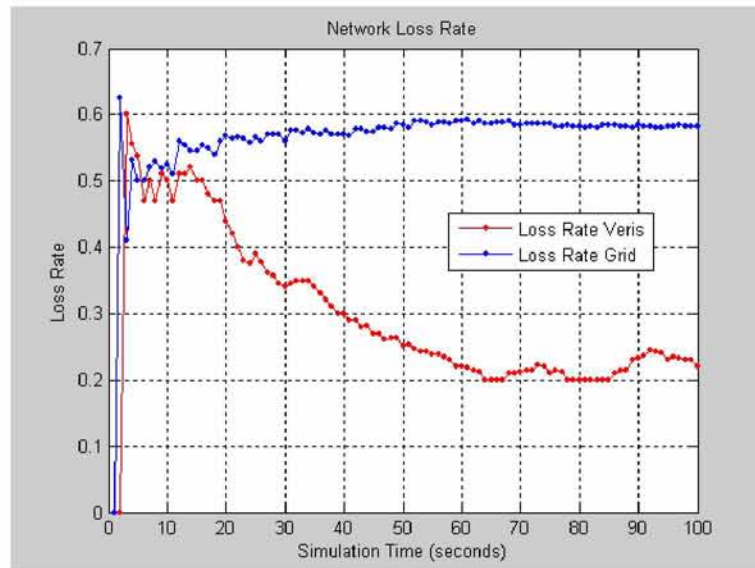
Εικόνα 7: Ρυθμαπόδοση (Network Throughput), για *grid* και *veris* τοπολογία

Η εικόνα 7 απεικονίζει την συνολική ρυθμαπόδοση, ως το πλήθος των πακέτων που παραλαμβάνονται από τον σταθμό βάσης στη μονάδα του χρόνου (s). Στην προσομοίωση που έγινε, τόσο για την *veris* όσο και για την *grid* τοπολογία, όλα τα πακέτα έχουν τον ίδιο και μοναδικό παραλήπτη. Παρατηρούμε ότι στην *grid* τοπολογία έχουμε μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση σε σχέση με την *grid*. Όπως ορίσαμε την ρυθμαπόδοση, στην *grid* τοπολογία παραλαμβάνονται περίπου 1180 πακέτα συνολικά και στην *veris* 396 πακέτα, που είναι 66% λιγότερα. Ωστόσο επειδή στην *veris* τοπολογία έχουμε λιγότερους κόμβους, μικρότερες καθυστερήσεις και χαμηλότερη απώλεια πακέτων (*network loss rate*), η ρυθμαπόδοση δείχνει να αυξάνεται καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης και η καμπύλη είναι κοίλη (*concave*) με τάση να σταθεροποιείται στο 3 πακέτα/sec. Αντίθετα στην *grid*, η ρυθμαπόδοση είναι με μικρές ταλαντώσεις κοντά στο 5 πακέτα/sec, χωρίς να αυξάνεται. Δεδομένου ότι στην *veris* τοπολογία έχουμε τοποθετήσει 70% λιγότερους κόμβους, η διαφορά στην ρυθμαπόδοση μεταξύ *grid* και *veris* είναι της τάξης του 35% κατά μέσο όρο.



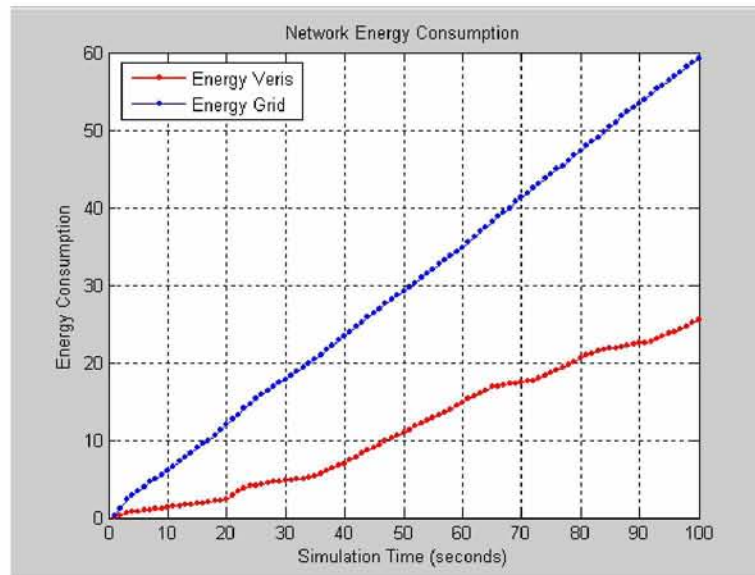
Εικόνα 8: Επιτυχής ποσοστιαία παράδοση πακέτων (Network Success Rate), για *grid* και *veris* τοπολογία

Στην εικόνα 8 απεικονίζεται η ποσοστιαία επιτυχής παράδοση πακέτων (network success rate) για τις δύο τοπολογίες. Το σημαντικό στην εικόνα αυτή είναι ότι για την *veris* τοπολογία η επιτυχής παράδοση αυξάνεται συνεχώς, συγκλίνοντας σε τιμή κοντά στο 80%, με μικρές διακυμάνσεις. Σε αντίθεση με την *grid*, το ποσοστό είναι περίπου το μισό, δηλαδή 40%. Αυτό σημαίνει ότι λόγω των χαμηλών καθυστερήσεων, των μικρότερων και ευέλικτων μονοπατιών δρομολόγησης και των λιγότερων κόμβων στην *veris* τοπολογία, το 80% των πακέτων φτάνουν επιτυχώς στον παραλήπτη. Στην *grid* τοπολογία η τιμή της επιτυχούς παράδοσης συγκλίνει από την αρχή της προσομοίωσης στο 40%, χωρίς να βελτιώνεται. Αυτό σημαίνει ότι λόγω πιθανών παρεμβολών και συμφόρησης στο δίκτυο τα μισά πακέτα φτάνουν στο σταθμό βάσης.



Εικόνα 9: Ανεπιτυχής ποσοστιαία παράδοση πακέτων (Network Loss Rate), για *grid* και *veris* τοπολογία

Στην εικόνα 9 παρατηρούμε την εξέλιξη στις τιμές της ανεπιτυχούς ποσοστιαίας παράδοσης πακέτων για τις δύο τοπολογίες. Όπως είναι αναμενόμενο για την *veris* τοπολογία η network loss rate παρουσιάζει συνεχόμενη μείωση και συγκλίνει κοντά στο 20%, με μικρές διακυμάνσεις. Στην *grid* τοπολογία, έχουμε σταθερό ρυθμό ανεπιτυχούς παράδοσης πακέτων κοντά στο 60%. Η κατά μέσο όρο network loss rate είναι 26%-30% λιγότερη στην περίπτωση της *veris* τοπολογίας. Οι περισσότεροι κόμβοι κατορθώνουν και μεταδίδουν επιτυχώς τα πακέτα τους στον σταθμό βάσης, όπως άλλωστε πιστοποιείται για την *veris* τοπολογία και από την εικόνα 8.



Εικόνα 10: Συνολική κατανάλωση ενέργειας (Network Energy Consumption) για τις επικοινωνίες δεδομένων, για *grid* και *veris* τοπολογία

Στην εικόνα 10 παρατηρούμε την συνολική κατανάλωση ενέργειας για τις δύο τοπολογίες. Η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντικός παράγοντας που θα καθορίσει την λειτουργικότητα του δικτύου και την διάρκεια ζωής του (network lifetime). Κρίνεται σκόπιμο να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, διότι ο κάθε κόμβος έχει λιγοστά ενεργειακά αποθέματα, τα οποία είναι μη ανανεώσιμα τις περισσότερες φορές. Φαίνεται ευδιάκριτα ότι στην περίπτωση *veris* τοπολογίας, η κατανάλωση ενέργειας γίνεται με μικρότερο ρυθμό (μικρότερη κλίση) σε σχέση με την *grid* και αυτή η διαφορά τείνει να αυξάνει. Επειδή η *grid* τοπολογία απασχολεί περισσότερους κόμβους από την *veris*, αυτός είναι ο κυριότερος λόγος που οδηγεί στην αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου.

2.1.13 Συμπεράσματα

Η Γ.Α και οι εφαρμογές Α.Δ.Α μπορούν να συνδιαστούν και να προσφέρουν ένα νέο χώρο έρευνας, τα αποτελέσματα του οποίου μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα στην γεωργική παραγωγή, την διαχείριση των υδάτων και να οδηγήσουν σε δραματική μείωση του κόστους παραγωγής. Επιπλέον, αυξανόμενη ανάγκη για χρήση αυτοματοποιημένων συστημάτων μετρήσεων και ασύρματης διάδοσης πληροφορίας, ανοίγουν τον δρόμο για την εφαρμογή των WSN σε εφαρμογές ΓΑ. Ακολουθώντας

την προτεινόμενη μεθοδολογία μας για τοποθέτηση κόμβων και παραγωγή της βέλτιστης τοπολογίας, οι καλλιεργητές καταφέρνουν μείωση στα κόστη της χρήσης και λειτουργίας ενός WSN και συνεπώς τα WSN αποτελούν πλέον μία ελκυστική λύση για όλα τα είδη των εδάφων και καλλιεργιών.

2.2 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΣΕ Α.Δ.Α ΒΑΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ LOGICAL GRID ROUTING

2.2.1 Εισαγωγή

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται ένας δεύτερος αλγόριθμος τοποθέτησης αισθητήρων για εφαρμογές ΓΑ. Η μεθοδολογία τοποθέτησης κόμβων που προτείνεται, εξαρτάται από το πλήθος και το είδος των ζωνών διαχείρισης που προκύπτουν βάση της παραλλακτικότητας του εδάφους. Ο αλγόριθμος βασίζεται στην λειτουργικότητα του αλγορίθμου δρομολόγησης LGR και κυρίως στον τρόπο κατασκευής του spanning tree και των εξαρτήσεων κόμβων τύπου πατέρα – παιδιά. Αρχικά τοποθετεί κόμβους στα κεντροειδή των ζωνών διαχείρισης και μετά βάση του υπολογισμού του συνόλου των πατέρων και των συντεταγμένων τους (x,y), υπολογίζει την τελική θέση για κάθε κόμβο παιδί με σκοπό να δημιουργηθεί ένας άκυκλος συνδεδεμένος γράφος (spanning tree). Η τελική τοπολογία συγκρίνεται με μία κλασική τοποθέτηση σε πλέγμα (grid) για διάφορες μετρικές απόδοσης δικτύου. Λόγω της ύπαρξης των ζωνών, ο αλγόριθμος καταφέρνει να προτείνει μία νέα τοπολογία με λιγότερους σε πλήθος κόμβους, τοποθετώντας τους σε καίρια σημεία εντός του εδάφους. Το συνολικό κόστος της λύσης μειώνεται χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα της πληροφορίας που μεταφέρεται.

2.2.2 Δομή του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από κόμβους οι οποίοι τοποθετούνται σε όλο το εύρος της περιοχής λήψης των μετρήσεων είτε με τυχαίο τρόπο είτε με μεθόδους καθορισμού διαχείρισης τοπολογίας [6]. Οι κόμβοι αυτοί προγραμματίζονται για να λαμβάνουν μετρήσεις διαφόρων ειδών όπως θερμοκρασίας, υγρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας, χημικών ουσιών κτλ. Η εντός του

αγρού τοποθέτηση των κόμβων, μπορεί να γίνει σε συστάδες (clusters), σε κάθε μία από τις οποίες επιλέγεται με κάποια κριτήρια ένας κόμβος - αρχηγός που θα συγκεντρώσει όλες τις μετρήσεις της περιοχής που ελέγχει. Κατόπιν όλες οι μετρήσεις από όλες τις υπο-περιοχές εντός του αγρού θα πρέπει να συγκεντρωθούν σε ένα κόμβο-συλλέκτη μέσω του οποίου μπορούν να μεταφερθούν μέσω internet σε άλλη τοποθεσία για περαιτέρω ανάλυση. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται η απόσταση διαχείριση του αγρού. Οι μετρήσεις με την μορφή πακέτων πληροφορίας μεταδίδονται από τους απλούς κόμβους προς τον cluster head κόμβο και κατόπιν προς τον σταθμό βάσης.

2.2.3 Γεωργία Ακριβείας και Ζώνες Διαχείρισης

Η Γεωργία Ακριβείας αναφέρεται στη διαχείριση της παραλλακτικότητας του εδάφους με τη χρήση νέων τεχνολογιών. Η παραλλακτικότητα του εδάφους οφείλεται στα διαφορετικά επίπεδα σε οργανική ουσία, άργιλο, νερό κτλ. Για να γίνει σωστή η διαχείριση πρέπει να διαθέτουμε λεπτομερείς χάρτες στους οποίους απεικονίζεται αυτή η παραλλακτικότητα. Από τους χάρτες αυτούς προκύπτουν οι ζώνες διαχείρισης είτε παραγωγής είτε ηλεκτρικής αγωγιμότητας, που λειτουργούν ως κριτήριο βάση του οποίου μπορούμε να μεταβούμε από την κλασική τοποθέτηση κόμβων σε πλέγμα σε μία βέλτιστη με λιγότερους σε πλήθος κόμβους.

Οι ζώνες διαχείρισης είναι μικρότερα μέρη του αγρού που μεταξύ τους έχουν σαφείς διαφορές αλλά εντός της ίδιας ζώνης οι μετρήσεις παρουσιάζουν υψηλό βαθμό συσχέτισης. Το κριτήριο για την παραγωγή ζωνών δεν είναι μοναδικό και όχι πάντως πλήρως καθορισμένο. Ανάλογα με το τι θέλουμε να μετρήσουμε και πώς να διαχειριστούμε την παραλλακτικότητα οι γεωπόνοι μας διαθέτουν ζώνες διαχείρισης βάση χαρτών παραγωγής, ποιοτικών χαρακτηριστικών και ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Στη δική μας πρόταση δεν εξετάζουμε πώς προέκυψαν οι ζώνες, τι μέγεθος έχουν και το συνολικό τους πλήθος. Το μέγεθος των ζωνών αυτών εξαρτάται από την ικανότητα των γεωπόνων να διαφοροποιήσουν τις ζώνες μεταξύ τους.

Στόχος μας είναι να πάρουμε ως εισερχόμενη πληροφορία το πλήθος και την έκταση των ζωνών αυτών σε έναν αγρό και να παράγουμε την τοπολογία των ασύρματων κόμβων μας η οποία θα είναι ένας άκυκλος γράφος στο χώρο των 2

διαστάσεων. Επειδή παρόλα αυτά συνήθως με τις εφαρμογές που ασχοληθήκαμε οι μετρήσεις αφορούν υγρασία θα ήταν πιο βολικό οι ζώνες να προκύψουν από μετρήσεις αγωγιμότητας εδάφους (με τη μέθοδο σάρωσης αγρού με το Veris 3100) επειδή ένας από τους κύριους παράγοντες καθορισμού τιμών αγωγιμότητας είναι και το νερό, άρα οι μετρήσεις υγρασίας ανά ζώνη θα παρουσιάζουν υψηλό βαθμό συσχέτισης.

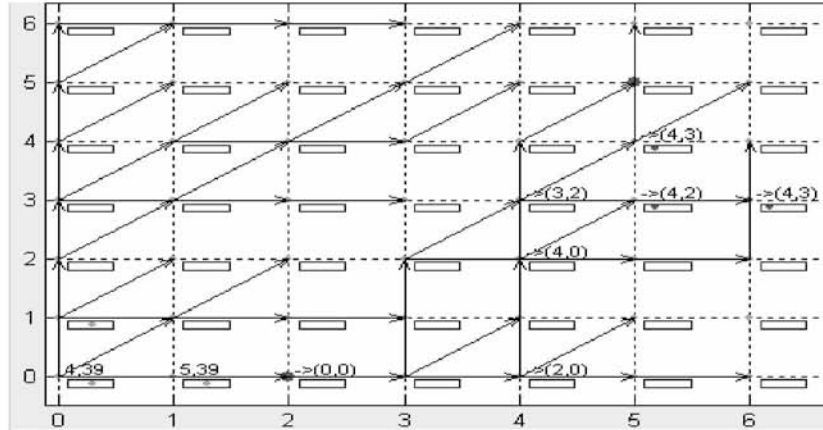
2.2.4 Δείκτες FPI/NCE

Το μέγεθος και το πλήθος των ζωνών προκύπτει με βάση στατιστικών μεθόδων όπως η ασαφής συσταδοποίηση (fuzzy clustering), που στηρίζεται στη θεωρία των ασαφών συνόλων και η οποία ταξινομεί τα χαρακτηριστικά από τις καλλιέργειες σε κλάσεις. Ο διαχωρισμός γίνεται με το λογισμικό MZA (Missouri Zone Analyst) ή FUZME. Συγκεκριμένα ο αριθμός των ζωνών καθορίστηκε με βάση τους δείκτες FPI (fuzziness performance index) και NCE (normalized classification entropy). Ο πρώτος δείκτης δείχνει το βαθμό διαχωρισμού των κλάσεων και κυμαίνεται από 0...1. Τιμές κοντά στο 0 δείχνουν ευδιάκριτες ζώνες, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για τιμές κοντά στο 1. Ο δεύτερος δείκτης κάνει εκτίμηση του ποσοστού της ασάφειας που δημιουργείται από έναν ορισμένο αριθμό κλάσεων. Τιμές κοντά στο 0 δείχνουν μεγαλύτερη οργάνωση ενώ τιμές κοντά στο 1 ασάφεια. Ο βέλτιστος αριθμός των ζωνών προκύπτει όταν έχουμε ελάχιστη τιμή και από τους δύο δείκτες [19].

2.2.5 Υπολογισμός πλήθους κόμβων σε 2D πλέγμα (GRID)

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση σχετικά με τους δείκτες FPI/NCE και δεδομένης της έκτασης σε στρέμματα, υπολογίζουμε καταρχήν το συνολικό αριθμό των κόμβων που τοποθετούνται σε αυτή εάν τους τοποθετήσουμε σε πλέγμα. Ο καθορισμός του πλήθους κόμβων τοποθέτησης σε πλέγμα θα εξαρτηθεί από την λαμβανόμενη ισχύς σήματος στον παραλήπτη και το κατώφλι θορύβου στις συχνότητες των 2.4 GHz ώστε ο σηματοθορυβικός λόγος να ξεπερνά ένα κάτω όριο: $SNR \geq SNR_{min}$. Θεωρούμε ότι το κανάλι είναι συμμετρικό (εάν ένας κόμβος δέκτης

μπορεί να λάβει από έναν κόμβο πομπό, τότε πραγματοποιείται και η αντίστροφη επικοινωνία) και ότι η ισχύς σήματος εξασθενεί βάση της σχέσης (1).



Εικόνα 11: Τοπολογία πλέγματος (GRID) με 48 κόμβους και 1 σταθμό βάσης στο (0,0)

Ας υποθέσουμε ότι ο χώρος 2 διαστάσεων που έχουμε στη διάθεσή μας είναι ένα αγροτεμάχιο 100 στρεμμάτων σε διάταξη τετραγώνου. Οι διαστάσεις της κάθε πλευράς του τετραγώνου είναι $X = Y \approx 330 \text{ m}$. Σε περίπτωση που το αγροτεμάχιο έχει διαφορετικό σχήμα, μπορούμε βάση τοπογραφικών στοιχείων να προκύψουν τα μήκη των πλευρών. Βάση της σχέσης (1) η ραδιοεπικοινωνία των κόμβων έχει εμβέλεια περίπου 30m. [16] [18]. Λαμβάνοντας υπόψη ότι για την multi hop επικοινωνία και της ad hoc μορφής της τοπολογίας, πρέπει να υπάρχει περίπου 10% επικάλυψη στην ομοκατευθυντική ακτίνα εκπομπής του κάθε κόμβου για να είναι εγγυημένη η επικοινωνία με χαμηλή καθυστέρηση και σταθερό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων. Η παρακάτω σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της γεωμετρικής απόστασης των κεραιών (και άρα των κόμβων)[19]:

$$\left(1 - \frac{d_c - R}{R}\right) * 100 > 10 \quad (7)$$

όπου $R = 30\text{m}$ και d_c είναι η απόσταση των κέντρων του κύκλου διασκορπισμού του σήματος (ομοιοκατευθυντικές κεραιές) για να έχουμε 10% επικάλυψη σήματος. Λύνοντας την (7) ως προς $d_c \approx 53\text{m}$, προκύπτει η απόσταση τοποθέτησης των ζευγών κόμβων πομπού – δέκτη. Συνεπώς για να καλύψουμε το αγροτεμάχιο θέλουμε να τοποθετήσουμε σε πλέγμα 49 κόμβους, όπως φαίνεται από

την εικόνα 11. Ο σταθμός βάσης τοποθετείται στο (0,0) και οι υπόλοιποι κόμβοι σε διάταξη πλέγματος με απόσταση μεταξύ τους ώστε να είναι εγγυημένη η ραδιοεπικοινωνία τους. Ονομάζουμε την τοπολογία της εικόνας 11 ως GRID.

Η παραπάνω διαδικασία υπολογισμού της θέσης και του πλήθους των κόμβων ισχύει και για τις περιπτώσεις των αγροτεμαχίων που δεν επιδεικνύουν τέλεια αναλογία στις πλευρές τους. Αρκεί να υπολογίσουμε τον λόγο συσχέτισης των πλευρών X και Y.

2.2.6 Προτεινόμενη μεθοδολογία τοποθέτησης κόμβων

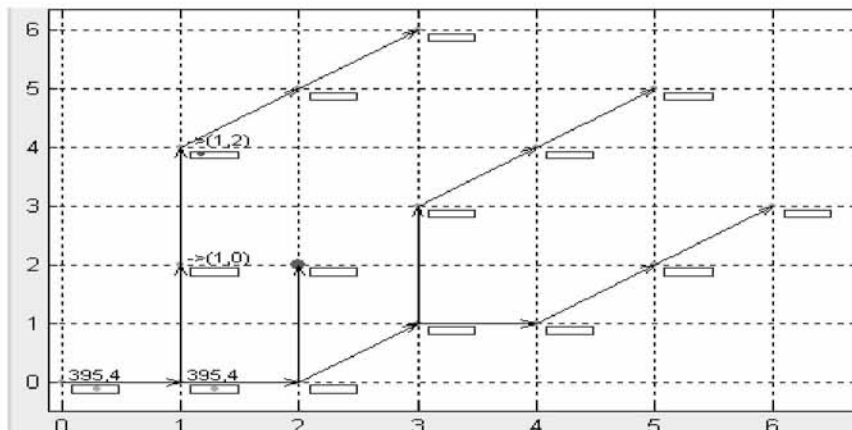
Οι κανόνες σχηματισμού γράφου δρομολόγησης του LGR προϋποθέτουν κάθε κόμβος, εκτός του κόμβου βάση, να έχει ένα πιθανό σύνολο 3 κόμβων πατέρων για να προωθήσει πακέτα. Όταν όλοι οι κόμβοι σε κάθε χρονική στιγμή επικοινωνούν με κάποιον από τους πιθανούς πατέρες τους, τότε σχηματίζεται ο άκυκλος γράφος. Σε περίπτωση που ένας κόμβος-πατέρας δεν μπορεί για κάποιο λόγο να δρομολογήσει ένα πακέτο ή η επικοινωνία μεταξύ παιδιού-πατέρα δεν υφίσταται (είτε λόγω εμποδίων είτε λόγω κακής ποιότητας σήματος), τότε ο κόμβος-παιδί με κάποιους κανόνες επιλέγει έναν νέο κόμβο-πατέρα ο οποίος μπορεί και να μην ανήκει σε σύνολο των πατέρων του [12]. Έτσι μειώνεται η πιθανότητα της διακοπής ροής πληροφορίας στο γράφο. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της δυναμικής εναλλαγής μεταξύ συνδέσεων πατέρων-παιδιών είναι η πλεονάζουσα επιλογή μονοπατιών δρομολόγησης καθώς επίσης και η ομοιόμορφη κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους.

Βασιζόμενοι στις παραπάνω παραδοχές και υποθέτοντας ότι ο κάθε κόμβος πρέπει να έχει έναν κόμβο γείτονα σε μία από τις θέσεις των πιθανών κόμβων πατέρων του, ακολουθούμε την παρακάτω μεθοδολογία για την κατασκευή τοπολογίας με λιγότερους κόμβους:

- Υπολογίζουμε για κάθε κόμβο το πλήθος των πιθανών πατέρων του και των συντεταγμένων του στο πλέγμα. Κρατούμε την πληροφορία αυτή σε ειδικό αρχείο με το όνομα **parents**

- Χρησιμοποιούμε τις διαθέσιμες ζώνες διαχείρισης – παραλλακτικότητας του αγροτεμαχίου και τοποθετούμε στα κεντροειδή (centroids) της κάθε ζώνης έναν κόμβο – επικεφαλή για την περιοχή αυτή. Οι κόμβοι επικεφαλής είναι σε πλήθος όσες και οι ζώνες.
- Οι συντεταγμένες (x,y) των κόμβων στα κεντροειδή παραμένουν σταθερές και εισάγονται στο αρχείο **centers**.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος τοποθέτησης λαμβάνοντας ως είσοδο τα αρχεία parents και centers, ενώνει τους κόμβους με έναν από τους πιθανούς πατέρες τους ώστε να δημιουργηθεί ένα μονοπάτι άκυκλου γράφου από οποιονδήποτε κόμβο προς τον κόμβο συλλεκτή στο (0,0). Με την λογική αυτή είμαστε βέβαιοι ότι ο LGR θα λειτουργήσει και θα συγκλίνει, όταν εφαρμοστεί στην προτεινόμενη τοπολογία, και θα έχουμε πάντα μονοπάτι προώθησης πακέτων.



Εικόνα 12: Προτεινόμενη Τοπολογία βασισμένη στον LGR με 14 κόμβους και 1 σταθμό βάσης στο (0,0)

Ο αλγόριθμος ως έξοδο έχει ένα αρχείο με το όνομα topology, στο οποίο υπάρχουν οι κόμβοι με τις συντεταγμένες τους προς τοποθέτηση, η τελική τοπολογία μας όπως φαίνεται και στην εικόνα 11. Η προτεινόμενη τοπολογία αποτελείται από 14 κόμβους, δηλαδή περιέχει 70% λιγότερους κόμβους από την αρχική τοπολογία πλέγματος της εικόνας 10 με 48 κόμβους. Το πλήθος των κόμβων που προκύπτουν προκειμένου να συγκλίνει ο LGR δίνει μία εκτίμηση του κάτω ορίου σε πλήθος κόμβων που μπορούν να τοποθετηθούν έτσι ώστε να έχουμε ποιοτικά σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα σε μετρήσεις. Αυτό είναι συνέπεια της μεγάλης

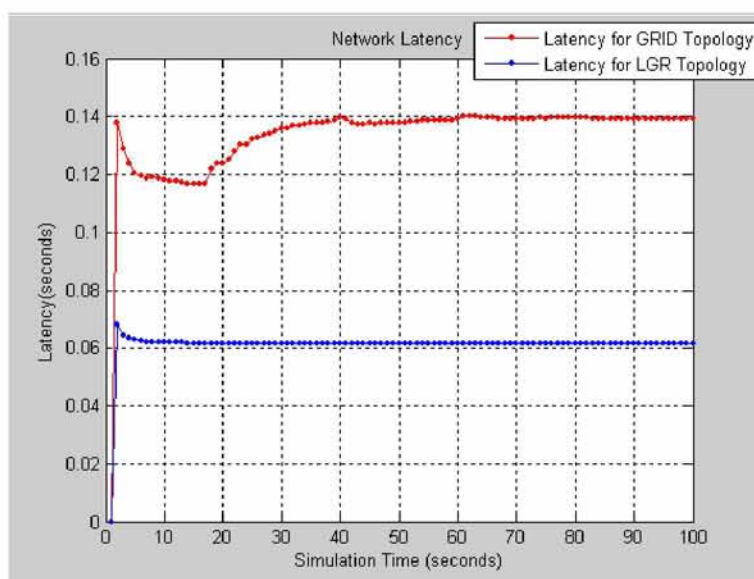
συσχέτισης των μετρήσεων ανά ζώνη διαχείρισης. Έχουμε βέβαια την ελευθερία να προσθέσουμε και άλλους κόμβους στην τοπολογία της εικόνας 12 προκειμένου να διασφαλίσουμε μικρή πιθανότητα διακοπής ροής πληροφορίας σε περίπτωση κατα-στροφής κόμβου ή κάποιου άλλου συμβάντος. Ονομάζουμε την τοπολογία της εικόνας 12 ως LGR.

2.2.7 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Για την σειρά προσομοιώσεων που έγιναν για την σύγκριση των τοπολογιών GRID και LGR, χρησιμοποιήθηκε ο πιθανοκρατικός προσομοιωτής Prowler/RMAZE. Το μοντέλο της ραδιοεπικοινωνίας για την μεταξύ των κόμβων επικοινωνία βασίζεται στην σχέση (2) και οι μετρικές απόδοσης (performance metrics) που χρησιμοποιήθηκαν για τις συγκρίσεις των δύο τοπολογιών είναι οι εξής:

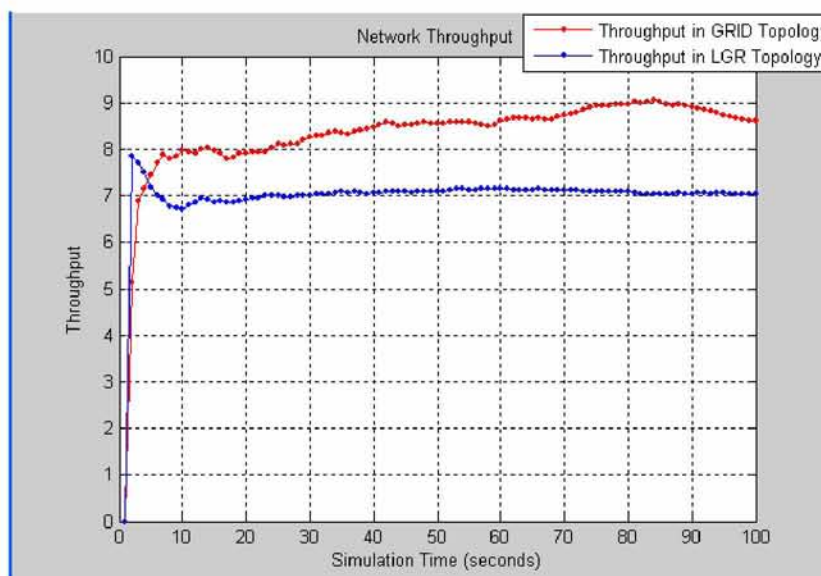
- Καθυστέρηση Παράδοσης πακέτων (Network Latency)
- Συνολική ρυθμαπόδοση δικτύου (Network Throughput)
- Ποσοστό επιτυχούς παράδοσης πακέτων (Network Success Rate)
- Ποσοστό ανεπιτυχούς παράδοσης πακέτων (Network Loss Rate)
- Συνολική κατανάλωση ενέργειας (Network Energy Consumption)

Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις αναπαριστούν τις μετρήσεις που προέκυψαν από τις χρησιμοποιούμενες μετρικές απόδοσης και αφορούν τις τοπολογίες GRID και LGR.



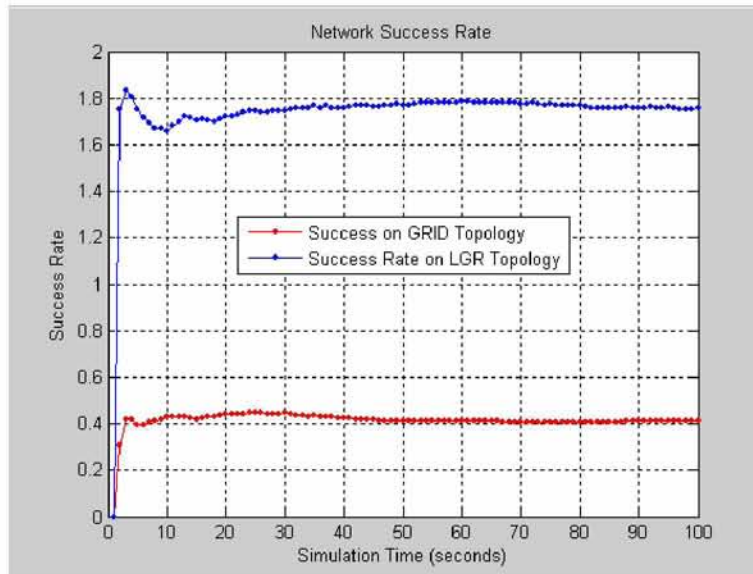
Εικόνα 13: Καθυστέρηση Παράδοσης πακέτων (Network Latency)

Σύμφωνα με την εικόνα 13, η μέση καθυστέρηση παράδοσης πακέτων από όλους τους κόμβους προς τον κόμβο βάσης είναι κατά 57% λιγότερη στην LGR τοπολογία. Ο λόγος είναι ότι στην LGR οι κόμβοι είναι σε πλήθος κατά 2/3 λιγότεροι και έχουν τοποθετηθεί σε καίριες θέσεις, τόσο από την σκοπιά της ραδιοεπικοινωνίας όσο και του τρόπου σύγκλισης του αλγορίθμου δρομολόγησης LGR.



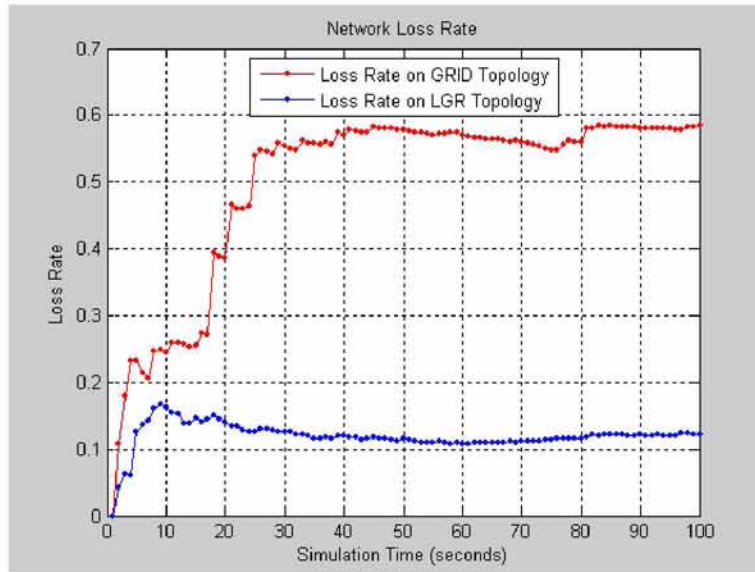
Εικόνα 14: Συνολική ρυθμαπόδοση δικτύου (Network Throughput)

Η εικόνα 14 αφορά την συνολική ρυθμαπόδοση του δικτύου, δηλαδή του πλήθους των πακέτων που φτάνουν επιτυχώς στο τελικό προορισμό τους στην μονάδα του χρόνου. Όπως είναι αναμενόμενο η ρυθμαπόδοση στην GRID τοπολογία είναι μεγαλύτερη, καθώς αποτελείται βάση της εικόνας 12 από περισσότερους κόμβους και συνεπώς αυτοί παράγουν με τον ίδιο ρυθμό μεγαλύτερο πλήθος πακέτων σε σχέση με την LGR. Ειδικότερα, καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης, για την GRID έχουμε 1180 πακέτα και για την LGR 396, περίπου 66% λιγότερα. Παρόλα αυτά, η ρυθμαπόδοση στην GRID είναι περίπου 9 πακέτα και στην LGR συγκλίνουν στα 7, δηλαδή 22% λιγότερα. Αυτό που διαπιστώνουμε είναι ότι παρόλου που το πλήθος των κόμβων στην LGR είναι πολύ λιγότερο και τα πακέτα που παράγονται 66% λιγότερα, η ρυθμαπόδοση δεν μειώνεται αναλογικά. Αυτό συμβαίνει λόγω της βέλτιστης τοποθέτησης των κόμβων που πάντα θα βρίσκουν γείτονα για προώθηση των πακέτων τους.



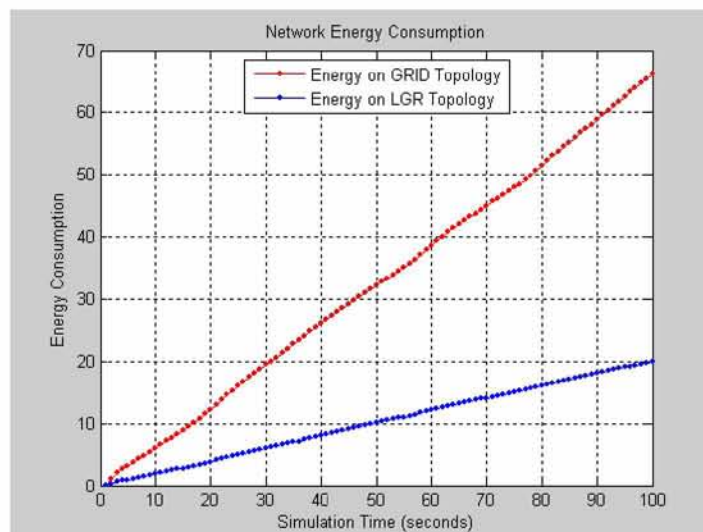
Εικόνα 15: Ρυθμός επιτυχούς παράδοσης πακέτων

Η εικόνα 15 αντικατοπτρίζει το συνολικό ποσοστό επιτυχούς παράδοσης πακέτων, δηλαδή τον λόγο του πληθους των πακέτων που παραλήφθηκαν επιτυχώς από τον προορισμό, προς το συνολικό πλήθος των πακέτων που παράχθηκαν από τους κόμβους – πηγές. Παρατηρούμε ότι στην LGR τοπολογία παραδίδονται περίπου 2 πακέτα στην μονάδα του χρόνου, ενώ στην GRID απαιτείται ο διπλάδιος χρόνος για την επιτυχή παράδοση 1 πακέτου. Λόγω του πλεονάζοντα αριθμού κόμβων, των πολλών μονοπατιών δρομολόγησης και της τοποθέτησης σε πλέγμα, είναι αυξημένη η πιθανότητα συγκρούσεων κατά την αποστολή και η μεταξύ των κόμβων παρεμβολή. Αυτό έχει ένα αντιστρόφως ανάλογο αποτέλεσμα στον ρυθμό επιτυχούς παράδοσης πακέτων στον προορισμό.



Εικόνα 16: Ποσοστό ανεπιτυχούς παράδοσης πακέτων (Network Loss Rate)

Η εικόνα 16 αναφέρεται στο ποσοστό ανεπιτυχούς παράδοσης πακέτων, δηλαδή στον υπολογισμό του λόγου του συνόλου των πακέτων που χάθηκαν προς το συνολικό αριθμό πακέτων που παράχθηκαν από τους κόμβους – πηγές. Παρατηρούμε πώς για την GRID τοπολογία, καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης, αυξάνεται κλιμακούμενο το ποσοστό της ανεπιτυχούς παραδοχής. Ο λόγος συμβαδίζει με τα προηγούμενη ανάλυση, δηλαδή ο πλεονασμός στο πλήθος των κόμβων οδηγεί σε αυξημένη πιθανότητα συγκρούσεων και κατά συνέπεια αυξάνει το ποσοστό αποτυχίας παράδοσης. Αντίθετα, στην LGR τοπολογία, το ποσοστό των πακέτων που χάνεται είναι της τάξης του 10% και είναι σταθερό καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης.



Εικόνα 17: Συνολική κατανάλωση ενέργειας (Network Energy Consumption)

Τέλος, στην εικόνα 17 αναπαριστάται γραφικά η συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου. Ο υπολογισμός της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι βασικός και σημαντικός παράγοντας, ο οποίος εξασφαλίζει το χρόνο ζωής όλου του δικτύου. Παρατηρούμε ότι στην LGR τοπολογία η συνολική κατανάλωση είναι σαφώς χαμηλότερη λόγω του λιγοστού πλήθους των κόμβων. Η διαφορά στην ενέργεια μεταξύ GRID και LGR συνεχώς μεγαλώνει καθόλη την διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης. Και στις δύο τοπολογίες αυξάνεται ανοδικά με θετική κλίση, ωστόσο η κλίση της καμπύλης στην LGR είναι μικρότερη. Για τον υπολογισμό της ενέργειας λαμβάνουμε υπόψη τα ποσά που δαπανήθηκαν από κάθε κόμβο για αποστολή και λήψη πακέτων, καθώς επίσης και τις περιόδους που ήταν αδρανής.

2.2.8 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάσαμε ένα τρόπο υπολογισμού του πλήθους κόμβων και τοποθέτησής τους σε μία περιοχή 2 διαστάσεων με βάση τον LGR αλγόριθμο δρομολόγησης πακέτων ώστε να δημιουργείται ένας άκυκλος γράφος από τους κόμβους-πηγές προς τον κόμβο προορισμού ο οποίος συγκλίνει. Αποδείξαμε με προσομοιώσεις ότι στις περισσότερες περιπτώσεις σεναρίων είναι συμφερότερος του τρόπου τοποθέτησης σε πλέγμα τόσο σε εξοικονόμηση ενέργειας όσο και οικονομικά ως τελική τεχνολογική λύση. Περαιτέρω στόχος μας είναι η δοκιμή της λύσης μας σε περιοχή με εμπόδια και η παραγωγή τοπολογιών που προκύπτουν από διαφορετικούς αλγορίθμους δρομολόγησης.

2.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- 1] A. Baggio, “Wireless sensor networks in precision agriculture”, in *IEEE Pervasive Computing*, vol. 3, issue 1, pp. 38–45, Mar 2004
- [2] J. Burrell, T. Brooke and R. Beckwith, “Vineyard Computing: Sensor Networks in Agricultural Production”, in *IEEE Pervasive Computing*, vol. 3, issue 1, pp. 38 – 45, Mar 2004

- [3] Virginia Tech. 2002. "Precision Farming: A Comprehensive Approach", *Virginia Tech Cooperative Extension, Publication Number: 442-500, 2009*
- [4] P. Kikiras and D. Drakoulis, "The European Approach to Augmented Satellite Based Positioning Systems and their Application in Precision Farming", in *3rd International Symposium on Precision Farming, Nov. 2003*
- [5] G. Vellidis, "A Real-Time Smart Sensor Array for Scheduling Irrigation in Cotton", in *Proceedings of 6th European Conference on Precision Agriculture (6ECPA), pp. 57 – 67, 2007*
- [6] K. Kahn, "Ad Hoc Sensor Networks: A New Frontier for Computing Applications", Intel Corporate Technology Group, 2002
- [7] W. Zhang, "Integrated Wireless Sensor/Actuator Networks in an Agricultural Application", in *ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '04), 2004*
- [8] T. Gemtos, S. Foundas, A. Markinos and A. Blackmore, "Precision Agriculture: Applications Perspectives in Greece and in South Europe", in *Proceedings of 3rd Conference on Agriculture Engineering ,pp. 230-237, May 2003*
- [9] Y. Zhang, G. Simon and G. Balogh, "High-Level Sensor Network Simulations for Routing Performance Evaluations", in *Third International Conference on Networked Sensing Systems (INSS06), 2006*
- [10] G. Simon, "Probabilistic wireless network simulator (PROWLER)", 2003
<http://www.isis.vanderbilt.edu/projects/nest/prowler/>
- [11] Y. Zhang, "Routing Modeling Application Simulation Environment (RMAZE),
www2.parc.com/isl/groups/era/nest/Rmase/default.html
- [12] K. Ferentinos, T. Tsiligridis and K. Arvanitis, "Energy Optimization of Wireless Sensor Networks for Environmental Measurements", in *IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measuring Systems and Applications (CIMSAS '05), Jul. 2005*
- [13] Global Positioning System (GPS): <http://www.gps.gov/>
- [14] Y. Choi, M. G. Gouda, H. Zhang and A. Arora, "Routing on a Logical Grid in Sensor Networks", *UTCS Technical Report TR-04-49, 2004*
- [15] M. Haenggi, "Probabilistic analysis of a simple mac scheme for ad hoc wireless networks", in *IEEE CAS Workshop on Wireless Communications and Networking, Sept. 2002*

- [16] G. Simon, P. Volgyesi, M. Maroti and A. Ledeczi, “Simulation – based optimization of communication protocols for large-scale wireless sensor networks”, in *IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT*, Mar 2003
- [17] Y. Zhang, G. Simom and G. Balogh, “High-Level Sensor Network Simulations for Routing Performance Evaluations”, in *3rd International Conference on Networked Sensing Systems (INSS06)*, Jun 2006
- [18] IEEE 802.15.4, http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4.
- [19] Katsalis, K., Xenakis, A., Kikiras, P. and Stamoulis, G, “Topology Optimization in Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture Applications.”, in *IEEE International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM '07)*, pp. 526 – 530, Oct 2007
- [20] Tmote Sky Nodes, <http://www.moteiv.com>.
- [21] Τανός, Α., Αγγελοπούλου, Α., Φουντάς, Σ., Γέμπος, Θ., Νάνος, Γ., Χατζηνίνος, Α., “Ζώνες Διαχείρισης Βάση Χαρτών Παραγωγής, Ποιοτικών Χαρακτηριστικών και Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας”, 5ο Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής (ΕΓΜΕ2007), Οκτ. 2007.
- [22] G. Vellidis, V. Garrick, S. Pocknee, C. Perry, C. Kvien and M. Tucker, “How Wireless will change Agriculture: A Real-Time Smart Sensor Array for Scheduling Irrigation in Cotton”, in *Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture (6ECPA)*, pp. 57 – 67, Jun. 2007
- [23] N. R. Kitchen, S. T. Drummond, E. D. Lund, K. A. Sudduth and G. W. Buchleiter, “Soil Electrical Conductivity and Topography Related to Yield for Three Contrasting Soil – Crop Systems”, in *Agronomy Journal*, vol. 95, issue 3, pp. 483 – 495, May 2003
- [24] P. Santi, “Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks”, John Willey and Sons Ltd.,2003

3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΝΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

ΚΟΜΒΩΝ ΣΕ Α.Δ.Α.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, οι μετρήσεις που λαμβάνονται από κάθε κόμβο για μία μετρήσιμη φυσική ποσότητα, θα πρέπει να καταλήξουν στον σταθμό βάσης, από όπου μπορούν να τις επεξεργαστούν τελικοί χρήστες που συνδέονται στον σταθμό από άλλα δίκτυα, είτε ενσύρματα είτε ασύρματα. Για το λόγο ότι ένα WSN αποτελείται από χαμηλής κατανάλωσης κόμβους με περιορισμένα ποσά ενέργειας ο καθένας, ενεργειακά αποτελεσματικές μέθοδοι επικοινωνίας, δρομολόγησης πακέτων και συλλογής δεδομένων θα πρέπει να εφαρμοστούν ώστε να αυξηθεί η συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου (network lifetime). Σε δίκτυα με τέτοια χαρακτηριστικά, όπου σε κάθε χρονική στιγμή (round) κάθε κόμβος μετρά φυσική ποσότητα και στέλνει δεδομένα, είναι ζωτικής σημασίας η εφαρμογή μεθόδων ελαχιστοποίησης της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας του συστήματος ώστε να επιδέχεται μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του. Η διάρκεια της ζωής ενός τέτοιου δικτύου ορίζεται ως ο χρόνος που θα παρέλθει μέχρι ο σταθμός βάσης λάβει όλα τα πακέτα δεδομένων από όλους τους κόμβους του δικτύου (και συγκεκριμένα από όσους έχουν πακέτα να στείλουν την συγκεκριμένη χρονική στιγμή).

3.2 ΟΡΙΣΜΟΙ

Η τεχνολογική πρόοδος στην επιστήμη της μικρο-ηλεκτρονικής και των ασυρμάτων επικοινωνιών, έχουν επιτρέψει την κατασκευή χαμηλού κόστους και κατανάλωσης κόμβων αισθητήρων, με μικρό μέγεθος, που μπορούν να επικοινωνήσουν ασύρματα σε μικρές σχετικά αποστάσεις αυτόνομα [1]. Οι κόμβοι αυτοί απαρτίζονται από κυκλώματα που τους παρέχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύουν ποσότητες του φυσικού περιβάλλοντος, να επικοινωνούν μεταξύ τους και να

επεξεργάζονται τοπικά τα δεδομένα. Η τοποθέτηση πολλών τέτοιων κόμβων γέννησε ένα νέο είδος δικτύου, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Α.Δ.Α). Η ανάπτυξη των δικτύων αυτών είναι ιδιαίτερα απαραίτητη για την συλλογή, επεξεργασία και αποστολή μετρούμενων ποσοτήτων από δύσβατες περιοχές και περιβάλλοντα με αντίξοες συνθήκες.

Οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων κυμαίνονται από στρατιωτικές και περιβαντολλογικές, μέχρι βιομηχανικούς αυτοματισμούς, έξυπνα σπίτια, παρακολούθηση δεικτών υγείας και συγκοινωνίες. Κάθε δίκτυο αισθητήρων μπορεί να αποτελείται από κόμβους που μπορούν να έχουν τα δικά τους χαρακτηριστικά σε υλικό και λογισμικό, να επεξεργάζονται διαφορετικά δεδομένα και με διαφορετικούς ρυθμούς [9]. Παρόλα αυτά, σε όλα τα δίκτυα αισθητήρων γίνονται κοινές παραδοχές που αφορούν συγκεκριμένα τεχνικά γνωρίσματα, τα οποία αναλύονται στην συνέχεια.

3.2.1 Κάλυψη Δικτύου και Συνδεσιμότητα Κόμβων

Ένας απλός κόμβος είναι ικανός να ανιχνεύσει ένα γεγονός ή να μετρήσει μία φυσική ποσότητα σε περιοχή εντός κύκλου και ακτίνας r_s , η οποία ονομάζεται εύρος ανίχνευσης (sensing range). Συνήθως καλύπτεται μία κυκλική περιοχή παρατήρησης ακτίνας r_s . Ανάλογα με την περίπτωση, διαφόρων επιπέδων εύρος ανίχνευσης υποστηρίζεται από έναν κόμβο, τα οποία εξαρτώνται και από τις προδιαγραφές υλικού (hardware specifications) του αισθητήρα που υπάρχει στο ολοκληρωμένο κύκλωμα του κόμβου. Στο μοντέλο του δικτύου που εξετάζουμε στην δική μας εφαρμογή, ορίζουμε ως συνολική κάλυψη ανίχνευσης (sensing coverage), το άθροισμα όλων των περιοχών εύρους r_s που καλύπτει ο κάθε κόμβος ξεχωριστά σε μία 2-D τοπολογία δικτύου. Ανάλογα με την τοποθέτηση των κόμβων, υπάρχουν περιπτώσεις επικάλυψης των περιοχών ανίχνευσης. Στις περιπτώσεις αυτές δεν προσμετρώνται πολλαπλές φορές.

Όσο αφορά την ενδο-επικοινωνία των κόμβων, ορίζουμε ως εύρος επικοινωνίας (communication range) έναν κύκλο με ακτίνα r_c , μέσα στον οποίο βρίσκονται οι πιθανοί κόμβοι γείτονες ενός κόμβου. Εάν ένα σήμα παραληφθεί με $SNR \geq SNR_{threshold}$, και ο κόμβος βρίσκεται εντός του κύκλου, τότε μπορεί να λάβει ένα μήνυμα και να το αποκωδικοποιήσει επιτυχώς. Το εύρος επικοινωνίας ενός κόμβου εξαρτάται από την ισχύ μετάδοσης P_{tr} που χρησιμοποιεί, τα κέρδη (gains)

των κεραιών του πομπού και του δέκτη, την τυχόν παρεμβολή (interference) μεταξύ γειτονικών κόμβων που εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα, των απωλειών διαδρομής (path loss) και των φαινομένων σκέδασης του σήματος (signal scattering effects) [3].

Για την επικοινωνία των κόμβων, το μοντέλο διάδοσης που εφαρμόζουμε είναι το free space and multi-path κατά το οποίο η ισχύς του σήματος στον δέκτη εξαρτάται από την απόσταση d_{ij} ανάμεσα στους κόμβους i και j και φθίνει ως συνάρτηση της σχέσης d_{ij}^l , όπου l είναι ο εκθέτης απώλειας διάδοσης (path loss exponent). Συνεπώς δύο κόμβοι θεωρούνται γείτονες εάν μπορούν να αποστείλουν μηνύματα εκατέρωθεν (συμμετρική επικοινωνία) με επιτυχία. Κατ' επέκταση οι γείτονες κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας, χωρίς την βοήθεια αναμεταδότη (relay), εάν ισχύει $d_{ij} \leq r_c$. Μία λειτουργική αστοχία (functional failure) ή έλλειψη ενέργειας σε έναν ή περισσότερους κόμβους μπορεί να προκαλέσει το διαχωρισμό του δικτύου (network disconnection). Συνεπώς, για όσο χρονικό διάστημα η τοπολογία του δικτύου παραμένει συνδεδεμένος γράφος, το δίκτυο θεωρείται πλήρως λειτουργικό. Ως εκ τούτου, σε ένα τέτοιο δίκτυο όλοι οι κόμβοι θα πρέπει να έχουν τουλάχιστον έναν λειτουργικό κόμβο ως γείτονα, διαφορετικά η συγκεκριμένη τοπολογία δικτύου δεν ικανοποιεί το παραπάνω κριτήριο συνδεσιμότητας και θα πρέπει να ξανασχεδιαστεί.

3.2.2 Διάρκεια ζωής Δικτύου (Network Lifetime)

Οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με μπαταρίες μικρής χωρητικότητας (μικρά ποσά ενέργειας) και συνεπώς ο κυριότερος περιορισμός τους είναι τα χαμηλά ενεργειακά τους αποθέματα που εν συνεχεία περιορίζουν την διάρκεια ζωής (κύκλους εργασιών) του κόμβου και αυτό επηρεάζει την συνολική ποιότητα λειτουργίας του δικτύου. Λόγω αυτού του περιορισμού, το θεμελιώδες πρόβλημα στα WSNs είναι πώς να επεκτείνουν την διάρκεια ζωής του δικτύου. Ο σκοπός σε ένα WSN είναι η αποτελεσματική και επιτυχής μετάδοση των πακέτων πληροφορίας στον σταθμό βάσης, ώστε η διάρκεια ζωής του δικτύου να μεγιστοποιείται (σε μονάδες χρόνου).

Σύνηθης μονάδα μέτρησης της διάρκειας ζωής (ή λειτουργικότητας) ενός δικτύου είναι ο χρόνος. Μία χρονική μονάδα (round) αφορά την διαδικασία συλλογής δεδομένων από όλους τους κόμβους και την αποστολή τους στο σταθμό βάσης [7-8]. Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για την διάρκεια ζωής ενός δικτύου αισθητήρων,

καθένας από τους οποίους αφορά την εφαρμογή του δικτύου και εξυπηρετεί τους σκοπούς για το οποίο δομήθηκε [15]. Στην περίπτωση που ένα δίκτυο έχει πυκνή ανάπτυξη κόμβων, η ποιότητά του (όσον αφορά την ποσότητα πληροφορίας που διακινεί επιτυχώς) δεν επηρεάζεται μέχρις ότου ένα μεγάλο ποσοστό των κόμβων τεθούν εκτός λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει διότι η πυκνή ανάπτυξη συνεπάγεται μεγάλο ποσοστό συσχέτισης στις μετρήσεις μεταξύ των πολύ κοντινών κόμβων. Στην περίπτωση αυτή, η διάρκεια του δικτύου ορίζεται ως ο χρόνος που έχει περάσει μέχρι οι μισοί κόμβοι (50%) να έχουν πεθάνει ή τεθεί εκτός λειτουργίας (half nodes die – HND). Σε άλλες εφαρμογές όμως στις οποίες η ανάπτυξη δεν είναι τόσο πυκνή ή ο χώρος κάλυψης της περιοχής είναι διαφορετικός, ο ορισμός της διάρκειας δικτύου αφορά τον χρόνο που πέρασε μέχρι που ο πρώτος κόμβος παύσει να λειτουργεί (first node death – FND). Το μοντέλο δικτύου στο κεφάλαιο αυτό υιοθετεί την FND προσέγγιση.

Στην παρούσα μελέτη, η διάρκεια ζωής (network lifetime) ορίζεται ως ο συνολικός χρόνος T μέχρι ο $1^{ος}$ κόμβος να μείνει χωρίς ενεργειακά αποθέματα:

$$T = \max_j \{t: e_j(t) = 0, t \in R\}$$

όπου $e_j(t)$ είναι το ενεργειακό απόθεμα του κάθε κόμβου και ορίζεται ως φθίνουσα συνάρτηση του χρόνου t .

Η διάρκεια ζωής ενός δικτύου εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες [15]:

- Πεδίο (Domain): Αυτή η προσέγγιση αφορά παράγοντες όπως η δικτυακή τοπολογία (χωρική τοποθέτηση κόμβων), οι διαστάσεις της περιοχής ανίχνευσης, το σχήμα της τοπολογίας. Με αυτή την προσέγγιση ευθυγραμμίζεται το μοντέλο συστήματος που ακολουθεί.
- Επιθυμητή ποιότητα ανίχνευσης (sensing quality): Αύξηση στην ποιότητα ανίχνευσης (μεγαλύτερη ανάλυση και περισσότερα πακέτα με μετρήσεις) συνεπάγεται αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας και μείωση της διάρκειας ζωής του δικτύου, διότι η λειτουργία της ανίχνευσης (sensing functionality) στα κυκλώματα του κόμβου καταναλώνει ενέργεια.

- Περιβάλλον (ambient environment): Το περιβάλλον επηρεάζει την ποιότητα του ασυρμάτου καναλιού και κατ' επέκταση το κόστος της επεξεργασίας (computational cost) και το κόστος της επικοινωνίας (communication cost) σε όρους ενέργειας.

3.3 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΠΑΡΑΤΑΣΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ Α.Δ.Α

Η παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου μπορεί να γίνει εφαρμόζοντας διάφορες προσεγγίσεις, όπως: με την εφαρμογή ενός ενεργειακά αποτελεσματικού πρωτοκόλλου δρομολόγησης, με την απευθείας επικοινωνία των κόμβων με τον σταθμό βάσης (1-hop direct communication) , με την οργάνωση των κόμβων σε συστάδες (clusters), με την κατασκευή ενεργειακά αποδοτικών τοπολογιών (topology control approach), με συνδιασμό των παραπάνω τεχνικών[1 - 3].

Σε αντίθεση με αυτές τις προσεγγίσεις, στο κεφάλαιο αυτό προτείνουμε έναν αλγόριθμο και αναλύουμε την λειτουργικότητά του, ο οποίος βασίζεται σε στατική δρομολόγηση πακέτων και ο οποίος φορτίζει μη ομοιόμορφα τον κάθε κόμβο, λαμβάνοντας υπόψη τα ακόλουθα κριτήρια: 1) χωροταξική τοποθέτηση του κόμβου στο δίκτυο 2) Πλήθος γειτόνων του κόμβου. Βάση της λειτουργικότητας του προτεινόμενου αλγορίθμου (βλέπε παρακάτω), ο κάθε κόμβος δεν χρειάζεται να διατηρεί πολύπλοκους πίνακες δρομολόγησης και να σπαταλά ενέργεια για την ανταλλαγή πακέτων προς ενημέρωσή τους. Με τον τρόπο αυτό λιγότερα μηνύματα υποδομής (infrastructure messages) ανταλλάσσονται και συνεπώς παρατείνεται η συνολική διάρκεια του δικτύου.

Σημαντικές μελέτες έχουν διεξαχθεί με στόχο την επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Λόγω του περιορισμού των ενεργειακών αποθεμάτων στους κόμβους, τα πρωτόκολλα που σχεδιάζονται για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να εκμεταλλεύονται με βέλτιστο τρόπο τα ενεργειακά αποθέματα κάθε κόμβου για τις διάφορες ενέργειές τους (ανίχνευση, επεξεργασία, επικοινωνίες) ώστε να επεκτείνουν την διάρκειά ζωής του [5][6]. Επιπροσθέτως, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας κόμβων πρέπει να ελαχιστοποιούν το συνολικό πλήθος ανταλλασόμενων μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων, όχι μόνο για δεδομένα αλλά και των μηνυμάτων που αφορούν λειτουργικά δεδομένα, όπως ενεργειακά αποθέματα κόμβων.

Η βιβλιογραφία έχει να αναδείξει αρκετά πρωτόκολλα δρομολόγησης δεδομένων, κάποια από τα οποία βασίζονται σε μεθόδους ομαδοποίησης συστάδων (cluster based protocols) ενώ άλλα λύνουν το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης κατανάλωσης ενέργειας κάνοντας χρήση μεθόδων γραμμικού προγραμματισμού (linear programming based) [3]. Στην πρώτη περίπτωση, οι κόμβοι χωρίζονται σε ομάδες (groups), όπου σε κάθε μία υπάρχει ένας κόμβος-αρχηγός (cluster head) ο οποίος είναι υπεύθυνος για την συλλογή της πληροφορίας από τους κόμβους – μέλη, την συνάθροιση των δεδομένων και την αποστολή τους σε επόμενο κόμβο επαναλήπτη ή απευθείας στον σταθμό βάσης. Στην δεύτερη περίπτωση, το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης ενέργειας μορφοποιείται ως πρόβλημα “μέγιστης ροής” (maximum flow problem) και λύνεται με μεθόδους γραμμικής βελτιστοποίησης [4][10].

Μία διαφορετική και απλή προσέγγιση για παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου είναι η απευθείας αποστολή πακέτων στο σταθμό βάσης από κάθε κόμβο, χωρίς την χρήση επαναληπτών και πρωτοκόλλου δρομολόγησης [7]. Στην περίπτωση όμως που λόγω της τοπολογίας ο σταθμός βάσης απέχει σημαντικά από τους υπόλοιπους κόμβους, το κόστος (σε μονάδες ενέργειας) αποστολής δεδομένων είναι μεγάλο και αυτός ο τρόπος επικοινωνίας μακροπρόθεσμα αποδεικνύεται ενεργειακά μη βέλτιστος. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, η αποστολή δεδομένων θα πρέπει να γίνεται συνεργατικά, μέσω χρήσης πρωτοκόλλου δρομολόγησης, όπου κάθε κόμβος επιλέγει τον γείτονά του βάση κάποιου κριτηρίου, όπως ελάχιστη γεωμετρική ευκλείδια απόσταση (minimum Euclidian distance), μέγιστο απόθεμα ενέργειας (maximum energy residual energy level) ή μέσω μιας μαθηματικά ορισμένης συνάρτησης κόστους για επικοινωνία δεδομένων που περιλαμβάνει στοιχεία όπως ενέργεια, μέγεθος πακέτου και είδος καναλιού [10].

3.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο σημείο αυτό παρέχονται όλες οι απαραίτητες λεπτομέρειες για το είδος της τοπολογίας δικτύου, για τον τρόπο επικοινωνίας των κόμβων, τα χαρακτηριστικά των κόμβων και τους ρόλους τους, το είδος του καναλιού και τις στρατηγικές προώθησης πακέτων.

3.4.1 Μοντέλο Κατανάλωσης Ενέργειας

Η χρήση του μοντέλου ενέργειας στις επικοινωνίες είναι το *first order radio model* [4][5]. Βάση αυτού, η ενέργεια που καταναλώνεται για την λειτουργία του των κυκλωμάτων του πομποδέκτη (transmitter/receiver circuit) ενός κόμβου είναι $e_{elect} = 50nJ/bit$ για το ηλεκτρονικό υποσύστημα (electronic subsystem) και $e_{amp} = \frac{100 pJ}{bit} / m^2$ για τη λειτουργία του ενισχυτή στον πομπό. Σχετικά με την απώλεια διαδρομής (path loss), υποθέτουμε απώλεια της τάξης $\approx \frac{1}{d^a}$. Συνεπώς, η ενέργεια που καταναλώνεται για την αποστολή πακέτου μήκους k bits από κόμβο i προς κόμβο j σε απόσταση d_{ij} δίνεται από την σχέση:

$$E_{Tx}(k, d) = e_{elect} \times k + e_{amp} \times k \times d_{ij}^a \quad (1)$$

όπου a είναι ο εκθέτης (ή συντελεστής) απώλειας διαδρομής (path loss exponent) και οι τιμές του κινούνται στο διάστημα $2 \leq a \leq 4$. Η τιμή του a απεικονίζει τις καιρικές συνθήκες και τα εμπόδια στη διαδρομή του σήματος και υπολογίζεται εμπειρικά. Η ενέργεια που καταναλώνεται για την λήψη του ίδιου πακέτου δίνεται από την σχέση:

$$E_{Rx}(k) = e_{elect} \times k \quad (2)$$

Υποθέτουμε ότι το κανάλι είναι συμμετρικό, που σημαίνει ότι το ενεργειακό κόστος για την αποστολή πακέτου από κόμβο i προς κόμβο j ισοδυναμεί με το αντίστοιχο κόστος για την αποστολή από κόμβο j προς κόμβο i (αντίστροφη πορεία μηνύματος). Βάση της μελέτης στο [6], η ενέργεια που απαιτείται για λήψη πακέτων δεν είναι καθόλου αμελητέα. Συνεπώς, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για δίκτυα αισθητήρων θα πρέπει να βασίζονται και στο κριτήριο της ελαχιστοποίησης πλήθους μηνυμάτων αποστολής και λήψης.

3.4.2 Μοντέλο Δικτύου

Ένα τυπικό δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από n κόμβους, με $n \in \mathbb{Z}^+$, που μπορεί να είναι τυχαία κατανεμημένοι σε μία επιφάνεια (περιοχή παρατήρησης). Οι θέσεις των κόμβων μπορούν να προκύψουν από γνωστές στατιστικές κατανομές,

όπως uniform, Gaussian και Poisson. Η τυχαία τοποθέτηση κόμβων αφορά εφαρμογές δικτύων αισθητήρων όπου το πεδίο μετρήσεων της επιφάνειας δεν παρουσιάζει μεγάλη παραλλαγή στις τιμές των φυσικών ποσοτήτων. Αντίθετα, σε άλλες εφαρμογές, υπάρχει απαίτηση οι θέσεις των κόμβων να έχουν προκαθοριστεί με κάποιον αλγοριθμικό τρόπο. Και στις δύο κατηγορίες τοπολογιών, ένα WSN μπορεί να θεωρηθεί και να αναπαρασταθεί ως ένας γράφος $G(V, E)$, όπου V εκφράζει τον αριθμό των κόμβων και E το σύνολο των πλευρών που ενώνουν τους κόμβους. Μία πλευρά νοείται ανάμεσα σε δύο κόμβους, όταν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους απευθείας.

Το μοντέλο του δικτύου ολοκληρώνεται με την τοποθέτηση του σταθμού βάσης (base station) ή πύλης (gateway) που είναι υπεύθυνη για την συλλογή όλων των μετρήσεων εντός περιοχής εποπτείας. Ο σταθμός βάσης παρέχει δυνατότητα σύνδεσης με άλλα δίκτυα, είτε ασύρματα είτε ενσύρματα όπως Wi-Fi, WiMax, 4G, Cellular, Ethernet, για την μεταφορά των δεδομένων περαιτέρω και την απομακρυσμένη ανάλυσή τους. Ο σταθμός βάσης, ανάλογα με την εφαρμογή προς εξέταση, συνήθως είναι ένας και τοποθετείται μακριά από το υπόλοιπο δίκτυο και δεν κινείται. Υπάρχουν και περιπτώσεις όμως όπου υπάρχουν πολλοί σταθμοί βάσης οι οποίοι μετακινούνται για την συλλογή των δεδομένων [4][17]. Πολλά μοντέλα δικτύων επιδεικνύουν παρόμοια χαρακτηριστικά γνωρίσματα [2]. Βασιζόμενοι σε αυτά, στην μελέτη αυτή, τα χαρακτηριστικά του δικτύου που εφαρμόζουμε είναι τα εξής:

- Η περιοχή παρακολούθησης είναι ένα ορθογώνιο 2 διαστάσεων πλέγμα (2D grid), διαστάσεων $N \times N$, όπου $N \in \mathbb{Z}^+$. Συνεπώς το πλέγμα μπορεί να περιλαμβάνει το μέγιστο N^2 κόμβους.
- Οι κόμβοι είτε είναι ενεργοί (active), δηλαδή λαμβάνουν μετρήσεις και στέλνουν-λαμβάνουν πακέτα, είτε ανενεργοί (inactive), δηλαδή έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω έλλειψης ενέργειας ή καταστροφής τους.
- Κάθε ενεργός (active) κόμβος ανιχνεύει περιοδικά το περιβάλλον του και αποστέλλει στα δεδομένα του στον σταθμό βάσης, είτε απευθείας, είτε μέσω επαναληπτών. Ο σταθμός βάσης τοποθετείται σε σταθερό σημείο. Ο ενεργός κόμβος έχει το radio ON. Η idle κατάσταση του κόμβου σημαίνει ότι μπορεί να ανιχνεύσει, αλλά έχει το radio OFF.

Τέλος, στην sleep κατάσταση ο κόμβος δεν πραγματοποιεί καμία δραστηριότητα.

- Κάθε κόμβος στέλνει τα δεδομένα του με πιθανότητα p , με $0 \leq p \leq 1$ ομοιόμορφα κατανομημένη. Για την παραγωγή ψευδοτυχαίων αριθμών που αναπαριστούν την πιθανότητα αυτή, χρησιμοποιούμε έναν *seed number* κάθε φορά. Αυτή η πιθανοκρατική προσέγγιση (Monte Carlo method), απεικονίζει την στοχαστική συμπεριφορά του ασύρματου μέσου. Κάθε φορά που αλλάζει ο seed, η απόφαση να στείλει ένας κόμβος πακέτο και αυτό να ληφθεί σωστά, δεν είναι ντετερμινιστική.
- Όλοι οι κόμβοι (εκτός του σταθμού βάσης), θεωρούνται ομογενείς όσον αφορά το υλικό τους (μνήμη, επεξεργαστική ισχύς, κεραία) και έχουν περιορισμένα αποθέματα ενέργειας. Ο σταθμός βάσης έχει θεωρητικά απεριόριστη ενέργεια ή μπορεί να φορτιστεί ξανά με ευκολία.
- Η τοπολογία του δικτύου αισθητήρων θεωρείται στατική. Οι θέσεις των κόμβων, είτε προκύπτουν τυχαία, είτε έχουν προαποφασιστεί με κάποια κριτήρια, παραμένουν σταθερές.
- Τα πακέτα δεδομένων που διακινούνται στο δίκτυο έχουν σταθερό μήκος k bits. Στέλνονται ως unicast πακέτο, αλλά λόγω του κοινόχρηστου ασυρμάτου μέσου, άλλοι κόμβοι – γείτονες του πομπού μπορούν να λάβουν τα πακέτα. Συνεπώς φαινόμενα overhearing εμφανίζονται [14][16]. Οι κόμβοι που δεν είναι αποδέκτες του μηνύματος, καταναλώνουν κάποιο ποσό ενέργειας για να “ακούσουν” το πακέτο και να διαβάσουν την επικεφαλίδα του (header). Κατόπιν, καταστρέφουν το πακέτο (drop packet).

3.5 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ (Forwarding Strategies)

Στόχος κάθε κόμβου είναι η προώθηση των πακέτων (είτε αυτών που παράγει είτε όσων έλαβε από γείτονες όταν λειτουργεί ως επαναλήπτης) στον σταθμό βάσης. Εάν δεν μπορεί να γίνει αυτό απευθείας είτε λόγω της εξασθένησης του σήματος είτε λόγω της απόστασης ή/και εμποδίων στην διαδρομή, προωθεί τα πακέτα σε έναν από τους γείτονές του σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια (C):

- (C1) Ελάχιστης ευκλείδιας απόστασης (Minimum distance): Ένα κόμβος i επιλέγει από την λίστα γειτόνων του τον κόμβο j ως επαναλήπτη βασιζόμενος στο κριτήριο της ελάχιστης ευκλείδιας απόστασης d_{ij} μεταξύ τους. Βάση αυτού του κριτηρίου, ο κόμβος i έχει πάντα έναν στατικό τρόπο προώθησης (δρομολόγησης) πακέτων και εφόσον η τοπολογία παραμένει σταθερή, παραμένει σταθερός ο γείτονας επαναλήπτης.
- (C2) Μέγιστη εναπομείνουσα ενέργεια (Maximum residual energy): Ένας κόμβος i επιλέγει από την λίστα γειτόνων του τον κόμβο j ως επαναλήπτη βασιζόμενος στο κριτήριο της μέγιστης εναπομείνουσας ενέργειας του j . Αυτό σημαίνει ότι η επιλογή του j δεν είναι σταθερή, αλλά εναλλάσσεται κάθε στιγμή λόγω της μεταβλητότητας στα ενεργειακά αποθέματα των γειτόνων του με έναν μη προβλεπόμενο τρόπο. Αυτό το κριτήριο προώθησης απεικονίζει έναν δυναμικό τρόπο επιλογής του γείτονα – επαναλήπτη.

Κάθε κόμβος επιλέγει έναν γείτονα – επαναλήπτη ανάλογα με το (C1) ή (C2) κριτήριο, αλλά η επιλογή παραμένει τοπική και δεν οδηγεί σε ολοκληρωμένο μονοπάτι προώθησης πακέτων. Πολλά από τα μοντέλα των WSN που έχουν προταθεί από την ερευνητική κοινότητα, στοχεύουν να επιμηκύνουν την διάρκεια ζωής τόσο του δικτύου όσο και των απλών κόμβων ξεχωριστά [5-6]. Πολλά από αυτά πετυχαίνουν να αυξήσουν την διάρκεια ζωής του δικτύου είτε βάση κριτηρίων όπως ελαχιστοποίηση φόρτου δικτύου (network load), μεγιστοποίηση διαθέσιμου εύρους ζώνης (bandwidth), ελαχιστοποίηση συνολικής καθυστέρησης, είτε μέσω προτεινόμενων αλγορίθμων για ενεργειακά βέλτιστες τοπολογίες δικτύου (energy efficient topology control algorithms) και έξυπνους αλγορίθμους δρομολόγησης. Σε όλες τις περιπτώσεις όμως η φόρτιση των κόμβων δεν λαμβάνει μέρος στα κριτήρια και οι κόμβοι φορτίζονται το ίδιο. Ωστόσο, ένα ομοιόμορφο σχήμα φόρτισης δεν οδηγεί πάντα σε αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

Σε αντίθεση με αυτές τις πρακτικές, στην μελέτη μας αναλύουμε και χρησιμοποιούμε δύο *Στρατηγικές Προώθησης* (Forwarding Strategies), οι οποίες συνδιάζονται με τα κριτήρια (C1) και (C2) και με βάση τις οποίες εκτιμούμε την

συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου (in rounds). Συγκεκριμένα, οι προτεινόμενες στρατηγικές έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- (STR1): Equal Charge Distribution (ECD): Αφορά την στρατηγική της ομοιόμορφης φόρτισης. Σε αυτή, όλοι οι κόμβοι φορτίζονται με τα ίδια ποσά ενέργειας (Joules) και επιλέγουν τον γείτονά τους με το κριτήριο (C2). Στην περίπτωση αυτή και καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης του δικτύου μέχρι ο πρώτος κόμβος να τεθεί εκτός λειτουργίας (FND), ένα ομοιόμορφο σχήμα φόρτισης εφαρμόζεται.
- (STR2): Unequal Charge Distribution (UCD): Αφορά την στρατηγική της μη ομοιόμορφης (άνισης) φόρτισης. Σε αυτή, οι κόμβοι επιλέγουν τους γείτονές – επαναλήπτες με το κριτήριο (C1). Αρχικά φορτίζονται όμοια. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του δικτύου όμως και όσο το δίκτυο εισέρχεται σε φάση “training”, το σχήμα φόρτισης γίνεται άνισο και συγκλίνει ώστε να επιμηκυνθεί η συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της ECD το συνολικό φορτίο ενέργειας στο δίκτυο (N Joules, όπου N το πλήθος των κόμβων της τοπολογίας) κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ των κόμβων, ανεξάρτητα από την τοποθέτησή τους στην τοπολογία. Αντιθέτως, για την UCD, ο προτεινόμενος αλγόριθμος κατανέμει τον φόρτο ανάλογα με την θέση του κόμβου στην τοπολογία και το πλήθος των γειτόνων του καθενός. Σε πραγματικές υλοποιήσεις, οι θέσεις των κόμβων προκύπτουν μέσω GPS ή μεθόδους τριγωνοποίησης (triangulation methods) [12]. Στην επόμενη ενότητα περιγράφεται ο αλγόριθμος και αναλύεται η λειτουργία του.

3.6 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΝΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΟΜΒΩΝ

3.6.1 Ορισμός Προβλήματος

Το πρόβλημα που καλείται να λύσει ο UCD δεδομένου του μοντέλου συστήματος που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες είναι να επιτύχει την επιμήκυνση της συνολικής διάρκειας ζωής του δικτύου μέσω ενός near optimal σχήματος φόρτισης, υλοποιώντας την στρατηγική προώθησης STR2. Στην ενότητα

αυτή, περιγράφουμε έναν επαναληπτικό και ευρετικό αλγόριθμο (iterative heuristic algorithm), που δεδομένου των θέσεων των κόμβων στην τοπολογία, προτείνει σε πολυωνυμικό χρόνο το τελικό σχήμα φόρτισής τους ώστε η διάρκεια ζωής του δικτύου να αυξάνεται.

3.6.2 Γνωρίσματα

Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφοροι ενεργειακά αποδοτικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης [10][13], σε κανένα όμως δεν δίνεται ουσιαστική έμφαση στο πώς θα ελαχιστοποιηθεί το πλήθος μηνυμάτων που ανταλλάσσονται για την λειτουργία τους. Η αύξηση του πλήθους των μηνυμάτων συγχρονισμού και ελέγχου (control and synchronization messages) αποτελεί κύριο παράγοντα της εξάντλησης των ενεργειακών αποθεμάτων στον κόμβο με γρήγορους ρυθμούς [14].

Βάση της παρατήρησης αυτής, ο αλγόριθμος UCD που προτείνουμε με σκοπό την παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου, βασίζεται στην παραδοχή πως δεν χρειάζεται όλοι οι κόμβοι να φορτίζονται εξ αρχής με τα ίδια ποσά ενέργειας, δηλαδή το σχήμα φόρτισής τους να είναι μη ομοιόμορφο και η δρομολόγηση να είναι στατική (static routing). Συνεπώς, αντί να φορτίζουμε όλους τους κόμβους όμοια, αδιαφορώντας για τον ρόλο τους και την θέση τους στην τοπολογία, ο UCD μας προτείνει ένα μη ομοιόμορφο σχήμα φόρτισης, κατανέμοντας κατάλληλα το συνολικό ποσό ενέργειας στους κόμβους του δικτύου. Η στατική δρομολόγηση στην περίπτωση αυτή βοηθά στην μείωση των μηνυμάτων υποδομής καθώς δεν απαιτείται δυναμική ενημέρωση πινάκων δρομολόγησης. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού, ο UCD είναι κατάλληλος για στατικές τοπολογίες στις οποίες οι θέσεις των κόμβων είναι εξ αρχής γνωστές.

Πρακτικά, ο UCD δεν αντιμετωπίζει όλους τους κόμβους το ίδιο. Αυτοί που δεν αποτελούν επαναλήπτες άλλων κόμβων, φορτίζονται με λιγότερα ποσά ενέργειας, αφού δεν εξυπηρετούν πολλούς γείτονες. Αντίθετα, οι συχνά χρησιμοποιούμενοι ως επαναλήπτες (routers) φορτίζονται περισσότερο, διότι έχουν πολλούς γείτονες και αποτελούν τα κομβικά σημεία της διακίνησης πληροφορίας. Η βασική ιδέα του UCD βασίζεται στην μη ομοιόμορφη κατανομή του συνολικού ενεργειακού φορτίου του δικτύου στους κόμβους με τρόπο που να πετυχαίνεται η επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του. Για να επιτευχθεί αυτό, το δίκτυο εισέρχεται σε μία φάση “εκπαίδευσης”

(training phase) και κατά την σύγκλιση του αλγορίθμου, ένα κατά προσέγγιση βέλτιστο (near optimal) σχήμα φόρτισης προτείνεται για τους κόμβους. Γνωρίζοντας εξ αρχής τη μορφή της τοπολογίας (πλήθος κόμβων και διάταξή τους στο επίπεδο) με τη χρήση του UCD λαμβάνουμε ένα σχήμα φόρτισης που οδηγεί σε αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Η απόδοση του UCD μετριέται σε πλήθος χρονικών μονάδων (number of rounds) ακολουθώντας την FND προσέγγιση.

3.6.3 Χαρακτηριστικά και Λειτουργία Αλγορίθμου

Η λειτουργία του UCD περιγράφεται ακόλουθα ως εξής: Ας υποθέσουμε ότι έχουμε συνολικό φορτίο ενέργειας M Joules για να κατανέμουμε σε N κόμβους. Οι βασικές δομές του αλγορίθμου είναι:

- *charges[i]*: Είναι ένα διάνυσμα (vector) το οποίο κρατά τις τιμές φόρτισης για τους κόμβους, με $i = 1 \dots N$
- *residuals[i]*: Είναι ένα διάνυσμα (vector) το οποίο κρατά τις τιμές της εναπομείνουσας ενέργειας για κάθε κόμβο, με $i = 1 \dots N$
- *transmit()*: Συνάρτηση που εκτελείται από κάθε κόμβο την στιγμή που έχει πακέτο να στείλει. Η συνάρτηση αυτή βασίζεται σε πιθανότητα p ο κόμβος να στείλει ή όχι ένα πακέτο.
- *max()*: Συνάρτηση υπολογισμού της μέγιστης τιμής. Καλείται με όρισμα ένα διάνυσμα.
- P : Μετρητής που δείχνει πόσες φορές ο UCD έχει εκτελεστεί.
- $ITER_{MAX}$: Άνω όριο εκτελέσεων αλγορίθμου.
- *res*: Μεταβλητή που κρατά τιμή για την κατά μέσο όρο εναπομείνουσα ενέργεια στους κόμβους. Καθορίζει ποσοτικά την περίπτωση ομοιόμορφου ρυθμού θανάτων εντός του δικτύου.

Algorithm 1 Unequal Charge Distribution

1. Initialization Phasea. $P = 1$ b. $charges^P[i] = \frac{M}{N}, i = 1, \dots, N$ c. $residuals^P[i] = charges^P[i], i = 1, \dots, N$ **2. Training Phase****while** ($P \leq ITER_{MAX}$) **do**a. $P = P + 1$ **repeat** $i \rightarrow transmit(), i = 1, \dots, N$ **until** $residuals^P[i] = 0$ b. $rf = \frac{\max(residuals^P[i])}{2}$ c. find position k where: $residuals^P[k] = \max(residuals^P[i])$ d. find position l where: $residuals^P[l] = 0$ **if** ($i = k$) **then**e. $charges^P[i] = charges^{P-1}[i] - rf$ **else****if** ($i = l$) **then**f. $charges^P[i] = charges^{P-1}[i] + rf$ **end if****else**g. $charges^P[i] = charges^{P-1}[i]$ **end if**h. $res = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N residuals^P[i]}$ **end while**

Εικόνα 1: Αλγόριθμος UCD

Στην εικόνα 1 δίνονται τα βήματα εκτέλεσης του UCD, σε μορφή ψευδοκώδικα. Ο UCD έχει δύο φάσεις: 1) Initialization phase, κατά την οποία όλοι οι κόμβοι φορτίζονται το ίδιο (βήμα 1b) και 2) Training phase: Όλοι οι κόμβοι στέλνουν τα πακέτα τους βάση πιθανότητας, μέχρι ο πρώτος κόμβος να τεθεί εκτός λειτουργίας (να μείνει χωρίς ενέργεια). Στο βήμα 2b, ένας *recharge factor* (*rf*) υπολογίζει το ποσό φόρτισης για τον επόμενο γύρο εκτέλεσης που προκύπτει ως το μισό της μέγιστης εναπομείνουσας ενέργειας. Εν συνεχεία, στα βήματα 2c και 2d, υπολογίζεται ποιος είναι ο κόμβος με την μέγιστη και την ελάχιστη εναπομείνουσα ενέργεια (κόμβος που τέθηκε εκτός λειτουργίας) αντίστοιχα. Σκοπός είναι να φορτιστεί στον επόμενο γύρο ο πιο αδύναμος ενεργειακά κόμβος κατά *rf* ποσό, το οποίο θα έχει αποκοπεί από τον πιο δυνατό ενεργειακά κόμβο. Ο συνολικός ενεργειακός φόρτος των M Joules

παραμένει σταθερός. Το σχήμα φόρτισης (energy charges) για τον επόμενο γύρο P υπολογίζεται ως εξής:

- Βήμα 2e: Φόρτιση του “δυνατού” κόμβου κατά rf λιγότερη ενέργεια.
- Βήμα 2f: Φόρτιση του “αδύνατου” κόμβου κατά rf περισσότερη ενέργεια.
- Βήμα 2g: Φόρτιση όλων των υπολοίπων κόμβων βάση του σχήματος φόρτισης του προηγούμενου γύρου $P - 1$.

Η τιμή της μεταβλητής res στο βήμα 2h υπολογίζει ποσοτικά την κατά μέσο όρο εναπομείνουσα ενέργεια στους κόμβους. Πρακτικά εάν η τιμή της είναι μικρή, αυτό σημαίνει ότι ο σχήμα φόρτισης που επιλέχθηκε οδηγεί σε περίπτωση ομοιόμορφου θανάτου των κόμβων (πεθαίνουν σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή), άρα είναι μία ένδειξη επιμήκυνσης της συνολικής διάρκειας ζωής του δικτύου.

3.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου UCD, η ενότητα αυτή παρουσιάζει μία σειρά από πειράματα. Οι προσομοιώσεις που αφορούν την κατασκευή τοπολογίας, τις επικοινωνίες των κόμβων, τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας και της διάρκειας ζωής του δικτύου έγιναν από τον προσομοιωτή (simulator) που δημιουργήθηκε σε C++, οι λεπτομέρειες του οποίου υπάρχουν στο Παράρτημα Α. Σχετικά με την δημιουργία τοπολογιών στα σενάρια προσομοίωσης έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Η τοπολογία είναι ένα πλέγμα δύο διαστάσεων 100m x 100m. Παρόλα αυτά, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει και μη συμμετρικές τοπολογίες με άνισες διαστάσεις.
- Το πλήθος των κόμβων που τοποθετούνται σε κάθε τοπολογία είναι μεταβλητό και το αποφασίζει ο χρήστης ανάλογα το σενάριο που εξετάζει.
- Η τοποθέτηση των κόμβων μπορεί να γίνει: 1) Στατικά, δηλαδή τοποθέτηση σειριακά των κόμβων εάν γνωρίζουμε εκ των προτέρων τις θέσεις τους 2) Τυχαία, δηλαδή οι συντεταγμένες (x,y) των κόμβων προκύπτουν από γνωστή στατιστική κατανομή (ομοιόμορφη,

Gaussian, κανονική) 3) Αρχείο που περιέχει τις συντεταγμένες των κόμβων.

- Τοπολογίες στις οποίες παραβιάζεται το κριτήριο της γειννιάσης μεταξύ δύο κόμβων απορρίπτονται. Για τις τοπολογίες μορφής πλέγματος τα όρια ευκλείδειας απόστασης δύο κόμβων για να θεωρούνται γείτονες είναι: $1 \leq d \leq \sqrt{2}$.
- Η τοπολογία θεωρείται στατική, δηλαδή οι θέσεις των κόμβων εντός αυτής δεν αλλάζουν.

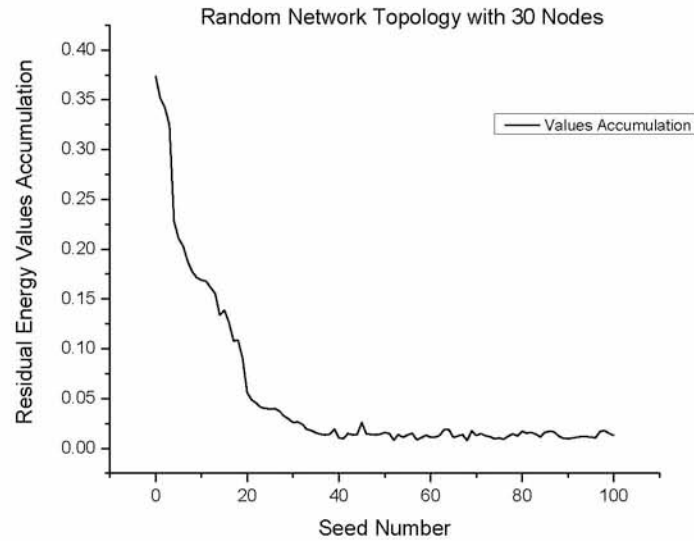
3.7.1 Σενάριο και Τοπολογία Προσομοίωσης

Ας θεωρήσουμε την τυχαία τοπολογία 30 κόμβων με 1 σταθμό βάσης σε επιφάνεια δύο διαστάσεων, όπως απεικονίζεται από την εικόνα 2. Κάθε κελί του πλέγματος έχει διάσταση 10m. Αρχικά όλοι οι κόμβοι φορτίζονται με το ίδιο ποσό ενέργειας, π.χ. 1 Joule. Για την αναπαράσταση των κόμβων, ο αριθμός 1 σημαίνει ότι στο κελί υπάρχει ενεργός (active) κόμβος, ο οποίος ανιχνεύει ποσότητες και επικοινωνεί πακέτα. Αντίθετα ο αριθμός 0 σημαίνει απουσία κόμβου.

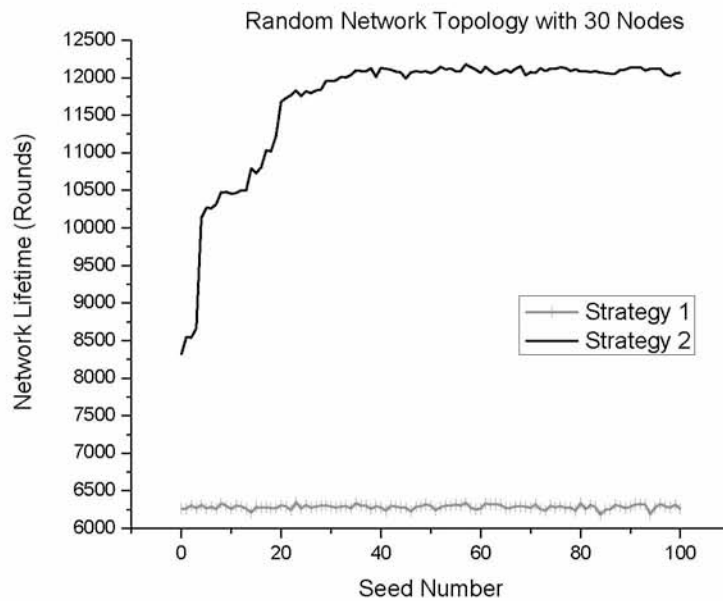
| | | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1(1) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1(2) | 1(3) | 0 | 1(4) | 1(5) | 0 | 0 | 0 |
| 1(6) | 1(7) | 0 | 0 | 0 | 1(8) | 0 | 0 | 0 | 1(9) |
| 0 | 1(10) | 1(11) | 0 | 0 | 1(12) | 0 | 1(13) | 1(14) | 0 |
| 0 | 0 | 1(15) | 0 | 1(16) | 0 | 1(17) | 0 | 1(18) | 0 |
| 0 | 0 | 1(19) | 0 | 1(20) | 0 | 1(21) | 1(22) | 0 | 0 |
| 0 | 1(23) | 0 | 1(24) | 0 | 0 | 0 | 1(25) | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1(26) | 1(27) | 0 | 0 | 0 | 0 | 1(28) | 1(29) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1(30) | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1(GW) |

Εικόνα 2: Τυχαία τοπολογία δικτύου αισθητήρων 30 κόμβων με τα ID τους

Δίπλα από κάθε ενεργό κόμβο σημειώνεται και το ID του, ώστε να μπορούμε να αναφερθούμε στον κόμβο αυτό και να καταγράψουμε το επίπεδο της φόρτισής του. Ο σταθμός βάσης (GW), τοποθετείται στο νοτιο-ανατολικό άκρο, χωρίς ID, διότι δεν μας ενδιαφέρει να μετρήσουμε στοιχεία ενέργειας γι αυτόν. Η απόσταση των κόμβων με ID=1 και ID=3 είναι: $\sqrt{2} \times 30m = 43m$. Η τοπολογία της εικόνας 2 θεωρείται έγκυρη, διότι κάθε κόμβος έχει τουλάχιστον 1 γείτονα κόμβο.



Εικόνα 3: Εναπομείνουσα ενέργεια κόμβων (*res value*)



Εικόνα 4: Συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου 30 κόμβων για STR1, STR2

Το σενάριο προσομοίωσης είναι το ακόλουθο:

1. Αρχικά όλοι οι κόμβοι φορτίζονται με το ίδιο ποσό ενέργειας
2. Όταν έλθει η σειρά τους να στείλουν ένα πακέτο με πιθανότητα p το στέλνουν.

3. Όταν ο πρώτος κόμβος τεθεί εκτός λειτουργίας, τότε βάση της εικόνας 1, υπολογίζεται για κάθε κόμβο το ποσό φόρτισης για τον επόμενο γύρο (rf value).
4. Όταν η διαφορά μεταξύ του γύρου P και $P - 1$ στο σχήμα φόρτισης του κάθε κόμβου είναι μικρότερη από 10%, τότε ο αλγόριθμος συγκλίνει και προκύπτει το τελικό (near optimal) σχήμα φόρτισης, που παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

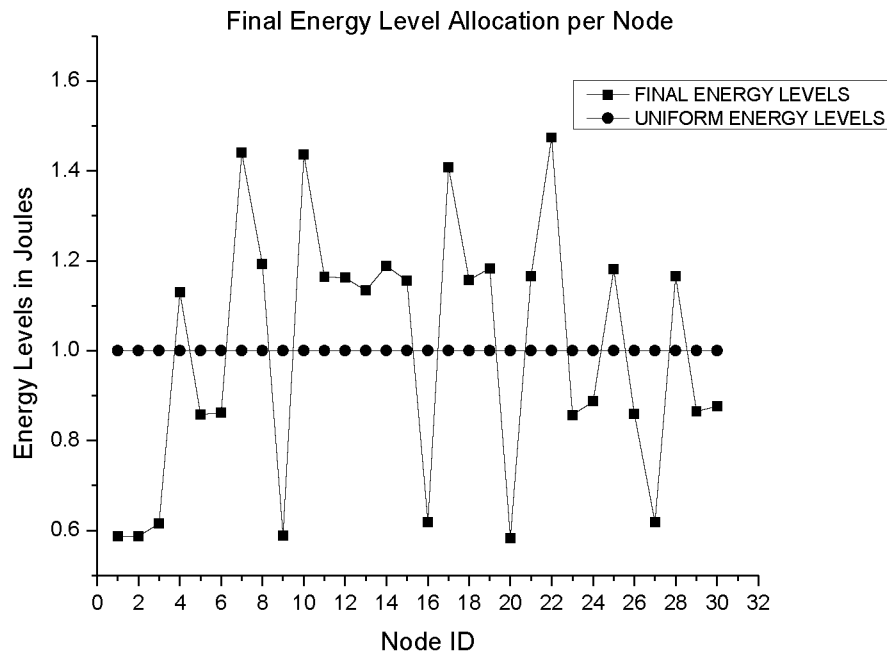
Η εικόνα 3 αναπαριστά την *res* value από το βήμα 2h, δηλαδή την εναπομείνουσα ενέργεια των κόμβων ως συνάρτηση του seed number (Monte Carlo προσομοίωση). Η τιμή της *res*, όσο μικρότερη γίνεται, είναι μία ποιοτική ένδειξη ότι οι κόμβοι εξαντλούν τα ενεργειακά τους αποθέματα σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή, δηλαδή το δίκτυο παρουσιάζει περίπτωση ομοιόμορφου θανάτου. Βάση της εικόνας 3, η τιμή της *res* συνεχώς μειώνεται και μετά από 40 επαναλήψεις του αλγορίθμου η τιμή της δείχνει να ταλαντώνεται γύρω από την τιμή 0,03. Η ελάχιστη τιμή της *res* είναι 0,0077. Το σχήμα φόρτισης του Πίνακα 1 που επιλέχθηκε για τους κόμβους οδήγησε σε ομοιόμορφο θάνατο τους κόμβους και όχι σε πρόωρο έναν από αυτούς. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου αυξάνεται.

Στην εικόνα 4 απεικονίζεται ην συνολική διάρκεια ζωής για τις στρατηγικές ECD (STR1) και UCD (STR2) αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι η ECD οδηγεί κατά μέσο όρο σε 45% χαμηλότερη διάρκεια ζωής από ότι η UCD. Οι τιμές της ECD ταλαντώνονται γύρω από 6200 network lifetime rounds και δεν αυξάνονται. Ο λόγος είναι ότι η τοπολογία είναι στατική και τα αρχικά ποσά φόρτισης για κάθε γύρο προσομοίωσης σταθερά. Αντιθέτως, στην UCD, μέχρι 40 επαναλήψεις έχουμε αύξηση της διάρκειας ζωής. Η μορφή της καμπύλης UCD παρουσιάζει αντικατοπτρική συμπεριφορά με αυτή της *res* στην εικόνα 3. Αυξάνεται δηλαδή και μετά σταθεροποιείται με μικρές μεταβολές γύρω από την τιμή 12.000. Καθόλη την διάρκεια των 40 επαναλήψεων, ο αλγόριθμός μας διέρχεται από μία φάση training, δηλαδή αλλάζουν τα ποσά φόρτισης των κόμβων και προσαρμόζονται κατάλληλα ώστε να επιμηκυνθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου.

Για να ποσοτικοποιήσουμε την ανωτερότητα της UCD έναντι της ECD στρατηγικής, ορίζουμε τον *δείκτη βελτίωσης* Improvement Factor (IF) ως εξής:

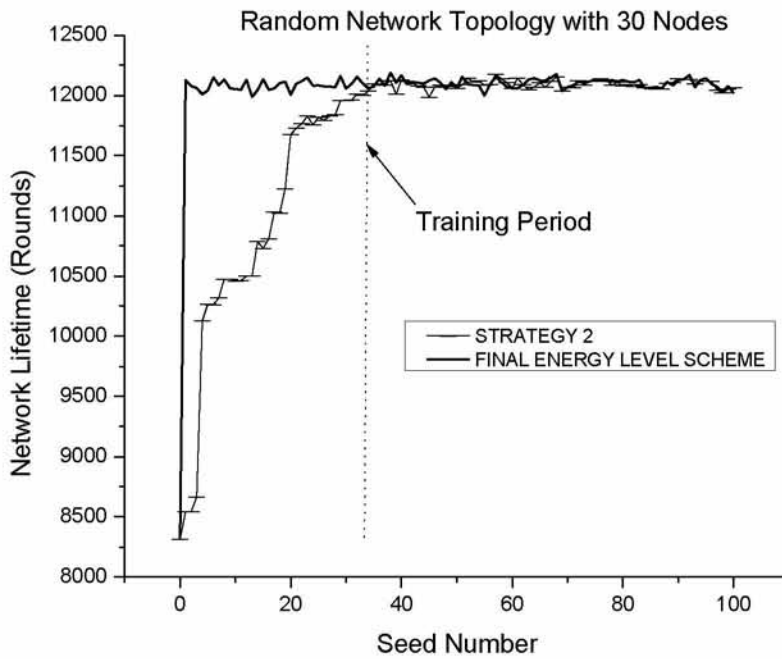
$$IF = \frac{Mean\{Lifetime_{UCD}(STR2)\}}{Mean\{Lifetime_{ECD}(STR1)\}} \quad (3)$$

Ο IF της τοπολογίας προσομοίωσης της εικόνας 2 είναι: $IF = 1.98$. Ο δείκτης αυτός μας δείχνει πρακτικά πόσες φορές θα διαρκέσει η ζωή του ίδιου δικτύου εάν χρησιμοποιηθεί η UCD έναντι της ECD.



Εικόνα 5: Βέλτιστο σχήμα φόρτισης κόμβων

Βάση του σεναρίου προσομοίωσης, με την σύγκλιση του αλγορίθμου προκύπτει το τελικό σχήμα φόρτισης. Η εικόνα 5, απεικονίζει γραφικά την κατανομή της ενέργειας ανά κόμβο. Υποθέτουμε ότι το αρχικό ποσό φόρτισης σε κάθε κόμβο είναι 1 Joule. Ο UCD αποφασίζει ότι 16 από τους 30 κόμβους της τοπολογίας πρέπει να φορτιστούν με ενέργεια > 1 Joule και οι υπόλοιποι 14 με ενέργεια < 1 Joule. Τα ακριβή ποσά φόρτισης ανά κόμβο (το ID του κόμβου) τον προσδιορίζει μοναδικά. Από την εικόνα 5 και τον Πίνακα 1 προκύπτει ότι ο κόμβος με ID=22 αφού έχει 5 γείτονες να εξυπηρετήσει, φορτίζεται 1.4739 Joules, περισσότερο από όλους.



Εικόνα 6: Σύγκριση της συνολικής διάρκειας δικτύου 30 κόμβων με βέλτιστο σχήμα φόρτισης κόμβων

Πίνακας 1: Τιμές φόρτισης (σε Joules) ανά κόμβο

| Node ID | Energy Charge | Node ID | Energy Charge | Node ID | Energy Charge |
|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|
| 1 | 0.58725 | 11 | 1.16402 | 21 | 1.16511 |
| 2 | 0.58728 | 12 | 1.16211 | 22 | 1.4739 |
| 3 | 0.6151 | 13 | 1.13329 | 23 | 0.85667 |
| 4 | 1.12989 | 14 | 1.18865 | 24 | 0.88725 |
| 5 | 0.85847 | 15 | 1.15545 | 25 | 1.18116 |
| 6 | 0.86185 | 16 | 0.61815 | 26 | 0.85987 |
| 7 | 1.44075 | 17 | 1.40844 | 27 | 0.61785 |
| 8 | 1.19243 | 18 | 1.15722 | 28 | 1.16609 |
| 9 | 0.58845 | 19 | 1.18316 | 29 | 0.86531 |
| 10 | 1.43596 | 20 | 0.58293 | 30 | 0.87594 |

Η training phase από την οποία περνά το δίκτυο μέσω του αλγορίθμου μέχρι να συγκλίνει στο βέλτιστο σχήμα φόρτισης φαίνεται στην εικόνα 6. Σε αυτή την εικόνα παραθέτουμε την διάρκεια ζωής του δικτύου προσομοίωσης για την UCD

(STR2) και της διάρκειας που προκύπτει εάν από την αρχή φορτίζαμε τους κόμβους με τα βέλτιστα ποσά του Πίνακα 1 (χωρίς training). Παρατηρούμε ότι από την δεύτερη επανάληψη του αλγορίθμου η τιμή της διάρκειας από τα 8300 ανεβαίνει αμέσως κοντά στα 12.000. Στις πρώτες 40 περίπου επαναλήψεις, όσο διαρκεί και η μείωση της *res* βάση της εικόνας 3, η καμπύλη της διάρκειας ζωής του δικτύου της STR2 ανεβαίνει σταδιακά. Μετά συγκλίνει κοντά στις 12.000.

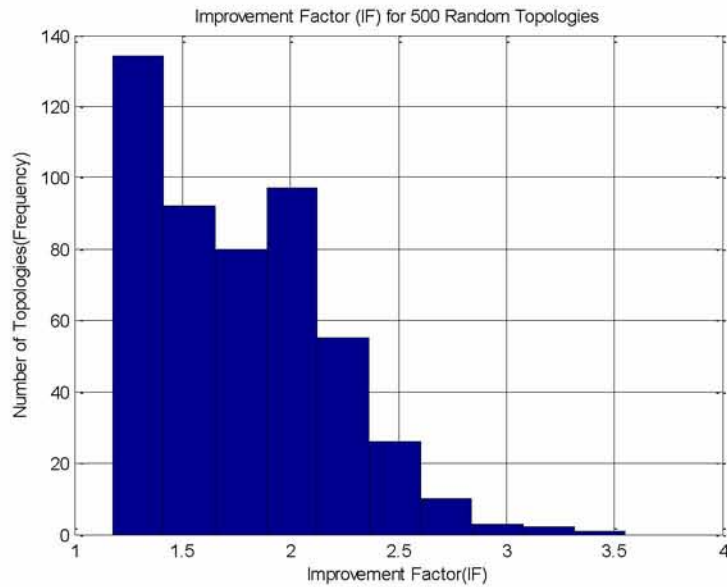
Επιπρόσθετα από την εικόνα 6, προκύπτει ένα **πρακτικό συμπέρασμα**: Σε μία πραγματική υλοποίηση με δίκτυο αισθητήρων, δεδομένης της τοπολογίας (θέσεις κόμβων και σταθμού βάσης), μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον UCD, να υπολογίσουμε το βέλτιστο σχήμα φόρτισης και μετά να φορτίσουμε ανάλογα τον κάθε κόμβο. Η φόρτιση μπορεί να γίνει **μία φορά**. Βάση των παραπάνω εικόνων και από τον *IF* δείκτη, περιμένουμε το δίκτυο να “ζήσει” περισσότερο. Φυσικά υποθέτουμε ότι οι κόμβοι διαθέτουν μπαταρίες με δυνατότητα επαναφόρτισης.

3.7.2 Προσομοίωση Τυχαίων Τοπολογιών

Η πρακτική χρησιμότητα του προτεινόμενου UCD παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες και η προσομοίωση βασίστηκε σε **μία τυχαία** τοπολογία, αυτή της εικόνας 2. Στο σημείο αυτό, και με σκοπό να αναδείξουμε την ευρωστία (robustness), παράγουμε **500** τυχαίες συνδεδεμένες τοπολογίες για τις ακόλουθες κατηγορίες: 20,30,40 σε σύνολο κόμβοι ανά τοπολογία. Για κάθε μία από αυτές τις μετρήσεις, λαμβάνουμε στατιστικά αποτελέσματα, υπολογίζουμε τον *IF* και παραθέτουμε τις 3 “καλύτερες” και τις 3 “χειρότερες” τοπολογίες ανά περίπτωση σε όρους *IF*. Επιπροσθέτως βλέπουμε ανά κατηγορία, πως διαμορφώνεται το σχήμα κάθε τοπολογίας ώστε όταν εφαρμοστεί ο UCD να έχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Όλες οι τοπολογίες που παράχθηκαν διαθέτουν έναν σταθμό βάσης στην ίδια τοποθεσία με αυτόν της αρχικής εικόνας 2. Στις ακόλουθες εικόνες παραθέτουμε τα ιστογράμματα *IF* 500 τοπολογιών ανά περίπτωση.

Κατηγορία: 20 κόμβοι:



Εικόνα 7: Ιστόγραμμα *IF* 500 τυχαίων και συνδεδεμένων τοπολογιών με 20 κόμβους και 1 σταθμό βάσης

Τα στατιστικά δεδομένα που προκύπτουν από τις μετρήσεις της διάρκειας ζωής των στρατηγικών ECD (STR1) και UCD (STR2) είναι τα ακόλουθα: Max IF = 3.5520 , Min IF = 1.1781, Mean IF = 1.7734 και Variance IF = 0.1656. Στις ακόλουθες εικόνες παραθέτονται οι 3 καλύτερες και 3 χειρότερες *IF* τοπολογίες:

3 καλύτερες *IF* τοπολογίες:

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1(GW) |

Εικόνα 7α : 1st best τοπολογία #256 με *IF* = 3,55 - 20 nodes

| | | | | | | | | | |
|---|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1(GW) |

Εικόνα 7β : 2nd best τοπολογία #155 με $IF = 3,17 - 20$ nodes

| | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1(GW) |

Εικόνα 7γ : 3rd best τοπολογία #338 με $IF = 3,11 - 20$ nodes

3 χειρότερες IF τοπολογίες:

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1(GW) |

Εικόνα 7δ : 1st worst τοπολογία #499 με $IF = 1,17 - 20$ nodes

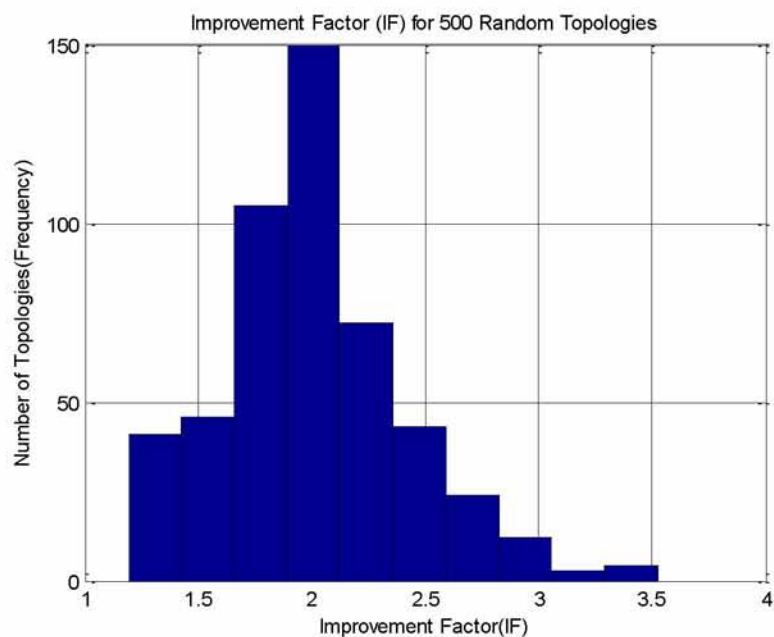
| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1(GW) |

Εικόνα 7ε : 2nd worst τοπολογία #57 με $IF = 1,18 - 20$ nodes

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1(GW) |

Εικόνα 7στ : 3rd worst τοπολογία #269 με $IF = 1,22 - 20$ nodes

Κατηγορία 30 Κόμβου:



Εικόνα 8: Ιστόγραμμα IF 500 τυχαίων και συνδεδεμένων τοπολογιών με 30 κόμβους και 1 σταθμό βάσης

Τα στατιστικά δεδομένα που προκύπτουν από τις μετρήσεις της διάρκειας ζωής των στρατηγικών ECD (STR1) και UCD (STR2) είναι τα ακόλουθα: Max $IF = 3.5246$, Min $IF = 1.1942$, Mean $IF = 2.0031$ και Variance $IF = 0.1632$. Στις ακόλουθες εικόνες παραθέτονται οι 3 καλύτερες και 3 χειρότερες IF τοπολογίες:

3 καλύτερες IF τοπολογίες:

| | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1(GW) |

Εικόνα 8α : 1st best τοπολογία #287 με $IF = 3,52 - 30$ nodes

| | | | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1(GW) |

Εικόνα 8β : 2nd best τοπολογία #459 με $IF = 3,46 - 30$ nodes

| | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1(GW) |

Εικόνα 8γ : 3rd best τοπολογία #34 με $IF = 3,40 - 30$ nodes

3 χειρότερες IF τοπολογίες:

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1(GW) |

Εικόνα 8δ : 1st worst τοπολογία #209 με $IF = 1,194 - 30$ nodes

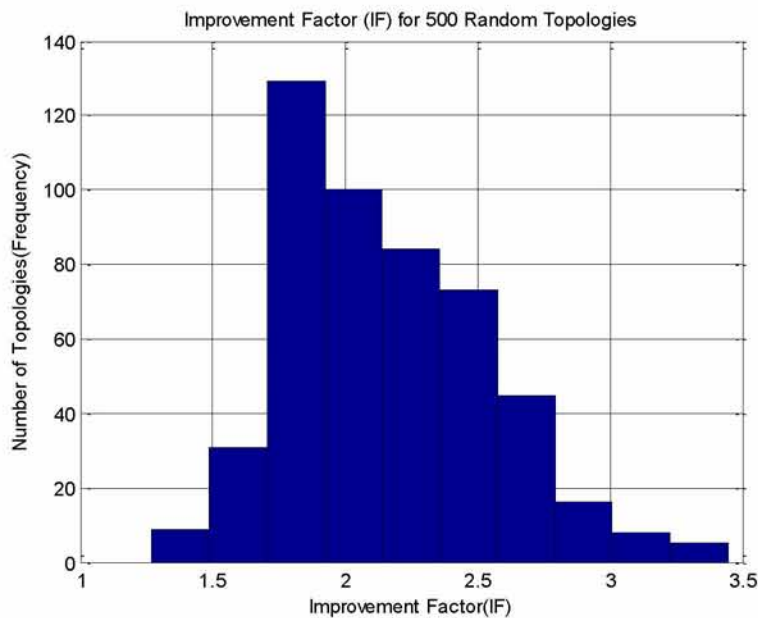
| | | | | | | | | | |
|---|---|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1(GW) |

Εικόνα 8ε : 2nd worst τοπολογία #339 με $IF = 1,205 - 30$ nodes

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1(GW) |

Εικόνα 8στ : 3rd worst τοπολογία #243 με $IF = 1,206 - 30$ nodes

Κατηγορία 40 Κόμβοι:



Εικόνα 9: Ιστόγραμμα IF 500 τυχαίων και συνδεδεμένων τοπολογιών με 40 κόμβους και 1 σταθμό βάσης

Τα στατιστικά δεδομένα που προκύπτουν από τις μετρήσεις της διάρκειας ζωής των στρατηγικών ECD (STR1) και UCD (STR2) είναι τα ακόλουθα: Max $IF = 3.4439$, Min $IF = 1.2704$, Mean $IF = 2.1542$ και Variance $IF = 0.1467$. Στις ακόλουθες εικόνες παραθέτονται οι 3 καλύτερες και 3 χειρότερες IF τοπολογίες:

3 καλύτερες IF τοπολογίες:

| | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | I(GW) |

Εικόνα 9α : 1st best τοπολογία #289 με $IF = 3,44 - 40$ nodes

| | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | I(GW) |

Εικόνα 9β : 2nd best τοπολογία #416 με $IF = 3,39 - 40$ nodes

| | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | I(GW) |

Εικόνα 9γ : 3rd best τοπολογία #65 με $IF = 3,37 - 40$ nodes

3 χειρότερες IF τοπολογίες:

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1(GW) |

Εικόνα 9δ : 1st worst τοπολογία #482 με $IF = 1,27$ - 40 nodes

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1(GW) |

Εικόνα 9ε : 2nd worst τοπολογία #67 με $IF = 1,30$ - 40 nodes

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1(GW) |

Εικόνα 9στ : 3rd worst τοπολογία #19 με $IF = 1,32$ - 40 nodes

Σχετικά με τις παραπάνω εικόνες των ιστογραμμάτων ανά κατηγορία έχουμε να επισημάνουμε τις ακόλουθες **παρατηρήσεις**:

- Οι εικόνες 7, 8 και 9 απεικονίζουν το ιστόγραμμα των 500 τυχαίων τοπολογιών, κάθε μία για τις κατηγορίες πλήθους κόμβων 20,30,40. Στον οριζόντιο άξονα αναπαριστούμε τον δείκτη IF και στον κατακόρυφο το πλήθος τοπολογιών. Σε όλες τις εικόνες παρατηρούμε ότι για όλες τις εξεταζόμενες τοπολογίες η UCD (STR2) είναι αποδοτικότερη από την ECD (STR1), αφού ισχύει $IF > 1$.
- Όλα τα ιστογράμματα, και περισσότερο των κατηγοριών 30,40 κόμβων μοιάζουν με ομοιόμορφη κατανομή (normal distribution) με συγκεκριμένη μέση τιμή και διασπορά.
- Ο δείκτης IF μας αποκαλύπτει ποια είναι μορφή (διασπορά και θέσεις των κόμβων εντός του χώρου 2 διαστάσεων) που θα έχουν οι τοπολογίες στις οποίες εάν εφαρμοστεί η UCD θα δώσει το μέγιστο αποτέλεσμα σε σχέση με την ECD. Οι 7α, 7β, 7γ απεικονίζουν τις 3 τοπολογίες για μέγιστο αποτέλεσμα. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία τάση να εξελίσσονται οι κόμβοι με ένα συγκεκριμένο pattern και να καλύπτουν σε μορφή διαγωνίου όλο τον 2-διαστάσεων χώρο. Την ίδια τάση παρουσιάζουν οι τοπολογίες των εικόνων 8α, 8β, 8γ, που είναι οι 3 καλύτερες για την κατηγορία 30 κόμβων. Στην κατηγορία αυτή, η εξέλιξη των κόμβων μοιάζει με “διακλάδωσεις”, που τείνουν να καλύπτουν διαγώνια τον χώρο και προς τα δεξιά και προς τα αριστερά. Όμοια τάση και συμπεριφορά εξέλιξης έχουν οι 3 καλύτερες τοπολογίες της κατηγορίας 40 κόμβοι. Αντίστοιχα, για τις χειρότερες τοπολογίες παρατηρούμε ότι υπάρχει η τάση οι κόμβοι να συσσωρεύονται ο ένας κοντά στον άλλον. Ο λόγος που στην περίπτωση αυτή οι τιμές του IF είναι χαμηλές προκύπτει από την τοποθέτηση των κόμβων και από την λειτουργία της UCD, ECD. Συγκεκριμένα, εάν ένας κόμβος έχει πολλούς γείτονες γύρω του (μεγάλη συσσώρευση κόμβων), τότε ο ECD οδηγεί σε αυξημένες τιμές της συνολικής διάρκειας ζωής του δικτύου διότι η επιλογή του κόμβου – γείτονα γίνεται δυναμικά βάση της εναπομείνουσας ενέργειάς του. Συνεπώς υπάρχουν πολλές επιλογές για δρομολόγηση. Και στις περιπτώσεις των χειρότερων τοπολογιών η UCD είναι καλύτερη στρατηγική έναντι της ECD. Παρόλα αυτά οι τιμές της διάρκειας ζωής της UCD είναι σε μικρό ποσοστό μεγαλύτερες από αυτές της ECD. Στις εικόνες 7δ,7ε,7στ της κατηγορίας 20 κόμβοι, οι κόμβοι τοποθετούνται με τάση συσσώρευσης ο ένας γύρω από τον άλλον. Παρόμοια αποτελέσματα δείχνουν οι τοπολογίες των εικόνων 8δ, 8ε, 8στ και 9δ, 9ε, 9στ.
- Υψηλή τιμή του δείκτη IF οδηγεί σε τοπολογία που είναι “απλωμένη” στις διαγωνίους, ενώ χαμηλή τιμή οδηγεί σε τοπολογία με μεγάλη συσσώρευση κόμβων σε μία περιοχή.

3.8 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Ο υπολογισμός της συνολικής διάρκειας ζωής του δικτύου, είτε εφαρμόζοντας την UCD είτε την ECD στρατηγική, εξαρτάται από το ποσό ενέργειας που καταναλώνει κάθε κόμβος για να επιτελέσει τις λειτουργίες του [17-19]. Στην παρούσα μελέτη μας ενδιαφέρει η κατανάλωση ενέργειας που οφείλεται στις επικοινωνίες δεδομένων και εξαρτάται από το πλήθος των πακέτων που στέλνει/λαμβάνει ο κόμβος, το μήκος (σε bits) τους και άλλους παράγοντες του physical layer, όπως διαμόρφωση (modulation) και κωδικοποίηση (encoding). Η σχέση (1), όπου υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας για την αποστολή δεδομένων, εκφράζεται ως πολυωνυμική συνάρτηση της απόστασης δύο κόμβων και του συντελεστή απώλειας διαδρομής a . Οι τιμές του συντελεστή a εξαρτώνται από τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες και από το είδος του ασύρματου μέσου (και περιβάλλοντα χώρου του δικτύου). Οι τιμές αυτές έχουν ληφθεί εμπειρικά και δίνονται στον παρακάτω πίνακα [17]:

Πίνακας 2: Τιμές συντελεστή (εκθέτη) απώλειας διαδρομής για διάφορα περιβάλλοντα

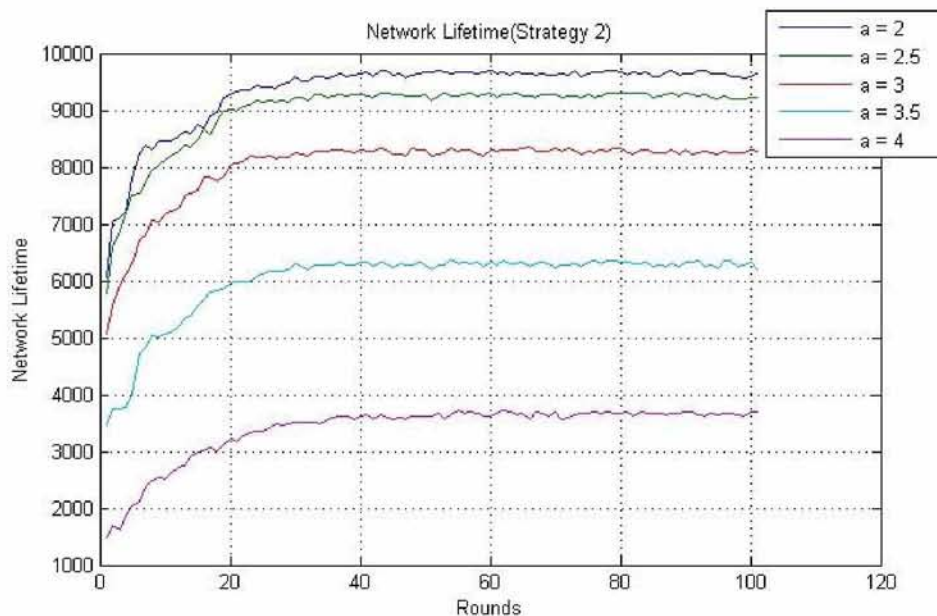
| Περιβάλλον | a |
|----------------------------|-----------|
| Free space | 2 |
| Urban Areas | 2.7 – 3.5 |
| Indoor Line of Sight (LOS) | 1.6 – 1.8 |
| Indoor NO LOS | 4 - 6 |
| Heavy Rain | 4 - 6 |

Οι βέλτιστες τιμές φόρτισης κάθε κόμβου όπως υπολογίζονται από την UCD μπορούν να αλλάξουν ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη τιμή του a . Εφόσον το περιβάλλον και το ασύρματο μέσο παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του σχήματος φόρτισης, στο σημείο αυτό της παρούσης μελέτης μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε πόσο χάνουμε (σε ποσοστό) σε μονάδες lifetime εάν χρησιμοποιήσουμε ένα σχήμα φόρτισης που δεν αντιστοιχεί στο περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσεται το δίκτυο αισθητήρων που μελετάμε.

| | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1(1) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1(2) | 1(3) | 0 | 1(4) | 0 |
| 0 | 1(5) | 0 | 1(6) | 0 | 1(7) | 1(8) | 1(9) | 1(10) | 0 |
| 1(11) | 1(12) | 1(13) | 0 | 1(14) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1(15) | 1(16) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1(17) | 1(18) | 1(19) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1(20) | 1(21) | 1(22) | 0 | 1(23) | 1(24) | 1(25) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1(26) | 1(27) | 0 | 1(28) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1(29) | 1(30) | 0 | 0 | 1(GW) |

Εικόνα 10: Τοπολογία με 30 κόμβους και 1 σταθμό βάσης (GW)

Συγκεκριμένα η τοπολογία που χρησιμοποιούμε αναφέρεται στην εικόνα 10. Αποτελείται από 30 κόμβους, όπου ο αριθμός 1 σε κάθε κελί συμβολίζει έναν ενεργό κόμβο, ο αριθμός στην παρένθεση συμβολίζει το ID του και ο αριθμός 0 στο κελί την απουσία κόμβου στην συγκεκριμένη περιοχή. Μετά από προσομοιώσεις για διαφορετικές τιμές του a , το διάγραμμα της συνολικής διάρκειας ζωής βάσης της UCD φαίνεται στην εικόνα 11. Είναι φυσικό, όσο αυξάνεται η τιμή του a , δηλαδή το περιβάλλον μπορεί να έχει εμπόδια, ο καιρός να είναι βροχερός ή ο περιβάλλοντας χώρος να είναι εσωτερικός με μεγάλη πιθανότητα σκέδασης του σήματος, η καμύλη να είναι σε χαμηλότερα επίπεδα lifetime.

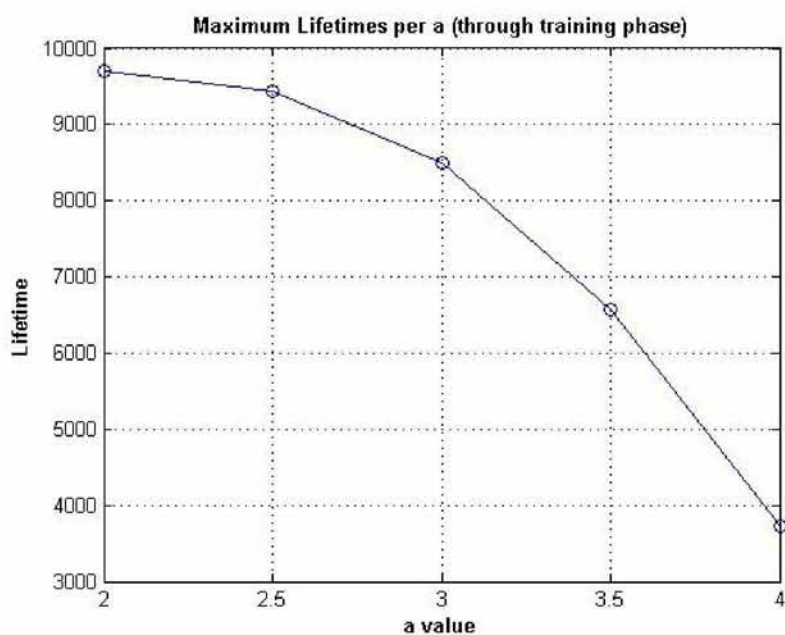


Εικόνα 11: Διάρκεια ζωής του δικτύου (εφαρμόζοντας UCD) για διάφορες τιμές του δείκτη απώλειας διαδρομής a .

Οι τιμές των καμπυλών για $a = 2$ και $a = 2.5$ διαφέρουν 4%. Όταν όμως αυξάνει η τιμή του a , τα ποσοστά απώλειας σε διάρκεια ζωής αυξάνονται. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι υπολογισμένες μέσω προσομοίωσης μέγιστες τιμές lifetime για κάθε τιμή a που χρησιμοποιείται:

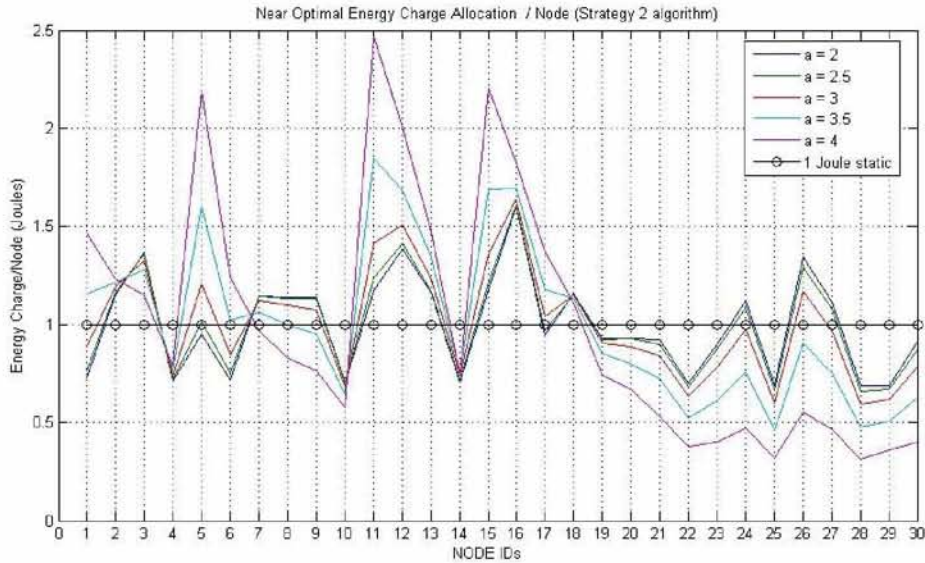
Πίνακας 3: Διάρκεια ζωής για διάφορες τιμές του συντελεστή (εκθέτη) απώλειας διαδρομής

| a | Maximum Lifetime |
|----------|-------------------------|
| 2 | 9710 |
| 2.5 | 9312 |
| 3 | 8348 |
| 3.5 | 6372 |
| 4 | 3717 |



Εικόνα 12: Μέγιστες τιμές διάρκειας ζωής για κάθε τιμή a

Η εικόνα 12 απεικονίζει γραφικά τις τιμές του πίνακα 3. Η πτώση της διάρκειας ζωής οφείλεται στην αύξηση του παράγοντα a και κατ'επέκταση στην αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας σε κάθε κόμβο για να στείλει/λάβει πακέτα.



Εικόνα 13: Βέλτιστο σχήμα φόρτισης για κάθε κόμβο της τοπολογίας ανάλογα με την τιμή a

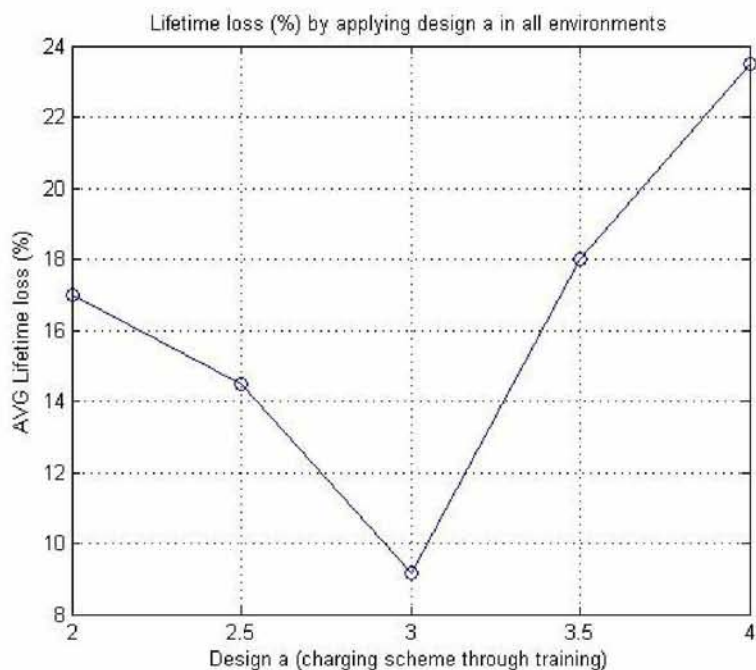
Τα επίπεδα φόρτισης που υπολογίστηκαν από την UCD απεικονίζονται στην εικόνα 13 για κάθε τιμή του a . Παρατηρούμε ότι η κατανομή της φόρτισης στους κόμβους ακολουθεί το ίδιο μοτίβο (pattern). Οι διαφορές στις τιμές οφείλονται και στις αποστάσεις που παρουσίασαν οι καμπύλες της εικόνας 11. Αυτό που είναι σημαντικό στο σημείο αυτό είναι να απαντηθεί ποσοτικά το εξής: “Πόση λιγότερη διάρκεια ζωής θα επιδείξει ένα δίκτυο αισθητήρων εάν χρησιμοποιήσουμε το σχήμα βέλτιστης φόρτισης κόμβων που έχει προκύψει για τιμές a , διαφορετική από αυτή που χαρακτηρίζει το περιβάλλον την στιγμή ανάπτυξης του συγκεκριμένου δικτύου”. Εάν για παράδειγμα το περιβάλλον ανάπτυξης του δικτύου μας χαρακτηρίζεται από $a = 2$ (ηλιόλουστος καιρός, LOS ασύρματη επικοινωνία) και εμείς φορτίσουμε τους κόμβους ακολουθώντας τα σχήματα φόρτισης που προέκυψαν για $a \neq 2$, πόσο σε ποσοστό από την διάρκειά ζωής του θα χάσουμε. Εφόσον δεν μπορούμε να γνωρίζουμε εκ των προτέρων την ακριβή συμπεριφορά του περιβάλλοντος του δικτύου, θέλουμε να ποσοτικοποιήσουμε την απώλεια σε διάρκεια ζωής του εάν ακολουθήσουμε ένα διαφορετικό σχήμα φόρτισης. Οι μετρήσεις που λάβαμε συγκεντρώνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4: Απώλεια (Μ.Ο.) σε διάρκεια ζωής δικτύου από την εφαρμογή διαφορετικών σχημάτων φόρτισης (ανά τιμή του a)

| | ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| | A | B | C | D | E |
| Κανονική τιμή του a (ανάλογα με το περιβάλλον) | <i>Εφαρμόζοντας το σχήμα φόρτισης για $a = 2$</i> | <i>Εφαρμόζοντας το σχήμα φόρτισης για $a = 2.5$</i> | <i>Εφαρμόζοντας το σχήμα φόρτισης για $a = 3$</i> | <i>Εφαρμόζοντας το σχήμα φόρτισης για $a = 3.5$</i> | <i>Εφαρμόζοντας το σχήμα φόρτισης για $a = 4$</i> |
| 2 | 0 | -2.7% | -12.5% | -32% | -37% |
| 2.5 | -4.5% | 0 | -8.9% | -19.5% | -33.2% |
| 3 | -14.8% | -13% | 0 | -13.7% | -20.6% |
| 3.5 | -30% | -21.4% | -11.35% | 0 | -27% |
| 4 | -36% | -35.4% | -13.1% | -25% | 0 |
| Απώλειες (Μ.Ο.) | -17% | -14.5% | -9.17% | -18% | -23.5% |

Συγκεκριμένα η πρώτη στήλη του πίνακα αφορά τις τιμές του a , δηλαδή αντιπροσωπεύουν το περιβάλλον ανάπτυξης του δικτύου. Στις στήλες A, B, C, D, E ποσοτικοποιείται το ποσοστό απώλειας της διάρκειας ζωής εάν είχαμε κάνει χρήση των αντίστοιχων τιμών του a και των σχημάτων φόρτισης που αναφέρονται σε αυτές τις τιμές, αλλά το περιβάλλον ήταν διαφορετικό. Είναι φυσικό η διαγώνιος του πίνακα να έχει μηδενικές τιμές, διότι αυτές είναι οι περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται το κατάλληλο σχήμα φόρτισης ανά τιμή του a .

Λαμβάνοντας τον Μ.Ο. των τιμών του πίνακα ανά στήλη, παρατηρούμε ότι την μικρότερη απώλεια την έχουμε στην περίπτωση $a = 3$. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι ειδικά για δίκτυα που αναπτύσσονται σε εξωτερικούς χώρους και υπάρχει ελλιπής ανθρώπινη παρεμβολή συντήρησης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σχήμα φόρτισης της UCD λαμβάνοντας υπόψη $a = 3$ και να έχουμε ~10% απώλεια στην συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου. Στην εικόνα 14 απεικονίζεται γραφικά η Μ.Ο. ποσοστιαία απώλεια στη διάρκεια ζωής για κάθε περίπτωση. Έχει την μορφή κυρτής καμπύλης με ελάχιστη τιμή για $a = 3$.



Εικόνα 14: Ποσοστιαία (%) Μ.Ο. απώλεια στην διάρκεια ζωής του δικτύου από την εφαρμογή διαφορετικού *a*.

3.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παραπάνω μελέτη, προτάθηκε ένας αλγόριθμος που βασίζεται σε στατική δρομολόγηση των δεδομένων και έχει ως αποτέλεσμα ένα μη ομοιόμορφο σχήμα φόρτισης για κάθε κόμβο του δικτύου. Το βασικό κριτήριο που καθορίζει το ποσό φόρτισης του κάθε κόμβου είναι η σχετική θέση του εντός τοπολογίας και συνεπώς το πλήθος των γειτόνων που έχει να εξυπηρετήσει. Ο αλγόριθμος υλοποιεί την προτεινόμενη στρατηγική προώθησης UCD και βασίζεται στην ιδέα ότι δεν είναι απαραίτητο οι κόμβοι να ανταλλάσσουν πολλά μηνύματα ανάλογα με τα ενεργειακά τους αποθέματα. Ο κάθε κόμβος επιλέγει τον κοντινότερο γείτονά του. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι επαναληπτικός (iterative) και σε κάθε βήμα του αναδιανέμει την ολική ενέργεια στο δίκτυο ανάλογα. Στο σημείο σύγκλισής του προκύπτει το τελικό και βέλτιστο σχήμα φόρτισης. Η στρατηγική UCD καταφέρνει να επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής για πληθώρα τυχαίων δικτύων στα οποία εφαρμόστηκε.

3.10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A Survey on Sensor Networks,” in *IEEE Communications Magazine*, 2002
- [2] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh and W. Heinzelman, “A Taxonomy of Wireless Micro – Sensor Network Models”, in *ACM Mobile Computing and Communications Review*, pp. 28-36, vol. 6, 2002
- [3] K. Akkaya, and M. Younis, “A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks“, in *Ad hoc Networks Journal*, pp. 325-349, vol. 3, 2005
- [4] K. Kalpakis, K. Dasgupta, and P. Namjoshi, “An efficient clustering – based heuristic for data gathering and aggregation in sensor networks”, in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2003
- [5] S. Bandyopadhyay and E. J. Coyle, “An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks”, in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2003
- [6] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, “Energy – efficient communication protocol for wireless microsensor networks”, in *33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp.3005 – 3014, 2000
- [7] M. Mallinson, S. Hussian, and J. H. Park, “Investigating Wireless Sensor Network Lifetime using a Realistic Radio Communication Model”, in *International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering (MUE 2008)*, pp. 433 – 437, Apr 2008
- [8] H. O. Tan and I. Korpeoglu, “Power Efficient Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks”, in *ACM SIGMOD*, vol 32, issue 4, pp. 66 – 71, Dec 2003
- [9] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: A survey”, in *Computer Networks*, vol. 38, no.4, pp.393-422, 2002
- [10] J. H. Chang and L. Tassiulas, “Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks”, in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, no. 4, 2004
- [11] A. Nandi and S. Kundu, “Energy Level Performance of Error Control Schemes in Wireless Sensor Networks”, in *International Conference on Devices and Communications (ICDeCom 2011)*, 2011
- [12] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin, “GPS-less Low Cost Outdoor Localization For Very Small Devices”, in *IEEE Personal Communications*, vol. 7, issue 5, pp. 28 – 34, Oct 2000

- [13] P. Kaushik and J. Singhai, "Energy Efficient Routing Algorithm for Maximizing the Minimum Lifetime of Wireless Sensor Network: A Review", in *International Journal of Ad hoc, Sensor and Ubiquitous Computing*, vol. 2, no. 2, Jul 2011
- [14] P. Basu and J. Redi, "Effect of Overhearing Transmissions on Energy Efficiency in Dense Sensor Networks", in *IEEE/ACM International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'04)*, Apr 2004
- [15] E. Jain and W. Liang, "Sensor Placement and Lifetime of Wireless Sensor Networks: Theory and Performance analysis", in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'05)*, vol. 1, Dec 2005
- [16] H. Braga and F. Assis, "A Topology Control Algorithm for Interference and Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks", in *ADHOC-NOW 2011, LNCS 6811*, pp. 86 – 99, 2011
- [17] P. Santi, "Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks", John Willey and Sons Ltd., 2003
- [18] M. Halgamuge, M. Zukerman and K. Ramamohanarao, "An Estimation of Sensor Energy Consumption", in *Progress In Electromagnetics Reserarch B*, vol. 12, pp. 259 – 295, 2009
- [19] A. Wang and C. Sodini, "A Simple Energy Model for Wireless Microsensor Transceivers", in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'04)*, vol. 5, Dec. 2004

4 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΣΕ Α.Δ.Α ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΛΥΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως έχουμε αναφέρει και στα προηγούμενα κεφάλαια, ένα Α.Δ.Α. αποτελείται από κόμβους χαμηλού κόστους και ισχύος, με περιορισμένη δυνατότητα αντικατάστασης των πηγών ενέργειάς τους [1-2]. Οι εφαρμογές των Α.Δ.Α. εκτείνονται από στρατιωτικές έως αστικές, περιβαλλοντική παρακολούθηση, έξυπνα σπίτια, βιομηχανικούς αυτοματισμούς, παρακολούθηση υγείας και γεωργία ακριβείας [2]. Σε τέτοιου τύπου δίκτυα ο κύριος περιοριστικός παράγοντας που καθορίζει την διάρκειά τους είναι η ενέργεια, συνεπώς η επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του δικτύου έχει πρωταρχική σημασία. Βάση αυτού του περιορισμού, ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα σε Α.Δ.Α. αφορά την μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς [3].

Στο κεφάλαιο αυτό, εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο άνισης φόρτισης UCD που αναπτύξαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και επιπροσθέτως αυξάνουμε την συνολική κάλυψη του χώρου, αναδιοργανώνοντας τη θέση των κόμβων κατάλληλα, εφαρμόζοντας κανόνες βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, ορίζουμε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που εκφράζεται μέσω μίας αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) η οποία ενσωματώνει τους παράγοντες της ενέργειας και της κάλυψης με σκοπό να τις μεγιστοποιήσει. Το πρόβλημα της ταυτόχρονης βελτιστοποίησης ενέργειας και κάλυψης μαζί με την τοποθέτηση των κόμβων στον χώρο, ικανοποιώντας συγκεκριμένους περιορισμούς είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα. Για την λύση τέτοιου τύπου προβλημάτων σε πολυωνυμικό χρόνο, είναι προτιμότεροι οι ευρετικοί αλγόριθμοι (meta-heuristic algorithms), όπως η simulated annealing (SA). Σε κάθε βήμα του αλγορίθμου, μία νέα τοπολογία (αναδιάταξη κόμβων) εξετάζεται, ένα νέο σχήμα φόρτισης εφαρμόζεται και αξιολογείται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Εφαρμόζοντας θεωρία αξιοπιστίας (reliability theory), αξιολογούμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Η μελέτη αξιοπιστίας του συστήματος

πραγματοποιείται μέσω της στατιστικής ανάλυσης της συνάρτησης επιβίωσης (survival function) της προτεινόμενης αντικειμενικής συνάρτησης του δικτύου.

4.2 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Σημαντική έρευνα έχει γίνει για την αντιμετώπιση και λύση του προβλήματος της μεγιστοποίησης διάρκειας ζωής σε Α.Δ.Α. Στην εργασία [4], ένα πρόβλημα γραμμικής βελτιστοποίησης (linear programming optimization) ορίζεται για στατικά δίκτυα και προτείνεται ένα ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης για την προώθηση πακέτων. Κατά κανόνα, τα περισσότερα πρωτόκολλα που εφαρμόζονται σε Α.Δ.Α. προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν αποδοτικά τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου (π.χ. ενέργεια, ρυθμαπόδοση) με σκοπό να επιμηκύνουν την αναμενόμενη διάρκεια ζωής ενός κόμβου [5]. Επιπροσθέτως, στοχεύουν να ελαχιστοποιήσουν τον συνολικό αριθμό των μηνυμάτων υποδομής και επικοινωνίας (communication and infrastructure messages) μεταξύ των κόμβων, τα οποία είναι απαραίτητα για τον συγχρονισμό τους και την ενημέρωσή τους για τα διαθέσιμα ενεργειακά τους αποθέματα.

Σε άλλες μελέτες [6 – 8], εφαρμόζονται προσεγγίσεις που αφορούν την ομαδοποίηση των κόμβων σε συστάδες (clusters), βάση των οποίων η τοπολογία του δικτύου τεμαχίζεται σε διακριτές περιοχές με έναν κόμβο να έχει το ρόλο του αρχηγού της συστάδας (cluster-head node) και ο οποίος συγκεντρώνει όλη την κίνηση της ομάδας του. Ο κόμβος – αρχηγός της συστάδας συγκεντρώνει όλες τις ροές δεδομένων των μελών της συστάδας του και μπορεί, είτε εφαρμόζοντας τεχνικές συνάθροισης δεδομένων, είτε στέλνοντας μόνο αντιπροσωπευτικές τιμές των μετρήσεων (μέσους όρους, μέγιστες/ελάχιστες τιμές ή υπολογίζοντας άλλα στατιστικά μεγέθη), είτε συμπιέζοντας τα δεδομένα έως κάποιο ποσοστό να εξοικονομήσει ενέργεια στην συστάδα του. Οι αλγόριθμοι clustering συνήθως επιλέγουν τους αρχηγούς συστάδας με κριτήριο τα αποθέματα ενέργειάς τους, και βάση κάποιους αλγορίθμους - τεχνικές εναλλάσσουν τους ρόλους τους (rotating) ώστε η εναπομείνουσα ενέργεια μεταξύ των κόμβων της συστάδας να είναι ομοιόμορφη. Ο κυριότερος αλγόριθμος είναι ο LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [9]. Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν προταθεί αρκετές παραλλαγές του LEACH [25 - 30], που όλες έχουν ως στόχο την τμηματοποίηση της τοπολογίας και την

ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία των κόμβων ώστε να μεγιστοποιείται η διάρκεια ζωής του δικτύου. Στο [10], οι ερευνητές προτείνουν έναν νέο αλγόριθμο για περιοδική συλλογή δεδομένων που βασίζεται σε μη ομοιόμορφα μεγέθη συστάδων (Energy Efficient Unequal Clustering). Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εξισορροπεί την ενεργειακή κατανάλωση ανάμεσα στους κόμβους της συστάδας και πετυχαίνει εμφανή βελτίωση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

Άλλες προσεγγίσεις για την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής αφορούν μεθόδους διαχείρισης τοπολογίας (topology control algorithms) και μεθόδους προσθαφαίρεσης ή/και μετακίνησης κόμβων κοντινότερα στον σταθμό βάσης. Στην μελέτη [11] οι ερευνητές προτείνουν μία στρατηγική μη ομοιόμορφης κατανομής κόμβων στο χώρο, προσθέτοντας περισσότερους κόμβους-γείτονες σε όσους κόμβους επιφορτίζονται με πολλές ροές δεδομένων λόγω της αρχικής τους θέσης. Σε παρεμφερή μελέτη στην αναφορά [12], οι ερευνητές προτείνουν έναν κατανεμημένο αλγόριθμο ελέγχου τοπολογίας που ονομάζεται *Cooperative Topology Control with Adaptation*, βάση του οποίου μορφοποιείται το πρόβλημα της μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής του δικτύου ως πρόβλημα παιγνίου (game-theoretic approach) και λύνεται μέσω της ισοροπίας Nash (Nash equilibrium) σε παίγνια.

Είναι εμφανές από τα παραπάνω ότι η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικούς περιορισμούς και κριτήρια, ανάλογα με το σενάριο εφαρμογής του δικτύου. Ωστόσο, σε όλες τις υφιστάμενες προσεγγίσεις, εφαρμόζεται ομοιόμορφο σχήμα φόρτισης στους κόμβους. Επίσης σε πολλά από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για A.Δ.Α. [13], καμία ιδιαίτερη έμφαση δεν δίνεται στον μεγάλο φόρτο μηνυμάτων υποδομής και συγχρονισμού που ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων, ώστε να λειτουργήσουν αυτά τα ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα. Το πλήθος των μηνυμάτων αυτών μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα εξάντησης της ενέργειας ενός κόμβου με γρήγορους ρυθμούς [14]. Λαμβάνοντας τις διαπιστώσεις αυτές υπόψη, εφαρμόζουμε τον UCD αλγόριθμο [19], ο οποίος βασίζεται στην στατική δρομολόγηση και την άνιση κατανομή επιπέδων φόρτισης στους κόμβους. Η απευθείας μετάδοση πακέτων στον σταθμό βάσης φαίνεται μία απλή λύση για την αποφυγή πολλών μηνυμάτων υποδομής [3], παρόλα αυτά αποδεικνύεται ενεργειακά μη βέλτιστη εάν ο σταθμός βάσης είναι μακριά από όλους τους κόμβους. Συνεπώς, εάν θέλουμε να εφαρμόσουμε στατική δρομολόγηση για μείωση των μηνυμάτων υποδομής και

ταυτόχρονα επιμήκυνση της διάρκειας ζωής, θα πρέπει να ρυθμίσουμε κατάλληλα την φόρτιση των κόμβων.

Παράλληλα με το κριτήριο της μείωσης ενέργειας του δικτύου, ένα ακόμη κριτήριο για τον σχεδιασμό ενός Α.Δ.Α είναι ο βαθμός κάλυψης που παρέχει (network sensing coverage). Συνεπώς, τα πρωτόκολλα που προορίζονται για Α.Δ.Α. πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να ικανοποιούν και τα δύο κριτήρια. Η βιβλιογραφία δεν έχει αναδείξει πληθώρα μελετών που να κινούνται σε αυτή τη βάση. Στην αναφορά [15], οι ερευνητές προτείνουν ένα αναλυτικό πλαίσιο (analytical framework) για την μεγιστοποίηση από κοινού της διάρκειας ζωής και της κάλυψης σε Α.Δ.Α., το οποίο βασίζεται σε τοποθέτηση κόμβων στο χώρο με συντεταγμένες που ακολουθούν 2D κανονική κατανομή (2D Gaussian distribution). Οι μελετητές εδώ εντοπίζουν εγγενείς ιδιότητες της κάλυψης και της διάρκειας βάσει των στατιστικών παραμέτρων της κανονικής κατανομής, με σκοπό να ποσοτικοποιήσουν την επίπτωσή τους επάνω στις παραμέτρους της κάλυψης και της διάρκειας ζωής. Επιπροσθέτως, στην μελέτη [16], μία γενικού σκοπού πολυμεταβλητή τεχνική βελτιστοποίησης εφαρμόζεται για να βελτιστοποιήσει τις εν γένει αντιφατικές έννοιες της εξισορρόπησης φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας και κάλυψης δικτύου. Η στρατηγική που εφαρμόστηκε στοχεύει στο να ρυθμίζει με πολλαπλασιαστικούς παράγοντες (weight factors) την ενεργειακή κατανάλωση και την εξισορρόπηση ενέργειας στους κόμβους ώστε να πετυχαίνει βέλτιστη απόδοση σε Α.Δ.Α.

Ως εκ τούτου, το πρόβλημα της ταυτόχρονης βελτιστοποίησης τοποθέτησης κόμβων σε χώρο, διάρκειας ζωής δικτύου και κάλυψης δικτύου δεν έχει μελετηθεί εκτενώς. Αυτή είναι και η βασική συνεισφορά της μελέτης του κεφαλαίου αυτού. Το πρόβλημα της χωροταξικής τοποθέτησης, ώστε να ικανοποιούνται περιορισμοί που αφορούν την κάλυψη και την ενέργεια είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα, ιδιαίτερα όταν το πλήθος των κόμβων του δικτύου μεγαλώνει γραμμικά. Σε τέτοιες περιπτώσεις, πιθανοκρατικές μέθοδοι αναζήτησης λύσης και ευρετικοί αλγόριθμοι βασιζόμενοι σε επιλεκτική αποδοχή λύσεων, είναι προτιμότερες για εύρεση λύσης εντός πολυωνυμικού χρόνου. Παράδειγμα τεχνικής βελτιστοποίησης αυτού του τύπου είναι η Simulated Annealing (SA) [17], η οποία και εφαρμόζεται και στην περίπτωση που εξετάζουμε εντός του κεφαλαίου αυτού.

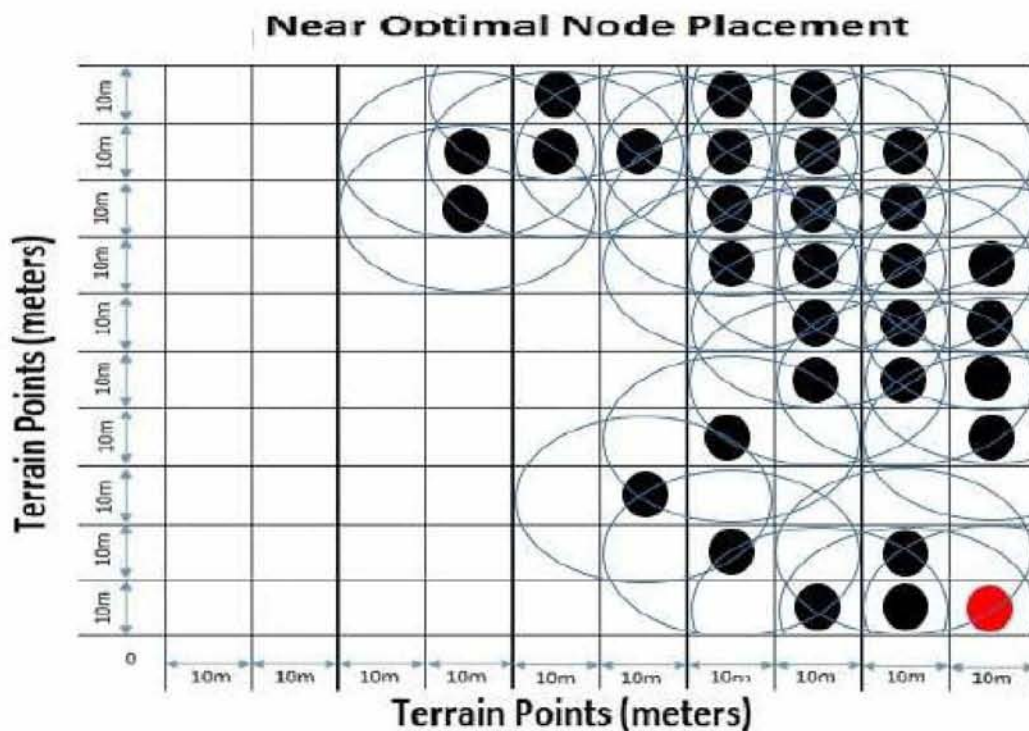
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Χρησιμοποιούμε όμοιο μοντέλο για την ενεργειακή κατανάλωση στις επικοινωνίες, όπως και στο κεφάλαιο 3. Το μοντέλο μας βασίζεται στο *first order radio model* [9], βάση του οποίου η κατανάλωση ενέργειας για την αποστολή και λήψη μηνυμάτων είναι πολυωνυμική συνάρτηση κυρίως της απόστασης μεταξύ των κόμβων και εξαρτάται από τον εκθέτη απώλειας διαδρομής (path loss exponent) α .

Το Α.Δ.Α που αναπτύσσουμε στο κεφάλαιο αυτό, μπορεί να θεωρηθεί και να αναπαρασταθεί ως ένας γράφος $G(V, E)$, όπου V εκφράζει τον αριθμό των κόμβων και E το σύνολο των πλευρών που ενώνουν τους κόμβους. Μία πλευρά νοείται ανάμεσα σε δύο κόμβους, όταν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους απευθείας, χωρίς την βοήθεια ή την παρεμβολή επαναληπτών. Το μοντέλο του δικτύου μας έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Η περιοχή παρακολούθησης και ανάπτυξης του δικτύου είναι ένα ορθογώνιο πλέγμα διαστάσεων $N \times N$, όπου $N \in \mathbb{Z}^+$. Συνεπώς το πλέγμα μπορεί να περιλαμβάνει το μέγιστο N^2 κόμβους. Κάθε κελί (cell) του πλέγματος μπορεί να περιέχει έναν κόμβο ή όχι.
- Οι κόμβοι είτε είναι ενεργοί (active), δηλαδή λαμβάνουν μετρήσεις και στέλνουν-λαμβάνουν πακέτα, είτε ανενεργοί (inactive), δηλαδή έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω έλλειψη ενέργειας ή καταστροφής τους.
- Κάθε κόμβος στέλνει τα δεδομένα του με πιθανότητα p , με $0 \leq p \leq 1$ ομοιόμορφα κατανεμημένη.
- Όλοι οι κόμβοι (εκτός της βάσης), θεωρούνται ομογενείς όσον αφορά το υλικό τους (μνήμη, επεξεργαστική ισχύς, κεραία) και έχουν περιορισμένα αποθέματα ενέργειας. Ο σταθμός βάσης έχει θεωρητικά απεριόριστη ενέργεια ή μπορεί να φορτιστεί ξανά με ευκολία.
- Τοπολογίες στις οποίες ένας κόμβος δεν έχει έναν τουλάχιστον γείτονα θεωρούνται μη έγκυρες και δεν εξετάζονται.
- Η τοποθεσία του σταθμού βάσης θεωρείται σταθερή.
- Κάθε Α.Δ.Α. που εξετάζεται θεωρείται στατικό για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα $t, t > 0$, έπειτα οι θέσεις των κόμβων αλλάζουν ανάλογα με τους κανόνες που θέτει ο SA αλγόριθμος.

- Τα πακέτα δεδομένων στέλνονται ως unicast, αλλά λόγω του ασυρμάτου μέσου, όσοι κόμβοι βρίσκονται εντός της ακτίνας εκπομπής του κόμβου πομπού, μπορούν να συλλάβουν τα πακέτα αυτά [16]. Το φαινόμενο η κεραία ενός κόμβου να ακούσει ένα μήνυμα αλλά μετά να το απορρίψει εφόσον δεν προορίζεται γι αυτόν τον κόμβο, ονομάζεται overhearing. Λαμβάνουμε υπόψη τέτοια φαινόμενα στο μοντέλο μας, συνεπώς δεν είναι πάντα δόκιμο να υπάρχουν πολλοί γείτονες κόμβοι εντός ακτίνας εκπομπής, διότι αυτό επηρεάζει αρνητικά τα ενεργειακά τους αποθέματα.



Εικόνα 1: Αρχική τοπολογία με 30 κόμβους (black dots), 1 σταθμό βάσης (red dot) και 59% συνολική κάλυψη δικτύου

4.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΛΥΣΗ

4.3.1 Μοντελοποίηση Προβλήματος

Στο σημείο αυτό, και βασική συνεισφορά μας στην παρούσα μελέτη, μοντελοποιούμε ένα πρόβλημα κοινής βελτιστοποίησης (joint optimization), στο οποίο η αντικειμενική συνάρτηση ενσωματώνει τις παραμέτρους της κάλυψης

δικτύου και της διάρκειας ζωής του με στόχο να τις μεγιστοποιήσει. Η λύση παράγει μία σχεδόν βέλτιστη (near optimal) τοπολογία, η οποία ικανοποιεί τους περιορισμούς που θέτουμε, σε αντιδιαστολή με μία τυχαία τοπολογία. Για το σκοπό αυτό, η λύση που προκύπτει δίνεται μέσω του αλγορίθμου SA. Εφαρμόζουμε SA για την σταδιακή αξιολόγηση της αντικειμενικής συνάρτησης που καθορίζει το πρόβλημά μας. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, εφαρμόζουμε τον UCD αλγόριθμο [19] για την εύρεση της βέλτιστης φόρτισης, ο οποίος εγγυάται την μεγιστοποίηση του προσδόκιμου χρόνου ζωής του κάθε κόμβου ξεχωριστά. Κατόπιν, συγκρίνουμε τα αποτελέσματά μας με 500 τυχαίες τοπολογίες και δείχνουμε ότι η προτεινόμενη προσέγγισή μας οδηγεί σε βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη τις στατιστικές ιδιότητες της αντικειμενικής συνάρτησης, μελετάμε την αξιοπιστία διαφόρων τύπων δικτύων (network set-ups). Η μελέτη αξιοπιστίας ενός Α.Δ.Α. βασίζεται στον υπολογισμό των τιμών των συναρτήσεων επιβίωσης (survival functions), μέσω των οποίων υπολογίζουμε την πιθανότητα να τεθεί εκτός λειτουργίας ένας τύπος δικτύου, ενώ ικανοποιεί κάποιους περιορισμούς που αφορούν κάλυψη και διάρκεια ζωής.

Συγκεκριμένα, ορίζουμε την παρακάτω αντικειμενική συνάρτηση F :

$$\begin{aligned} \max: & \quad F = w_1 \{COV(j)\} \times w_2 \{STR2_{lifetime}(j)\} \\ \text{s.t.} & \quad P_{rx} \geq P_{thres} \end{aligned} \quad (1)$$

όπου P_{rx} είναι η λαμβανόμενη ισχύς σήματος στον παραλήπτη κόμβο και P_{thres} είναι το κάτω όριο (in dBm) για επιτυχή λήψη. Επίσης ορίζουμε την συνάρτηση $COV(j)$, με την οποία υπολογίζουμε για κάθε τοπολογία j την συνολική κάλυψη δικτύου (σε ποσοστό επίσης κάλυψης όλης της περιοχής), βάση της ακτίνας ανίχνευσης r_s του κάθε κόμβου όπως ορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Βάση της ανάλυσης που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο για τις στρατηγικές ECD (Strategy 1) και UCD (Strategy 2), ορίζουμε της συναρτήσεις $STR1_{lifetime}(j)$ και $STR2_{lifetime}(j)$, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής ενός δικτύου (τοπολογίας) j εάν εφαρμοστεί μία από τις δύο στρατηγικές. Στην αντικειμενική συνάρτηση εφαρμόζουμε μόνο UCD, άρα η διάρκεια ζωής προκύπτει λόγω του βέλτιστου σχήματος άνισης φόρτισης κόμβων. Είναι εμφανές ότι η

αντικειμενική συνάρτηση ενσωματώνει τους παράγοντες της διάρκειας ζωής και της κάλυψης δικτύου, όπως αυτοί υπολογίζονται από τις αντίστοιχες συναρτήσεις.

Οι περισσότεροι σχεδιαστές Α.Δ.Α. ενδιαφέρονται να προτείνουν ένα σύστημα που να καταναλώνει την ελάχιστη δυνατή ενέργεια, μεγιστοποιώντας τους παράγοντες της διάρκειας ζωής και της κάλυψης δικτύου κάτω από περιορισμούς. Για τον λόγο αυτό εισάγουμε στην αντικειμενική μας συνάρτηση τον πολλαπλασιαστικό παράγοντα (βάρος) w_1 για την κάλυψη και τον παράγοντα w_2 που αφορά την διάρκεια ζωής, με $w_1 + w_2 = 1$, $w_1 > 0$ και $w_2 > 0 \in R$.

4.3.2 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Simulated Annealing

Ο αλγόριθμος Simulated Annealing (SA) είναι μία στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης για την εύρεση ολικού ελάχιστου ή μέγιστου (ανάλογα το πρόβλημα) μίας αντικειμενικής συνάρτησης που παρουσιάζει πολλά τοπικά ελάχιστα/μέγιστα. Τα βασικά στοιχεία του SA είναι τα εξής [17]:

- Μία αρχική “κατάσταση” S_0 . Η κάθε κατάσταση εκφράζει μία εφικτή λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης.
- Ένα ορισμένο σύνολο καταστάσεων S
- Μία αντικειμενική συνάρτηση J , ορισμένη στο S (σύνολο εφικτών λύσεων προβλήματος). Έστω $S^* \in S$, να είναι ένα σύνολο ολικών ελαχίστων.
- Για κάθε $i \in S$, ένα σύνολο $S(i) \subset S - i$, ονομάζεται σύνολο γειτόνων του i
- Για κάθε i , μία συλλογή θετικών συντελεστών (positive coefficients) q_{ij} , $j \in S(i)$, έτσι ώστε $\sum_{j \in S(i)} q_{ij} = 1$. Υποθέτουμε ότι εάν $j \in S(i)$, τότε και $i \in S(j)$
- Μία γνησίως φθίνουσα συνάρτηση $T: N \rightarrow (0, \infty)$, που ονομάζεται *cooling schedule*. Το N είναι ένα σύνολο από θετικούς ακεραίους και $T(t)$ ονομάζεται θερμοκρασία για την χρονική στιγμή t .

Οι παράγοντες της κάλυψης και της διάρκειας ζωής που ενσωματώνει η αντικειμενική συνάρτηση F της σχέσης (1) επηρεάζονται από την τοπολογία. Κατάλληλες χωροταξικές τοποθετήσεις κόμβων σε 2-διαστάσεων χώρο, ικανοποιώντας περιορισμούς του προβλήματος, με σκοπό την αξιολόγηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε βήμα του SA, θεωρείται περίπλοκο πρόβλημα (complex problem), ειδικά όταν το πλήθος των κόμβων αυξάνει. Σε περιπτώσεις πολύπλοκων, NP Complete και μη γραμμικών προβλημάτων [20], η πολυωνυμική λύση προκύπτει από την εφαρμογή ευρετικών αλγορίθμων. Μία καλή επιλογή είναι ο Simulated Annealing(SA). Για την λύση του προβλήματός μας επιλέγουμε SA στοχεύοντας να παράγουμε αποτελέσματα σε πολυωνυμικό χρόνο. Η απόδειξη ότι το πρόβλημά μας ανήκει στην κλάση NP-Complete των προβλημάτων στα οποία εφαρμόζεται ευρετική λύση παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α .

Ο SA, συμπεριφέρεται ως μία στοχαστική παραλλαγή του κλασσικού gradient descent algorithm , εφαρμόζοντας ένα πιθανοκρατικό κριτήριο αποδοχής “χειροτέρων λύσεων”, δηλαδή αυτών που οδηγούν σε αύξηση της τιμής της F εάν πρόκειται για πρόβλημα ελαχιστοποίησης, ή μείωση της τιμής της F εάν πρόκειται για πρόβλημα μεγιστοποίησης. Ενδεικτικά κάποιες εννοιολογικές αντιστοιχίσεις μεταξύ της φυσικής διεργασίας *physical annealing*, που εφαρμόζεται σε φυσικά συστήματα, και του SA που χρησιμοποιείται για προβλήματα συνδιαστικής βελτιστοποίησης φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 1: Αντιστοιχία εννοιών physical annealing και Combinatorial Optimization

| Physical Simulation | SA - Combinatorial Optimisation |
|---------------------|---------------------------------|
| System States | Feasible Solutions |
| Energy | Objective Function's Cost |
| Change of State | Neighbouring Solutions |
| Temperature | Control Parameter |
| Frozen State | Heuristic Solution |

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει μία εννοιολογική μετάβαση από το πεδίο των φυσικών συστημάτων και διεργασιών βελτιστοποίησης στο πεδίο των τεχνητών συστημάτων και προβλημάτων συνδιαστικής βελτιστοποίησης [21].

4.3.3 Απεικόνιση του προβλήματος στα δομικά συστατικά του SA

Ο SA για όποιο πρόβλημα οποιουδήποτε επιστημονικού πεδίου εφαρμοστεί, συμπεριφέρεται με όμοιο τρόπο και διατηρεί τα ίδια δομικά συστατικά, όπως φαίνονται στον Πίνακα 1. Παρόλα αυτά, δόκιμο είναι να γίνεται σχετική αντιστοίχιση των στοιχείων ενός συγκεκριμένου προβλήματος προς τα συστατικά του SA. Συγκεκριμένα για το παρών πρόβλημα βελτιστοποίησης βασιζόμαστε στα:

- State S: Κάθε κατάσταση S είναι μία εφικτή και αποδεκτή λύση (feasible solution) της αντικειμενικής συνάρτησης. Στο πρόβλημά μας ορίζουμε ως κατάσταση S μία συνδεδεμένη τοπολογία από 30 κόμβους, όπου ο καθένας τους έχει τις δικές του συντεταγμένες (x,y) . Παράδειγμα κατάστασης S αποτελεί η εικόνα 1, η οποία είναι η αρχική αποδεκτή τυχαία τοπολογία την οποία εξετάζει ο SA.
- Objective Function Cost $Obj(f)$: Είναι μία συνάρτηση που υπολογίζει για κάθε κατάσταση S το κόστος που προκύπτει, βάση της αντικειμενικής συνάρτησης F . Στο πρόβλημά μας βάση της σχέσης (1), κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, σε κάθε βήμα του SA αξιολογείται η κάθε τοπολογία που δοκιμάζεται (State S) βάση της διάρκειας ζωής της και της κάλυψης που παρέχει.
- Initial Temperature T_0 : Η αρχική τιμή της “θερμοκρασίας” που αποτελεί ουσιαστικά μία μεταβλητή ελέγχου βημάτων του αλγορίθμου SA, πρέπει να είναι σχετικά υψηλή ώστε κάθε νέα λύση (State S) που παράγεται από τον SA να έχει πιθανότητα κοντά στο 1 να είναι αποδεκτή. Η αρχική τιμή της T_0 θα επιτρέψει ή όχι την μετάβαση από μία κατάσταση S_i σε μία γειτονική κατάσταση S_j . Αν η τιμή της T_0 είναι πολύ υψηλή, τότε ο SA ενδέχεται να συμπεριφερθεί ως brute

force, αποδέχοντας κάθε γειτονική κατάσταση, άρα εξετάζοντας όλο το πεδίο των εφικτών λύσεων του προβλήματος.

- Cooling function $cooling()$: Είναι μία συνάρτηση μείωσης της θερμοκρασίας T . Οι κυρίαρχες συναρτήσεις είναι *γεωμετρικές* (geometric decrement), *λογαριθμικές* (logarithmic decrement) και *γραμμικές* (linear decrement) [22]. Στην παρούσα μελέτη θεωρούμε *γεωμετρική* μείωση, η οποία ορίζεται ως εξής: $cooling(T) = T \times a$, όπου $0.8 \leq a \leq 0.99$ αποτελεί τον παράγοντα μείωσης. Εάν η τιμή του είναι υψηλή, τότε η μείωση της T γίνεται με μικρό ρυθμό και αυτό συνεπάγεται σε αργή σύγκλιση του SA. Κοινότυπη τιμή του a είναι η 0.98 [21].
- Final Temperature T_{final} : Η τελική τιμή της θερμοκρασίας $T_{final} \sim 0$ θα πρέπει να τείνει στο 0 και αν συμβεί αυτό, τότε το σύστημα θεωρείται ότι έχει φτάσει στην βέλτιστη τιμή του. Η T_{final} μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως κριτήριο σύγκλισης του SA [22].
- Neighbor Function $Nei()$: Είναι μία συνάρτηση παραγωγής της επόμενης κατάστασης NEW_S , δεδομένης μίας τρέχουσας κατάστασης S .
- Rand(): Συνάρτηση γεννήτρια τυχαίων αριθμών, ομοιόμορφα κατανεμημένων στο διάστημα (0..1)
- Markov Chain (MC) length L : Βάση των [21-22] οι επαναλήψεις που λαμβάνουν χώρα όταν εκτελείται ο SA για κάθε τιμή της θερμοκρασίας T θα πρέπει να είναι πολλές ώστε να δίνεται η δυνατότητα στον SA να εξερευνεί το πεδίο των λύσεων έχοντας μεγαλύτερη ελευθερία. Με τον τρόπο αυτό, εξερευνούνται με μεγάλη πιθανότητα όλες σχεδόν οι γειτονικές καταστάσεις S μίας τρέχουσας κατάστασης.

Algorithm Simulated Annealing Algorithm

1. Initialise Parameters: $S = S_0, T = T_0, iterations = 0$ $L = \text{iterations of inner loop}$ 2. Execution**repeat****repeat**a. $NewS = Nei(S)$ b. $DE = obj(NewS) - obj(S)$ **if** ($DE \leq 0$) **then**c. $S = NewS, iterations ++$ **else****if** ($rand() \leq \exp(-DE/T)$) **then**d. $S = NewS, iterations ++$ **end if****else**c. $iterations ++$ **end if****until** ($iterations \leq L$)3. Update Parameters: $T = cooling(T)$ **until** $T \geq T_{final}$

Εικόνα 2: Αλγόριθμος Simulated Annealing σε ψευδοκώδικα

Στην εικόνα 2, φαίνεται σε ψευδοκώδικα ο αλγόριθμος SA. Αρχικά λαμβάνει χώρα η φάση της αρχικοποίησης (initialization phase), κατά την οποία αρχικές τιμές της κατάστασης S και της θερμοκρασίας T επιλέγονται. Όπως εξηγήθηκε και προηγουμένως, η αρχική T είναι πολύ μεγαλύτερη της τελικής T_{final} , ώστε ο αλγόριθμος να αποφύγει την πρόωρη σύγκλιση. Έπειτα λαμβάνει χώρα η φάση της εκτέλεσης (execution phase) κατά την οποία μία νέα κατάσταση δημιουργείται μέσω της $Nei()$, δηλαδή παράγεται μία νέα τοπολογία.

Έπειτα η τρέχουσα κατάσταση S και η νέα κατάσταση NEW_S αξιολογούνται από την συνάρτηση $obj()$ στο βήμα 2b., η οποία υπολογίζει το κόστος της κάθε κατάστασης βάση της συνάρτησης F της σχέσης (1). Έτσι υπολογίζεται η διαφορά τους (DE). Στο σημείο αυτό λαμβάνεται μία απόφαση: Εάν η νέα κατάσταση οδηγήσει σε μικρότερη τιμή κόστους ($DE \leq 0$), τότε η κατάσταση αυτή είναι αποδεκτή. Διαφορετικά, μία πιθανοκρατική απόφαση που υπακούει την κατανομή Boltzmann

λαμβάνεται για το εάν η νέα κατάσταση με το υψηλότερο κόστος (χειρότερη κατάσταση) θα είναι αποδεκτή ή όχι. Συνεπώς η στοχαστική συμπεριφορά του SA απορρίπτει μία χειρότερη κατάσταση βάση πιθανότητας και όχι αρχικά. Η λειτουργία του αυτή τον αποτρέπει από το να “πιαστεί” ή να εγκλωβιστεί σε τοπικά ελάχιστα (ή μέγιστα) του πεδίου εφικτών λύσεων. Εάν σε οποιαδήποτε περίπτωση η νέα κατάσταση NEW_S απορρίπτεται, ο SA συνεχίζει να ψάχνει το πεδίο των εφικτών λύσεων παράγοντας άλλη κατάσταση (τοπολογία).

Στην 3^η φάση, μειώνεται η τιμή της θερμοκρασίας T γεωμετρικά, που σημαίνει ότι το σύστημα οδεύει πιο κοντά στην εύρεση της βέλτιστης λύσης. Τέλος ο SA συγκλίνει όταν η $T \sim 0$. Βάση του Πίνακα 1, το σύστημα έχει “παγώσει”, οπότε η ευρετική λύση έχει βρεθεί. Συσχετίζονται με το δικό μας πρόβλημα, εφαρμόζοντας SA για την τοποθέτηση κόμβων σε χώρο (τοπολογία) και ταυτόχρονα σε κάθε βήμα εκτέλεσής του εφαρμόζουμε το βέλτιστο σχήμα φόρτισης όπως προκύπτει από τον αλγόριθμο UCD του κεφαλαίου 3, μεγιστοποιούμε την τιμή της F . Στο σημείο σύγκλισης του SA, προκύπτει η τελική τοποθέτηση κόμβων (τοπολογία) μαζί με το βέλτιστο σχήμα φόρτισής τους, τα οποία εγγυώνται την μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του και της κάλυψής του.

4.3.4 Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε και αναλύουμε τα αποτελέσματα προσομοίωσης του SA, βάση του οποίου λύνουμε το πρόβλημα κοινής βελτιστοποίησης (joint optimization) της διάρκειας ζωής, της τοπολογίας και της κάλυψης. Οι προσομοιώσεις έγιναν με τη βοήθεια του *προσομοιωτή τοπολογίας* σε C++, που οι λειτουργίες του περιγράφονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Εφαρμόζουμε τις τιμές των ηλεκτρικών παραμέτρων και παραμέτρων υλικού των Tmote Sky nodes [23], οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με MSP430F1611 τύπου επεξεργαστή και CC2420 ραδιοκύκλωμα. Οι τιμές των παραμέτρων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

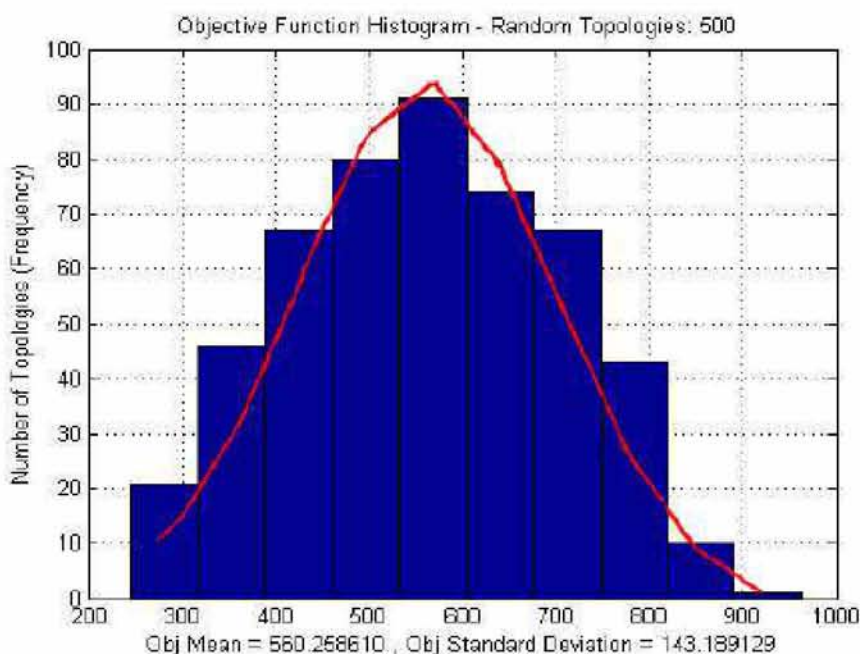
Πίνακας 2: Τιμές μεταβλητών προσομοίωσης

| Παράμετρος | Ερμηνεία | Τιμή |
|--------------|---|------------|
| P_t | Ισχύς εκπομπής | 0 dBm |
| k | Μήκος πακέτου | 1000 bits |
| a | Παράγοντας μείωσης θερμοκρασίας SA | 0.98 |
| T_0 | Αρχική θερμοκρασία | 10 |
| T_{final} | Τελική θερμοκρασία | 10^{-9} |
| r_c | Ακτίνα ανίχνευσης κόμβου | 15m |
| l | Εκθέτης απώλειας διαδρομής σήματος | 4 |
| (w_1, w_2) | Βάρη της F | (0.5, 0.5) |
| P_{thres} | Κάτω όριο επιτυχούς ανίχνευσης ισχύος σήματος | -90 dBm |

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου της εικόνας 2, μία νέα τοπολογία παράγεται και κατόπιν αξιολογείται βάση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης F και στα σημεία σύγκλισης, προτείνεται μία βέλτιστη τοποθέτηση κόμβων με το σχήμα φόρτισής τους. Τοπολογίες που δεν πληρούν το κριτήριο της συνδεσιμότητας, απορρίπτονται. Για τον σκοπό αυτό, εφαρμόζουμε μία Boolean συνάρτηση $CONNECT(j)$, η οποία επικυρώνει ή απορρίπτει μία τοπολογία j . Μία έγκυρη τοπολογία j θεωρείται συνδεδεμένος γράφος ο κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει με έναν τουλάχιστον γείτονά του. Διαφορετικά $CONNECT(j) == false$ και ο SA δεν την λαμβάνει υπόψη.

Η εικόνα 1 απεικονίζει την αρχική τοπολογία, η οποία αποτελεί και την αρχική κατάσταση S_0 του SA. Η τοπολογία αυτή είναι έγκυρη, έχει 30 κόμβους και η ακτίνα ανίχνευσης – κάλυψης του κάθε κόμβου απεικονίζεται με έναν κύκλο ακτίνας r_c . Αρχικά όλοι οι κόμβοι έχουν τα ίδια ποσά ενέργειας, π.χ. 1 Joule. Οι τοπολογίες που εξετάζονται εφεξής από τον SA έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: αποτυπώνονται

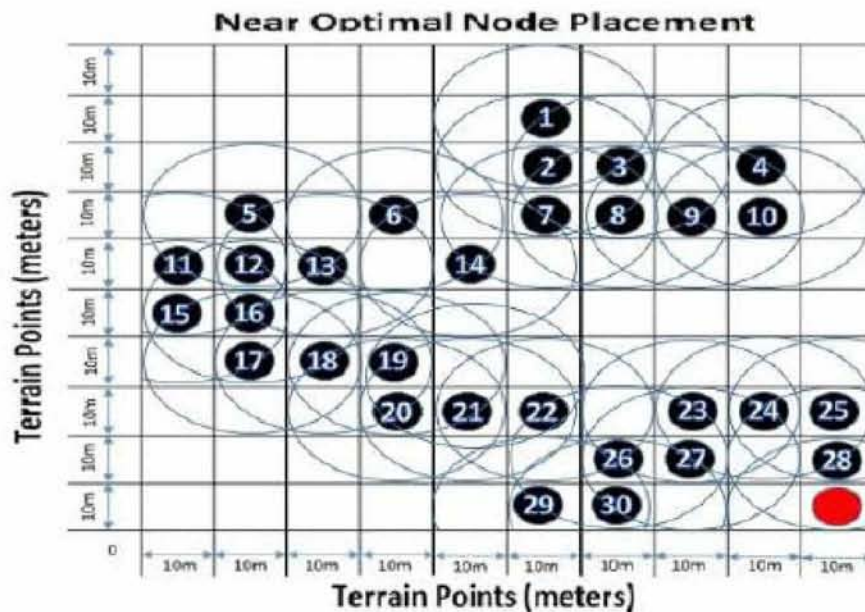
ως πλέγμα (grid) με τετράγωνα κελιά μήκους 10μ. και περιέχουν 30 κόμβους (μαύρες κουκίδες) και 1 σταθμό βάσης (κόκκινη κουκίδα) πάντα στην ίδια θέση. Για την τοπολογία της εικόνας 1, η συνολική κάλυψη φτάνει το 59% της συνολικής επιφάνειας και η αντικειμενική συνάρτηση οδηγεί στην τιμή $F_{init} = 510$.



Εικόνα 3: Ιστόγραμμα τιμών αντικειμενικής συνάρτησης F για 500 τυχαίες συνδεδεμένες τοπολογίες με στατιστικές τιμές Mean = 560.25 και Std = 143.18

Για να ελέγξουμε (και ουσιαστικά αποδεικνύουμε πειραματικά) στην συνέχεια εάν ο SA θα παράγει μία λύση που να είναι βέλτιστη και καλύτερη από την αρχική τυχαία τοπολογία, την τελική λύση θα την συγκρίνουμε με 500 τυχαίες συνδεδεμένες τοπολογίες που παράγαμε και όλες είναι έγκυρες. Συνεπώς, η εικόνα 3 απεικονίζει το ιστόγραμμα των 500 τοπολογιών που παράγαμε τυχαία μέσω ομοιόμορφης κατανομής των κόμβων. Κατόπιν αξιολογήθηκαν οι τοπολογίες αυτές βάση της τιμής της αντικειμενικής τους συνάρτησης F_i με $i = 1 \dots 500$ βάση της (1) και εφαρμόζοντας SA. Κάθε μία από τις τοπολογίες αυτές έχουν τον σταθμό βάσης σε σταθερό σημείο και διαφέρουν στην τοποθέτηση ενός ή περισσότερων κόμβων εντός του πλέγματός τους. Το ιστόγραμμα παριστάνει τις τιμές F_i στον οριζόντιο άξονα και φέρει το σχήμα κανονικής (Gaussian) κατανομής. Για να προσεγγίσουμε το ιστόγραμμα ως κανονική κατανομή, σχεδιάζουμε κανονική κατανομή με τον ίδιο μέσο ως κόκκινη γραμμή. Υπολογίζοντας το μέσο και την τυπική απόκλιση

προκύπτει: $F_{mean} = 560.25$ και $F_{std} = 143.18$. Παρατηρούμε ότι $F_{init} < F_{mean}$, συνεπώς η τιμή της αρχικής τοπολογίας μαρτυρά ότι δεν πρόκειται για βέλτιστη. Ο στόχος μας είναι μέσω του SA, να προτείνουμε μία τοπολογία, η τιμή F της οποίας να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από F_{mean} . Πρόκειται για πρόβλημα μεγιστοποίησης, άρα θέλουμε να τιμές δεξιότερα του ιστογράμματος. Ας υποθέσουμε ότι η τιμή της προτεινόμενης τοπολογίας θα ονομάζεται F_{SA} .



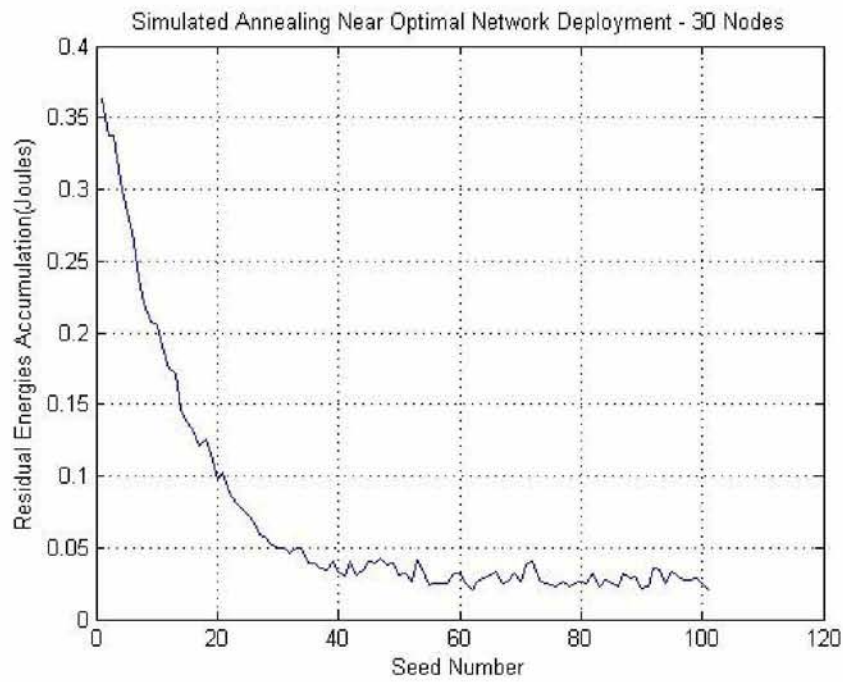
Εικόνα 4: Βέλτιστη τοποθέτηση (τελική προτεινόμενη τοπολογία) με 30 κόμβους (μαύρες κουκίδες με IDs), 1 σταθμό βάσης (κόκκινη κουκίδα) και 70% συνολική κάλυψη

Η εικόνα 4, απεικονίζει την τελική προτεινόμενη τοπολογία, όπως προκύπτει από το σημείο σύγκλισης του SA. Η τοπολογία αυτή προέκυψε ως λύση του SA σε πολυωνυμικό χρόνο. Κάθε κόμβος της αναπαριστάται με το ID του. Η τοπολογία αυτή έχει τιμή $F_{SA} = 837$, και άρα συγκρινόμενη με τον μέσο των 500 τοπολογιών ισχύει $F_{SA} > F_{mean}$. Συνεπώς χωρίς να ελέγξουμε σειριακά με brute force πολλές τοπολογίες, προτείνουμε σε πολυωνυμικό χρόνο μία τοπολογία που έχει να επιδειξει υψηλή τιμή F . Η F_{SA} ανήκει στο 5% των καλύτερων τοπολογιών σε σύνολο 500 που δοκιμάστηκαν βάση της εικόνας 3. Παρατηρούμε σε σχέση με την αρχική τοπολογία της εικόνας 1 ότι όλοι οι κόμβοι έχουν αλλάξει θέσεις και το τελικό μορφότυπο τοποθέτησής τους μαρτυρεί το σχήμα των τοπολογιών του κεφαλαίου 3. Επίσης ο βαθμός κάλυψης της τελικής τοπολογίας είναι 70%, δηλαδή κατά 18% μεγαλύτερος

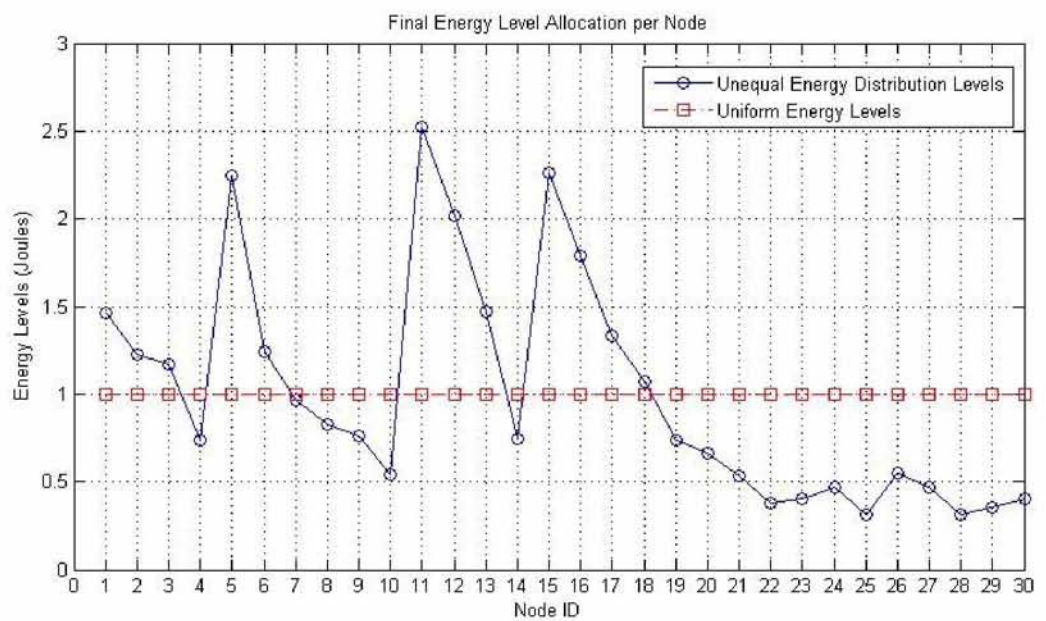
από το 59% της αρχικής τοπολογίας. Είναι συνεπώς σαφές ότι ο SA συγκλίνει σε κατάσταση (τοπολογία) που πετυχαίνει να επιμηκύνει από κοινού τόσο την διάρκεια ζωής όσο και την κάλυψη του δικτύου.

Η τιμή της F_{SA} προέκυψε λόγω της κατάλληλης τοποθέτησης κόμβων και του κατάλληλου σχήματος φόρτισης που δοκιμάστηκε. Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 3, το βέλτιστο σχήμα φόρτισης του αλγορίθμου UCD προκύπτει όταν η τιμή res πάρει την μικρότερη τιμή της. Σύμφωνα με την εικόνα 5, στην οποία φαίνεται ο βαθμός μείωσης της res , η ελάχιστη τιμή της είναι $res = 0.0206$ Joules. Η res μειώνεται μέχρι $seed = 40$ και από εκεί και έπειτα δείχνει μία σταθερή συμπεριφορά με ελάχιστες ταλαντώσεις. Κατά την διάρκεια της φάσης εκπαίδευσης του UCD (training phase) το συνολικό φορτίο ενέργειας αναδιαμένεται στους κόμβους με σκοπό το δίκτυο να παρουσιάσει αύξηση της διάρκειας της ζωής του. Ο Πίνακας 2 δείχνει τις τιμές φόρτισης των κόμβων και στην εικόνα 6 αναπαριστάται το σχήμα φόρτισης. Παρατηρούμε ότι 12 στους 30 κόμβους (40%) έχουν ενέργεια >1 Joule και οι υπόλοιποι 18 στους 30 (60%) ενέργεια <1 . Τα ποσοστά αυτά είναι άμεσα εξαρτώμενα από την τοποθέτηση των κόμβων, το πλήθος των γειτόνων τους και την στρατηγική προώθησης πακέτων.

Τέλος στην εικόνα 7 παραθέτουμε τις καμπύλες που αφορούν την διάρκεια ζωής της τελικής τοπολογίας, για τις δύο στρατηγικές προώθησης (ECD-STR1, UCD-STR2). Είναι φανερό ότι η UCD αυξάνει την διάρκεια ζωής και αυτό φαίνεται από την αντίστοιχη καμπύλη που είναι αύξουσα. Και οι δύο καμπύλες αρχίζουν από σημείο διάρκειας 1476, όπου τότε εκτιμάται ότι ο πρώτος κόμβος τίθεται εκτός λειτουργίας (FND). Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, με την στρατηγική 2 ο δίκτυο μπαίνει σε φάση εκπαίδευσης (training phase) μέχρι $seed = 40$. Κατόπιν και οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν ελαφρές διακυμάνσεις στις τιμές τους. Για την UCD, η μέγιστη διάρκεια ζωής φτάνει τον αριθμό 3717. Ποσοτικοποιούμε την υπεροχή της UCD έναντι της ECD με τον δείκτη $IF = \frac{STR2_Lifetime()}{STR1_Lifetime()}$, όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η τελική τοπολογία μας έχει $IF_{SA} = 2.385$. Υπολογίζοντας τον αντίστοιχο δείκτη για τις 500 τυχαίες τοπολογίες που απεικονίζονται στο ιστόγραμμα της εικόνας 3, προκύπτει ότι $\overline{IF}_{500} = 1.77$ και $var(IF) = 0.4069$. Αυτό σημαίνει ότι $IF_{SA} = 1,86 \times \sigma$, όπου σ είναι η τυπική απόκλιση.



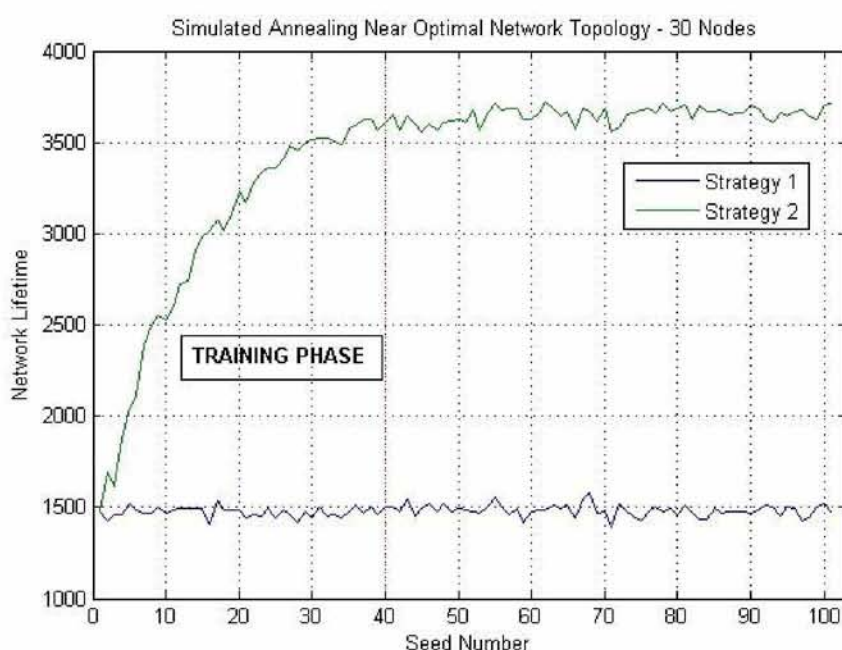
Εικόνα 5: Μείωση res για την τελική τοπολογία



Εικόνα 6: Τελικό σχήμα φόρτισης κόμβων της προτεινόμενης τοπολογίας

Πίνακας 3: Τιμές φόρτισης κόμβων για την προτεινόμενη SA τοπολογία

| Node ID | Energy Charge | Node ID | Energy Charge | Node ID | Energy Charge |
|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|
| 1 | 1.46157 | 11 | 2.51989 | 21 | 0.53146 |
| 2 | 1.23059 | 12 | 2.01367 | 22 | 0.37937 |
| 3 | 1.16808 | 13 | 1.47306 | 23 | 0.39947 |
| 4 | 0.73911 | 14 | 0.74411 | 24 | 0.47136 |
| 5 | 2.24584 | 15 | 2.26248 | 25 | 0.31786 |
| 6 | 1.23955 | 16 | 1.78686 | 26 | 0.55132 |
| 7 | 0.96754 | 17 | 1.33649 | 27 | 0.46716 |
| 8 | 0.82599 | 18 | 1.07573 | 28 | 0.31572 |
| 9 | 0.76305 | 19 | 0.74143 | 29 | 0.35736 |
| 10 | 0.54237 | 20 | 0.66794 | 30 | 0.40358 |



Εικόνα 7: Σύγκριση της διάρκειας ζωής (network lifetime) της προτεινόμενης τοπολογίας για τις στρατηγικές προώθησης Strategy 1 (ECD Algorithm) και Strategy 2 (UCD Algorithm)

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα μαρτυρούν ότι η τελική προτεινόμενη τοπολογία οδηγεί ταυτόχρονα σε επιμήκυνση της κάλυψης και της διάρκειας ζωής του δικτύου. Ολοκληρώνουμε την μελέτη αυτή παρέχοντας μελέτη αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων μας. Η μελέτη αξιοπιστίας πραγματοποιείται μέσω της ανάλυσης της συνάρτησης επιβίωσης (survival function) των στατιστικών ιδιοτήτων της προτεινόμενης αντικειμενικής συνάρτησης F της σχέσης (1). Τα αποτελέσματα

αποκαλύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τις ιδιότητες των Α.Δ.Α. κάτω από συγκεκριμένες μελέτες περίπτωσης (case studies).

4.4. ΜΕΛΕΤΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ (Reliability Study)

4.4.1 Θεωρία Αξιοπιστίας (Reliability Theory)

Η θεωρία αξιοπιστίας ασχολείται με την διάρκεια της ωφέλιμης ζωής των μερών ενός συστήματος [24]. Περιγράφει και υπολογίζει την πιθανότητα ενός συστήματος να ολοκληρώσει την αναμενόμενη λειτουργία του κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος. Όπως προαναφέρθηκε, η αντικειμενική συνάρτηση F , ενσωματώνει τους παράγοντες της κάλυψης και της διάρκειας ζωής του δικτύου, προκειμένου να εξέγξει την αξιοπιστία μίας συγκεκριμένης τοπολογίας. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούμε τον ορισμό της αξιοπιστίας ενός συστήματος και μοντελοποιούμε τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης F_j με $j = 1..500$ για κάθε τυχαία j τοπολογία, ως συνεχής και μη αρνητική (continuous and non-negative) τυχαία μεταβλητή T , η κατανομή της οποίας μπορεί να αναπαρασταθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

1. *Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας* (Probability Density Function – PDF): Είναι μία στατιστική συνάρτηση που περιγράφει την πιθανότητα μία συνεχούς τυχαίας μεταβλητής T να πάρει μία συγκεκριμένη τιμή και παριστάνεται ως $f(T)$. Η πιθανότητα η τιμή της τυχαίας μεταβλητής T να εμπίπτει σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών δίνεται από το ολοκλήρωμα της πυκνότητας της μεταβλητής στο εύρος αυτό: $\Pr[t \leq T \leq t + dt] = \int_t^{t+dt} f(x)dx$. Όλες οι *pdfs* πρέπει να ικανοποιούν τις συνθήκες: $\int_0^{\infty} f(x)dx = 1$ και $f(t) \geq 0, \forall t$
2. *Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής* (Cumulative Distribution Function – CDF): Η *cdf* που αντιστοιχεί στην *pdf* $f(t)$ αναπαριστάται ως $F(t)$, υπολογίζει την πιθανότητα μία τυχαία μεταβλητή T να λάβει τιμή σε διάστημα μικρότερο ή ίσο από t . Συνεπώς πρακτικά δίνει την πιθανότητα το σύστημα να αποτύχει να ολοκληρώσει την λειτουργία του μέχρι t . Ορίζεται ως εξής:

$$F(t) = \int_0^t f(s)ds \quad (2)$$

Η μελέτη επιβίωσης (survival analysis) ενός συστήματος, είναι ένας κλάδος της Στατιστικής Επιστήμης που ασχολείται με την ανάλυση του βιώσιμου χρόνου όπως “θάνατος” για τους βιολογικούς οργανισμούς, ή λειτουργική αστοχία-αποτυχία (function failure) στα μηχανολογικά συστήματα. Σε αυτό το μέρος της μελέτης μας εφαρμόζουμε θεωρία αξιοπιστίας (reliability theory) ή μελέτη αξιοπιστίας όπως ονομάζεται για τις Επιστήμες της Μηχανικής ή ανάλυση διάρκειας (duration analysis) όπως ονομάζεται στις Οικονομικές και Κοινωνικές Επιστήμες [24].

Το κύριο σημείο ενδιαφέροντος, σε σύνδεση με το πρόβλημα βελτιστοποίησης που ορίσαμε σε προηγούμενη ενότητα, είναι η *Συνάρτηση Επιβίωσης* (Survival Function) που ονομάζεται και *Συνάρτηση Αξιοπιστίας* (Reliability Function) και ορίζεται ως εξής: $S(t) = \Pr[T > t], t \geq 0$ (3), όπου t είναι μία συγκεκριμένη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης F και T μία τυχαία μεταβλητή. Συνεπώς, βάση της σχέσης (2), η συνάρτηση επιβίωσης $S(t)$ μίας τοπολογίας, εκφράζει την πιθανότητα που έχει η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης F μίας τοπολογίας να είναι μεγαλύτερη από ένα κάτω όριο t . Η $S(t)$ μπορεί να προκύψει από την cdf της $F(T)$ ως εξής:

$$S(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(s)ds \quad (4)$$

Η $S(t)$ θα πρέπει να ικανοποιεί τις συνθήκες: $S(0) = 1, \log_{t \rightarrow \infty} S(t) = 0$ και $S(t)$ φθίνουσα.

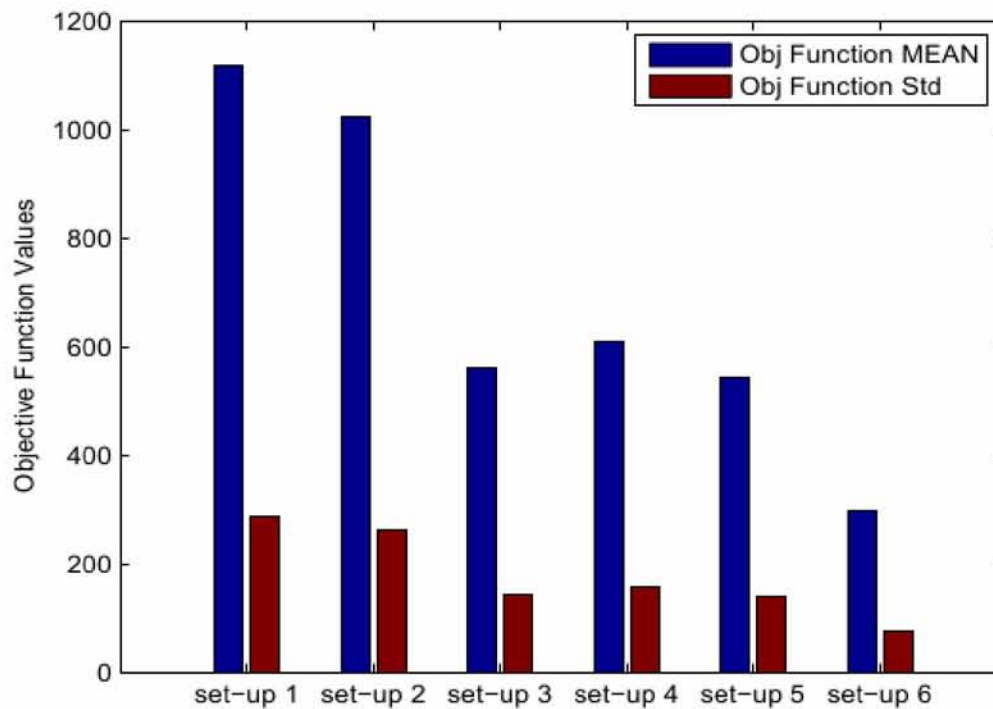
4.4.2 Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα

Στο σημείο αυτό αξιολογούμε την αξιοπιστία των 500 τυχαίων συνδεδεμένων τοπολογιών, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2), (3) και (4). Τα αποτελέσματα προκύπτουν από 6 πειραματικές δοκιμές (set ups) η κάθε μία από τις οποίες αφορούν τιμές διαφόρων τιμών παραμέτρων της αντικειμενικής συνάρτησης. Για την εξαγωγή των συμπερασμάτων αξιοπιστίας, πραγματοποιούμε μία σειρά από προσομοιώσεις, βασισμένα στα 6 set ups. Οι παράμετροί τους δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4: Set up ρυθμίσεις ($w_1 = 0.5, w_2 = 0.5$)

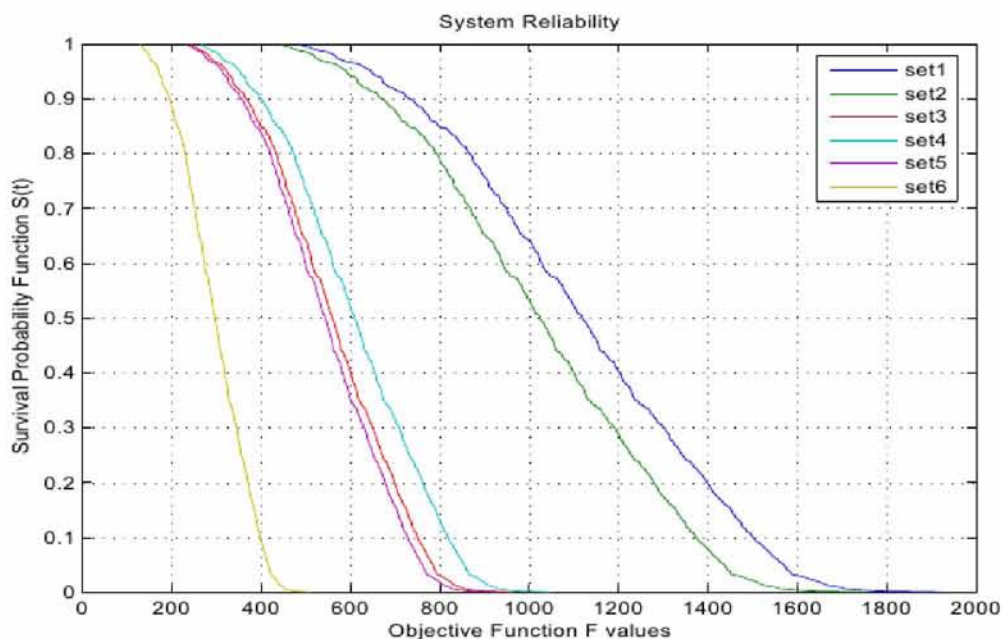
| Set up | Path Loss Exponent (l) | Initial Charge Energy (Joules) | Objective Function F mean | Objective Function Standard Deviation |
|--------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 2 | 1 | 1.1205e+003 | 286.3783 |
| 2 | 3 | 1 | 1.0253e+003 | 262.0361 |
| 3 | 4 | 1 | 560.2586 | 143.1891 |
| 4 | 2 | 0.5 | 610.6819 | 156.0762 |
| 5 | 3 | 0.5 | 543.4509 | 138.8935 |
| 6 | 4 | 0.5 | 296.937 | 75.8902 |

Συγκεκριμένα, από τα παραπάνω set ups, εξετάζουμε εκθέτες απώλειας διαδρομής σήματος l και φόρτιση κόμβων. Όπως είναι εμφανές από τον πίνακα 4, για κάθε set up έχει υπολογιστεί ο μέσος (mean) των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης και η τυπική απόκλιση (standard deviation) για τις 500 τυχαίες τοπολογίες.

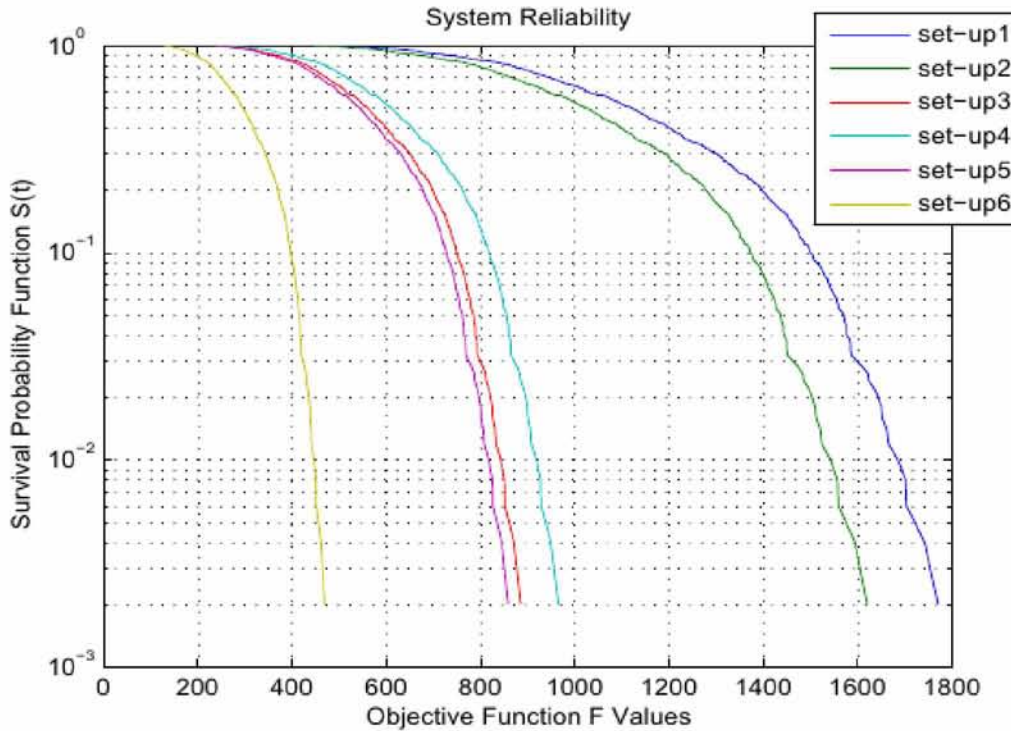


Εικόνα 8: Μέσοι όροι και τυπική απόκλιση τιμών αντικειμενικής συνάρτησης F για 500 τυχαίες τοπολογίες

Η εικόνα 8, απεικονίζει τους μέσους και τις τυπικές αποκλίσεις από τις μετρήσεις για κάθε set up των 500 τοπολογιών. Λόγω του προβλήματος μεγιστοποίησης που τέθηκε σε προηγούμενη ενότητα, παρατηρούμε ότι καλύτερο σενάριο είναι το set up 1, επειδή οδηγεί σε μεγαλύτερη τιμή της F . Σε σύνδεση της εικόνας 8 με το ιστόγραμμα της εικόνας 3, έχουμε να πούμε ότι κάθε ένα από τα set ups “μετακινεί” το ιστόγραμμα είτε προς τα δεξιά είτε προς τα αριστερά. Επειδή στην εικόνα 3, ο άξονας X απεικονίζει τιμές αντικειμενικής συνάρτησης, τότε ένα set up το οποίο οδηγεί σε μεγάλες τιμές, θα μετακινήσει το ιστόγραμμα δεξιά, ενώ ένα άλλο που οδηγεί σε μικρότερες τιμές θα οδηγήσει το ιστόγραμμα αριστερά. Επειδή η τυπική απόκλιση ως τιμή δεν διαφέρει σε μεγάλη κλίμακα για τα παραπάνω set ups, εικάζουμε ότι το ιστόγραμμα δεν θα μεταβληθεί ιδιαίτερα όσο αφορά το πλάτος του ανοίγματός του γύρω από το μέσο όρο.



Εικόνα 9: Συνάρτηση Επιβίωσης (Survival Probability Function)



Εικόνα 10: Συνάρτηση Επιβίωσης (Survival Probability Function) – Σε λογαριθμική κλίμακα

Βάση της σχέσης (4) μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα η αντικειμενική συνάρτηση ενός set up να είναι μεγαλύτερη, μικρότερη ή εντός διαστήματος τιμών. Συνεπώς, η εικόνα 9 μας δίνει γραφικά για όλα τα set ups την συνάρτηση πιθανότητας επιβίωσης (survival probability function) έναντι τιμών αντικειμενικής συνάρτησης. Είναι σαφές ότι το καλύτερο set up είναι το set up 1, το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές της F και συγκεκριμένα στην τιμή 1800, ενώ το χειρότερο είναι το set up 6, που οδηγεί σε τιμή 500. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι στο set up 1 εφαρμόζουμε μικρότερο συντελεστή απώλειας διαδρομής $l = 2$, που αυτό επηρεάζει κατάλληλα την κατανάλωση ενέργειας κατά την αποστολή δεδομένων.

Επίσης από τις πληροφορίες της εικόνας 9, μπορεί κανείς βάσει του ορισμού της συνάρτησης πιθανότητας επιβίωσης της σχέσης (4), να εκτιμήσει στατιστικά πότε το σύστημα τερματίζει την λειτουργία του. Συγκεκριμένα, για το set up 1, η πιθανότητα να προκύψει τιμή αντικειμενικής συνάρτησης < 1000 μονάδες αντιστοιχεί με το εμβαδό κάτω από την μπλέ καμπύλη του set up 1 για τιμές $F < 1000$. Αντίστοιχα η πιθανότητα το σύστημα για το set up 1 να ζήσει πάνω από 1800 είναι σχεδόν 0, αφού η καμπύλη εφάπτεται στον άξονα X της εικόνας 9 για τιμές πάνω από

1800. Τέλος η εικόνα 10, απεικονίζει ότι και η εικόνα 9, αλλά είναι εκφρασμένες οι μονάδες πιθανότητας σε λογαριθμική κλίμακα. Στην εικόνα 10 φαίνεται πιο ευδιάκριτα η υπεροχή του set up 1.

4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό, μορφοποιήσαμε και λύσαμε έναν πρόβλημα συνδιαστικής βελτιστοποίησης με σκοπό να προτείνουμε μία τοπολογία δικτύου η οποία επεκτείνει την συνολική κάλυψη και την διάρκεια ζωής του. Για το σκοπό αυτό, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ενσωματώνει όρους διάρκειας ζωής και κάλυψης. Για την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής εφαρμόσαμε τον προτεινόμενο αλγόριθμο άνισης φόρτισης UCD που εξηγήσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο και επιλέξαμε απλή πολιτική προώθησης πακέτων. Η λογική είναι η μη ομοιόμορφη φόρτιση κόμβων βάση της τοποθέτησής τους. Εάν επεκταθεί η διάρκεια ζωής για έναν κόμβο, αυτό συνεπάγεται ότι επεκτείνεται για όλο το δίκτυο, αφού το κριτήριο για θάνατο του δικτύου είναι η πρώτη απώλεια κόμβου λόγω μη επαρκών ενεργειακών αποθεμάτων. Για την επιμήκυνση της συνολικής κάλυψης, χρησιμοποιήσαμε έναν ευρετικό (heuristic) αλγόριθμο βασισμένο στην SA τεχνική βελτιστοποίησης. Μέσω προσομοίωσης μετακινήθηκαν όλοι οι κόμβοι κατάλληλα και προτάθηκε μία τελική τοπολογία η οποία πληρεί τους περιορισμούς του προβλήματος. Μέσω της αναδιάταξης των κόμβων η κάλυψη αυξήθηκε από 59% σε 70%. Το κριτήριο για την αποδοχή μίας νέας εξεταζόμενης τοπολογίας από τον SA είναι η τιμή της αντικειμενικής της συνάρτησης να μεγαλώνει.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποκαλύπτουν ότι ο SA οδηγεί σε μία τελική τοπολογία, η αξιολόγηση της οποίας ανήκει στο 5% των 500 τυχαίων τοπολογιών. Τέλος, βάση θεωρίας αξιοπιστίας, χαρακτηρίζουμε στατιστικά την συμπεριφορά τυχαίων τοπολογιών σε όρους τιμών αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή κάλυψης και διάρκειας ζωής. Τα αποτελέσματα αφορούν την αξιοπιστία συγκεκριμένων set ups και υπολογίζουν την πιθανότητα επιβίωσης. Ως επέκταση της μελέτης αυτής νοείται η πρόταση ενός προσαρμοσμένου ευρετικού αλγορίθμου για έλεγχο τοπολογίας και βελτιστοποίηση της αντίστοιχης αντικειμενικής συνάρτησης, οποίος να ενσωματώνει περισσότερες μεταβλητές από διάφορα επίπεδα του OSI.

4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks", in *IEEE Communications Magazine*, 2002.
- [2] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman, "A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models", in *ACM Mobile Computing and Communications Review*, pp. 28-36, vol. 6, 2002.
- [5] M. Mallinson, S. Hussian, and J. H. Park, "Investigating Wireless Sensor Network Lifetime Using a Realistic Radio Communication Model", in *International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering (MUE)*, pp. 433-437, Apr. 2008.
- [4] J. H. Chang and L. Tassiulas, "Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks", in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, no. 4, Aug. 2004.
- [5] K. Akkaya, and M. Younis, "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks", in *Ad hoc Networks Journal*, pp. 325-349, vol. 3, 2005.
- [6] K. Kalpakis, K. Dasgupta, and P. Namjoshi, "An Efficient Clustering – based heuristic for Data Gathering and Aggregation in Sensor Networks", in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2003.
- [7] S. Bandyopadhyay and E. J. Coyle, "An Energy Efficient hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Network", in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2003.
- [8] H. O. Tan and I. Korpeoglu, "Power Efficient Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks", in *ACM SIGMOD*, vol. 32, no. 4, Dec. 2003.
- [9] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient Communication Protocol for Wireless micro-sensor Networks", in *33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp.3005 – 3014, 2000.
- [10] C. Li, M. Ye, G. Chen and J. Wu, "An Energy - Efficient Unequal Clustering Mechanism for Wireless Sensor Networks", in *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference*, Nov. 2005
- [11] J. Lian, K. Naik, and G.B. Agnew, "Data Capacity Improvement of Wireless Sensor Networks Using Non-Uniform Sensor Distribution", in *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2, no. 2, pp. 121-145, June 2006
- [12] X. Chu and H. Sethu, "Cooperative Topology Control with Adaptation for Improved Lifetime in Wireless Sensor Networks", in *IEEE INFOCOMM*, 2012
- [13] P. Kaushik and J. Singhai, "Energy Efficient Routing Algorithm for Maximizing the Minimum Lifetime of Wireless Sensor Network: A Review", in *International*

Journal of Ad hoc, Sensor and Ubiquitous Computing, vol. 2, no. 2, pp. 25-36, Jun. 2011.

[14] P. Basu and J. Redi, "Effect of overhearing transmissions on energy efficiency in dense sensor networks", in *3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pp. 196-204, Apr. 2004.

[15] D. Wang, B. Xie and D. P. Agrawal, "Coverage and Lifetime Optimization of Wireless Sensor Networks with Gaussian Distribution", in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, issue 12, pp. 1444 - 1458, Dec 2008

[16] V. Kumar Singh and V. Sharma, "A Multiobjective Coverage and Connectivity Strategy for Improving the Performance of Wireless Sensor Networks", in *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 3, issue 12, Dec 2013

[17] D. Bertsimas and J. Tsitsiklis, "Simulated Annealing", in *Statistical Science Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 10 - 15, 1993

[18] E. Jain and W. Liang, "Sensor Placement and Lifetime of Wireless Sensor Networks: Theory and Performance Analysis", in *IEEE GLOBECOM'05*, 2005

[19] A. Xenakis, I. Katsavounidis and G. Stamoulis, "Investigating Wireless Sensor Network Lifetime under Static Routing with Unequal Energy Distribution", in *Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*, 2012 Asia-Pacific, pp. 1 - 7, Dec 2012.

[20] S. Kirkpatrick, C. Gelatt and M. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing", *Science, New Series*, vol. 220, no. 4598, pp. 671 - 680, May 1983

[21] S. Nahar, S. Sahni and E. Shragowitz, "Simulated Annealing and Combinatorial Optimization", in *23rd Conference on Design and Automation*, Jun. 1986.

[22] Y. Naourani and B. Andersen, "A Comparison of Simulated Annealing Cooling Strategies", in *Journal of Physics A: Mathematical and General*, vol. 31, no. 41, 1998.

[23] P. Baronti, P. Pillai, V. Chook, S. Chessa, A. Gotta and Y. Hu, "Wireless Sensor Networks: A Survey on the state of the art and the 802.15.4 and the ZigBee Standards", in *Computer Communication*, vol. 30, no. 7, pp. 1655 - 1695, May 2007.

[24] E. Jain and Q. Liang, "Sensor placement and lifetime of wireless sensor networks: theory and performance analysis", in *IEEE GLOBECOM 2005*, vol. 1, Nov. 2005.

5 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ

ΚΟΜΒΩΝ ΣΕ Α.Δ.Α ΜΕΣΩ CROSS LAYER OPTIMIZATION

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη του παρόντος κεφαλαίου αφορά την από κοινού βελτιστοποίηση (joint optimization) της ενεργειακής κατανάλωσης κόμβων και της τοποθέτησής τους εντός χώρου 2-διαστάσεων χρησιμοποιώντας ευρετικούς αλγορίθμους. Λόγω των σοβαρών ενεργειακών περιορισμών που επιδεικνύουν τα Α.Δ.Α., προτείνουμε έναν τρόπο βέλτιστης επιλογής ελέγχου ισχύος εκπομπής (power control), βέλτιστης επιλογής μήκους πακέτου δεδομένων (packet length control) και ελέγχου τοπολογίας. Για τον σκοπό αυτό, ορίζουμε ένα πρόβλημα κοινής βελτιστοποίησης με στόχο να μειωθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας στις επικοινωνίες των κόμβων, η οποία ενσωματώνει έλεγχο ισχύος, μετάδοση πακέτων με τη χρήση κωδικών διόρθωσης σφαλμάτων (error correcting codes – ECC) και αξιολόγηση τοπολογίας, ικανοποιώντας περιορισμούς κάλυψης δικτύου. Το πρόβλημα που ορίζουμε αποδεικνύεται NP-Complete και για τον λόγο αυτό, η λύση του προκύπτει βάση εφαρμογής ευρετικού αλγορίθμου, όπως ο Simulated Annealing (SA) και ο Random Sampling (RS).

Η κατανάλωση ενέργειας του δικτύου σχετίζεται με την μέση ενεργειακή κατανάλωση όλων των κόμβων, την κάλυψη ανίχνευσης περιοχής (sensing coverage) και τις θέσεις των κόμβων εντός τοπολογίας. Συνεπώς για την ελαχιστοποίησή της, θέλουμε όλες αυτές τις πληροφορίες για τον ορισμό του προβλήματος βελτιστοποίησης. Κάτι τέτοιο μαρτυρεί την αναγκαιότητα για μορφοποίηση μέσω διαστρωμάτωσης (cross layer design). Εφαρμόζοντας SA και RS, μία τοπολογία ελέγχεται (θέσεις των κόμβων) ταυτόχρονα με την εφαρμοζόμενη τιμή ισχύος εκπομπής και το μήκος του πακέτου που χρησιμοποιείται. Συνεπώς πρόκειται για κοινή βελτιστοποίηση.

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν μαρτυρούν πώς η προτεινόμενη τοπολογία που προκύπτει ως λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης οδηγεί σε μεγαλύτερη κάλυψη δικτύου συγκρινόμενη με τυχαία τοποθέτηση. Η προσεγγιστικά βέλτιστη λύση προκύπτει από τον SA, και εξετάζοντας διάφορες παραμέτρους του (cooling schedules), συγκρίνουμε την ποιότητα των λύσεων με τον ευρετικό αλγόριθμο Random Sampling (RS). Η λύση του SA είναι ποιοτικά ανώτερη έναντι αυτής του RS, λόγω του στοχαστικού χαρακτηριστικού του να αποδέχεται χειρότερες λύσεις με κάποια πιθανότητα. Τέλος, αξιολογούμε την λύση μας σε όρους ενέργειας και πειραματικά αποδεικνύουμε ότι η τεχνική *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ) είναι η βέλτιστη όταν χρησιμοποιούμε κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων στο data link layer.

5.2 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΚΗ ΜΑΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Η εξέλιξη στην ηλεκτρονική τεχνολογία και την τεχνολογία τηλεπικοινωνιών οδήγησε στην ανάπτυξη μικρών σε μέγεθος κόμβων, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και κόστους που επικοινωνούν μεταξύ τους με ραδιοκύματα (RF) στις *Industrial, Scientific και Medical* (ISM) συχνότητες. Οι κόμβοι διαθέτουν επεξεργαστή, μνήμη και καταχωρητές και χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές σχετικές με παρακολούθηση και μέτρηση φυσικών ποσοτήτων, όπως περιβαλλοντικές, στρατιωτικές, υγείας, αυτοματισμοί [1]. Οι κόμβοι έχουν περιορισμένα αποθέματα ενέργειας, ένας παράγοντας που περιορίζει σημαντικά την συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου [2]. Η ποιότητα στην επικοινωνία και η ενέργεια που καταναλώνεται είναι δύο αντιφατικές έννοιες. Για παράδειγμα, ο έλεγχος ισχύος (power control) μπορεί να περιορίζει την ισχύ μετάδοσης, αλλά αυτή η απόφαση συνεπάγεται αύξηση στον ρυθμό σφαλμάτων πακέτου (packet error rate – PER)[3].

Επιπροσθέτως, για τη βελτίωση της ποιότητας επικοινωνίας σε ένα κανάλι, προτείνεται η αποδοτική χρήση κωδικών διόρθωσης σφαλμάτων [4]. Στην περίπτωση του απλού Automatic Repeat Request (ARQ), μόνο η δυνατότητα της ανίχνευσης σφάλματος παρέχεται στον δέκτη και δεν γίνεται προσπάθεια διόρθωσης των σφαλμάτων. Στην περίπτωση του Forward Error Correction (FEC), ο πομπός προσθέτει πλεονάζουσα πληροφορία (περισσότερα bits) στο πακέτο ώστε να μπορεί να ληφθεί χωρίς λάθη. Με την τεχνική Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ),

ένας σχεδιαστής δικτύου στοχεύει να εκμεταλευτεί τα πλεονεκτήματα των ARQ/FEC αυξάνοντας βαθμιαία την ανθεκτικότητα σε σφάλματα μέσω αναμεταδόσεων πακέτων. Όλες όμως αυτές οι τεχνικές ποιότητας επικοινωνίας οδηγούν σε υψηλή αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης, η οποία είναι κρίσιμη παράμετρος για την αύξηση της διάρκειας ζωής ενός A.Δ.Α [4].

Προς αυτή την κατεύθυνση μελέτης στο [5] θεωρούν ως κριτήριο που καθορίζει την διάρκεια της ζωής του δικτύου το χρόνο που χρειάζεται μέχρι ο πρώτος κόμβος να τεθεί εκτός λειτουργίας, διατυπώνουν ένα πρόβλημα γραμμικής βελτιστοποίησης και παρουσιάζουν έναν αλγόριθμο ο οποίος βρίσκει προσεγγιστικά βέλτιστα μονοπάτια δρομολόγησης ανάμεσα στους κόμβους. Η δουλειά τους αφορά στατικά A.Δ.Α. Μία άλλη προσέγγιση αφορά τεχνικές ελέγχου ισχύος (power control techniques) που προτείνονται για την μείωση ενεργειακής κατανάλωσης σε A.Δ.Α. στατικής τοπολογίας [6]. Ωστόσο, σε επικοινωνίες 1-hop, όπου πρακτικά η δρομολόγηση δεν αποτελεί μείζον θέμα, ο σχεδιασμός ενεργειακά αποδοτικών A.Δ.Α. βασίζεται κυρίως στον έλεγχο των θέσεων των κόμβων, δηλαδή διαχειρίζοντας την υφιστάμενη τοπολογία. Από την άλλη πλευρά, τεχνικές διαχείρισης τοπολογίας δικτύου (topology control techniques) που έχουν εφαρμοστεί σε ασύρματα αυτο – οργανούμενα δίκτυα (ad hoc networks) και δίκτυα αισθητήρων, και στοχεύουν να μειώσουν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και τις ραδιοπαραεμβολές [2][7], ασχολούνται μόνο με τοποθέτηση κόμβων ενώ διατηρούν την ισχύ εκπομπής και το μήκος πακέτου σταθερά. Επιπρόσθετα, στην μελέτη [8], αλγόριθμοι για 2D και 3D τοπολογίες προτείνονται, κινούνται στην ίδια λογική, αφορούν μόνο τοποθέτηση κόμβων εντός πλέγματος και θεωρούν την ισχύ και το πακέτο σταθερές μεταβλητές.

Η προσέγγιση που ακολουθείται στο παρόν κεφάλαιο αφορά το πρόβλημα της βέλτιστης ανάπτυξης τοπολογίας, ικανοποιώντας τους περιορισμούς συνδεσιμότητας και κάλυψης δικτύου, με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί η μέση ενεργειακή κατανάλωση από την εφαρμογή ECC στο επίπεδο πρόσβασης του μέσου (Medium Access Control – MAC layer) για επαναμετάδοση πακέτων (packet retransmission) και έλεγχο ισχύος (power control) στο Φυσικό επίπεδο πρόσβασης (Physical Layer). Ακολουθούμε τεχνικές cross layer design για να πραγματοποιήσουμε κοινή βελτιστοποίηση των ποσοτήτων αυτών.

Συνεπώς, το πρόβλημα της διαχείρισης των θέσεων των κόμβων (σχεδιασμός τοπολογίας) σε πολυωνυμικό χρόνο ώστε να προκύψει μία τοπολογία που ικανοποιεί περιορισμούς κάλυψης και ενέργειας είναι πολύπλοκο, ειδικά όταν το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών εισόδου, όπως πλήθος κόμβων, μήκος πακέτων και επίπεδα ισχύος αυξάνονται [7]. Στις περιπτώσεις πολύπλοκων προβλημάτων κοινής βελτιστοποίησης, ειδικά όταν η αντικειμενική συνάρτηση εξαρτάται από πολλές μεταβλητές, ευρετικές μέθοδοι με στοχαστική συμπεριφορά στις αποφάσεις και επιλογή λύσεων επιλέγονται, όπως η Simulated Annealing[9-10]. Για παράδειγμα, στην μελέτη [11] οι ερευνητές αποδεικνύουν ότι πρόβλημα *εκχώρησης καναλιού* (channel assignment) είναι NP-Complete (βλέπε Παράρτημα) και το λύνουν εφαρμόζοντας SA ευρετικό αλγόριθμο. Στην ίδια λογική κινούνται και οι μελέτες στο [12], σχετικά με το πρόβλημα της ανάθεσης κυψελών σε πομπούς υπό την παρουσία περιορισμών χωρητικότητας καναλιού, το οποίο είναι NP-Complete και λύνεται με τεχνικές SA. Ομοίως στο [13] το πρόβλημα της χωροταξικού σχεδιασμού σε κυψελωτά δίκτυα (location area planning) λύνεται μέσω SA σε πολυωνυμικό χρόνο.

Ως αποτέλεσμα, συνολικά διαχειριστικά κόστη ελαχιστοποιούνται. Εν συνεχεία, στην μελέτη [14] οι συγγραφείς παρουσιάζουν μία προσέγγιση βελτιστοποίησης για A.Δ.Α. μεγάλης κλίμακας βασισμένη στον SA. Ο κύριος στόχος τους είναι να επιτευχθεί μέχρι ένα σημείο αποτελεσματικότητα στην επικοινωνία κόμβων με αυτόνομο τρόπο. Η προσέγγισή τους μπορεί να φτάσει το επιθυμητό επίπεδο αποδοτικότητας ακόμη και σε A.Δ.Α. μεγάλης κλίμακας. Προς την κατεύθυνση της βέλτιστης τοποθέτησης κόμβων για εφαρμογές αναγνώρισης στόχου κινείται η μελέτη στο [15]. Η SA τεχνική βελτιστοποίησης εφαρμόστηκε με σκοπό να επιτευχθεί βέλτιστη τοποθέτησης κόμβων σε τοπολογία πλέγματος. Τέλος SA εφαρμόστηκε επίσης και στην εφαρμογή εκτίμησης της ακριβούς θέσης (location estimation) των κόμβων σε χώρο [16-17]. Αυτή η προσέγγιση εφαρμόζει tabu-search τεχνική ως πρώτο βήμα βελτιστοποίησης και έπειτα SA ευρετικό αλγόριθμο για να ραφινάρει όποιο αποτέλεσμα παρουσιάζει ασάφεια και θόρυβο.

Η προτεινόμενη προσέγγιση του κεφαλαίου αυτού είναι η διαχείριση τοπολογίας δικτύου σε πολυωνυμικό χρόνο με cross layer τεχνικές, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες μεταβλητές και λύνοντας το πρόβλημα που τίθεται με SA. Αρχικά, αποδεικνύουμε ότι το πρόβλημα που διατυπώνουμε είναι NP-Complete (βλέπε Παράρτημα). Εν συνεχεία, εφαρμόζουμε SA ευρετικό αλγόριθμο για την βήμα προς

βήμα αξιολόγηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης όσο αφορά προσεγγιστικά βέλτιστες τιμές (near optimal) της ισχύος μετάδοσης (transmit power), του μήκους πακέτου (packet length) σε συνδιασμό με την χωροταξική τοποθέτηση κόμβων. Κατόπιν, ο SA εφαρμόζεται όχι μόνο με γεωμετρικό cooling schedule αλλά λογαριθμικό και γραμμικό. Αυτά είναι χαρακτηριστικά της λειτουργίας του SA και επηρεάζουν τα αποτελέσματα όπως αναλύουμε στην πορεία. Τέλος, συγκρίνουμε τα αποτελέσματά μας με τον ευρετικό αλγόριθμο Random Sampling (RS), ο οποίος σε σχέση με τον SA δεν επιδεικνύει την στοχαστική συμπεριφορά στις αποφάσεις του.

5.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ (ECC Techniques)

Οι κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων (ECC) μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: *Automatic Repeat Request* (ARQ), *Forward Error Correction* (FEC), και *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ). Συγκεκριμένα [26-27]:

ARQ: Η τεχνική αυτή διόρθωσης σφαλμάτων βασίζεται κυρίως στην επαναμετάδοση πακέτων που έχουν ληφθεί με λάθη στον παραλήπτη. Τα πρωτόκολλα που υλοποιούν ARQ υποστηρίζουν στο MAC layer αναμετάδοση χαμένων ή λανθασμένων πακέτων στέλνοντας ACK σε περίπτωση σφάλματος. Είναι φανερό από την λειτουργικότητα του ARQ ότι επιφέρει σημαντικό ενεργειακό κόστος στην επικοινωνία, ιδιαίτερα σε κανάλια με θόρυβο και σε πακέτα με αυξημένο ρυθμό σφαλμάτων. Αντιθέτως κρίνεται καλή επιλογή στις περιπτώσεις καλής ποιότητας καναλιού, διότι το κόστος (overhead) του ARQ έναντι FEC είναι χαμηλότερο. Παρόλα αυτά, η αποδοτικότητα του ARQ σε εφαρμογές δικτύων αισθητήρων είναι περιορισμένη λόγω της ανεπάρκειας των κόμβων σε ενέργεια και επεξεργαστική ισχύ.

FEC: Η τεχνική FEC προσθέτει πλεονάζουσα πληροφορία (σε bits) μέσα στο προς μετάδοση πακέτο, έτσι ώστε κατά την λήψη του η πιθανότητα να αποκωδικοποιηθεί με επιτυχία να είναι μεγάλη, ακόμη και στην περίπτωση λίγων λαθών σε κάποια bits. Συνεπώς οι κώδικες FEC επιφέρουν επικοινωνιακή υπερφόρτωση (communication overhead) και κατά την αποστολή/λήψη και αποκωδικοποίηση του πακέτου. Σε εφαρμογές A.Δ.Α., η ενέργεια που δαπανάται για

την αποκωδικοποίηση (decoding energy) δεν είναι αμελητέα και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την αξιολόγηση των FEC πρωτοκόλλων. Υπάρχουν πολλά FEC πρωτόκολλα, βελτιστοποιημένα συγκεκριμένα μήκη πακέτων, κατάσταση καναλιού, όπως BCH και Reed-Solomon Codes (RS-C). Στην παρούσα μελέτη εφαρμόζουμε BCH λόγω της ενεργειακής τους αποδοτικότητας.

HARQ: Η τεχνική HARQ στοχεύει να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματα από την ARQ και FEC με το να αυξάνει σταδιακά την ανθεκτικότητα σε σφάλματα (error resiliency) ενός πακέτου μέσω των επαναμεταδόσεων. Δύο είδη HARQ σχημάτων εφαρμόζονται: Type I και Type II. Σύμφωνα με την HARQ τεχνική, αρχικά ένα μη κωδικοποιημένο πακέτο ή ένα πακέτο με χαμηλή δυνατότητα διόρθωσης σφαλμάτων (low error correction resiliency) μεταδίδεται. Εάν το πακέτο αυτό παραληφθεί με λάθη, ο παραλήπτης στέλνει ένα negative acknowledgement (NACK) στον πομπό, ο οποίος στη συνέχεια επαναμεταδίδει το πακέτο κωδικοποιημένο με πιο ισχυρό FEC κώδικα. Η διαφορά στο Type II αφορά την επαναμετάδοση, όπου μόνο τα πλεονάζοντα bits στέλνονται και όχι όλο το πακέτο από την αρχή. Ενώ το Type II έχει επίπτωση στη μείωση του διαθέσιμου εύρους ζώνης του καναλιού, το Type I δεν απαιτεί τα προηγούμενα πακέτα να κρατώνται σε κάποια μνήμη στον κόμβο.

5.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

5.4.1 Μοντελοποίηση Καναλιού

Σχετικά με το μοντέλο του καναλιού στις επικοινωνίες των κόμβων, υποθέτουμε και εφαρμόζουμε *log normal shadowing path loss channel model*. Αυτό το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί είτε για μικρής είτε για μεγάλης κλίμακας συστήματα επικοινωνιών. Εμπειρικές μελέτες [18] φανερώνουν πώς το μοντέλο ενσωματώνει φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών (multi-path) και μπορεί να εφαρμοστεί και σε περιβάλλοντα με εμπόδια ή NLOS (Non Line of Sight). Ο λόγος είναι η στοχαστική συμπεριφορά του. Συνεπώς ο τύπος της απώλειας διαδρομής (path loss) $PL(d_{ij})$ μεταξύ δύο κόμβων i και j σε απόσταση, δίνεται από [18]:

$$PL(d_{ij}) = PL(d_0) + 10\beta \log_{10}\left(\frac{d_{ij}}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (1)$$

Όπου d_{ij} είναι η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη, d_0 είναι μία απόσταση αναφοράς (reference distance in dB), β είναι ο συντελεστής απώλειας διαδρομής, με τιμές $2 \leq \beta \leq 4$, και $X_\sigma \sim N(0, \sigma)$ τυχαία μεταβλητή σε dB, που εκφράζει το *shadow fading component*, με μέσο 0 και τυπική απόκλιση σ . Δεδομένου μίας ισχύς εκπομπής P_t σε dBm, η λαμβανόμενη ισχύς σε dBm δίνεται P_r δίνεται από:

$$P_r = P_t - PL(d_{ij}) \quad (2)$$

και ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) στον δέκτη δίνεται από:

$$SNR(d) = P_r - P_n \quad (3)$$

Όπου P_n είναι η ισχύς του θορύβου σε dBm.

5.4.2 Υπολογισμός Bit and Packet Error Rate

Η επιτυχία στην κατανομή του καναλιού σε κόμβους για κάποιο χρονικό διάστημα χωρίς να δημιουργούνται συγκρούσεις εξαρτάται από την επιτυχή ανίχνευση του καναλιού (carrier sense) καθώς επίσης και από την πιθανότητα η μετάδοση πακέτου να μην υποστεί σύγκρουση με άλλες.

Η πιθανότητα σύγκρουσης p_c ορίζεται ως εξής:

$$p_c = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (4)$$

όπου n είναι το πλήθος των κόμβων της τοπολογίας, τ απεικονίζει τον ρυθμό αποδοχής επιτυχημένων πακέτων (Packet Reception Rate – PRR), που ουσιαστικά είναι η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης και δίνεται από την σχέση:

$$\tau = (1 - p_b)^{L_{packet}} \quad (5)$$

όπου L_{packet} είναι το συνολικό μήκος του frame σε bits και p_b εκφράζει τον ρυθμό σφαλμάτων Bit Error Rate (BER). Ένα τυπικό 802.15.4 MAC frame αποτελείται από ένα μέρος επικεφαλίδας L_{header} (MHR), ένα μέρος δεδομένων L_{data} (Payload) και

ένα μέρος L_{FCS} για εξακρίβωση λαθών [3]. Σχηματικά δίνεται η δομή του στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 1: Τυπικό MAC frame format Δεδομένων στο 802.15.4 [3]

Υποθέτουμε επίσης κωδικοποίηση NRZ [19], όπου 1Baud = 1bit και η πιθανότητα επιτυχίας στην μετάδοση δίνεται από την σχέση (5). Στην παρούσα μελέτη υποθέτουμε τα χαρακτηριστικά υλικού των Tmote Sky κόμβων, οι οποίοι χρησιμοποιούν ραδιοκύκλωμα CC2420, που είναι συμβατό με το πρότυπο IEEE 802.15.4. Οι κόμβοι εκπέμπουν στην ISM συχνότητα 2.4 GHz (στο κανάλι 11 by default) χρησιμοποιώντας O-QPSK διαμόρφωση με DSSS (Direct Spread Spectrum) [21-22]. Βάση αυτών των χαρακτηριστικών, το BER δίνεται από την σχέση [23-24]

$$p_b^{OQPSK} = Q\left(\sqrt{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{DS}}\right) \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)}\right) \quad (6)$$

όπου E_b εκφράζει την ενέργεια / bit, N_0 εκφράζει τον θόρυβο. Η συνάρτηση *Error Function* $\operatorname{erfc}(x)$ με $x > 0$ υπολογίζει την πιθανότητα μία μέτρηση, υπό την επίδραση τιμής σφάλματος κανονικά κατανομημένης με τυπική απόκλιση σ , να έχει απόσταση μικρότερη από x από την μέση τιμή. Στην τεχνική ARQ, υποθέτοντας ότι όλα τα πιθανά λάθη θα μπορούν να ανιχνευτούν, το PER (packet error rate) για μία μετάδοση ενός πακέτου μήκους L_{packet} δίνεται από[23]:

$$PER_{ARQ} = 1 - (1 - p_b)^{L_{packet} + L_{Ack}}, \quad (7)$$

όπου p_b εκφράζει BER. Στους κωδικούς τύπου BCH, υποθέτοντας τέλεια διεμπλοκή (perfect interleaving) το block error rate (BLER) δίνεται από την σχέση:

$$BLER(n, k, t) = \sum_{i=t+1}^n \binom{n}{i} p_b^i (1 - p_b)^{n-i}. \quad (8)$$

Ωστόσο, επειδή ένα πακέτο μπορεί να είναι μεγαλύτερο από block length n , ειδικά όπου μικρά block lengths χρησιμοποιούνται, το PER για τεχνική FEC δίνεται από:

$$PER_{FEC} = 1 - (1 - BLER(n, k, t))^{\lceil \frac{L_{packet}}{k} \rceil} \quad (9)$$

όπου $\lceil \frac{L_{packet}}{k} \rceil$ αποτελεί τον αριθμό των encoding blocks που χρειάζεται για να στείλει ο πομπός πακέτο μήκους L_{packet} . Ωστόσο, κάποια ραδιοκυκλώματα δεν υποστηρίζουν $\frac{E_b}{N_0}$, αλλά την μεταβλητή Received Signal Strength indicator (RSSI) του λαμβανόμενου σήματος. Οι μετρήσεις RSSI μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιορίζουν το SNR, συνεπώς στην παρούσα μελέτη όσες από τις παραπάνω σχέσεις βασίζονται στον λόγο $\frac{E_b}{N_0}$, μετατρέπονται σε SNR [23] ως εξής:

$$SNR(d) = \frac{Eb}{No} \frac{R}{B_N} \quad (10)$$

όπου R εκφράζει data rate σε bits και B_N είναι πλάτος ζώνης θορύβου (noise bandwidth)

5.4.3 Μοντέλο Δικτύου

Στο σημείο αυτό αναλύουμε το μοντέλο του δικτύου, στο οποίο βασίζονται και όλες οι προσομοιώσεις μας. Υποθέτουμε ότι έχουμε ένα Α.Δ.Α. με n πλήθος κόμβων, $n \in \mathbb{Z}^+$, που είναι τυχαία κατανομημένοι γύρω από μία περιοχή επιτήρησης και ένας σταθμός βάσης (GW) τοποθετείται στατικά στην μέση της 2-διαστάσεων περιοχής. Το Α.Δ.Α νοείται ως ένας γράφος $G(V, E)$, όπου V εκφράζει τον αριθμό των κόμβων και E το σύνολο των συνδέσεων μεταξύ τους. Σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων i, j νοείται όταν μπορούν να επικοινωνήσουν εκατέρωθεν πακέτα. Οι συντεταγμένες του κάθε κόμβου προκύπτουν από ομοιόμορφη στατιστική κατανομή. Στην παρούσα μελέτη, αξιολογούμε το ποσό ενέργειας που απαιτείται για τις λειτουργίες της επικοινωνίας στο MAC layer για ένα ζεύγος κόμβων που ανταλλάσσουν πακέτα με 1-hop. Το μοντέλο δικτύου που εφαρμόζουμε αφορά τα εξής:

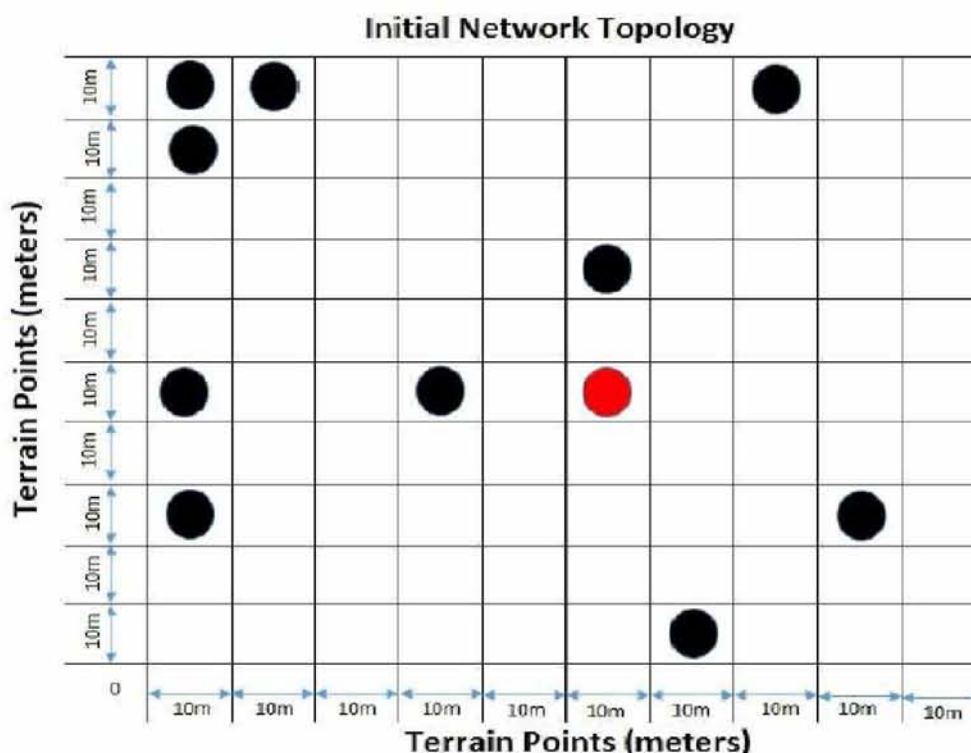
- Η περιοχή ανίχνευσης είναι 2-διαστάσεων $N \times N$, $N \in \mathbb{Z}^+$
- Δύο κόμβοι θεωρούνται γείτονες κόμβοι εάν μπορούν να ανταλλάξουν με επιτυχία εκατέρωθεν πακέτα. Ο παραλήπτης κόμβος j μπορεί να

αποκωδικοποιήσει ένα πακέτο εάν $P_r \geq \psi_{th}$, όπου ψ_{th} είναι ένα κάτω όριο (threshold) σε dBm το οποίο εκφράζει την ευαισθησία του παραλήπτη.

- Όλοι οι κόμβοι, εκτός από τον GW, χαρακτηρίζονται από περιορισμούς στα αποθέματα ενέργειας, αρχικοποιούνται με το ίδιο ποσό ενέργειας σε Joules και είναι ομογενείς σε επίπεδο υλικού, όπως μνήμη, επεξεργαστή και ραδιοκύκλωμα.
- Κάθε κόμβος μπορεί να ανιχνεύσει ένα γεγονός, μία φυσική ποσότητα σε ακτίνα $r_c = 15\mu$. Αυτή η παράμετρος ορίζει την ευαισθησία ανίχνευσης του κάθε κόμβου και είναι κοινή για όλους.
- Πρίν την αποστολή κάποιου πακέτου, υποθέτουμε ότι ο κάθε κόμβος προβαίνει σε ανίχνευση του μέσου (carrier sense) και έπειτα εάν είναι ελεύθερο, προχωρά στην αποστολή πακέτου.
- Κάθε στιγμιότυπο τοπολογίας αφορά ένα δίκτυο στατικό, όπου οι κόμβοι δεν μετακινούνται. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με τους κανόνες βελτιστοποίησης του SA σε κάθε βήμα ο SA μετακινεί κάποιον κόμβο και έτσι δημιουργείται μία νέα στατική τοπολογία.
- Ένας κόμβος νοείται ως ενεργός (active) εάν μπορεί να ανιχνεύει το περιβάλλον του και να στέλνει/λαμβάνει πακέτα.
- Ο GW σε κάθε περίπτωση παραμένει σταθερός στην ίδια θέση.

Όλες οι τοπολογίες που εξετάζονται κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων που ακολουθούν είναι τύπου αστέρα (star-based), δηλαδή ο GW είναι ο τελικός αποδέκτης των πακέτων και οι κόμβοι στέλνουν με 1-hop τα πακέτα τους. Ένα παράδειγμα μίας τέτοιας τοπολογίας, η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη, απεικονίζεται στην εικόνα 2. Ειδικά, σε εφαρμογές A.Δ.Α. για Γεωργία Ακριβείας [25], όπου υπάρχει η ανάγκη για *open field monitoring* από κόμβους διάσπαρτους σε μία περιοχή παρατήρησης, οι τύπου αστέρα τοπολογίες αποτελούν προτιμότερες λύσεις. Επικοινωνίες τύπου ad hoc είναι ενδιαφέρουσες εάν εμπλέξουμε και πρωτόκολλο δρομολόγησης. Στην παρούσα μελέτη, δεν εξετάζουμε ούτε προτείνουμε τρόπους δρομολόγησης, ως εκ τούτου δεν εξετάζονται μερικής ή πλήρους (partial or full mesh) σύνδεσης τοπολογίες με multi-hop πρότυπα επικοινωνίας.

Η αρχική τοπολογία που εξετάζουμε φαίνεται στον εικόνα 2. Στην εικόνα αυτή, ο GW αναπαριστάται με κόκκινη κουκίδα και τοποθετείται στον κέντρο του πλέγματος τοπολογίας. Σχετικά με την μορφοποίηση του προβλήματος που ακολουθεί, χρησιμοποιούμε τοπολογίες πλέγματος 10x10 οι οποίες αναπαριστούν ένα Α.Δ.Α . σε 2-διαστάσεις.



Εικόνα 2: Αρχική τοπολογία με 10 ενεργούς κόμβους (μαύρες κουκίδες) και έναν GW (κόκκινη κουκίδα)

5.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ CROSS LAYER ΤΕΧΝΙΚΗ

5.5.1 Cross Layer Design and Optimization

Τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν τεχνολογίες με αυξανόμενο ενδιαφέρον και προσδοκίες στον κόσμο των τηλεπικοινωνιών. Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνολογίες θα πρέπει να διασφαλίζουν την διαλειτουργικότητα (interoperability) με το Internet, την αύξηση της απόδοσης των κινητών συσκευών και να βελτιστοποιούν την λειτουργία τους για πολυμεσικές εφαρμογές. Η απαίτηση αυτή θέτει νέες προκλήσεις στο σχεδιασμό των πρωτοκόλλων, τα οποία πρέπει να προσαρμοστούν σε

ένα νέο περιβάλλον δικτύωσης με χαρακτηριστικά όπως περιορισμένο εύρος ζώνης (limited bandwidth), υψηλός ρυθμός σφαλμάτων (high error rates) και αυξημένη καθυστέρηση (increased latency)[35].

Ο παραδοσιακός σχεδιασμός δικτυακών αρχιτεκτονικών και πρωτοκόλλων βασίζεται στην διαστρωματοποιημένη λογική του μοντέλου *Open System Interconnection* (OSI). Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε για να υποστηρίζει την τυποποίηση (standardization) νέων δικτυακών αρχιτεκτονικών που βασίζονται στην διαστρωματοποιημένη λογική. Ένα πρωτόκολλο ενός συγκεκριμένου επιπέδου θεωρείται μία οντότητα (entity), η οποία επικοινωνεί με άλλες ομοειδής οντότητες που εκτελούν την ίδια λειτουργία εντός του πρωτοκόλλου και ανταλλάσσουν ειδικά μηνύματα, τα Protocol Data Units (PDUs). Το πλεονέκτημα που απορρέει από το παράδειγμα σχεδιασμού βασισμένο σε διαστρωμάτωση, είναι ότι η λογική των οντοτήτων επιτρέπει την διαλειτουργικότητα (interoperability) στον σχεδιασμό πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Συγκεκριμένα [36]:

- Κάθε στρώμα (layer) εκτελεί μία συγκεκριμένη λειτουργία πρωτοκόλλου.
- Κάθε στρώμα παρέχει υπηρεσίες μόνο στο ανώτερό του επίπεδο.
- Αλλαγές σε λειτουργίες ενός στρώματος δεν συνεπάγονται και αλλαγές στα άλλα επίπεδα.
- Ένα πρωτόκολλο ενός στρώματος περιγράφεται από τις λειτουργίες που προσφέρει σε άλλα στρώματα, ενώ λεπτομέρειες υλοποίησης και παράμετροι είναι κρυμμένα από τα άλλα στρώματα.

Το παράδειγμα του “μαύρου κουτιού” (black box paradigm) είναι το βασικό σημείο των συστημάτων που βασίζονται στην αρχιτεκτονική OSI και υπήρξε η κυρίαρχη σχεδιαστική αρχή όλων των σύγχρονων δικτυακών αρχιτεκτονικών. Ωστόσο η έλλειψη συντονισμού μεταξύ των στρωμάτων, περιορίζει την απόδοση των ασυρμάτων δικτύων όσο οι προκλήσεις στο ασύρματο μέσο μεγαλώνουν και οι ζεύξεις μετάδοσης γίνονται πολυπλοκότερες. Για να ξεπεραστούν τέτοιοι περιορισμοί, προτείνεται η τεχνική *cross layer design* (CLD). Κάθε σχεδιαστική προσπάθεια που παραβιάζει τη λογική της κλειστής διαστρωμάτωσης μπορεί να θεωρηθεί cross layer design. Η εφαρμογή των μεθόδων CLD, διευκολύνει την επικοινωνία των μη γειτονικών επιπέδων. Η βασική ιδέα είναι να διατηρηθούν οι

λειτουργίες που σχετίζονται με τα αρχικά στρώματα, αλλά να επιτραπεί η αλληλεπίδραση συντονισμού και η από κοινού βελτιστοποίηση (joint optimization) των πρωτοκόλλων που αφορούν πολλά στρώματα. Συνεπώς, η CLD στοχεύει να διαμορφώσει και να καθορίσει τον συν-σχεδιασμό (co-design) συγκεκριμένων μηχανισμών στην στοίβα πρωτοκόλλων. Η επιτυχία της τεχνικής CLD να βελτιστοποιήσει κρίσιμα προβλήματα των μοντέρνων επικοινωνιών είναι ευρέως αναγνωρισμένη.

5.5.2 Cross Layer τεχνική βελτιστοποίησης σε A.Δ.Α.

Η *Cross Layer Optimization* τεχνική ξεφεύγει από το παραδοσιακό OSI μοντέλο επικοινωνίας, όπου τα δεδομένα περιορίζονται μόνο εντός των ορίων του κάθε στρώματος. Ασχολείται με την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλαπλών παραμέτρων μεταξύ διαφόρων στρωμάτων μίας συσκευής. Η βελτιστοποίηση βασίζεται σε ένα σύνολο από εσωτερικές λειτουργικές παραμέτρους λειτουργίας μεταξύ διαφορετικών στρωμάτων με σκοπό να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των χρηστών με όσο το δυνατόν λιγότερους διαθέσιμους πόρους.

Η τεχνική cross layer optimization (CLO) αψηφά οποιαδήποτε αυστηρά όρια μεταξύ των στρωμάτων ώστε να επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ τους, επιτρέποντας ένα στρώμα να έχει πρόσβαση στα δεδομένα του άλλου (όχι απαραίτητα συνεχόμενου στρώματος) για να ανταλλάξουν πληροφορίες και να επιτραπεί η αλληλεπίδρασή τους. Ως παράδειγμα, η γνώση της κατάστασης στο φυσικό μέσο (quantities from physical layer) μπορεί να βοηθήσει ένα σύστημα κατανομής καναλιού ή την εφαρμογή κατάλληλου κώδικα διόρθωσης σφαλμάτων, όπως ARQ στο MAC layer με σκοπό να βελτιστοποιηθούν κάποια trade-offs μεταξύ των στρωμάτων και να επιτευχθεί βέλτιστη ρυθμαπόδοση.

Ο στόχος της CLD μεθοδολογίας και βελτιστοποίησης σε εφαρμογές A.Δ.Α είναι να λύσει πολλαπλές διενέξεις μεταξύ σχεδιαστικών απαιτήσεων για μεγάλης κλίμακας δίκτυα, για επιμήκυνση της διάρκειας ζωής, πολλαπλών περιορισμών όπως χαμηλά ενεργειακά αποθέματα, περιορισμένους πόρους στους κόμβους, έλλειψη σε εύρος ζώνης με σκοπό να δομηθούν αποδοτικά και ευέλικτα συστήματα [39]. Τα A.Δ.Α. είναι μία ειδική περίπτωση αυτο-οργανούμενων δικτύων (ad hoc networks)

στα οποία οι περιορισμοί στους πόρους είναι αυστηρότεροι. Με μικρή τροφοδοτική ισχύς και περιορισμένη επεξεργαστική δυνατότητα, κάθε περαιτέρω υπερφόρτωση του κόμβου με πληροφορία θα οδηγήσει σε υποβάθμιση των δυνατοτήτων του. Παρόλα αυτά, σε κάθε δικτυακό σύστημα υπάρχει υπερφόρτωση σε κάθε επίπεδο του OSI μοντέλου. Για τον λόγο αυτόν, βελτίωση στην απόδοση μπορεί να επιτευχθεί μέσω cross layer optimization.

Τα περισσότερα προτεινόμενα επικοινωνιακά πρωτόκολλα βελτιώνουν την ενεργειακή αυτονομία ως ένα βαθμό, αξιοποιώντας την συνεργατική φύση των Α.Δ.Α. Οι στόχοι βελτιστοποίησης που θέτει η τεχνική CLD σε εφαρμογές Α.Δ.Α. είναι οι ακόλουθοι [38-39]:

- Να υποστηρίζονται σχεδιαστικά μεγάλης κλίμακας δίκτυα χωρίς να ελατώνεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης ανά κόμβο.
- Να ελαχιστοποιείται το χάσμα μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και περιορισμένης δυνατότητας ανανέωσής της. Αυτό θα συνεπάγεται και μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και άρα αύξηση της διάρκειας ζωής.
- Να επεκταθεί η διάρκεια ζωής ενός κόμβου παρά τους αυστηρούς περιορισμούς σε πόρους, όπως επεξεργαστική ισχύς, μνήμη και δυνατότητα αποθήκευσης.

Στην παρούσα μελέτη στο πρόβλημα κοινής βελτιστοποίησης που ορίζουμε, στην αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνουμε υπόψη παραμέτρους από physical και MAC layer για την μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Βασιζόμαστε στην λογική της cross layer optimization προσπαθώντας να ισορροπίσουμε διάφορες εκ πρώτης όψης αντικρουόμενες παραμέτρους. Τα πιο σημαντικά προβλήματα που καλείται να λύσει η τεχνική cross layer optimization για Α.Δ.Α. είναι τα ακόλουθα:

- *Ολοκληρωμένη και καλύτερη κατανόηση της ενεργειακής κατανάλωσης:* Μεθοδολογίες CLD και CLO επικεντρώνονται κυρίως στην από κοινού βελτιστοποίηση (joint optimization) λειτουργιών και παμέτρων με στόχο την μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης δικτύου και ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης

ενέργειας. Προς την κατεύθυνση αυτή είναι απαραίτητη βαθύτερη μελέτη και ανάπτυξη μοντέλων για την λύση ενεργειακών προβλημάτων.

- *Ζητήματα συνδεσιμότητας στο Φυσικό Επίπεδο:* Η ασύρματη συνδεσιμότητα έχει μελετηθεί ενδελεχώς. Στοχαστικά μοντέλα καναλιού έχουν αναπτυχθεί για να καθορίσουν θέματα σύνδεσης δικτύου. Ωστόσο, αυτές οι μελέτες θέλουν βαθύτερη έρευνα και προσαρμογή διότι βασίζονται στο *disk – graph* μοντέλο επικοινωνίας, όπου οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων αντιμετωπίζονται περισσότερο βάση γεωμετρικών ευκλείδειων αποστάσεων. Πειραματικές μελέτες έδειξαν [19] ότι οι επιπτώσεις από την στοχαστική συμπεριφορά του ασύρματου μέσου στα ανώτερα στρώματα δεν είναι αμελητέες. Αποτέλεσμα αυτής της διαπίστωσης είναι η παρουσία μεγάλων μεταβατικών περιοχών (transitional regions) στις συνδέσεις κόμβων, όπου η πιθανότητα επιτυχούς σύνδεσης και επικοινωνίας αυξομοιώνεται έντονα.
- *Κατάλληλος ορισμός αντικειμενικής συνάρτησης:* Σε ένα πλαίσιο κοινής βελτιστοποίησης, όπου παράμετροι από διάφορα στρώματα πρέπει να ληφθούν υπόψη, περισσότερο βάρος πρέπει να δίνεται στον ορθό ορισμό και μορφοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης του συστήματος [40].

5.5.3 Υπολογισμός συνολικής κατανάλωσης ενέργειας επικοινωνίας

Η σχέση που περιγράφει την συνολική κατανάλωση ενέργειας ενός Α.Δ.Α που ακολουθεί τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν είναι η εξής:

$$E_c = (E_{Tx} + E_{Rx}) (1 + Ntr_{ECC}) \quad (11)$$

όπου E_c είναι η συνολική κατανάλωση ενέργειας, E_{Tx} και E_{Rx} είναι η συνολική κατανάλωση ενέργειας του transmitter (T_x) και του receiver (R_x) αντίστοιχα για να στείλουν/λάβουν ένα πακέτο, Ntr_{ECC} είναι το πλήθος των

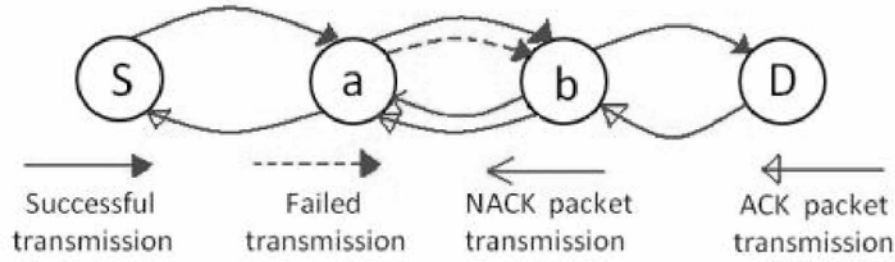
αναμεταδόσεων, $ECC = \{ARQ, FEC, HARQ\}$ και $Ntr_{ECC} \leq N_{max}$. N_{max} είναι το άνω όριο αναμεταδόσεων. Για την παρούσα μελέτη ισχύει $N_{max} = 3$. Υποθέτουμε επίσης ότι είναι σε ισχύ ένα contention based protocol (CSMA/CA) και όλοι οι κόμβοι μεταδίδουν στην ίδια συχνότητα. Η μορφή της συνάρτησης υπολογισμού της ενεργειακής κατανάλωσης για τον πομπό (T_x) και τον δέκτη (R_x) για να στείλουν και να λάβουν αντίστοιχα πακέτο μήκους k bits, δίνεται από[27]:

$$E_{T_x/R_x}^k = V_{radio} I_{T_x/R_x} T_{radio} k \quad (12)$$

όπου V_{radio} , I_{T_x/R_x} είναι η τάση τροφοδοσίας (supply voltage), ρεύμα για μετάδοση/λήψη (transmit/receive current) και $T_{radio} = \frac{1}{R_{bit}}$ είναι ο χρόνος που απαιτείται για την αποστολή 1 bit.

5.5.4 ARQ Κατανάλωση Ενέργειας

Η τεχνική ARQ βασίζεται στην hop – by – hop αναμετάδοσης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3[41-42], όπου σε κάθε hop ο παραλήπτης (R_x) ελέγχει την ορθότητα του πακέτου και αιτείται επαναμετάδοσή του στην περίπτωση negative acknowledgement (NACK) μέχρι το πακέτο να ληφθεί σωστά. Σε διαφορετική περίπτωση, ένα ορθό acknowledgement (ACK) παράγεται και η μετάδοση θεωρείται επιτυχής. Συγκεκριμένα, ένας κόμβος θα πρέπει να εκτελέσει 4-way handshake RTS-CTS-DATA-ACK ακολουθία μηνυμάτων στην περίπτωση της ARQ τεχνικής. Κυρίως, ανίχνευση του μέσου (carrier sense) λαμβάνει χώρα πριν την ανταλλαγή RTS-CTS με σκοπό να ελεγχθεί εάν το κανάλι είναι ελεύθερο. Ένα ACK πακέτο στέλνεται στον πομπό ορίζοντας μία επιτυχή μετάδοση. Σε ένα τυπικό A.D.A., όπου οι κόμβοι χαρακτηρίζονται από χαμηλό ρυθμό αποστολής πακέτων (low reporting rate), ένα stop-and-wait (SAW)[43] ARQ σχήμα εφαρμόζεται. Επιλεκτική επαναμετάδοση (selective retransmission) κυρίως εφαρμόζεται σε κινητές επικοινωνίες όπου υπάρχουν *block fading channels*. Η τεχνική ARQ πετυχαίνει αξιοπιστία μέσω επαναμετάδοσης στην περίπτωση που τα δεδομένα έχουν σφάλματα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι το πακέτο να ληφθεί σωστά ή το άνω επιτρεπτό όριο του αριθμού επαναμεταδόσεων N_{max} να έχει επιτευχθεί.



Εικόνα 3: ARQ σχήμα σε λειτουργία [41-42]

Η ενέργεια που καταναλώνεται από τον πομπό ,όταν η ARQ είναι σε ισχύ, συμβολίζεται ως E_{Tx}^{arq} και δίνεται από[23]:

$$E_{Tx}^{arq} = E_{sense} + (1 - p_c) (E_{Tx}^R + E_{Rx}^C + E_{Tx}^D + E_{Rx}^A) \quad (13)$$

ενώ η ενέργεια του δέκτη, όταν η ARQ είναι σε ισχύ, συμβολίζεται ως E_{Rx}^{arq} και δίνεται από [23]:

$$E_{Rx}^{arq} = (1 - p_c) (E_{Rx}^R + E_{Tx}^C + E_{Rx}^D + E_{Tx}^A) \quad (14)$$

Οι εκθέτες R, C, D και A αναφέρονται σε RTS, CTS, DATA και ACK πακέτα αντίστοιχα και E_{sense} είναι η ενέργεια που καταναλώνεται για ανίχνευση κάποιας ποσότητας και δίνεται από:

$$E_{sense}^k = V_{sense} I_{sense} T_{sense} k \quad (15)$$

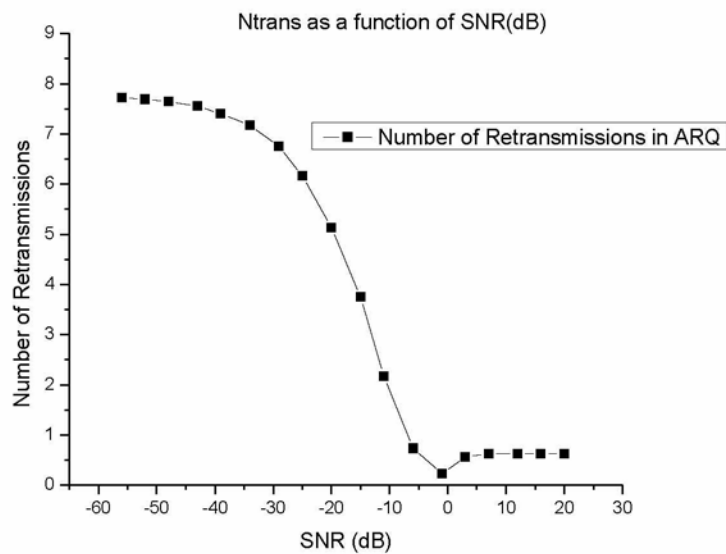
όπου V_{sense} , I_{sense} , T_{sense} είναι η τάση τροφοδοσίας, το ρεύμα ανά bit για ανίχνευση και ο χρόνος σε sec για να γίνει ανίχνευση 1 bit πληροφορίας. Έστω c ο αριθμός των επαναμεταδόσεων για επιτυχή παραλαβή και αποκωδικοποίηση ενός πακέτου όταν εφαρμοστεί ARQ. Η πιθανότητα επιτυχίας κατά την c^{th} μετάδοση είναι [3]:

$$Ntr_{ARQ}[c] = (1 - PER_{ARQ})(PER_{ARQ})^{c-1} \quad (16)$$

Συνεπώς ο μέσος αριθμός των επαναμεταδόσεων δίνεται προσεγγιστικά από [3]:

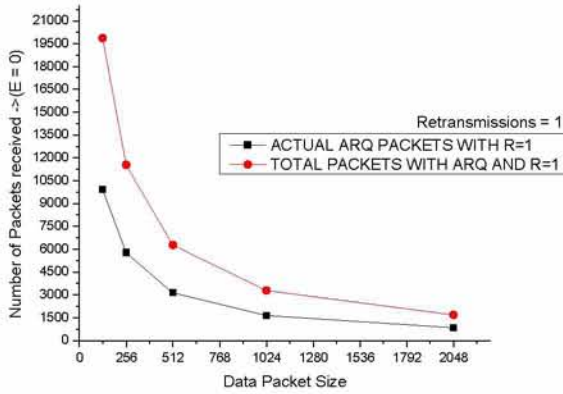
$$\overline{Ntr}_{ARQ} = \sum_{c=1}^{\infty} PER_{ARQ}[c]c \approx \frac{1}{(1 - PER_{ARQ})} \quad (17)$$

όπου PER_{ARQ} είναι packet error rate για ARQ και δίνεται από την σχέση (7), όπως ορίστηκε προηγουμένως. Βάση των σχέσεων (7), (10) και (17) μπορούμε να βρούμε προσεγγιστικά τον πλήθος επαναμεταδόσεων για διάφορα επίπεδα SNR στον δέκτη, που φαίνονται γραφικά στην εικόνα.

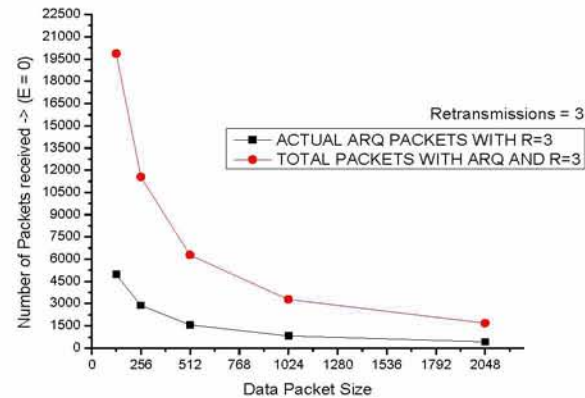


Εικόνα 4: Πλήθος επαναμεταδόσεων ανά επίπεδο SNR, για τεχνική ARQ

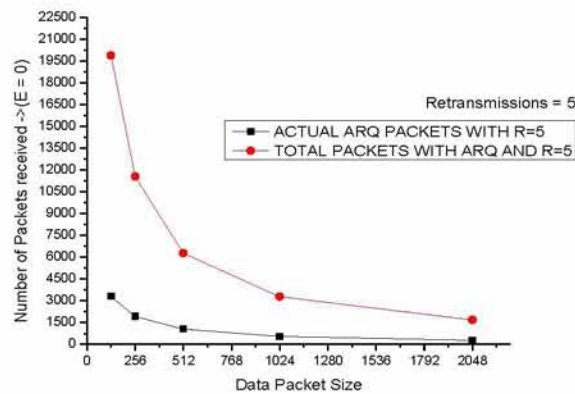
Καθίσταται φανερό από την όλη ανάλυση μέχρι στιγμής, ότι η εφαρμογή ECC για καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας ακόμη και σε περιπτώσεις με χαμηλό SNR (χαμηλής ποιότητας κανάλι), επιφέρει σημαντική ενεργειακή επιβάρυνση σε κάθε κόμβο. Αυτό σημαίνει πως ένας κόμβος χωρίς τεχνικές ECC στέλνει κατά μέσο όρο περισσότερα πακέτα σε έναν γείτονά του. Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζουμε την επίδραση που έχει ο αριθμός των επαναμεταδόσεων Ntr_{ARQ} στο σύνολο των πακέτων που στέλνονται μέχρι ο κόμβος να εξαντλήσει όλα τα ενεργειακά του αποθέματα, δηλαδή μέχρι $E \sim 0$ Joules.



Εικόνα 5α: Πλήθος πακέτων DATA (μαύρη) και TOTAL (κόκκινη) για $N_{tr} = 1$ μέχρι $E = 0$



Εικόνα 5β Πλήθος πακέτων DATA (μαύρη) και TOTAL (κόκκινη) για $N_{tr} = 3$ μέχρι $E = 0$



Εικόνα 5γ: Πλήθος πακέτων DATA (μαύρη) και TOTAL (κόκκινη) για $N_{tr} = 5$ μέχρι $E = 0$

Από τις παραπάνω εικόνες είναι εμφανές το εξής: Με μαύρο χρώμα δείχνουμε τις καμπύλες που αφορούν πλήθος πακέτων πραγματικής πληροφορίας (actual data packets) και με κόκκινο χρώμα το πλήθος των πακέτων συνολικά, δηλαδή DATA + ARQ control πακέτα. Προφανώς πάντα τα πακέτα της πραγματικής πληροφορίας είναι λιγότερα. Όσο το πλήθος των επαναμεταδόσεων αυξάνει από 1 σε 3 και μετά σε 5 η απόσταση μεταξύ των καμπυλών αυξάνεται και στα τρία γραφήματα. Αυτό σημαίνει ότι όσο αυξάνει η παράμετρος N_{tr} , τόσο σπαταλάται ενέργεια για την λειτουργία του ARQ και όχι για την αποστολή και λήψη πραγματικής DATA πληροφορίας. Επίσης και στις τρεις εικόνες δείχνουμε την εξάρτηση του πλήθους των

πακέτων που στέλνει ο κόμβος μέχρι $E = 0$, από το μήκος του πακέτου k . Είναι λογικό όταν το k αυξάνεται να μειώνεται το πλήθος των πακέτων.

5.5.5 FEC Κατανάλωση Ενέργειας

Η τεχνική FEC αφορά την προσθήκη πλεοναζόντων bits (parity bits), τα οποία χρησιμοποιούνται για να διορθώσουν όποια bits του πακέτου έχουν ληφθεί λανθασμένα. Στην πράξη, ένας κόμβος χρειάζεται να ολοκληρώσει 3-way RTS-CTS-DATA handshake για FEC κωδικούς. Η κωδικοποίηση FEC βελτιώνει την ανθεκτικότητα σε σφάλματα συγκρινόμενη με την ARQ σε περιπτώσεις όπου οι επαναμεταδόσεις είναι αδύνατο να γίνουν ή κοστίζουν αρκετά σε όρους ενέργειας. Διαάφορα FEC σχήματα υπάρχουν στην βιβλιογραφία, τα οποία είναι βελτιστοποιημένα για συγκεκριμένα μήκη πακέτων, συνθήκες καναλιού, όπως linear block codes (BCH και Reed – Solomon codes) και κώδικες βασιζόμενοι στην συνέλιξη σημάτων (convolutional codes). Στην μελέτη [26] τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι οι BCH κώδικες υπερτερούν ενεργειακά έναντι του πιο αποδοτικού convolutional κωδικού. Συνεπώς για την μελέτη μας εφαρμόζουμε BCH.

Η ενέργεια που καταναλώνεται από τον πομπό όταν εφαρμόζεται FEC συμβολίζεται ως E_{Tx}^{fec} και δίνεται από την σχέση:

$$E_{Tx}^{fec} = E_{sense} + (1 - p_c) (E_{Tx}^R + E_{Rx}^C + E_{Tx}^D) \quad (18)$$

ενώ η ενέργεια του δέκτη, όταν η FEC είναι σε ισχύ, συμβολίζεται ως E_{Rx}^{fec} και δίνεται από:

$$E_{Rx}^{fec} = (1 - p_c) (E_{Rx}^R + E_{Tx}^C + E_{Rx}^D + E_{dec}^D) \quad (20)$$

όπου E_{dec} είναι η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την αποκωδικοποίηση του πακέτου βάση του BCH κώδικα. Η ενέργεια για την κωδικοποίηση του πακέτου θεωρείται αμελητέα και δεν την λαμβάνουμε υπόψη στην μελέτη αυτή. Η ενέργεια για την αποκωδικοποίηση ορίζεται ως συνάρτηση $BCH(n, k, t)$ και δίνεται από[27]:

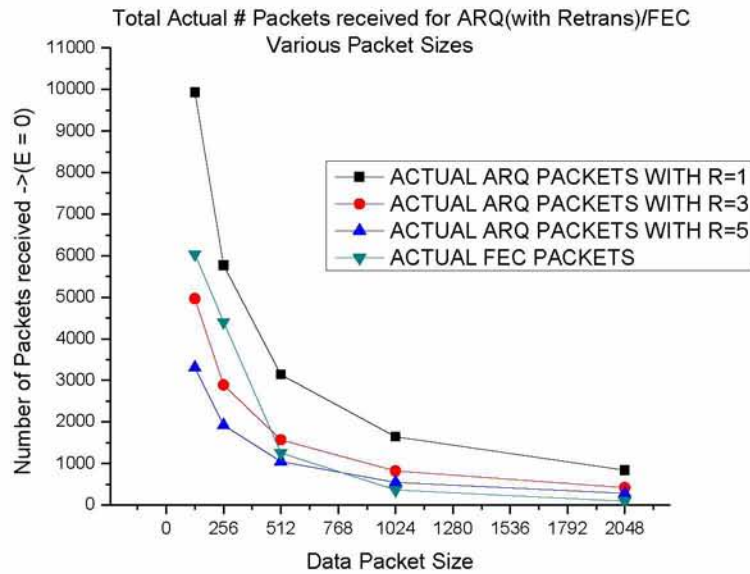
$$E_{dec} = I_{proc}V_{proc}(2nt + 2t^2)t_{cycle} \lceil \frac{3m}{8} \rceil \quad (21)$$

όπου I_{proc} είναι το ρεύμα του επεξεργαστή, V_{proc} η τάση τροφοδοσίας, t_{cycle} είναι 1 κύκλος λειτουργίας του επεξεργαστή και $m = \log_2(n + 1)$. Για κάθε θετικό ακέραιο, $m \geq 3$ και $t < 2^m - 1$, υπάρχει ένας δυαδικός BCH κωδικός με τα εξής χαρακτηριστικά [28]:

- Block length: $n = 2^m - 1$
- Number of parity check bits: $n - k \leq mt$
- Minimum distance: $d_{min} \geq 2t + 1$

Κάθε δυαδικός BCH(n,k,t) κωδικός μπορεί να διορθώσει μέχρι $t - \text{bit}$ λάθη, και συνεπώς ονομάζεται και ως $t - \text{error correcting}$ κωδικός.

Βάση της μελέτης στο [44], το κριτήριο της απόστασης μεταξύ των κόμβων καθώς επίσης το RSSI χρησιμοποιείται για να αποφασιστεί εάν η ARQ τεχνική είναι αποδοτικότερη ενεργειακά έναντι της FEC και το αντίστροφο. Βάση της ανάλυσης αυτής, μέχρι 40μ, είναι περισσότερο αποδοτικό να εφαρμόζεται ARQ διότι το κανάλι είναι καλό και δεν υπάρχουν μεγάλες αυξομειώσεις στην τιμή της εξασθένησης του σήματος. Για αποστάσεις όμως μεγαλύτερες, είναι ενεργειακά αποδοτικότερο να χρησιμοποιούνται είτε FEC είτε HARQ σχήματα. Στο σημείο αυτό, διεξάγουμε την δική μας ανάλυση για την σύγκριση σχημάτων ARQ/FEC. Όπως φαίνεται από την εικόνα 6, υπολογίσαμε το πλήθος των πακέτων που ανταλλάσσονται μεταξύ δύο κόμβων μέχρι να τελειώσει η ενέργειά τους. Η ARQ δοκιμάζεται με διάφορες τιμές επαναμεταδόσεων και συγκρίνεται με την FEC για διάφορες τιμές μήκους πακέτου. Για πακέτα με μήκος $> 512 \text{ bits}$, προτιμότερη ενεργειακά είναι η ARQ. Η μόνη περίπτωση που η FEC είναι αποδοτικότερη της ARQ, είναι για $N_{tr} = 5$, που με βάση την εικόνα 4, αντιστοιχεί σε $\text{SNR} = -20\text{dB}$. Συνεπώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι: 1) για $\text{SNR} \geq -20\text{dBm}$ ($N_{tr} \leq 5$) και 2) Μήκος πακέτου $\geq 512 \text{ bits}$, η ARQ είναι αποδοτικότερη της FEC/BCH.



Εικόνα 6: Πλήθος πακέτων DATA (μαύρη) και TOTAL (κόκκινη, μπλέ, πράσινο) για ARQ/FEC μέχρι $E = 0$

5.5.6 HARQ Κατανάλωση Ενέργειας

Η τεχνική HARQ στοχεύει να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματα από τις ARQ και FEC ώστε να αυξάνει την ανοχή σε σφάλματα μέσω του μηχανισμού των επαναμεταδόσεων. Η HARQ βελτιώνει την αξιοπιστία του ασύρματου μέσου, βασιζόμενη στην αποκωδικοποίησή του καναλιού (channel decoding) και στον μηχανισμό επαναμετάδοσης (link layer frame retransmission scheme). Εάν ένα σφάλμα σε ένα frame ανιχνευτεί από τον παραλήπτη, το σφάλμα διορθώνεται βάση κωδικοποίησης καναλιού. Διαφορετικά, ο παραλήπτης στέλνει ένα NACK στον αποστολέα, ο οποίος ξανα-στέλνει το πακέτο, κωδικοποιημένο με πιο ισχυρό FEC κωδικό.

Πρακτικά, ένας κόμβος πρέπει να ολοκληρώσει 4-way RTS-CTS-DATA-NACK handshake στην HARQ. Στην παρούσα μελέτη θεωρούμε μόνο 1 επαναμετάδοση όταν εφαρμόζουμε HARQ, δηλαδή $Ntr_{HARQ} = 1$.

Η κατανάλωση ενέργειας του αποστολέα, όταν η HARQ είναι σε ισχύ, συμβολίζεται με E_{Tx}^{harq} και δίνεται από:

$$E_{Tx}^{harq} = E_{sense} + (1 - p_c)(E_{Tx}^R + E_{Rx}^C + E_{Tx}^{D1} + E_{Tx}^{D2} + E_{Rx}^{NACK}) \quad (22)$$

και η κατανάλωση ενέργειας στον δέκτη, όταν η HARQ είναι σε ισχύ, συμβολίζεται με E_{Rx}^{harq} και δίνεται από:

$$E_{Rx}^{harq} = (1 - p_c)(E_{Rx}^R + E_{Tx}^C + E_{Rx}^{D1} + E_{Rx}^{D2} + E_{dec}^{t1} + E_{dec}^{t2} + E_{Rx}^{NACK}) \quad (23)$$

όπου οι δείκτες D_1 και D_2 αναφέρονται στο 1^ο και 2^ο πακέτο μετάδοσης σε HARQ(t_1, t_2), και t_1, t_2 με $t_1 < t_2$ είναι error correcting capabilities. Δεδομένου ότι ένα πακέτο μπορεί να είναι μεγαλύτερο από block length n , ειδικά όταν μικρά block lengths χρησιμοποιούνται, οι παραπάνω σχέσεις που αφορούν τις FEC συναρτήσεις ενέργειας θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν με $C_{number} = \left\lceil \frac{l}{k} \right\rceil$, όπου $\left\lceil \frac{l}{k} \right\rceil$ είναι ο αριθμός των blocks που χρειάζεται για να σταθλούν κωδικοποιημένα l bits.

5.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΛΥΣΗ

5.6.1 Μοντελοποίηση Προβλήματος

Στα Α.Δ.Α. , η ενέργεια που απαιτείται για να εκτελέσουν διάφορες εργασίες είναι υψηλή και θα πρέπει να ελαχιστοποιείται. Βάση της μελέτης στο [29] το περισσότερο ενεργειακά απαιτητικό έργο για έναν κόμβο είναι η επικοινωνία του με άλλους κόμβους. Σε μία ενεργειακά βέλτιστη και αποδοτική τοπολογία Α.Δ.Α., θα πρέπει κανείς να είναι πολύ προσεκτικός όταν εφαρμόζει πρωτόκολλα τα οποία προσαρμόζουν την ισχύ εκπομπής ή όταν εφαρμόζει κωδικούς διόρθωσης σφαλμάτων. Για το σκοπό αυτό, αρχικά δημιουργούμε μία τυχαία τοπολογία, η οποία ικανοποιεί συγκεκριμένους περιορισμούς κάλυψης (coverage) και συνδεσιμότητας (connectivity), τοποθετώντας τους κόμβους εντός πλέγματος, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2. Έπειτα εφαρμόζοντας ευρετικό αλγόριθμο (SA, RS), προσαρμόζουμε σταδιακά την τιμή της ισχύος εκπομπής, του μήκους πακέτου και αλλάζουμε τις θέσεις των κόμβων ώστε η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης F που ορίζουμε να μειώνεται και να ελαχιστοποιείται. Το πρόβλημα της κοινής βελτιστοποίησης (joint optimization) με παραμέτρους που αφορούν διάφορα στρώματα και επίπεδα του OSI (cross layer design and optimization) με ταυτόχρονη διαχείριση τοπολογίας δικτύου

είναι ένα σύνθετο πρόβλημα, το οποίο αποδεικνύουμε ότι ανήκει στην κλάση NP – Complete (βλέπε απόδειξη στο Παράρτημα).

Πρακτικά, ο περιορισμός της συνδεσιμότητας (connectivity constraint) ικανοποιείται όταν $\overline{Pr}_i \geq Pr_{min}$ για όλα τα πακέτα που στέλνονται από κάθε κόμβο i με $i = 1 \dots N$ και \overline{Pr}_i είναι η μέση ισχύς σήματος που φτάνει στο σταθμό βάσης. Αναλόγως, ο περιορισμός της κάλυψης ικανοποιείται όταν για κάθε τοπολογία j που παράγεται και αξιολογείται, η ακόλουθη ανισοσύτητα ισχύει: $COV_j \geq COV_{min}$, όπου COV_j είναι η τιμή της κάλυψης περιοχής σε ποσοστό της τοπολογίας j . Οι τιμές των COV_{min} και Pr_{min} σε συνδιασμό με τις παραμέτρους του SA καθορίζουν την ποιότητα της τελικής λύσης σε όρους κατανάλωσης ενέργειας και κάλυψης. Συνεπώς ορίζουμε την ακόλουθη αντικειμενική συνάρτηση F του προβλήματος κοινής βελτιστοποίησης, που δίνεται από την σχέση (24):

$$\begin{aligned} \min_{P_t, L_{data}}: & & F &= w_1 \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_c \right\} + w_2 \left\{ \frac{1}{COV_j} \right\} \\ \text{s.t.} & & P_t &\leq P_{max}, (C1) \\ & & L_{data} &\leq L_{max}, (C2) \\ & & COV_j &\geq COV_{min}, (C3) \\ & & \overline{Pr}_i &\geq Pr_{min}. (C4) \end{aligned}$$

Η συνάρτηση F ενσωματώνει δύο παράγοντες οι οποίοι είναι ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη Α.Δ.Α. : *κατανάλωση ενέργειας* (energy consumption) και *κάλυψη δικτύου* (network coverage). Οι σχεδιαστές Α.Δ.Α ενδιαφέρονται να προτείνουν ένα σύστημα που να καταναλώνει την ελάχιστη ενέργεια και να προσφέρει εκτεταμένη κάλυψη ανίχνευσης. Συνεπώς, η συνάρτηση F έχει τα βάρη w_1 και w_2 , με $0 \leq w_1, w_2 \leq 1$ και $w_1 + w_2 = 1$ που το κάθε ένα αναφέρεται στους παραπάνω παράγοντες. Ο κάθε σχεδιαστής μπορεί να δώσει μεγαλύτερη σημασία στον έναν ή τον άλλον παράγοντα, επηρεάζοντας και διαφορετικά την τιμή της F . Ο περιορισμός (C1) αναφέρεται στην ισχύ μετάδοσης που χρησιμοποιεί ο κάθε κόμβος, η τιμή της οποίας οριοθετείται από την P_{max} και ο

(C2) αναφέρεται στο μήκος το πακέτου που ο κάθε κόμβος χρησιμοποιεί, η τιμή του οποίου οριοθετείται από την L_{max} . Οι τιμές αυτές είναι κοινές για όλους τους κόμβους της τοπολογίας. Επιπρόσθετα, ο περιορισμός (C3) αναφέρεται στην κάλυψη δικτύου και ο (C4) στην συνδεσιμότητα δικτύου.

5.6.2 Λύση μέσω Simulated Annealing (SA) και Random Sampling (RS)

Όπως εξηγήθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο η τεχνική βελτιστοποίηση Simulated Annealing (SA) είναι μία ευρετική μέθοδος βελτιστοποίησης γενικού σκοπού. Είναι μία επέκταση της μεθόδου Monte Carlo που εφαρμόζεται σε φυσικά συστήματα για να προσομοιώσει μία κατάσταση ισορροπίας μίας συλλογής μεγάλου αριθμού ατόμων για μία δεδομένη θερμοκρασία T και είναι μία ειδική περίπτωση ευρύτερης κατηγορίας ευρετικών αλγορίθμων συνδιαστικής βελτιστοποίησης. Ο SA εφαρμόζεται σε σύνθετα, μη γραμμικά και NP-Complete προβλήματα [23]. Σύμφωνα με την λειτουργία του, επιχειρεί να αντικαταστήσει μία τρέχουσα εφικτή λύση με μία νέα λύση εντός του πεδίου των αποδεκτών λύσεων, που προκύπτει από μία τυχαία επιλογή (perturbation) εντός του συνόλου των λύσεων. Ο SA συμπεριφέρεται ως μία στοχαστική παραλλαγή του αλγορίθμου τοπικής αναζήτησης αφού ενσωματώνει ένα πιθανοκρατικό κριτήριο αποδοχής χειρότερης ποιοτικά λύσης έναντι καλύτερης ώστε να μην παγιδευτεί σε τοπικά ελάχιστα/μέγιστα του συνόλου των εφικτών λύσεων. Η ποιότητα της τελικής προσεγγιστικά βέλτιστης λύσης (near optimal solution) εξαρτάται από μία παράμετρο ελέγχου (control parameter), γνωστή ως θερμοκρασία T .

Στο σημείο αυτό είναι δόκιμο να συνδέσουμε τις έννοιες που αφορούν το πρόβλημα του κεφαλαίου αυτού όπως μορφοποιήθηκε με τις έννοιες και τις παραμέτρους του SA. Συγκεκριμένα, ορίζουμε ως κατάσταση S μία συγκεκριμένη τριάδα λύσης ($P_t, L_{data}, Sensors Coordinates$), όπου P_t και L_{data} ικανοποιούν τους περιορισμούς (C1) και (C2) αντίστοιχα. Οι συντεταγμένες των κόμβων καθορίζουν την τοπολογία προς εξέταση. Άρα ως κατάσταση (state) S εννοούμε μία εφικτή λύση της αντικειμενικής συνάρτησης F .

Algorithm 1 Simulated Annealing Algorithm

1. *Initialise Parameters:*

$S = S_0$, $T = T_0$, $iterations = 0$

$L =$ upper iterations bound of inner loop

repeat

repeat

 a. $NewS = Nei(S)$

 b. $DE = obj(NewS) - obj(S)$

 c. if $((DE < 0) \text{ or } (rand() < \exp(-DE/T)))$ then $S = NewS$, $iterations ++$

 else $iterations ++$

until $(iterations \leq L)$

2. *Update Parameters:*

$T = cooling(T)$, $L = \beta \times L$

until $STOP_C$ is TRUE

Εικόνα 7: Simulated Annealing Αλγόριθμος

Σε προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε η λειτουργία του SA. Συνοπτικά για την παρούσα μελέτη υπενθυμίζουμε τα βήματά του. Η εικόνα 7 απεικονίζει την λειτουργία του SA. Ξεκινά με τον υπολογισμό μίας αρχικής κατάστασης S_0 και μίας αρχικής θερμοκρασίας T_0 . Η θερμοκρασία αρχικοποιείται σε μία αρκετά μεγάλη τιμή συγκρινόμενη με την τελική τιμή της $T_{final} \sim 0$ για να αποφύγει προώρη σύγκλιση. Στο βήμα a. μία νέα κατάσταση παράγεται χρησιμοποιώντας την συνάρτηση $Nei()$ η οποία υπολογίζει μία τριπλέτα λύσης ($P_t, L_{data}, Sensors Coordinates$). Η τρέχουσα και η επόμενη κατάσταση αξιολογούνται βάση της συνάρτησης $obj()$ στο βήμα b., η οποία δίνει την τιμή της λύσης σε όρους κόστους της αντικειμενικής συνάρτησης F . Στο βήμα c. μία απόφαση λαμβάνεται εάν θα δεχθούμε ή θα απορρίψουμε μία νέα λύση. Εάν (για προβλήματα ελαχιστοποίησης) η διαφορά τους είναι μικρότερη του μηδέν, τότε η νέα κατάσταση είναι αποδεκτή με πιθανότητα 1. Διαφορετικά η χειρότερη λύση είναι αποδεκτή βάση πιθανότητας που ακολουθεί κατανομή Boltzman [31]. Η συνάρτηση $rand()$ αποτελεί γεννήτρια τυχαίων αριθμών ομοιόμορφα κατανεμημένων σε διάστημα (0..1) και το εσωτερικό loop επαναλαμβάνεται L φορές.

Κατόπιν, στην φάση parameters update, η T μειώνεται με κάποιον ρυθμό ο οποίος δίνεται είτε γεωμετρικά, είτε λογαριθμικά είτε γραμμικά [33], αναλόγως από την συνάρτηση $cooling()$. Στην παρούσα μελέτη στις προσομοιώσεις μας

εξετάζουμε την επίδραση των τριών συναρτήσεων μείωσης θερμοκρασίας στα τελικά αποτελέσματα. Η παράμετρος L ορίζει το άνω όριο της εσωτερικής επαναληπτικής δομής και η τιμή της ενημερώνεται (μεγαλώνει) καθώς η T μικραίνει ώστε να δίνεται στον SA μεγαλύτερος “χώρος” στην εξερεύνηση των λύσεων. Η επιλογή των παραμέτρων του SA καθορίζει την ποιότητα της τελικής λύσης και τον χρόνο που χρειάστηκε (πλήθος επαναλήψεων αλγορίθμου) μέχρι να συγκλίνει [31].

Η θεωρία ορίζει ότι θα πρέπει να επιτρέπονται πολλές επαναλήψεις ανά τιμή θερμοκρασίας, ώστε το σύστημα να σταθεροποιείται για την τιμή της θερμοκρασίας αυτής και μετά η θερμοκρασία να μειώνεται [8]. Αυτό είναι απαραίτητο για τον αλγόριθμο να εξερευνεί μεγάλο πλήθος λύσεων από το σύνολο των εφικτών λύσεων. Μπορούμε να το επιτύχουμε αυτό είτε επιλέγοντας μεγάλη τιμή για το L , είτε μικρή αλλά αργό ρυθμό cooling ή να ισορροπήσουμε κάπου ανάμεσα στις δύο αντιφατικές επιλογές. Τέλος, σημειώνουμε ότι ο SA δεν είναι ντετερμινιστικός στην επιλογή και αξιολόγηση των λύσεων και θα παράγει διαφορετικές τελικές λύσεις για κάθε στιγμιότυπο εκτέλεσής του, ακόμη και αν οι αρχικές συνθήκες (τιμές των παραμέτρων) είναι οι ίδιες. Αυτό συμβαίνει λόγω της πιθανοκρατικής φύσης του να επιλέγει λύσεις χειρότερες έναντι καλύτερες. Δεν υπάρχει εγγύηση εύρεσης της πραγματικά βέλτιστης τιμής σε πολυωνυμικό χρόνο, συνεπώς ο SA είναι εφαρμόσιμος σε προβλήματα σύνθετα, κοινής βελτιστοποίησης με πολλές παραμέτρους στην αντικειμενική συνάρτηση [30].

Με σκοπό να προσαρμόσουμε τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος βελτιστοποίησης του κεφαλαίου αυτού στην λειτουργία του SA, πρέπει να τροποποιήσουμε και να προσαρμόσουμε τα ακόλουθα στοιχεία: 1) Την αρχική διαδικασία παραγωγής λύσης 2) την διαδικασία εύρεσης γειτονικής (επόμενης) λύσης και 3) το κριτήριο αποδοχής μίας τοπολογίας [29]. Για να παράγουμε μία αρχική λύση, καλούμε την συνάρτηση $Nei()$, η οποία χρησιμοποιεί την $rand()$ για να παράγει ένα νέο ζεύγος (P_t, L_{data}) και συντεταγμένες (x, y) για έναν κόμβο που επιλέγει να μετακινήσει εντός του πλέγματος. Κατάλληλοι έλεγχοι πρέπει να γίνουν ώστε να μετακινηθεί ένας κόμβος σε νέα θέση που δεν κατέχεται από κάποιον άλλον. Όλες οι παραγόμενες τοπολογίες αξιολογούνται σε όρους κάλυψης και συνδεσιμότητας, όπως ορίζει το πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Σε κάθε επανάληψη του SA, εφαρμόζουμε μία Boolean συνάρτηση με όνομα $Check(TOPO)$, η οποία αξιολογεί την κάθε εξεταζόμενη τοπολογία προς τους περιορισμούς (C1) και (C2). Η συνάρτηση αυτή λειτουργεί ως φίλτρο που απορρίπτει όλες τις προβληματικές τοπολογίες, οι οποίες παραβιάζουν τουλάχιστον έναν από τους παραπάνω περιορισμούς. Συνεπώς, κάθε κατάσταση S , προτού αξιολογηθεί ως τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης F , περνά από το φίλτρο. Η $Check(TOPO)$ ακολουθεί τα λογικά βήματα που φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:

```

For each  $TOPO_j$   $j = 1, \dots, K$ . DO
  1) If  $(COV_j \geq COV_{min})$  Then goto (2) Else goto (4)
  2) For each node  $i = 1, \dots, N$ . in each topology
      If  $(\overline{Pr}_i \geq Pr_{min})$  Then goto (3) Else goto (4)
  3)  $Check(TOPO_j) = TRUE$ 
  4)  $Check(TOPO_j) = FALSE$ 
END-FOR

```

Εικόνα 8: Ψευδοκώδικας βημάτων ελέγχου εγκυρότητας τοπολογίας

Μία πρακτική εφαρμογή του SA απαιτεί να παραχθεί ορισμένη ακολουθία από τιμές που αντιστοιχούν σε θερμοκρασία T και ορισμένος αριθμός L μεταβάσεων σε καταστάσεις για κάθε θερμοκρασία. Για να είναι αυτό εφικτό, ένα κατάλληλο *cooling schedule* (CS) πρέπει να καθοριστεί. Ένα CS του SA αποτελείται από τα εξής μέρη:

- *Αρχική Θερμοκρασία (Initial Temperature)*: Η αρχική τιμή της θερμοκρασίας θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε οποιαδήποτε νέα κατάσταση παράγεται να επιλέγεται αρχικά με πιθανότητα κοντά στο 1, ακόμη και αν είναι χειρότερη. Υψηλές τιμές θερμοκρασίας θα επιτρέψουν την κίνηση σε οποιαδήποτε “γειτονιά” λύσεων του πεδίου των λύσεων με επιτυχία. Ωστόσο εάν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή, τότε ο SA συμπεριφέρεται ως brute force.
- *Τελική Θερμοκρασία (Final Temperature)*: Η τελική θερμοκρασία συνήθως προσεγγίζει τιμή κοντά στο μηδέν, και μπορεί να αποτελεί κριτήριο σύγκλισης για τον $STOP_C$ για τον SA. Η πολύ χαμηλή τιμή

της θερμοκρασίας μπορεί να επιβραδύνει σημαντικά το χρόνο τερματισμού του αλγορίθμου, ειδικά όταν λογαριθμικός ρυθμός μείωσης θερμοκρασίας είναι σε εφαρμογή, όπως και δείχνουμε στη συνέχεια. Ωστόσο στην πράξη, η θερμοκρασία δεν είναι απαραίτητο να φτάσει το 0, αφού η πιθανότητα για αποδοχή χειρότερης λύσης είναι η ίδια εάν η θερμοκρασία είναι κοντά στο 0. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα έχει “παγώσει” και έχει επέλθει ισορροπία.

- *Αριθμός επαναλήψεων L* : Σύμφωνα με το [32], το πλήθος των επαναλήψεων ανά τιμή θερμοκρασίας πρέπει να είναι αρκετά υψηλό, έτσι ώστε εάν καμία νέα κατάσταση δεν έχει γίνει αποδεκτή, ο αλγόριθμος να μπορεί να εξερευνήσει κάθε γειτονική κατάσταση μιας τρέχουσας κατάστασης με μεγάλη πιθανότητα κοντά στο 1. Στην μελέτη [30] ο αριθμός των επαναλήψεων δεν είναι σταθερός και αυξάνεται όταν η θερμοκρασία μειώνεται. Η λογική πίσω από αυτό προκύπτει εάν θεωρήσουμε την παράμετρο L ότι εκφράζει το μήκος ομογενούς Μαρκοβιανής αλυσίδας [32].
- *Ρυθμός μείωσης θερμοκρασίας – cooling function/schedule*: Αυτή η συνάρτηση είναι απαραίτητη για την μείωση της θερμοκρασίας. Βοηθά τον SA να μεταβεί από T_{init} σε T_{final} και να ικανοποιήσει το κριτήριο σύγκλισης. Ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας, είναι κρίσιμος για τον χρόνο σύγκλισης και την ποιότητα της λύσης. Κάθε φορά που L σε πλήθος μεταβάσεις καταστάσεων πραγματοποιούνται, η θερμοκρασία μειώνεται με σταθερό ρυθμό. Ονομάζουμε το συνολικό αριθμό επαναλήψεων που απαιτείται από T_{init} σε T_{final} ως *Temperature Cycle*.

Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις μείωσης θερμοκρασίας είναι οι ακόλουθες [34]:

1. *Λογαριθμικές (Logarithmic)* και δίνονται από τις σχέσεις:

Logarithmic1:

$$T_k = \frac{T_o}{1 + \log(1 + k)}$$

Logarithmic2:

$$T_k = \frac{d}{\log(1 + k)}$$

όπου T_0 είναι η αρχική θερμοκρασία, k είναι temperature cycle και d είναι ένας θετικός ακέραιος, ο οποίος βάση της μελέτης [32] αποτελεί την απόσταση από μία κατάσταση S προς την βέλτιστη S^* . Στην περίπτωση της λογαριθμικής μείωσης, ο SA απαιτεί απαγορευτικό χρόνο για να συγκλίνει, συγκρινόμενος με γεωμετρικό σχήμα. Λόγω λοιπόν της πολύ αργής μείωσης της θερμοκρασίας, είναι προτιμητέο να ισχύει $L = 1$ σε κάθε θερμοκρασία.

2. *Γεωμετρικές (Geometric)* και δίνονται από τις σχέσεις:

Geometric1:

$$T_k = T_o a^k$$

Geometric2:

$$T_{k+1} = T_k a$$

Ο παράγοντας μείωσης στο γεωμετρικό cooling συμβολίζεται με a . Συνήθως η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 0.8 και 0.99. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του, τόσο ο ρυθμός της μείωσης θερμοκρασίας είναι αργός και άρα χρειάζεται περισσότερος χρόνος και επαναλήψεις μέχρι τη σύγκλιση.

3. *Γραμμική (Linear)* και δίνεται από την σχέση:

$$T_k = T_o - nk$$

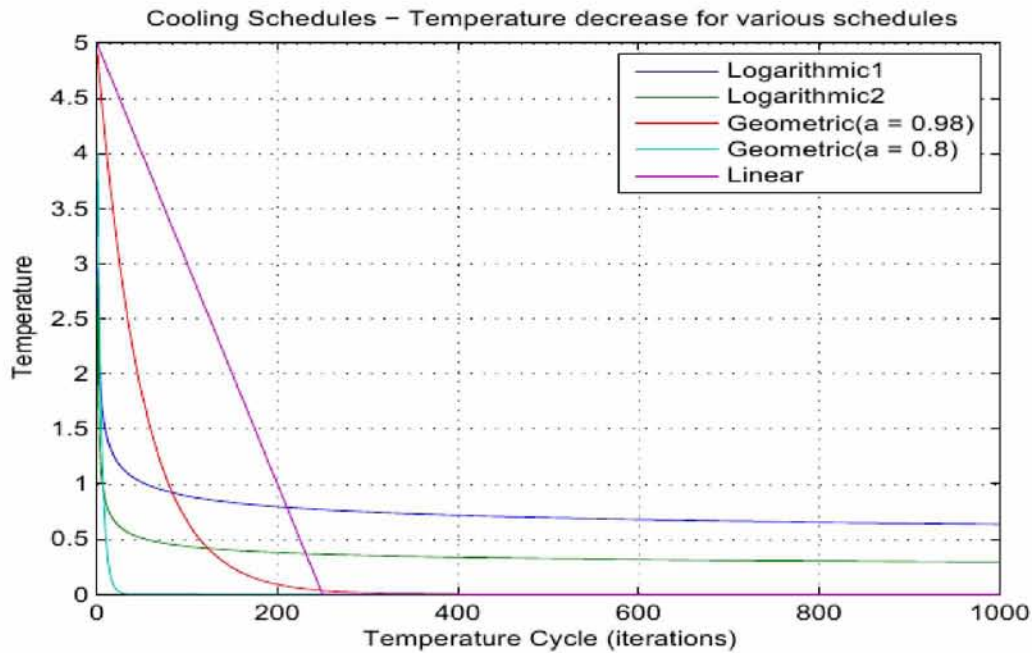
όπου T_0 η αρχική θερμοκρασία και $0 \leq n \leq 1$

Ποιο από τα παραπάνω σχήματα θα επιλέξει κανείς εξαρτάται από το πλήθος των επαναλήψεων μέχρι την σύγκλιση (χρόνος σύγκλισης) και την ποιότητα της λύσης. Συγκρίνουμε συνεπώς τα παραπάνω cooling schedules σε ότι αφορά το πλήθος των καταστάσεων που παράχθησαν κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του SA. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 1: Συνολικός αριθμός καταστάσεων που παράγονται ανά cooling schedule για: $T_0 = 15$, $T_{final} = 10^{-6}$, $\alpha = 0.98$, $L = 10$, $n = 0,002$ και $d = 2$

| Cooling Schedule | Total S.A. states |
|----------------------|-------------------|
| Geometric (a = 0.98) | 9120 |
| Geometric (a = 0.8) | 830 |
| Linear | 5000 |
| Logarithmic 1 | > 100000 |
| Logarithmic 2 | > 100000 |

Παρατηρούμε ότι το λογαριθμικό cooling schedule παράγει σημαντικά περισσότερες καταστάσεις συγκρινόμενο με τα υπόλοιπα και συμπεριφέρεται όπως οι μέθοδοι exhaustive search. Είναι συνετό να θεωρήσουμε άλλες γρηγορότερες μεθόδους μείωσης θερμοκρασίας, όπως γεωμετρικές και γραμμικές. Μία γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων του πίνακα 1 σχετικά με την σύγκριση των cooling schedules φαίνεται και στην εικόνα 9. Ενώ οι καμπύλες του γεωμετρικού και γραμμικού σχήματος έχουν προσεγγίσει το μηδέν, οι καμπύλες του λογαριθμικού είναι παράλληλες με τον άξονα X. Παρατηρούμε επίσης και μία διαφορά στις κλίσεις των καμπυλών μεταξύ geometric1 και geometric2. Αυτό οφείλεται στον παράγοντα a . Παρόλα αυτά, όταν εφαρμόζεται ευρετικός αλγόριθμος για λύση ενός σύνθετου προβλήματος, θέλουμε να προκύπτει προσεγγιστικά βέλτιστη λύση σε εύλογο χρονικό διάστημα (πολυωνυμικός χρόνος) και έχοντας διαθέσει τους λιγότερους επεξεργαστικούς πόρους για τις προσομοιώσεις.



Εικόνα 9: Μείωση θερμοκρασίας για κάθε cooling schedule ως συνάρτηση της temperature cycle για: $T_0 = 15$, $T_{final} = 10^{-6}$, $\alpha = 0.98$, $L = 10$, $n = 0,002$ και $d = 2$

Ο αλγόριθμος Random Sampling (RS) [30], είναι ένα παράδειγμα μίας γενικότερης κατηγορίας ευρετικών προσαρμοστικών αλγορίθμων. Δεν χρειάζεται καμία εξελιγμένη μαθηματική απόδειξη για να κατανοήσουμε ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει σε προσεγγιστικά βέλτιστη λύση, όποιο και αν είναι το στιγμιότυπο του προβλήματος για το οποίο εφαρμόζεται. Ωστόσο, δεν έχει τον πιθανοκρατικό χαρακτηριστικό του SA, διότι δέχεται μόνο καλύτερες λύσεις και άρα λειτουργεί ως greedy αλγόριθμος. Έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να “πιαστεί” σε τοπικό ελάχιστο/μέγιστο συγκρινόμενος με τον SA. Το πλεονέκτημά του όμως έναντι του SA είναι πως είναι πιο απλός στην υλοποίηση. Η μόνη απαίτηση που έχει είναι η γέννηση νέας τυχαίας εφικτής λύσης, δεδομένης μίας τρέχουσας. Ο RS απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:

Algorithm 2 Random Sampling Algorithm

1. *Initialise Parameters:*

Sol = initial random feasible solution;

repeat

a. $NewSol$ = generate another random feasible solution;

b. $DE = h(NewSol) - h(Sol)$;

c. if ($DE < 0$) then $Sol = NewSol$;

until $STOP_C$ is TRUE

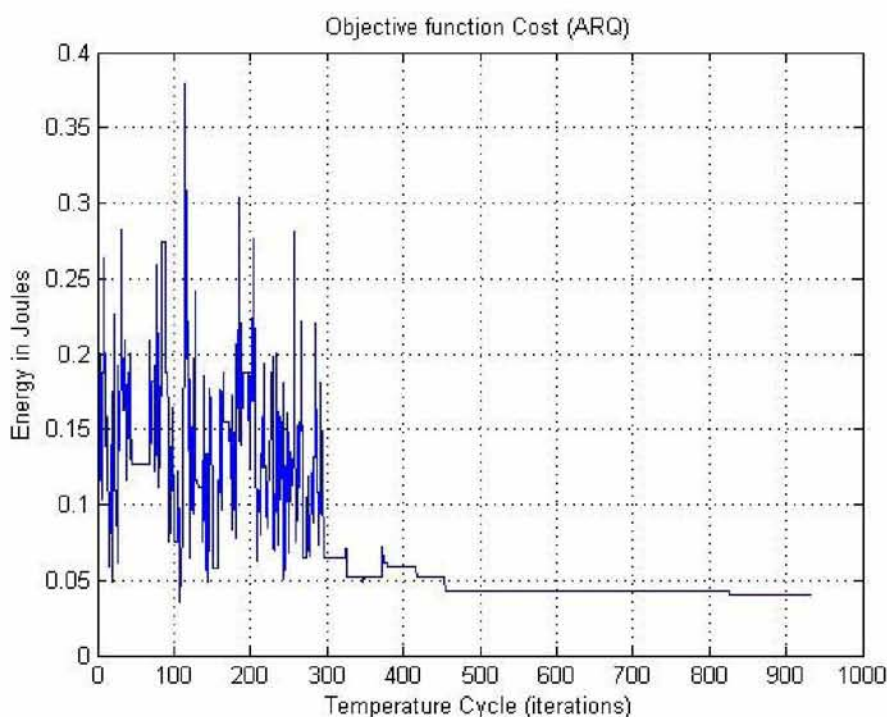
Εικόνα 10: Random Sampling Αλγόριθμος

Ομοίως στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει αντιστοίχιση των παραμέτρων του προβλήματός μας με τις λειτουργίες του RS. Μία εφικτή λύση σύμφωνα με το πρόβλημα βελτιστοποίησης που θέτουμε αντιστοιχεί επίσης σε μία τριάδα $(P_t, L_{data}, Sensors\ Coordinates)$ και sensor coordinates (x,y) ορίζουν μία τοπολογία. Στην φάση της αρχικοποίησης, μία αρχική εφικτή λύση Sol παράγεται. Αυτή η λύση είναι ένα στιγμιότυπο όλων των πιθανών τριάδων που θα μπορούσαν να παραχθούν και είναι έγκυρες ικανοποιώντας τους περιορισμούς (C1) και (C2). Στη συνέχεια στο βήμα a, μία νέα λύση NEW_{Sol} παράγεται και ελέγχεται για εγκυρότητα. Χρησιμοποιούμε την συνάρτηση $h()$ για να αξιολογήσουμε μία εφικτή λύση σε όρους τιμών αντικειμενικής συνάρτησης F . Μόνο λύσεις καλύτερες που οδηγούν σε μείωση του κόστους της F είναι αποδεκτές, όπως φαίνεται στο βήμα c.

5.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο σημείο αυτό, παραθέτουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εφαρμόζοντας SA για διάφορα cooling schedules και RS για την σύγκρισή τους. Υποθέτουμε τα χαρακτηριστικά υλικού Tmote Sky για τους κόμβους, οι οποίοι διαθέτουν επεξεργαστή τύπου MSP430F1611 και ραδιοκύκλωμα CC2420 [22]. Για να υπολογίσουμε την ενέργεια κατά την αποκωδικοποίηση πακέτου E_{dec} , χρησιμοποιούμε BCH(128,78,7) και στην περίπτωση τεχνικής HARQ, εφαρμόζουμε HARQ(3,7), όπου το πρώτο πακέτο κωδικοποιείται με $t_1 = 3$ και το δεύτερο με $t_2 = 7$. Όλες οι τιμές που σχετίζονται με ρεύματα στη λειτουργία transmit/receive καθώς επίσης και τάση τροφοδοσίας δίνονται στο [32] καθώς επίσης και στο Παράρτημα του τόμου.

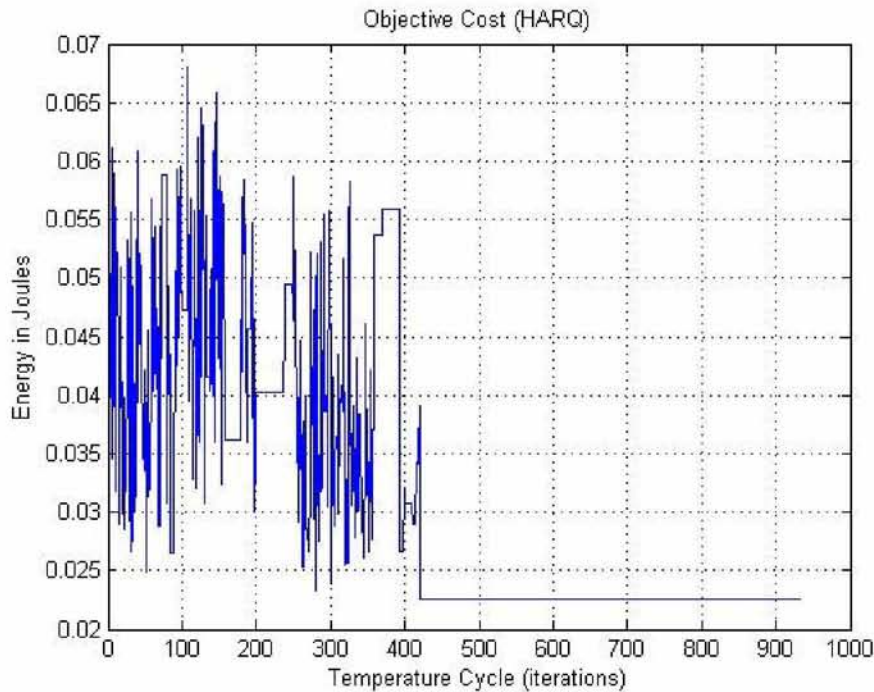
Θεωρούμε την αρχική τυχαία αλλά έγκυρη τοπολογία της εικόνας 2, η οποία ικανοποιεί τους περιορισμούς κάλυψης και συνδεσιμότητας όπως ορίστηκαν από το πρόβλημα. Η υπολογισμένη κάλυψη της αρχικής τοπολογίας φτάνει το 28% της ολικής επιφάνειας του πλέγματος. Ο σκοπός μας μέσω του SA είναι σταδιακά να προσαρμόσουμε κατάλληλα τις τιμές της ισχύος εκπομπής, του μήκους πακέτου και να αναδιανέμουμε τους κόμβους της τοπολογίας με σκοπό η τελική τοπολογία που θα προκύψει να καταναλώνει συνολικά λιγότερη ενέργεια και να αυξάνεται ο βαθμός κάλυψης.



Εικόνα 11: Μέση κατανάλωση ενέργειας δικτύου (in Joules) εφαρμόζοντας ARQ ως συνάρτηση της temperature cycle

Η εικόνα 11 απεικονίζει την μέση ενεργειακή κατανάλωση ως συνάρτηση της temperature cycle για ένα στιγμιότυπο εκτέλεσης του SA. Παρατηρούμε ότι οι τιμές της ενέργειας ταλαντώνονται έντονα μέχρι οι επαναλήψεις να φτάσουν τις 250. Μία τέτοια συμπεριφορά δικαιολογείται καθώς ο SA συμπεριφέρεται πιθανοκρατικά και για υψηλές θερμοκρασίες αποδέχεται χειρότερες λύσεις για να ξεφύγει από τοπικά ελάχιστα. Η συχνότητα (frequency) και το πλάτος (amplitude) της ταλάντωσης είναι άμεσα εξαρτώμενο από τις παραμέτρους του SA, όπως θερμοκρασία, cooling schedule, μήκος αλυσίδας Markov. Οι παράμετροι αυτοί ορίζουν την ποιότητα λύσης.

Όταν οι επαναλήψεις ξεπεράσουν τις 250, το κόστος (τιμή) της αντικειμενικής συνάρτησης μειώνεται και δείχνει να συγκλίνει στην τιμή 0.0357 Joules. Όταν η θερμοκρασία πέσει αρκετά, ο SA δείχνει να συμπεριφέρεται ως *gradient descent algorithm* και άρα επιλέγει μόνο καλύτερες λύσεις. Αυτό εξηγεί και την ευθεία γραμμή σύγκλισης στην τελική τιμή.



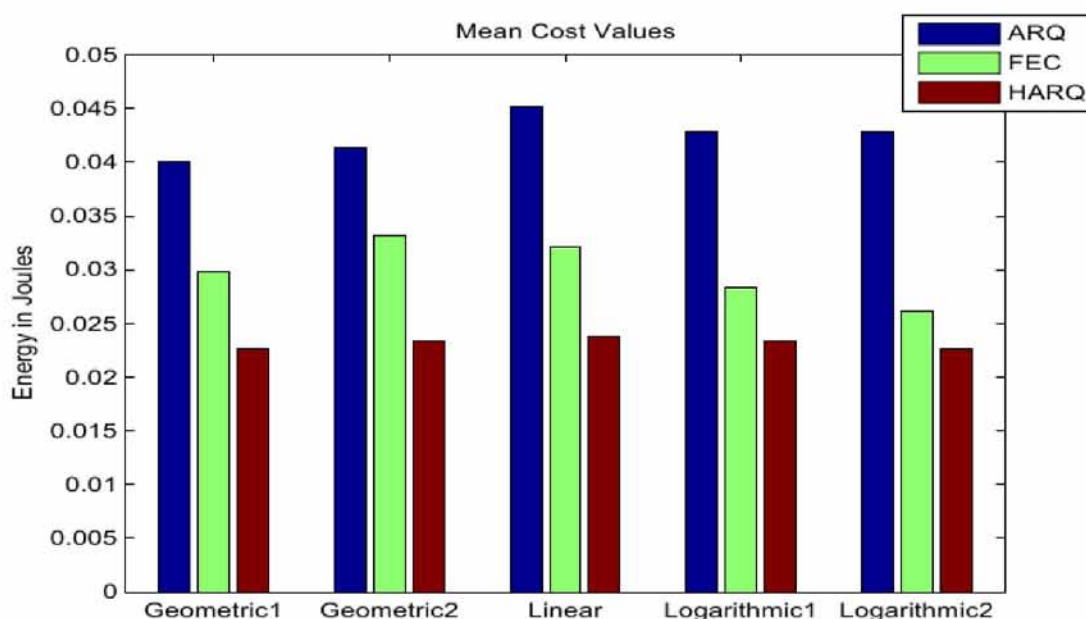
Εικόνα 12: Μέση κατανάλωση ενέργειας δικτύου (in Joules) εφαρμόζοντας HARQ ως συνάρτηση της temperature cycle

Πίνακας 2: Τιμή ενέργειας αντικειμενικής συνάρτησης, τιμή πακέτου, τιμή ισχύς εκπομπής, μέσος και τυπική απόκλιση από την εφαρμογή SA (geometric cooling) για ARQ, FEC, HARQ

| ECC scheme | BEST Cost (Joules) | Packet Length (bits) | P_{tr} (dBm) | Mean Cost (Joules) | Std |
|------------|--------------------|----------------------|----------------|--------------------|--------|
| ARQ | 0.0357 | 225 | -7 | 0.0400 | 0.0029 |
| FEC | 0.0253 | 296 | -5 | 0.0299 | 0.0058 |
| HARQ | 0.0214 | 256 | -1 | 0.0227 | 0.0008 |

Ομοίως η εικόνα 12 απεικονίζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όταν εφαρμόζεται η τεχνική HARQ. Οι ταλαντώσεις μέχρι την επανάληψη 400 είναι εμφανείς, αλλά έπειτα επέρχεται η σύγκλιση στην τιμή 0.0128 Joules που είναι μικρότερη της αντίστοιχης της ARQ. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού η HARQ εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα ARQ και FEC.

Ο πίνακας 2 παρουσιάζει την καλύτερη (best) και μέση (mean) ενεργειακή κατανάλωση δικτύου για ARQ, FEC, HARQ όταν το γεωμετρικό cooling εφαρμόζεται. Αφού όπως έχουμε αναφέρει ο SA έχει στοχαστική συμπεριφορά, δεν είναι δυνατό να παράγει τα ίδια αποτελέσματα σε κάθε στιγμιότυπο, ακόμη και για την λύση του ίδιου προβλήματος με ίδιες αρχικές συνθήκες. Συνεπώς έχουμε εκτελέσει 30 φορές τον SA για το ίδιο πρόβλημα και τις ίδιες παραμέτρους και καταγράφουμε μέσο και τυπική απόκλιση στα αποτελέσματα. Τα νούμερα φανερώσουν ότι η HARQ είναι προτιμητέα της ARQ, FEC. Κάτι τέτοιο φαίνεται και γραφικά στην εικόνα 12, από όπου φαίνεται η υπεροχή της HARQ για όλα τα cooling schedules.



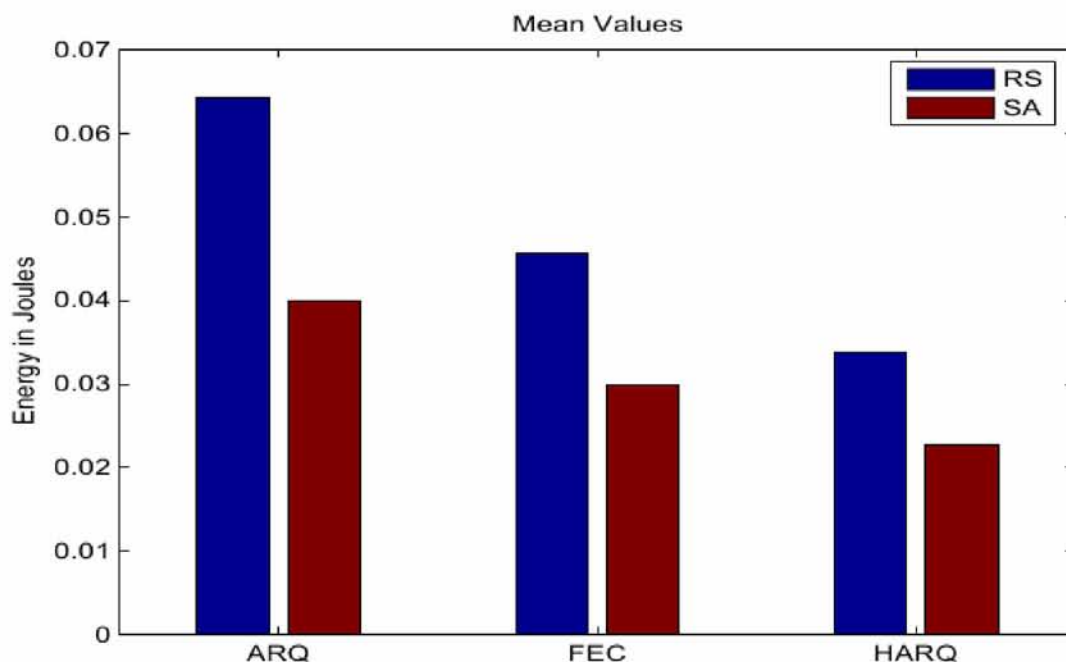
Εικόνα 13: Μέση ενεργειακή κατανάλωση δικτύου (Joules) για όλα τα cooling schedules όταν εφαρμόζεται SA

Στην ARQ η κατανάλωση ενέργειας κυμαίνεται από 0.0400 έως 0.0428 Joules, στην FEC από 0.0298 έως 0.0261 και στην HARQ από 0.0227 έως 0.0226 Joules. Συνεπώς, η HARQ οδηγεί σε 29% βελτίωση συγκρινόμενη με την FEC και σε 83% συγκρινόμενη με την ARQ.

Πίνακας 3: Τιμή ενέργειας αντικειμενικής συνάρτησης, τιμή πακέτου, τιμή ισχύος εκπομπής, μέση τιμή και τυπική απόκλιση από την εφαρμογή RS

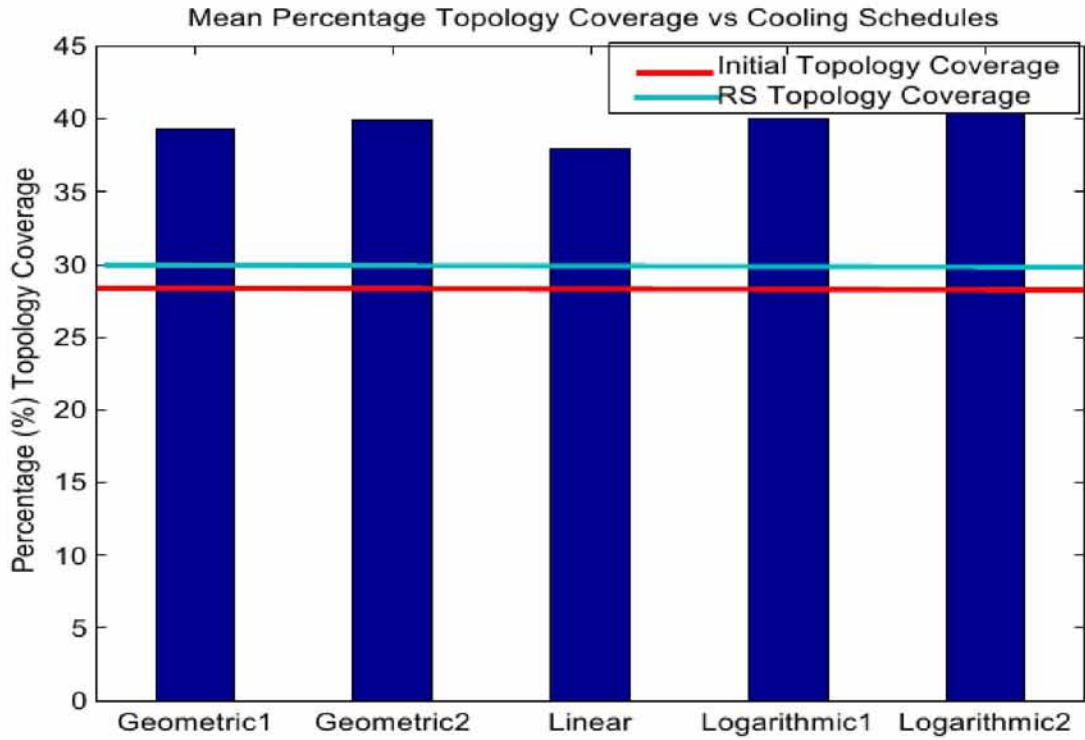
| ECC scheme | BEST Cost (Joules) | Packet Length (bits) | P_{tr} (dBm) | Mean Cost (Joules) | Std |
|------------|--------------------|----------------------|----------------|--------------------|--------|
| ARQ | 0.0462 | 302 | -10 | 0.0644 | 0.0058 |
| FEC | 0.0354 | 371 | -7 | 0.0456 | 0.0032 |
| HARQ | 0.0272 | 289 | -10 | 0.0338 | 0.0022 |

Αντίστοιχες τιμές ενέργειας, μήκους πακέτου και ισχύος εκπομπής παρουσιάζονται στον πίνακα 3, όταν εφαρμόζεται ο RS για ARQ, FEC και HARQ. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πινάκων 2 και 3, συμπεραίνουμε ότι ο SA οδηγεί σε χαμηλότερα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας για όλα τα εφαρμοζόμενα ECCs. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 13, για ARQ ο SA οδηγεί σε 62% λιγότερη ενεργειακή κατανάλωση, για FEC ο SA οδηγεί σε 53% λιγότερη και για HARQ ο SA οδηγεί σε 49% λιγότερη. Η εξήγηση εύλογα προκύπτει από την πιθανοκρατική συμπεριφορά του SA, που τον βοηθά να ξεφύγει από τοπικά μέγιστα/ελάχιστα. Συνεπώς, ο SA είναι περισσότερο πιθανό να συγκλίνει κοντινότερα στην βέλτιστη λύση του πεδίου εφικτών λύσεων. Ωστόσο ο RS είναι απλούστερος και μπορεί να εγγυηθεί εξίσου ποιοτικά αποτελέσματα.

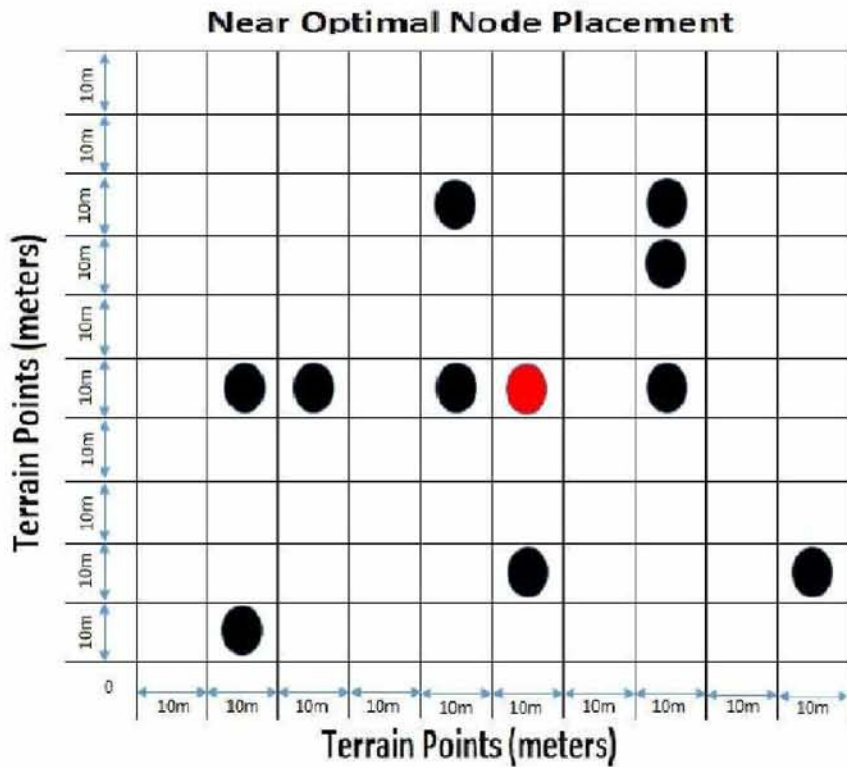


Εικόνα 14: Σύγκριση SA και RS σχετικά με την μέση ενεργειακή κατανάλωση για ARQ, FEC και HARQ.

Όσον αφορά την κάλυψη του δικτύου που ενσωματώνει η αντικειμενική συνάρτηση F , μία συγκριτική μελέτη μεταξύ του SA και RS φαίνεται στην εικόνα 14. Το όριο του 28% κάλυψης (κόκκινη γραμμή) το θέτει η αρχική τοπολογία της εικόνας 2. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα είναι ότι ο SA για όλα τα cooling schedules καταφέρνει να προτείνει μία τελική βέλτιστη τοπολογία, ο βαθμός κάλυψης της οποίας είναι μεγαλύτερος από 28% και φτάνει κοντά στο 40%. Αυτό έγινε από την συνεχή μετακίνηση των κόμβων εντός του πλέγματος κατά την διάρκεια των επαναλήψεων της προσομοίωσης. Συνεπώς ο SA πετυχαίνει να επιμηκύνει την κάλυψη του δικτύου. Ομοίως, ο RS αυξάνει τον βαθμό κάλυψης στο 30%, το οποίο είναι μεγαλύτερο από το αρχικό όριο, αλλά πολύ κοντά του. Και για τον παράγοντα της κάλυψης του δικτύου ο SA οδηγεί σε καλύτερο αποτέλεσμα σε σύγκριση με τον RS, για όλα τα εφαρμοζόμενα cooling schedules.



Εικόνα 15: Σύγκριση μεταξύ SA και RS όσο αφορά τον παράγοντα κάλυψη της βέλτιστης τοπολογίας και της αρχικής για όλα τα cooling schedules



Εικόνα 16: Τελική προτεινόμενη βέλτιστη τοπολογία του SA

Τέλος, στην εικόνα 16 απεικονίζεται η βέλτιστη τοπολογία όπως προτείνεται από τον SA. Παρατηρούμε ότι συγκρινόμενη με την αρχική τοπολογία της εικόνας 2, όλοι οι κόμβοι έχουν αλλάξει θέσεις με τρόπο που να έρχονται πιο κοντά στο GW, ώστε να καταναλώσουν λιγότερη ενέργεια κατά την 1-hop επικοινωνία τους. Ωστόσο, δεν μπορούν να πλησιάσουν περισσότερο διότι θα παραβιαστεί κάποιους από τους περιορισμούς. Η τελική τοπολογία πετυχαίνει βαθμό κάλυψης 42%.

5.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Στην παρούσα μελέτη, προτείνουμε μία εφαρμογή του SA με σκοπό να πετύχουμε κοινή βελτιστοποίηση της ισχύος εκπομπής, του μήκους πακέτου και της τοποθέτησης των κόμβων εντός πλέγματος (διαχείριση τοπολογίας) σε A.Δ.Α. με μέθοδο cross layer βελτιστοποίησης. Αρχικά παρέχουμε ανάλυση της ενεργειακής κατανάλωσης η οποία ενσωματώνει παραμέτρους ισχύος, πλήθος επαναμεταδόσεων, μήκος πακέτου και παραμέτρους του φυσικού επιπέδου. Η ανάλυση προκύπτει με cross layer τρόπο. Η επαναμετάδοση των πακέτων προκύπτει από τα σχήματα ECC όπως ARQ, FEC και HARQ. Στη συνέχεια ορίζουμε και μορφοποιούμε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που αφορά τη μέση ενεργειακή κατανάλωση με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί και τη συνολική κάλυψη δικτύου με σκοπό να επιμηκυνθεί. Με τον τρόπο αυτό, η αντικειμενική συνάρτηση ενσωματώνει και την ενέργεια και την κάλυψη. Το πρόβλημα αποδεικνύεται ότι είναι σύνθετο και λύνεται με SA ευρετικό αλγόριθμο. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος αρχίζει από μία πρώτη λύση θεωρώντας τιμές για μήκος πακέτου, ισχύς εκπομπής και θέσεις κόμβων και η αντικειμενική συνάρτηση αξιολογείται. Έπειτα παράγονται νέες εφικτές λύσεις και αξιολογούνται σταδιακά μέχρι να επέλθει σύγκλιση σε βέλτιστο σημείο. Ο SA συμπεριφέρεται πιθανοκρατικά και σε κάθε επανάληψή του μπορεί να επιλέξει χειρότερες λύσεις έναντι καλύτερων. Η επιλογή των παραμέτρων θερμοκρασίας και cooling schedule επηρεάζουν σημαντικά την τελική λύση.

Στις προσομοιώσεις της μελέτης αυτής δείξαμε ότι η τεχνική HARQ προτιμάται σε σχέση με τις ARQ, FEC όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση, για όλα τα cooling schedules που δοκιμάστηκαν. Επιπροσθέτως, ο SA φαίνεται να παράγει λύσεις που αφορούν ισχύ μετάδοσης, μήκος πακέτου και τοπολογία που

οδηγούν σε επιμήκυνση της κάλυψης εάν το συγκρίνουμε με μία τυχαία τοπολογία. Επιπλέον τα αποτελέσματα του SA συγκρίνονται με RS σε όρους ενεργειακής κατανάλωσης και κάλυψης δικτύου για ARQ, FEC και HARQ. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι ο SA οδηγεί σε καλύτερες λύσεις σε σχέση με τον RS.

5.9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman, "A taxonomy of wireless micro-sensor network models", in *ACM Mobile Computing and Communications Review*, pp. 28-36, vol. 6, no. 2, Sep. 2002
- [2] P.Santi, "Topology control in wireless ad hoc and sensor networks", in *ACM Computing Surveys*, vol. 37, no. 2, pp. 164-194, Jun. 2005
- [3] Z. Tian, D. Yuan and Q. Liang, "Energy efficiency analysis of error control schemes in wireless sensor networks", in *International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing*, pp.401-405, Aug. 2008.
- [4] H. Liu, H. Ma, M. El Zarki and S. Gupta, "Error control schemes for networks: An overview", in *Mobile Networks and Applications*, vol. 2, pp. 167-182, Oct 1997
- [5] J. H. Chang and L. Tassiulas, "Maximum lifetime routing in wireless sensor networks", in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, no. 4, Aug. 2004
- [6] G. Bravos, "Power control techniques for energy efficient wireless sensor networks", in *Enabling Technologies for Wireless Multimedia Communications (European Wireless)*, 12th European Conference on, pp. 1-6, Apr. 2006
- [7] Ya Xu , Y. Mori , D. Estrin and J. Heidemann, "Topology Control Protocols to Conserve Energy in Wireless Ad Hoc Networks", in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2003
- [8] A. Salhieh, J. Weinmann, M. Kochhal and L. Schwiebert, "Power Efficient Topologies for Wireless Sensor Networks", in *International Conference on Parallel Processing*, pp. 156 - 163, Sept 2001.
- [9] J. Chen, X. Cao and Y. Sun, "Simulated annealing for optimisation with wireless sensor and actuator networks", in *IET Electronics Letters*, vol. 44, pp. 1208-1209, Sep. 2008
- [10] R.A. Rutenbar, "Simulated annealing algorithms: an overview", in *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 5, no. 1, pp. 19-26, Jan. 1989

- [11] M. Duque-Anton, D. Kuntz and B. Ruber, "Channel Assignment for Cellular Radio Using Simulated Annealing", in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 42, no. 1, pp.14-21, Feb. 1993
- [12] S. Menon and R. Gupta, "Assigning cells to switches in cellular networks by incorporating a pricing mechanism into Simulated annealing", in *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 34, pp. 558-565, Feb 2004
- [13] N. Prajapati, R. Agravat and M. I. Hasan, "Simulated Annealing for Location Area Planning in Cellular networks", in *Journal on Applications of Graph Theory in Wireless Ad hoc Networks and Sensor Networks (J GRAPH-HOC)*, vol. 2, no. 1, Mar. 2010
- [14] A.R. Pinto and C. Montez, "Self-optimization of dense wireless sensor networks based on simulated annealing", in *13th Latin American Test Workshop (LATW)*, Apr. 2012
- [15] P.L. Chiu, F.Y.S.Lin, "A Simulated Annealing Algorithm to Support the Sensor Placement for Target Location", in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2004
- [16] S.K. Shekofteh, M.H. Yaghmaee, M.B. Khalkhali, H. Deldari, "Localization in Wireless Sensor Networks Using Tabu Search and Simulated Annealing", in *2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, 2010.
- [17] A. Kannan, G. Mao and B. Vucetic, "Simulated Annealing based Wireless Sensor Network Localization with Flip Ambiguity Mitigation", in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2006)*, vol. 2, pp. 1022 - 1026, May 2006
- [18] H. Nikookar and H. Hashemi, "Statistical modeling of signal amplitude fading of indoor radio propagation channels", in *2nd International Conference on Universal Personal Communications*, vol. 1, pp. 84 – 88, 1993.
- [19] M. Zuniga and B.Krishnamachari, "Analyzing the transitional region in low power wireless links", in *IEEE SECON 2004, First Annual IEEE Communications Society Conference*, pp. 517-526, Oct. 2004
- [20] M. Mallinson, S. Hussian, and J. H. Park, "Investigating wireless sensor network lifetime using a realistic radio communication model", in *International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering (MUE)*, pp. 433-437, Apr. 2008.
- [21] P. Baronti, P. Pillai, V. Chook, S. Chessa, A. Gotta and Y. Hu, "Wireless sensor networks: a survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards", in *Computer Communications*, vol. 30, no. 7, pp.1655-1695, May 2007.
- [22] Chipcon from Texas Instruments. CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee - ready RF Transceiver, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>
- [23] M.C. Vuran and I.F. Akyildiz, "Error Control in Wireless Sensor Networks: A Cross Layer Analysis", in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.17, no. 4, pp.1186-1199, Aug. 2009

- [24] H. Stern and S. Mahmoud, *Communication Systems*, Pearson Prentice Hall, 2004
- [25] M. Mafuta, M. Zennaro, A. Begula, G. Ault, H. Gombachika and T. Chadza, "Successful Deployment of a Wireless Sensor Network for Precision Agriculture in Malawi", in *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 1, no. 1, Apr. 2013
- [26] Y. Sankarasubramaniam, I. F. Akyildiz and S.W. McLaughlin, "Energy efficient based packet size optimization in wireless sensor networks", in *Proc. IEEE Int. Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, pp.1 – 8, 2003
- [27] Z. Tian, D. Yuan, Q. Liang: "Energy Efficiency Analysis of Error Control Schemes in Wireless Sensor Networks" Proc. of the International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Crete- Island, Greece, Aug. 2008.
- [28] Y. Jin, J. Chang and D. Le, "A high energy efficiency link layer adaptive error control mechanism for wireless sensor networks", in *International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering (CiSE)*, pp.1-4, Dec. 2010.
- [29] G. Molina and E. Alba, "Wireless sensor network deployment using a memetic simulated annealing", in *International Symposium on Applications and the Internet*, pp. 237-240, Jul. 2008.
- [30] S. Nahar, S. Sahni and E. Shragowitz, "Simulated Annealing and Combinatorial Optimization", in *23rd Conference on Design and Automation*, Jun. 1986.
- [31] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, and M. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", in *Science Journal*, vol. 220, no. 4598, pp. 671-680, May 1983
- [32] D. Bertsimas and J. Tsitsiklis, "Simulated Annealing", in *Statistical Science*, vol. 8, no. 1, pp. 10 - 15, 1993
- [33] Y. Naourani and B. Andersen, "A comparison of simulated annealing cooling strategies", in *J. Phys. A: Math.*, vol. 31, no. 41, 1998
- [34] L. Darougaran, H. Shahinzadeh and M. Salavati, "Simulated annealing algorithm for data aggregation trees in wireless sensor networks", in *International Journal on Soft Computing And Software Engineering*, vol. 1, no. 1, pp.36-43, Jun. 2011.
- [35] F. Foukalas, V. Gazis and N. Alonistioti, "Cross-Layer Design Proposals for Wireless Mobile Networks: A Survey and Taxonomy", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 10, no. 1, pp. 70 - 85, Apr. 2008
- [36] D. Kliazovich and F. Granelli, "Why Cross Layer Design? Its advantages and disadvantages", Book chapter in *Cross Layer Design for WLAN Systems*, Troubador Publishing Publishing Ltd, Leicester, UK, 2010
- [37] T. Melodia, M. Vuran and D. Pompoli, "The State of the Art in Cross-Layer Design for Wireless Sensor Networks", *Wireless Systems and Network Architectures*

in Next Generation Internet, Lecture Notes in Computer Science, vol. 3883, pp. 78 – 92, 2006

[38] Y. Zhang and L. Cheng, “Cross Layer Optimization for Sensor Networks”, *New York Metro Area Networking Workshop*, New York City, Sept. 2003

[39] P. Skraba, H. Aghajan and A. Bahai, “*Cross-Layer Optimization for High Density Sensor Networks: Distributed Passive Routing Decisions*”, in *Proceedings Ad hoc NOW*, 2004

[40] J. Yuan, Z. Li, W. Yu and B. Li, “*A Cross-layer optimization framework for Multihop Multicast in Wireless Mesh Networks*”, in *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, vol. 24, issue 11, pp. 2092 – 2103, Nov. 2006

[41] Z. Tian, D. Yuan, Q. Liang: “Energy Efficiency Analysis of Error Control Schemes in Wireless Sensor Networks” *Proc. of the International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Crete- Island, Greece, Aug. 2008.

[42] A. Nandi, S. Kundu: “Energy Level Performance of Error Control Schemes in WSN over Rayleigh Fading Channel”, in *Industrial Electronics and Applications (ISIEA)*, 2011 IEEE Symposium on, pp. 194-199

[43] H. Liu, H. Ma, M. El Zarki and S. Gupta: “Error Control Schemes for networks: An overview”, in *Mobile Networks and Applications Journal*, Vol.2, Issue 2, Oct 1997, pp. 167-182.

[44] Y. Jin, J. Chang and D. Le: “A High Energy Efficiency Link Layer Adaptive Error Control Mechanism for Wireless Sensor Networks”, in *International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering (CiSE)*, Dec 9 – 11, 2011

6 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η ταχύτατη ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής τεχνολογίας και της τεχνολογίας των τηλεπικοινωνιών επέτρεψε την κατασκευή μικρών συσκευών - κόμβων με συστήματα ανίχνευσης, επεξεργασίας πληροφορίας (επεξεργαστής), αποθηκευτικού χώρου και ραδιοκύκλωμα για επικοινωνία. Η μαζική ανάπτυξη των κόμβων σε μεγάλη κλίμακα δημιουργεί τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Α.Δ.Α) με την είσοδο των οποίων η έννοια της απανταχού υπολογιστικής (pervasive computing) πήρε σάρκα και οστά. Το κυριότερο πρόβλημα και περιοριστικός παράγοντας των κόμβων αισθητήρων είναι η ενέργεια. Στις περισσότερες εφαρμογές Α.Δ.Α τα αποθέματα ενέργειας των κόμβων μειώνονται με γρήγορους ρυθμούς και δεν υπάρχει η δυνατότητα ανανέωσής τους. Συνεπώς η βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας, τόσο σε επίπεδο κόμβου όσο και σε επίπεδο δικτύου αποτελεί σημαντικό κριτήριο κατά τον σχεδιασμό ενός Α.Δ.Α. Η ορθή διαχείριση της ενέργειας ενός κόμβου συνεπάγεται και την ορθή διαχείριση της ενέργειας στο δίκτυο, και αυτό συνεπάγεται αύξηση της συνολικής διάρκειας ζωής του. Η βιβλιογραφία έχει να επιδείξει πολλές μελέτες ενεργειακά βέλτιστων πρωτοκόλλων που αφορούν τόσο τις λειτουργίες του κόμβου σε επίπεδο υλικού, όσο και θέματα δρομολόγησης, προώθησης πακέτων και διαχείρισης τοπολογίας.

Κύριο κομμάτι της παρούσας Διδακτορικής διατριβής είναι να προτείνει τρόπους διαχείρισης τοπολογίας ώστε να μειώνεται η συνολική ενεργειακή κατανάλωση και να αυξάνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου. Στο 2^ο κεφάλαιο προτείναμε δύο εμπειρικές μεθόδους τοποθέτησης κόμβων σε πλέγμα ώστε να μειώνεται η συνολική κατανάλωση, να αυξάνεται το ποσοστό επιτυχούς παράδοσης πακέτων στον προορισμό και να αυξάνεται η ρυθμαπόδοση. Βασιστήκαμε στους χάρτες της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και στην παραλλακτικότητα του εδάφους και τοποθετήσαμε κατάλληλα κόμβους στις ζώνες διαχείρισης. Με τον τρόπο αυτό μειώσαμε το πλήθος των κόμβων (άρα και το κόστος της λύσης ανάπτυξης δικτύου) και χωροταξικά αποσυμφωρήσαμε περιοχές με πλεονάζοντες κόμβους. Αποτέλεσμα

ήταν να μειωθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Στη συνέχεια προτείναμε μία διαφορετική προσέγγιση τοποθέτησης κόμβων στο πλέγμα βασιζόμενοι στην λειτουργία ενός απλού αλγορίθμου δρομολόγησης. Η τοποθέτηση σε στρατηγικά σημεία που υποδεικνύει ο αλγόριθμος μαρτυρεί πώς ο εμπειρικός αυτός τρόπος διαχείρισης τοπολογίας οδήγησε σε μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.

Συνεχίζοντας στο 3^ο κεφάλαιο, προτείναμε έναν προτότυπο αλγόριθμο άνισης φόρτισης κόμβων. Σε αντίθεση με τις υπάρχουσες μελέτες που θεωρούν ομοιόμορφη φόρτιση κόμβων και προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν διαδρομές προώθησης πακέτων, να κάνουν έλεγχο ισχύος εκπομπής ή να τοποθετήσουν επαναλήπτες κόμβους, εμείς επικεντρωθήκαμε στο πώς θα διανεμηθεί το συνολικό ενεργειακό φορτίο που αντιστοιχεί στην τοπολογία στους κόμβους ανάλογα με την θέση τους στο πλέγμα και το πλήθος των γειτόνων τους. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μαρτυρούν ότι η άνιση φόρτιση πετυχαίνει να επιμηκύνει την διάρκεια ζωής του δικτύου.

Το επόμενο κεφάλαιο είναι μία προέκταση και εμπλουτισμός του 3^{ου} κεφαλαίου. Χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο άνισης φόρτισης, αλλά επιπροσθέτως ορίζουμε ένα πρόβλημα κοινής βελτιστοποίησης της διάρκειας ζωής και της κάλυψης του δικτύου. Αποδεικνύουμε ότι το πρόβλημά μας είναι NP-Complete και χρησιμοποιούμε Simulated Annealing για να το λύσουμε. Λαμβάνουμε υπόψη και την παράμετρο της τοπολογίας στο πρόβλημα που θέτουμε. Συνεπώς μέσω της βέλτιστης τοποθέτησης των κόμβων και την εφαρμογή της άνισης φόρτισης πετυχαίνουμε αύξηση της διάρκειας ζωής και αύξηση του βαθμού κάλυψης του δικτύου.

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη το σοβαρό περιορισμό στα αποθέματα ενέργειας που επιδεικνύουν τα Α.Δ.Α., προτείνουμε έναν τρόπο κοινής βελτιστοποίησης με cross layer τεχνική για την επιλογή βέλτιστης τιμής στην ισχύ εκπομπής, βέλτιστης τιμής στο μήκος πακέτου και βέλτιστης χωροταξικής τοποθέτησης κόμβων με σκοπό την ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Cross Layer τεχνική σημαίνει να λαμβάνουμε υπόψη παραμέτρους από διάφορα στρώματα του OSI μοντέλου κατά την προσπάθειά μας να βελτιστοποιήσουμε μία ή περισσότερες ποσότητες. Λαμβάνουμε λοιπόν υπόψη την ενεργειακή κατανάλωση από την

εφαρμογή κώδικες διόρθωσης λαθών (ECC) στο MAC επίπεδο. Δείχνουμε μέσω προσομοιώσεων ότι η λύση που προτείνουμε στο πρόβλημα βελτιστοποίησης μέσω δύο ευρετικών αλγορίθμων (SA, RS) οδηγεί σε αύξηση της κάλυψης του δικτύου και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά την επικοινωνία των κόμβων. Τα αποτελέσματά μας παρουσιάζουν μεγάλη ευρωστεία για όλες τις παραμέτρους του SA.

6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ

Ως μελλοντική και φυσική επέκταση της παρούσας διατριβής θα μπορούσε να είναι η διαχείριση 3D τοπολογίας και ορισμός νέων προβλημάτων ταυτόχρονης βελτιστοποίησης πολλών και αντικρουόμενων παραμέτρων από διάφορα επίπεδα του OSI με κοινό σκοπό την αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου, τη δυνατότητα να ανακάμπτει μετά από κάποια αποτυχία και την αύξηση της κάλυψής του. Φυσικά στόχος είναι να προταθεί δικός μας ευρετικός αλγόριθμος και να συγκριθεί με τον γενικού σκοπού αλγόριθμο βελτιστοποίησης SA, όσον αφορά τον τρόπο και τον χρόνο σύγκλισης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α :

Α1. ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΔΕΙΞΗ NP-COMPLETENESS

Στην υπολογιστική θεωρία πολυπλοκότητας (computational complexity theory), ένα πρόβλημα απόφασης (decision problem) είναι NP-Complete εάν είναι NP και NP-hard. Το σύνολο των NP-Complete προβλημάτων ονομάζεται NPC και NP σημαίνει: “*nondeterministically polynomial time*”.

Οι βασικές κλάσεις προβλημάτων είναι οι εξής:

P: Η κλάση των προβλημάτων απόφασης που μπορούν να λυθούν σε πολυωνυμικό χρόνο.

NP: Είναι η κλάση των προβλημάτων απόφασης που λύνονται από non-deterministic polynomial time algorithms.

NP-hard: Ένα πρόβλημα απόφασης ανήκει σε αυτή την κλάση όταν: εάν μπορεί να λυθεί σε πολυωνυμικό χρόνο, τότε όλα τα προβλήματα που ανήκουν στην NP κλάση θα μπορούν να λυθούν σε πολυωνυμικό χρόνο.

Εάν ένα πρόβλημα είναι NP-hard και ανήκει στην κλάση NP, τότε ονομάζεται NP-Complete. Συνεπώς: Ένα πρόβλημα Q ανήκει στην κλάση NP-Complete εάν ισχύει:

1. $Q \in NP$ και
2. Κάποιο άλλο πρόβλημα Q' στην NP μπορεί να αναχθεί (reducible) στο Q , άρα $Q' \leq_p Q$

Κάποια από τα γνωστά προβλήματα NP-Complete είναι τα ακόλουθα:

- Boolean satisfiability problem (Sat.)
- Knapsack problem
- Hamiltonian path problem
- Travelling salesman problem
- Subgraph isomorphism problem

- Subset sum problem
- Clique problem
- Vertex cover problem
- Independent set problem
- Dominating set problem
- Graph coloring problem

Τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις αναγωγές (reductions) ώστε να αποδείξει κανείς ότι το δικό του πρόβλημα είναι όντως NP-Complete. Στόχος μας για την παρακάτω απόδειξη είναι να βασιστούμε σε ένα γνωστό NP-Complete πρόβλημα και να ανάγουμε το δικό μας προς αυτό, π.χ. το *vertex cover problem*. Αν και οποιαδήποτε λύση για ένα NP-Complete πρόβλημα μπορεί να ελεγχθεί γρήγορα (σε πολυωνυμικό χρόνο), δεν υπάρχει αποδοτικός τρόπος να εντοπίσουμε μία λύση. Πράγματι, το πιο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό των NP-Complete προβλημάτων είναι ότι δεν υπάρχει “γρήγορος” τρόπος για να φτάσουμε στη λύση τους. Ο χρόνος που απαιτείται για τη λύση χρησιμοποιώντας οποιονδήποτε γνωστό αλγόριθμο αυξάνεται εκθετικά όσο η είσοδος του προβλήματος αυξάνει.

Ενώ οποιαδήποτε μέθοδος για λύση σε NP-Complete προβλήματα σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα παραμένει άγνωστη, τέτοιου είδους προβλήματα παρουσιάζονται σε πολλά επιστημονικά πεδία βελτιστοποίησης. Συνεπώς για την λύση τους, προτείνονται ευρετικές μέθοδοι βελτιστοποίησης και προσεγγιστικοί αλγόριθμοι.

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης που διαπραγματεύονται τα κεφάλαια 4 και 5 έχουν να κάνουν εκτός των άλλων παραμέτρων με την τοποθέτηση των κόμβων, δηλαδή με την παραγωγή νέων συνδεδεμένων τοπολογιών. Για να κάνουμε την εννοιολογική σύνδεση με το πρόβλημά μας, χρειαζόμαστε να απαντήσουμε στις ακόλουθες παραδοχές:

1. Υπάρχει ένα σύνολο λύσεων (π.χ. τοπολογιών) U , όπου $U = \{x_1, x_2, \dots, x_z\}$;
2. Έχουμε μία συλλογή από m υποσύνολα $S_i \subseteq U$;
3. Μπορούμε να επιλέξουμε μία συλλογή C από το πολύ k τέτοια υποσύνολα έτσι ώστε εάν τα ενώσουμε να έχουμε όλο το σετ των λύσεων;

Οι εννοιολογικές μας **απεικονίσεις** στα παραπάνω ερωτήματα είναι:

1. ΝΑΙ. Θεωρητικά το σύνολο U όλων των πιθανών παραγόμενων λύσεων (τοπολογιών) $U = \{x_1, x_2, \dots, x_z\}$, όπου $z = \binom{N \times N}{n}$.
2. ΝΑΙ. Επειδή το πρόβλημα βελτιστοποίησης που ορίζουμε βασίζεται σε περιορισμούς, ένας από τους οποίους αφορά την συνδεσιμότητα του γράφου της τοπολογίας (ο κάθε κόμβος να έχει τουλάχιστον έναν γείτονα), τότε όλες οι τοπολογίες στο U δεν μπορούν να είναι αποδεκτές. Συνεπώς, από όλες αυτές, το πολύ m υποσύνολα περιέχουν τις αποδεκτές.
3. ΝΑΙ. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης, ο SA επιλέγει από τα έγκυρα m υποσύνολα το πολύ k , όπου k εξαρτάται από τις παραμέτρους και λειτουργία του SA (execution time), οι πιο σημαντικές να είναι *temperature* και *cooling schedule*. Συνεπώς ο SA έχοντας εξετάσει ένα σύνολο των k λύσεων (k τοπολογίες προς εξέταση), παρέχει μία προσεγγιστικά βέλτιστη (near optimal) λύση της εκάστοτε αντικειμενικής συνάρτησης.

Ορίζουμε το σύνολο $U = \{x_1, x_2, \dots, x_z\}$, που εκφράζει το συνολικό πλήθος τοπολογιών που δημιουργούνται εάν τοποθετήσουμε $n \in R$ σύνολο κόμβων εντός χώρου 2-διαστάσεων, έστω $N \times N$ ή $N \times M$, και $z = \binom{N \times N}{n}$. Το σύνολο U μεγαλώνει με εκθετικό ρυθμό όσο το n αυξάνεται γραμμικά. Φυσικά επειδή κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης που εξετάζουμε θέτει τους δικούς του περιορισμούς όσο αφορά το σχηματισμό των τοπολογιών και τα δικά του κριτήρια για την εγκυροποίησή τους, μόνο μία συλλογή m υποσυνόλων με $S_i \subset U, i = 1, 2, \dots, m$ θεωρούνται έγκυρες και χρησιμοποιούνται. Παρακάτω αποδεικνύουμε ότι το πρόβλημα της διαχείρισης τοπολογίας ανήκει στην κλάση NP-Complete, συνεπώς προτείνεται η εφαρμογή ευρετικού αλγορίθμου για την λύση του, όπως είναι ο SA. Έστω ότι το δικό μας πρόβλημα το ονομάζουμε SA_{prob} .

Θεώρημα 1: Ένα SA πρόβλημα βελτιστοποίησης θεωρείται NP-complete, εάν υπάρχει ένα σύνολο $C \in \{1, 2, \dots, m\}$ όλων των m υποσυνόλων τέτοια ώστε $|C| \leq k$ και:

$$\bigcup_{i \in C} S_i = U \quad (2)$$

Απόδειξη: Αρχικά εικάζουμε ότι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που λύνεται με SA ανήκει στην κλάση NP, αφού όταν δοθεί μία συλλογή από σύνολα C , μπορεί να ελεγχθεί αποδοτικά ότι το C περιέχει το πολύ k στοιχεία και ότι η ένωση όλων των συνόλων στο C περιέχει όλα τα στοιχεία από το βασικό σύνολο U , όπως φανερώνει η σχέση (2). Στην συνέχεια πρέπει να δείξουμε ότι το γνωστό vertex cover ανάγεται στο πρόβλημά μας, δηλαδή $Vertex\ Cover \leq_p SA_{prob}$, και ότι η προτεινόμενη αναγωγή γίνεται σε πολυωνυμικό χρόνο. Δεδομένου ενός στιγμιοτύπου (instance) του vertex cover, για παράδειγμα ένα γράφημα $G = (V, E)$ με μέγεθος το πολύ j και S ένα σύνολο κόμβων που αντιστοιχεί σε μία συλλογή C υποσυνόλων του U . Ορίζοντας $k = j$, το C έχει το πολύ k υποσύνολα. Κάθε σύνολο στο C συσχετίζεται με μία κορυφή (vertex) στο G και ως εκ τούτου S είναι ένα σύνολο από τέτοιες κορυφές, π.χ. $|S| = |C|$. Συνεπώς, το S περιέχει το πολύ j κόμβους. Τέλος, δεδομένου ότι το U είναι το βασικό σύνολο και C μία συλλογή υποσυνόλων, το τελευταίο πρέπει να περιέχει τουλάχιστον ένα σύνολο το οποίο περιέχει ένα στοιχείο που αποτελεί μία πλευρά e του vertex cover. Δεδομένου ότι η προτεινόμενη συλλογιστική λύνει το vertex cover χρησιμοποιώντας black box για το SA πρόβλημα που λύνεται σε πολυωνυμικό χρόνο, και το $SA_{prob} \in NP$, συμπεραίνουμε ότι το SA_{prob} είναι NP-Complete.

A2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ Α.Δ.Α σε C++

Όλες οι προσομοιώσεις των κεφαλαίων 3, 4 και 5 έγιναν βάση του προσομοιωτή για Α.Δ.Α. που σχεδιάστηκε σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Τα χαρακτηριστικά του είναι τα ακόλουθα:

(A) Γενικά Σημεία Εξομοιωτή

- Είναι υλοποιημένος σε C++.
- Η τοπολογία κόμβων είναι ουσιαστικά ένας πίνακας 2-διαστάσεων σε κάθε κελί του οποίου υπάρχουν κόμβοι – αντικείμενα κλάσης
- Αποτελέσματα υπολογισμών που προκύπτουν από την προσομοίωση μπορούν να σώζονται σε αρχεία κειμένου

(B) Χαρακτηριστικά κόμβου – Κύρια Σημεία

- Ο κάθε κόμβος είναι ένα αντικείμενο κλάσης node

- Η κλάση έχει private μεταβλητές σχετικές με:
 - ενέργεια κόμβου
 - ID κόμβου
 - status (0 = radio off, 1 = radio on)
 - Συντεταγμένες κόμβου
 - Πλήθος γειτόνων κόμβου
 - Τύπο κόμβου (1 = απλός κόμβος, 2 = clusterhead, 0 = Σταθμός Βάσης)
 - Πλήθος απεσταλθέντων μηνυμάτων
 - Πλήθος λαμβανομένων μηνυμάτων
 - Sensing range
 - Communication range (καθορίζεται από το minRSSI)
 - Ισχύς στο RF
 - Λίστα με πιθανούς γείτονες
 - Τιμές μετρήσεων (π.χ. θερμοκρασίας)
 - Alive (1 = node alive (energy>0), 0 = node is dead (energy<=0))
 - Lifetime
 - Υπολογισμό πιθανότητας για αποστολή πακέτου
- Η κλάση έχει συναρτήσεις – μέλη οι οποίες:
 - Καθορίζουν τη λίστα των γειτόνων
 - Δείχνουν τη λίστα των γειτόνων με τις αποστάσεις τους από τον κόμβο
 - Παράγουν κλώνους κόμβων (σε περίπτωση που θέλουμε έναν κόμβο να τον μετακινήσουμε σε άλλη θέση με άλλες συντεταγμένες πρέπει να διατηρήσουμε όλα τα στοιχεία του)
 - Ο κάθε κόμβος μπορεί όταν επιλεγεί να στείλει ένα πακέτο να το στείλει με κάποια πιθανότητα. Γίνεται χρήση της drand48() που παράγει αριθμούς ομοιόμορφα κατανεμημένους στο διάστημα (0...1)

Υποθέσεις

- Ένας κόμβος θεωρείται ως active (alive) όταν η εναπομείνουσα ενέργειά του είναι >0. Αλλιώς θεωρείται ως dead.
- Αρχικά οι κόμβοι που τοποθετούνται είναι όλοι όμοιοι όσο αφορά τον τύπο τους και τις αρχικές τους τιμές. Ο χρήστης μπορεί έπειτα να τροποποιήσει αυτή την υπόθεση αλλάζοντας τιμές σε κάποιους που θέλει.

(Γ) Τοπολογίες – Κύρια Σημεία

Δυνατότητες

- Οι τοπολογίες που παράγονται είναι κυρίως σε 2D αλλά υπάρχει η δυνατότητα και για 3D.
- Ο χρήστης ρυθμίζει το μέγεθος της διάστασης στον οριζόντιο και στον κάθετο άξονα. Δεν είναι απαραίτητο να έχουμε συμμετρικές ως προς τους άξονες τοπολογίες (αντίστοιχα και για περίπτωση 3D διαστάσεων)

- Ο κάθε κόμβος όταν δημιουργείται έχει συντεταγμένες της μορφής (x,y) στο πλέγμα καθώς επίσης και αρχικά αποθέματα ενέργειας.
- Ο χρήστης μπορεί να ελέγξει εάν 2 κόμβοι με ρόλους sender – receiver μπορούν να θεωρηθούν γείτονες.
- Οι τοπολογίες παράγονται με τους ακόλουθους τρόπους:
 - Manually: Το πρόγραμμα ρωτά το χρήστη πόσους κόμβους να τοποθετήσει και μετά ο χρήστης δίνει τις συντεταγμένες των κόμβων προς τοποθέτηση.
 - Grid: Το πρόγραμμα τοποθετεί σε όλο το πλέγμα κόμβους. Καλύπτει όλες τις περιοχές της τοπολογίας
 - Statistically: Τοπολογίες στις οποίες η επιλογή συντεταγμένων κόμβων επιλέγεται από τις στατιστικές κατανομές (ομοιόμορφη, εκθετική, gaussian, poisson, binomial, hypergeometric, normal)

Σε όλες τις περιπτώσεις κατασκευής τοπολογιών το πρόγραμμα ρωτά το χρήστη για το πλήθος των κόμβων προς τοποθέτηση και γίνονται οι ακόλουθοι έλεγχοι:

- Δεν επιτρέπεται στο χρήστη να δώσει περισσότερους κόμβους από $R * C$ όπου R = πλήθος γραμμών του 2D πίνακα και C = πλήθος στηλών του 2D πίνακα
- Ο χρήστης επιλέγει είτε να τοποθετεί έναν έναν τους κόμβους επαναληπτικά είτε να ρυθμίζει το συνολικό πλήθος των κόμβων και να τοποθετούνται αμέσως (αυτό ιδιαίτερα στην περίπτωση της στατιστικής τοποθέτησης)
- Όταν ο χρήστης δώσει τις ίδιες συντεταγμένες περισσότερες φορές, τότε το πρόγραμμα ζητά νέες. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως στις τοπολογίες που προκύπτουν από στατιστικές κατανομές.

Μετά την παραγωγή τοπολογίας υπάρχουν οι ακόλουθες δυνατότητες επί της τοπολογίας:

- Να τοποθετηθεί ένας νέος κόμβος στην ήδη υπάρχουσα τοπολογία. Σε περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει να τοποθετήσει έναν κόμβο σε θέση στην οποία υπάρχει ένας κόμβος δίνεται κατάλληλη προειδοποίηση ώστε να επιλεγεί άλλη θέση. Ο νέος κόμβος που τοποθετείται έχει αρχικές τιμές (αυτές που δίνονται σε όλους τους κόμβους της αρχικής τοπολογίας)
- Να αφαιρεθεί ένας κόμβος από την τοπολογία. (Χάνονται και οι τιμές του)
- Μπορεί ένας κόμβος να τεθεί σε sleep mode, άρα οι τιμές του δεν χάνονται. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να πάρει μέρος σε δρομολόγηση, ούτε να στείλει/λάβει μηνύματα από γείτονές του.
- Εάν ο γράφος που παράγεται από την αρχική τοπολογία είναι αραιός, μπορούμε να εισάγουμε για κάθε κόμβο τουλάχιστον 1 γείτονα ώστε να μπορεί να δρομολογήσει μέσω αυτού.

Συναρτήσεις

Για την παραγωγή τοπολογιών βασισμένων σε επιλογή κόμβων με τη χρήση στατιστικής κατανομής έχουν υλοποιηθεί οι αντίστοιχες συναρτήσεις uniform, normal, gaussian, hypergeometric, binomial, exponential κατανομών

- Για την παραγωγή τοπολογιών με manual τρόπο υλοποιείται η αντίστοιχη συνάρτηση
- Υλοποιείται συνάρτηση που μετρά το πλήθος γειτόνων ενός κόμβου
- Υλοποιείται συνάρτηση που ελέγχει γεωμετρικά εάν 2 κόμβοι είναι γείτονες
- Υλοποιείται συνάρτηση που ελέγχει εάν ο γράφος της τοπολογίας είναι connected. Εάν συμβαίνει αυτό τότε δεν κάνει τίποτα. Σε διαφορετική περίπτωση για κάθε κόμβο επιλέγεται τυχαία ένας γείτονας και τοποθετείται στη νέα τοπολογία.
- Υλοποιείται συνάρτηση για την εύρεση ευκλείδιας απόσταση μεταξύ κόμβων

(Δ) Δρομολόγηση και Υπολογισμός Ενεργειών – Κύρια Σημεία

Δυνατότητες

- Για επικοινωνία κόμβων μειώνεται τόσο η ενέργεια του αποστολέα που στέλνει, όσο και η ενέργεια του δέκτη για τον οποίο προορίζεται το πακέτο (ή τα πακέτα)
- Δύο κόμβοι sender/receiver μπορούν να στείλουν μεταξύ τους μηνύματα. Στην επικοινωνία αυτή μετρούμε: εναπομείνουσα ενέργεια μετά την επικοινωνία, πλήθος μηνυμάτων που στέλνουν/λαμβάνουν, πλήθος rounds που είναι οι κόμβοι ζωντανοί. Σε κάθε περίπτωση μπορεί ένας κόμβος να στείλει 1 ή και περισσότερα πακέτα σε μία αποστολή. Τα πακέτα έχουν μήκος 1000 bits.
- Μπορεί να υπολογιστεί πόση ενέργεια δαπανάται εάν το πακέτο σταλθεί από ένα συγκεκριμένο path (multi-hop routing) αν γίνει χρήση των συναρτήσεων υπολογισμού ενεργειών για κάθε ζεύγος sender/receiver του συγκεκριμένου path.
- Για να επιλέξει ένας κόμβος έναν γείτονά του ώστε να του στείλει ένα πακέτο, από το σύνολο των γειτόνων του, μπορεί να βασιστεί στην εναπομείνουσα ενέργειά του. Μπορεί να επιλέξει αυτόν με τα μεγαλύτερα αποθέματα ενέργειας.
- Μπορεί ο χρήστης να “αναπληρώσει” τα ενεργειακά αποθέματα ενός ή περισσότερων κόμβων εάν το κρίνει σκόπιμο. (ουσιαστικά εάν υποθέσουμε ότι μπορεί να αλλάζει μπαταρία.)

Άλλες βοηθητικές συναρτήσεις για τη λειτουργία του εξομοιωτή

- Συνάρτηση για τον υπολογισμό Minimum Spanning Tree (Prim’s algorithm) (είναι υλοποιημένη και θα ενσωματωθεί στον κώδικα του εργαλείου)

- Συνάρτηση για τον υπολογισμό Shortest Path First (Bellman – Ford) που βασίζεται στα υπολογισμένα κόστη των ακμών του γράφου. (είναι υλοποιημένη και θα ενσωματωθεί στον κώδικα του εργαλείου)
- Συναρτήσεις για εκτύπωση των στοιχείων (τιμών) ενός μόνου κόμβου και των κόμβων όλης της τοπολογίας (λειτουργούν)
- Συναρτήσεις ταξινόμησης (selection sort) (λειτουργεί)

Μετρήσεις του εξομοιωτή – Σενάρια που έχουν υλοποιηθεί (λειτουργούν)

- Ο χρήστης επιλέγει ένα ζεύγος sender/receiver. Στη συνέχεια επιλέγει την ισχύ εκπομπής του sender καθώς επίσης και το fading model. Εάν οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν τότε εγκαθιδρύεται η επικοινωνία τους και ο χρήστης επιλέγει σε κάθε γύρο πόσα πακέτα θα στέλνονται. Με κάθε αποστολή και λήψη υπολογίζεται η εναπομείνουσα ενέργεια του ζεύγους. (λειτουργεί)
- Ο χρήστης δημιουργεί μία τοπολογία. Μετά προσθέτει έναν νέο κόμβο. Αυτός ο νέος κόμβος γίνεται αποστολέας και στέλνει πακέτα. Μετά ο χρήστης τον μετακινεί σε άλλη θέση εντός της τοπολογίας. (λειτουργεί)
- Ο χρήστης δημιουργεί μία τοπολογία. Για κάθε κόμβο της τοπολογίας υπολογίζονται οι γείτονές του. Τυχαία επιλέγουμε μερικούς κόμβους και τους αφαιρούμε από την τοπολογία. Καλούμε μία συνάρτηση επαναυπολογισμού των γειτόνων μετά την αλλαγή στην τοπολογία. (λειτουργεί)
- Επιλέγονται 2 κόμβοι ως sender/receiver. Για κάθε ισχύ εκπομπής (επιλογή μεταξύ επιπέδων ισχύος 0, -1, -3, -5, -7, -10 dBm) ο sender στέλνει 100 messages στον receiver σε κάθε round σε πλήθος 10 rounds. Υπολογίζονται για τα 2 fading models πόσα από τα 100 μηνύματα έφτασαν στον receiver. Έτσι μπορούμε να ορίσουμε χοντρικά την success packet reception probability. Εάν είναι > 85% (85 μηνύματα από τα 100 έχουν αποκωδικοποιηθεί από τον receiver) τότε το ζευγάρι sender/receiver για μία συγκεκριμένη τιμή ισχύος και για ένα συγκεκριμένο fading model θεωρούνται ως γείτονες (κριτήριο communication) (λειτουργεί)
- Χρήστης επιλέγει μία κατανομή και τοποθετούνται 30 κόμβους σε πλέγμα. Υλοποιείται το ακόλουθο σενάριο: Επιλέγεται μία βάση στην οποία θα στέλνονται οι μετρήσεις. Μία επαναληπτική μέθοδος σκανάρει την τοπολογία και όπου υπάρχει κόμβος κάνει τα εξής:
 - Τσεκάρει εάν ο κόμβος αυτός είναι διαφορετικός από τη βάση
 - Τσεκάρει εάν έχει αποθέματα ενέργειας
 - Τσεκάρει εάν ο κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει με τη βάση (γείτονες). Εάν ναι, τότε ο κόμβος στέλνει με κάποια πιθανότητα 1-hop πακέτο προς τη βάση. Εάν όχι, τότε επιλέγει τυχαία έναν γείτονά του. Για αυτό τον γείτονα γίνονται οι ίδιοι έλεγχοι και με κάποια πιθανότητα αυτός τώρα στέλνει το πακέτο του, είτε στη βάση είτε σε γείτονά του.
 Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται όταν τουλάχιστον 1 κόμβος μείνει με 0 ενέργεια. Σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται το network lifetime το οποίο ορίζεται

ως ένας μετρητής που αυξάνεται όσο όλοι οι κόμβοι του δικτύου έχουν αποθέματα ενέργειας > 0. Για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποστολής πακέτου γίνεται χρήση seed από 1 ... 10000. Οπότε για κάθε seed έχουμε και διαφορετική network lifetime. (σε φάση υλοποίησης).

A3. MATLAB SCRIPTS ΓΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

Στο σημείο αυτό του παραρτήματος παραθέτουμε κάποια scripts σε MATLAB για την διαχείριση των τοπολογιών

Script1: Εισάγονται τοπολογίες και υπολογίζει τα ιστογράμματα των ECD και UCD όσο αφορά την network lifetime

```
%-----  
%IMPF HISTOGRAM  
%Input: Processes N number of input txt files concerning lifetimes  
%measurements (100 lifetime measurements per file). Each file expresses the  
%lifetime measurements of 1 topology.  
%Variable: User can CHANGE the PATH of the lifetime input files  
%Process: Calculates for each of the N input files, for each strategy, the  
%AVERAGE lifetime (per file) and creates 2 output file: 1) STR1_averages  
%and 2) STR2_averages. Mean - Variance and HIST plot of IMPF(improvement  
%factor) is calculated)  
%Output: Vector with maxes concerning either STR1/STR2  
%-----  
  
delete STR1_averages.txt;  
delete STR2_averages.txt;  
clear all;  
clc;  
%dir = 'd:\sim\results\connected\apsipa_journal\  
dir = 'd:\sim\results\connected\30\  
%dir = input('Give the directory: ','s');  
N = input('How many files to process: ','s');  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% THIS IS THE PROCESSING OF STRATEGY 1 FILES  
sum = 0;  
format short  
for files = 1:str2num(N)  
file_name = strcat(dir,'network_lifetimes_',int2str(files),'_1.txt');  
file = load(file_name);  
for i = 1:size(file,1)  
sum = sum + file(i);  
end  
mesos = sum / size(file,1);  
fid = fopen('STR1_averages.txt','a');
```

```

fprintf(fid,'%d\n',mesos);
mesos = 0;sum = 0;
end
fclose(fid)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% THIS IS THE PROCESSING OF STRATEGY 2 FILES
sum = 0;
format short
for files = 1:str2num(N)
file_name = strcat(dir,'network_lifetimes_',int2str(files),'_2.txt');
file = load(file_name);
for i = 1:size(file,1)
sum = sum + file(i);
end
mesos = sum / size(file,1);
fid = fopen('STR2_averages.txt','a');
fprintf(fid,'%d\n',mesos);
mesos = 0;sum = 0;
end
fclose(fid)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%RESULTS%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

topology = 1:str2num(N);
STR1_AVG = load('STR1_averages.txt');
STR2_AVG = load('STR2_averages.txt');
%subplot(2,1,1);plot(topology,STR1_AVG,topology,STR2_AVG);grid
on;xlabel('Topologies');ylabel('Network Lifetime');title('Network Lifetime for 500 Random
Topologies');legend('STRATEGY 1','STRATEGY 2','best');
for i = 1:size(STR1_AVG,1)
IMPF(i) = STR2_AVG(i) / STR1_AVG(i);
end
variance = var(IMPF);
mean = mean(IMPF);
%subplot(2,1,2);hist(IMPF);xlabel('Improvement Factor(IF)');ylabel('Number of
Topologies(Frequency)');title('Improvement Factor (IF) for 500 Random Topologies');grid on;
hist(IMPF);xlabel('Improvement Factor(IF)');ylabel('Number of
Topologies(Frequency)');title('Improvement Factor (IF) for 500 Random Topologies');grid on;
delete STR1_averages.txt;
delete STR2_averages.txt;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Script2: Υπολογισμός PDF network lifetime and Coverage

```
PLOT της PDF Coverage για N topologies
Χρειάζεσαι το αρχείο coverage.txt
[n x] = hist(maxes);
plot(x,n/N);
str1 = sprintf('Lifetime Mean = %f , Lifetime Standard Deviation =
%f',mean(maxes),std(maxes));
str2 = sprintf('Network Coverage Histogram - Random Topologies: %d ',N);
grid on;xlabel(str1);ylabel('Probability');title(str2);

PLOT της PDF Lifetime (STR2) για N topologies
[n x] = hist(maxes);
plot(x,n/N);
str1 = sprintf('Lifetime Mean = %f , Lifetime Standard Deviation =
%f',mean(maxes),std(maxes));
str2 = sprintf('STR2 Lifetime Histogram - Random Topologies: %d ',N);
grid on;xlabel(str1);ylabel('Probability');title(str2);
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:

B1. ΤΙΜΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Στο σημείο αυτό παραθέτουμε συγκεντρωτικά τις τιμές των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις του κεφαλαίου 5. Θεωρούμε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά και δυνατότες του υλικού: (επεξεργαστής, αισθητήρες και ραδιοκύκλωμα)

1. Node Hardware: **Tmote Sky**
2. Radio Module: **CC2420 with O-QPSK modulation with DSSS**, transmitting at 2.405GHz (IEEE 802.15.4 channel 11)
3. CPU Type: **MSP430 F1611**
4. Humidity/Temperature sensor type: **SHT - 11**

Πίνακας 1: Τιμές προσομοιώσεων

| Μεταβλητή | Τιμή | Ερμηνεία |
|-------------|---|---|
| P_t | 0,-1,-3,-5,-7,-10,-15,-25 | Transmit power (dBm) |
| I_{tr} | 17.4,16.5,15.2,13.9,12,5,11.2,9.9,8.5 | Transmit current(mA) |
| I_{re} | 19.7 | Receive current(mA) |
| V_{radio} | 3.6 | Supply voltage for radio(Volts) |
| R_{radio} | 250000 | Data rate(bps) |
| T_{tr} | $1/R_{radio} = 1/250000=0.000004$ | Time to transmit 1 bit(sec) |
| V_{proc} | 3.6 | Supply voltage for processor – used for Edec(Volts) |
| I_{proc} | 0.008 | Current for processor(A) |
| t_{cycle} | 0.000000125 | One cycle duration of processor (sec) |
| N_{tr} | 1,2,3 | Number of retransmissions in ARQ/HARQ |
| D | 38 | DATA packet (bytes) |
| A | 8 | ACK/NACK packet(bytes) |
| C | 8 | CTS packet(bytes) |
| η | 3 | Path loss exponent |
| σ | 3.8 | Standard deviation |
| n | 127 | Block code in BCH |
| k | 113,106,92,78,64,36 | k information bits (payload) |
| t | 2,3,5,7,9,13 | Error correcting capability |
| N | 10,20,30 | Number of nodes in topology |
| E_{neigh} | 10% of the energy to transmit a packet | Energy consumed by neighbor nodes (Joules) |
| E_{sense} | $E_{sense} = b * V_{sense} * I_{sense} * T_{sense}$ | Energy consumed to sense 1 bit of information(Joules) |
| V_{sense} | 3.3 | Supply voltage for sensing(Volts) |
| I_{sense} | 0.00055 | Supply current for sensing(A) |
| T_{sense} | $1/12 = 0.083$ | 12 bits per second |
| E_{add} | $3.3 * 10^{-5} * m(mW / MHz)$ | The energy consumption of |

| | | |
|-------------|--|---|
| | | addition with 0.18μm, 2.5V CMOS |
| E_{mult} | $3.7 * 10^{-5} * m^3 (mW / MHz)$ | The energy consumption of multiplication with 0.18μm, 2.5V CMOS |
| E_{inv} | $3.3 * 10^{-5} * (2m - 3)m^3 (mW / MHz)$ | The energy consumption of reciprocal in GF(2m) field with 0.18μm, 2.5V CMOS |
| ψ (dB) | -5 ... 15 | Receiver SNR threshold |

Πίνακας 2: Χρησιμοποιούμενα BCH codes

| |
|---|
| $BCH(n,k,t)$ with $n = 127$ and $t = \{2,3,5,7,9,13\}$ BCH(127,113,2) BCH(127,106,3) BCH(127,92,5) BCH(127,78,7) BCH(127,64,9) BCH(127,36,13) |
|---|

B2. ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ:

[1] A.Xenakis, K. Katsalis, A.Sakelariou, P.Kikiras, G. Stamoulis, “Βελτιστοποίηση της τοπολογίας Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων σε εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας”, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, 18-20 Οκτωβρίου 2007, Λάρισα

[2] A.Xenakis, K. Katsalis, P.Kikiras, G.Stamoulis ‘‘Proposing a Method of Network Topology Optimization in Wireless Sensors in Precision Agriculture’’, 6th European Conference on Precision Agriculture, 6ECPA 3-6 June 2007 Skiathos Greece

[3] A.Xenakis, K. Katsalis, P.Kikiras, G.Stamoulis ‘‘Topology Optimization in Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture Applications’’, IEEE SENSORCOMM 2007, October 14-19, 2007, Valencia, Spain.

[4] A. Xenakis, L. Perlepes, P Kikiras, G Stamoulis, ‘‘Application of the LGR Algorithm for topology control in a wireless sensor network for precision agriculture applications, Panhellenic conference of the society of agricultural engineers, 641-648. 8-10 October 2009, Thessaloniki Greece.

[5] A. Xenakis, I. Katsavounidis and G. Stamoulis, "Investigating Wirelss Sensor Network Lifetime under static Routing with Unequal Energy Distribution", Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), Dec 2012

[6] A. Xenakis, F. Foukalas, G. Stamoulis and T. Khattab, "Energy-aware Joint Power, Packet and Topology Optimization by Simulated Annealing for WSNs", 7th IEEE GCC Conference & Exhibition, Qatar, 2013

[7] A. Xenakis, F. Foukalas, I. Katsavounidis and G. Stamoulis, "Wireless Sensor Network Placement, Coverage and Lifetime Optimization under Unequal Energy Distribution", submitted at IEEE Systems Journal

[8] A. Xenakis, F. Foukalas and G. Stamoulis, "Simulated Annealing Application for Cross-Layer Energy-Aware Topology Control in WSNs", submitted at IEEE Transactions on Vehicular Technology