



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Επισκόπηση των προβλημάτων και αλγορίθμων κάλυψης σε
τρισδιάστατα ασύρματα δίκτυα»**

ΚΟΥΚΛΑΡΗΣ Β. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επιβλέποντες: Κατσαρός Δημήτριος

Σταμούλης Γεώργιος

ΒΟΛΟΣ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2010

Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μια επισκόπηση των προβλημάτων και των αλγορίθμων κάλυψης σε τρισδιάστατα ασύρματα δίκτυα. Επιχειρείται μια παρουσίαση των γνωστών τεχνολογιών κάλυψης, τα προβλήματα αυτών στην εφαρμογή τους σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου και παρουσιάζονται αλγόριθμοι με υποσχόμενα αποτελέσματα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: 2-d, 3-d, κάλυψη, αλγόριθμος, ασύρματα, δίκτυα, μοτίβα, αισθητήρες.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα και καθοδηγητή της παρούσας εργασίας κ. Δημήτριο Κατσαρό για την απρόσκοπτη επικοινωνία και συμβολή καθ' όλη τη διάρκεια της διεκπεραίωσής της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον δεύτερο επιβλέποντα αλλά και πρόεδρο του τμήματος και εξάίρετο επιστήμονα κ. Γεώργιο Σταμούλη για την στήριξη και την βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο τμήμα.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη στους γονείς μου, στην αδελφή μου και στους φίλους που μου συμπαραστάθηκαν και με στήριξαν όλο αυτό το χρονικό διάστημα μέχρι την ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ	6
1.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ (WSNS)	6
1.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΚΑΛΥΨΗΣ.....	7
2. ΚΑΛΥΨΗ.....	9
2.1 ΑΝΑΓΩΓΗ ΣΕ 3-D.....	9
2.2 ΔΗΛΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	10
2.2.1 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΛΥΣΗ.....	11
2.3 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΛΥΨΗΣ.....	12
2.3.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΔΗΛΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	13
2.3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 1 (GREEDY ALGORITHM).....	14
2.3.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 2 (DIVIDE & CONQUER).....	14
2.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	16
3. ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΚΑΛΥΨΗ	16
3.1 Καθορισμός Προβλήματος.....	17
3.2 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	18
3.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	19
3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	22
4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ 3-D ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΚΑΛΥΨΗ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ	23
4.1 Δήλωση Προβλήματος.....	23
4.2 Αλγόριθμοι Διακριτοποίησης.....	24
4.2.1 ITEG.....	24
4.2.2 Απόδοση ITEG.....	25
4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	26
5. ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	27
5.1 UWSNs.....	27
5.2 Προτεινόμενος Αλγόριθμος.....	27
5.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΛΥΨΗΣ.....	29
5.4 Περιγραφή Αλγορίθμου.....	30
5.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	31
5.6 Συμπεράσματα.....	33
6. ΧΑΜΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΛΗΡΗ ΚΑΛΥΨΗ ΣΕ 3-D ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	34
6.1 Περιγραφή.....	35
6.2 Συμπεράσματα.....	38
7 ΠΛΗΡΗΣ ΚΑΛΥΨΗ ΜΕ Κ-ΚΑΛΥΨΗ ($K = 14,6$) ΣΕ 3-D ΔΙΚΤΥΑ	39
7.1 ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΑ	39
8 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΒΑΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ	42
8.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	44
8.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	46
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	48

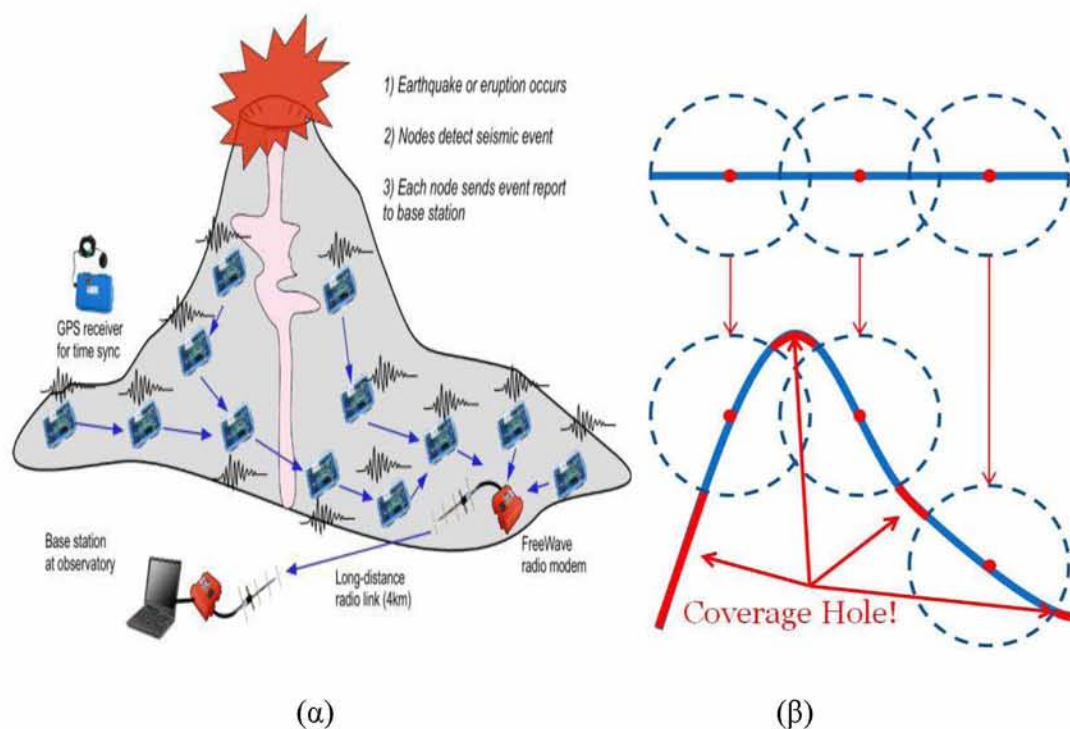
1. Εισαγωγικά

1.1 Τι είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs)

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) είναι μια νέα τεχνολογία αποκτήσεως πληροφοριών που προκύπτουν από την ανάπτυξη της ασύρματης τεχνολογίας επικοινωνιών, ενσωματωμένη τεχνολογία υπολογισμού, τεχνολογία αισθητήρων και τεχνολογία MEMS. Έχει μια μεγάλη προοπτική εφαρμογής στο στρατιωτικό, αυτόματο ηλεκτρονικό, βιομηχανικό έλεγχο, παρακολούθηση περιβάλλοντος, ιατρική, έξυπνο νοικοκυριό. Η απόδοση WSNs εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από την θέση των αισθητήρων και του κύκλου ζωής που συνδέονται με την κατανάλωση ισχύος. Αυτή τη στιγμή, όλο και περισσότερη προσοχή έχει δοθεί στην αποδοτική διάθεση της ενέργειας. Η εστίαση των αλγορίθμων της επέκτασης για WSNs είναι η κάλυψη και συνδετικότητα που είναι οι περισσότερο σοβαροί παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στην απόδοση του δικτύου αισθητήρων και την αποδοτική χρησιμοποίηση της ενέργειας

Η κάλυψη είναι ένα θεμελιώδες πρόβλημα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks). Κάθε αισθητήρας σχεδιάζεται και επεκτείνεται με κεντρικό στόχο ένα τμήμα ενός τομέα ενδιαφέροντος (Field of Interest). Ένα FoI θεωρείται πλήρως καλυμμένο εάν και μόνο εάν κάθε σημείο στην επιφάνεια καλύπτεται από τουλάχιστον έναν αισθητήρα. Η πεμπτουσία του προβλήματος κάλυψης έγκειται στη χρήση του λιγότερο δυνατού αριθμού αισθητήρων για να ικανοποιήσει συγκεκριμένες απαιτήσεις υπηρεσιών, π.χ. αναλογία κάλυψης, συνδετικότητα δικτύων και ευρωστία. Οι λύσεις στο πρόβλημα κάλυψης έχουν σημαντικές εφαρμογές στην επέκταση σταθμών βάσης στα κυψελοειδή δίκτυα, την κάλυψη στα ασύρματα δίκτυα πλέγματος, κ.λ.π.

Στην δισδιάστατη κάλυψη του επιπέδου, οι αισθητήρες επιτρέπονται μόνο να τοποθετηθούν σε ένα ιδανικού σχήματος τμήμα του επιπέδου. Στην τρισδιάστατη πλήρη κάλυψη, το FoI ορίζεται ως το τρισδιάστατο πλήρες διάστημα όπου οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν ελεύθερα μέσα σε ολόκληρο το FoI. Σε πολλές εφαρμογές πραγματικών κόσμων, εντούτοις, το FoI δεν είναι ούτε ένα δισδιάστατο ιδανικό τμήμα του επιπέδου ούτε ένα τρισδιάστατο πλήρες διάστημα. Αντ' αυτού, είναι σύνθετες επιφάνειες. Παραδείγματος χάριν, στο πρόγραμμα ελέγχου ηφαιστειών Tungurahua (Εικόνα 1 (α)), οι δισδιάστατες λύσεις κάλυψης επιπέδου δεν παρέχουν μια εφαρμόσιμη στρατηγική για την κάλυψη επιφάνειας για το ηφαίστειο, το οποίο είναι μια σύνθετη επιφάνεια, χωρίς την ύπαρξη «θυμάτων» στο πρόβλημα κενών κάλυψης, όπως διευκρινίζεται στην εικόνα.1 (β). Ομοίως, ούτε οι λύσεις της τρισδιάστατης πλήρους κάλυψης δεν μπορούν να εφαρμοστούν, επειδή οι αισθητήρες σε αυτήν την περίπτωση μπορούν μόνο να επεκταθούν στην εκτεθειμένη περιοχή επιφάνειας, και όχι ελεύθερα μέσα στο ηφαίστειο.



Εικόνα 1: Μια πολύπλοκη κάλυψη αισθητήρων, (α) ένα ενδεχόμενο μελέτης κάλυψης του ηφαιστείου με αισθητήρες, (β) πρόβλημα κάλυψης κατά τη χρήση παραδοσιακού μοντέλου κάλυψης.

1.2 Πρόβλημα Κάλυψης

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να ταξινομηθεί η υπάρχουσα έρευνα για το πρόβλημα κάλυψης. Κάποιος είναι ο τύπος FoI: δισδιάστατο ιδανικό FoI στο επίπεδο ή τρισδιάστατο πλήρες FoI. Το πρώτο έργο στην κάλυψη του δισδιάστατου ιδανικού FoI υπέθεσε ότι το FoI ήταν άπειρο ώστε να αποφευχθεί η επίδραση ακρών (edge effect), αλλά τα πρόσφατα συμπεράσματα που έχουν παρουσιάσει αυτά τα αποτελέσματα είναι μη πρακτικές και ημιτελείς λύσεις στις πεπερασμένες περιοχές. Μέχρι τώρα, τα θεμελιώδη προβλήματα για αυτές τις πεπερασμένες περιοχές παραμένουν αναπάντητα (π.χ. βέλτιστη πολιτική κάλυψης και κινητή κάλυψη), και οι λύσεις κάλυψης για το δισδιάστατο ιδανικό FoI συνεχίζουν να υποκινούν τη έντονη αντιπαράθεση. Ακόμα, οι προτεινόμενες λύσεις στο δισδιάστατο ιδανικό πρόβλημα έχουν βρεί ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και μερικές απ' αυτές εφαρμόζονται εύκολα στην περίπτωση του τρισδιάστατου πλήρους διαστήματος κάλυψης. Όλα αυτά τα αποτελέσματα, που προέρχονται από την δισδιάστατη προσέγγιση και που εφαρμόζονται έπειτα στην τρισδιάστατη σύνθετη επιφάνεια, υποφέρουν από το πρόβλημα κενών κάλυψης (Coverage Hole Problem).

Ένας άλλος τρόπος να ταξινομηθεί η προηγούμενη έρευνα βασίζεται στο σχέδιο επέκτασης αισθητήρων. Ένα ντετερμινιστικό σχέδιο είναι εκείνο που έχει προγραμματίσει τις ανάγκες επέκτασης (π.χ., χειρωνακτική επέκταση), απαιτούνται λιγότεροι αισθητήρες για να καλυφθεί μια δεδομένη περιοχή αλλά είναι πιο χρονοβόρο και εντατικό σχέδιο, καθιστώντας το πιο κατάλληλο για τα φιλικά περιβάλλοντα. Ένα άλλο σχέδιο επέκτασης είναι από την πιθανολογική ή τυχαία επέκταση. Αυτή η μέθοδος τοποθετεί τους αισθητήρες με τα οχήματα ή τα αεροσκάφη.

Επίσης, υπάρχει άλλη εργασία που εστιάζει στους κοινούς βέλτιστους στόχους. Ο Cardei et. Al πρότεινε μια πολιτική σχεδιασμού για να μεγιστοποιήσει η διάρκεια ζωής των δικτύων αισθητήρων. Μελετήθηκε η σχέση μεταξύ της κάλυψης των αισθητήρων και της συνδετικότητας επικοινωνίας. Επίσης προτάθηκαν βέλτιστα σχέδια κάλυψης για το ιδανικό άπειρο επίπεδο με τις οριζόμενες απαιτήσεις συνδετικότητας. Πιο συγκεκριμένα, η πρόσφατη κάλυψη εμποδίων εξέτασε την ανίχνευση παρείσφρησης σε μια περιοχή εμποδίων, η οποία είναι αρκετά διαφορετική από την παραδοσιακή δισδιάστατη κάλυψη.

Το ζήτημα ελέγχου κάλυψης των WSNs είναι να βελτιστοποιηθεί η διανομή όλων των πόρων από την τοποθέτηση των αισθητήρων και τον προσδιορισμό των δρομολογήσεων κάτω από τους περιορισμούς της ενέργειας των κόμβων αισθητήρων, του εύρους ζώνης επικοινωνίας και του υπολογισμού και της επεξεργαστικής δυνατότητας του δικτύου, που βελτιώνει τις ιδιότητες υπηρεσιών όπως η αντίληψη, η επικοινωνία και ο έλεγχος.

2. Κάλυψη

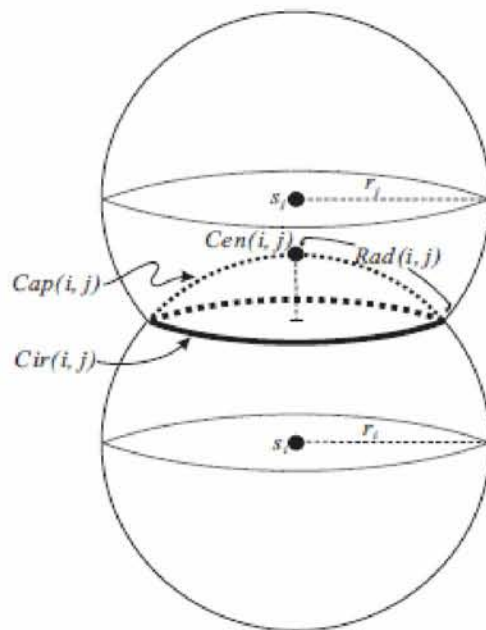
Ένα από τα θεμελιώδη ζητήματα σε δίκτυα αισθητήρων είναι το πρόβλημα της κάλυψης, η οποία αντικατοπτρίζει το πόσο καλά ένα δίκτυο αισθητήρων ελέγχεται ή παρακολουθείται από αισθητήρες. Η ταχεία πρόοδος των ασύρματων επικοινωνιών και των ενσωματωμένων μικρό-αισθητήρων έχει κάνει δυνατή την ασύρματη δικτύωση αισθητήρων. Στο παρελθόν, οι αισθητήρες ήταν συνδεδεμένοι με συρμάτινες γραμμές. Σήμερα, αυτό το περιβάλλον συνδυάζεται με την ad hoc τεχνολογία δικτύωσης, διευκολύνοντας έτσι την επικοινωνία. Η ευελιξία εγκατάστασης και ρύθμισης ενός δικτύου αισθητήρων είναι έτσι βελτιώνεται σημαντικά.

Επειδή οι αισθητήρες μπορούν να κλιμακωθούν με αυθαίρετο τρόπο, δύο θεμελιώδη ζητήματα σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι το πρόβλημα της κάλυψης και το πρόβλημα της εγκατάστασης. Δεδομένου ενός δικτύου αισθητήρων, το πρόβλημα κάλυψης είναι να καθορίσει πόσο καλά το πεδίο παρακολουθείται από αισθητήρες, ενώ το πρόβλημα εγκατάστασης είναι να ασχολείται με το πώς θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες για να πληρούν ορισμένες απαιτήσεις κάλυψης. Στην θεωρία, τα δύο αυτά προβλήματα έχουν διατυπωθεί με διάφορες μορφές. Στην υπολογιστική γεωμετρία, ένας κύκλος που καλύπτει μια ρύθμιση των κύκλων σε ένα πεδίο που μπορεί να καλύψει πλήρως το πεδίο. Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί η ακτίνα του κύκλου, δεδομένου σταθερό αριθμό κύκλων. Ένα άλλο σχετικό υπολογιστικό θέμα είναι ο καθορισμός του αριθμού των παρατηρητών κατά τρόπον ώστε κάθε σημείο του πεδίου να παρακολουθείται από τουλάχιστον έναν παρατηρητή. Προτείνονται διάφοροι πολυωνυμικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι βρίσκουν τη μέγιστη διαδρομή παραβίασης και τη μέγιστη διαδρομή υποστήριξης. Συναντάται συνήθως σε 2-d δίκτυα, δίνοντας επιθυμητές λύσεις.

2.1 Ανάγωση σε 3-d

Δεδομένου ενός συνόλου αισθητήρων σε 3D χώρο, θέλουμε να εξακριβωθεί εάν πρόκειται για ένα α -covered πεδίο, όπου α είναι ένα δεδομένο ακέραιο, στην έννοια ότι κάθε σημείο του πεδίου καλύπτεται από τουλάχιστον α αισθητήρες. Ενώ οι περισσότερες εφαρμογές μπορούν να απαιτήσουν $\alpha = 1$, υπάρχουν αυτές που απαιτούν $\alpha > 1$ και μπορεί να συμβεί σε περιπτώσεις όπου μια ισχυρότερη περιβαλλοντική παρακολούθηση ή δυνατότητα ανοχής σε σφάλματα είναι επιθυμητή, όπως είναι οι στρατιωτικές εφαρμογές. Μερικές εφαρμογές μπορούν να απαιτούν πολλαπλές αισθητήρες για την ανίχνευση μιας ενέργειας. Για παράδειγμα, η τριγωνοποίηση με βάση τα πρωτόκολλα θέσης, απαιτεί τη συνδρομή τριών τουλάχιστον αισθητήρων (π.χ., $\alpha \geq 3$), ανά πάσα στιγμή για την παρακολούθηση ενός κινούμενου αντικειμένου.

Κατά την πρώτη ματιά, το 3-d πρόβλημα κάλυψης, φαίνεται πολύ δύσκολο ωστόσο είναι εφικτή η λύση του. Προτείνεται μια λύση, μετατροπής από 3-d χώρο σε 2-d χώρο, και έπειτα σε 1-d χώρο. Στην ουσία προσπαθούμε να διαπιστώσουμε ποιος αισθητήρας αναλαμβάνει κάθε χώρο.

**Εικόνα 2**

Όσο οι σφαίρες κάθε αισθητήρα καλύπτονται επαρκώς, ολόκληρο το πεδίο καλύπτεται.

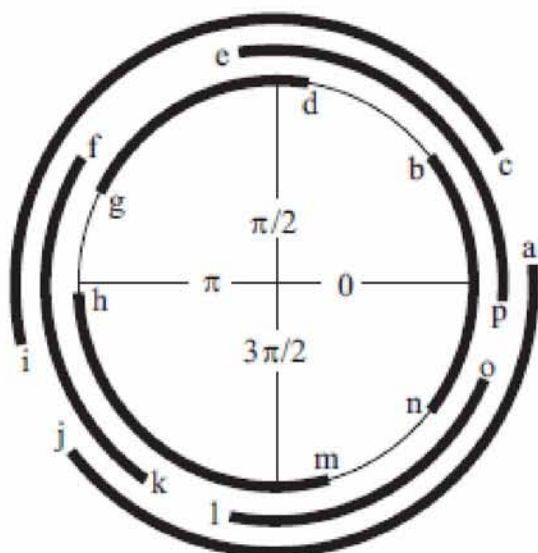
2.2 Δήλωση Προβλήματος

Δεδομένου ενός συνόλου αισθητήρων $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$, σε ένα 3-d πεδίο αισθητήρων, κάθε αισθητήρας βρίσκεται στο συντονισμό (X_i, Y_i, Z_i) και έχει φάσμα r_i . Έτσι η αισθητήρια περιοχή κάθε s_i αισθητήρα είναι μια σφαίρα με κέντρο (X_i, Y_i, Z_i) , με ακτίνα r_i , και συμβολίζεται ως $b_i = (X_i, Y_i, Z_i, r_i)$. Εξετάζοντας δύο αισθητήρες S_i, S_j και ένα σημείο A στο χώρο, ποιος αισθητήρας το καλύπτει;

Ορισμός: Ένα σημείο A καλύπτεται από έναν αισθητήρα S_i , αν είναι εντός του πεδίου κάλυψής του. Ένα σημείο A είναι a -covered αν καλύπτεται από a αισθητήρες.

2.2.1 Προτεινόμενη λύση

Ο αλγόριθμος προσπαθεί να καθορίσει αν η σφαίρα του υπό εξέταση αισθητήρα καλύπτεται επαρκώς. Περαιτέρω, αν οι σφαίρες όλων των αισθητήρων καλύπτονται από τους γειτονικούς, καλύπτονται επαρκώς. Μέσω της συλλογής πληροφοριών από όλους τους αισθητήρες μπορεί να αποδοθεί η σωστή λύση. Διαισθητικά μειώνουμε από 3-d σε 2-d χώρο και έπειτα σε 1-d χώρο. Ο αλγόριθμος μπορεί να εκτελεστεί είτε κεντρικά είτε σε ένα πλήρως καταναμημένο τρόπο ανεξάρτητα σε κάθε αισθητήρα. Πρώτον, κάθε αισθητήρας γνωρίζει και συλλέγει το πώς οι γειτονικοί αισθητήρες του διασταυρώνονται με τον εαυτό του και έτσι υπολογίζεται το αντίστοιχο σφαιρικό πεδίο. Στη συνέχεια, υπολογίζει τη σχέση μεταξύ των σφαιρικών πεδίων, και μπορούμε να καθορίσουμε το επίπεδο κάλυψης του κάθε κύκλου.



(Το πεδίο κάλυψης ενός αισθητήρα μπορεί να υπερκαλύπτεται από έναν άλλο αισθητήρα.)

Εικόνα 3

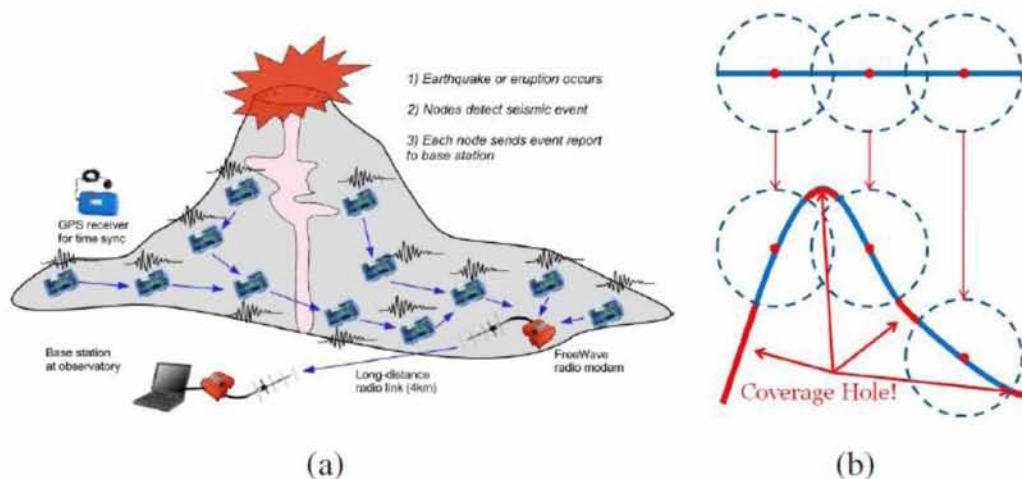
Καταλήγουμε πως η αντιμετώπιση προβλημάτων στο 3-d χώρο γίνεται σε πολυωνυμικό χρόνο. Το αποτέλεσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αξιοποίηση των αισθητήρων σε 3-d χώρο και στη μείωση των εν υπηρεσία χρόνου των ασύρματων αισθητήρων.

2.3 Επιφάνεια Κάλυψης

Όπως ειπώθηκε παραπάνω το σημαντικότερο πρόβλημα στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων είναι η κάλυψη. Οι υπάρχουσες μελέτες για το θέμα αυτό εστιάζονται σε 2-d ιδανική κάλυψη επιπέδου και σε 3-d πλήρη κάλυψη χώρου. Η 3D επιφάνεια ενός από τα στοχευόμενα πεδία ενδιαφέροντος συνήθως είναι πολύπλοκη όταν μιλάμε για εφαρμογές πραγματικού κόσμου και για αυτό οι υπάρχουσες μελέτες σχετικά με την κάλυψη δεν παράγουν πρακτικά αποτελέσματα.

Προτείνουμε ένα νέο μοντέλο κάλυψης που ονομάζεται *επιφάνεια κάλυψης*. Στην επιφάνεια κάλυψης, το πεδίο ενδιαφέροντος είναι μια σύνθετη επιφάνεια σε 3D χώρο όπου οι αισθητήρες μπορούν να αναπτυχτούν μονό στην επιφάνεια.

Τα μέχρι στιγμής αποτελέσματα ερευνών δεν μας καλύπτουν αρκετά, σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου. Ένα παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη αισθητήρων για τη παρακολούθηση του ηφαιστείου Tungurahua. Η κλασική 2-d ανάπτυξη αισθητήρων, δεν μπορούσε να αποφύγει την ύπαρξη περιοχών – «τρυπών» στην κάλυψη.



Εικόνα 4

Τα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε όσον αφορά την επαρκή κάλυψη της δραστηριότητας, είναι ο αριθμός των αισθητήρων που χρειαζόμαστε για να υπάρχει μια αναμενόμενη κάλυψη και ποιος ο τρόπος ανάπτυξης αυτών.

2.3.1 Δεδομένα και δήλωση προβλήματος

Προτού προχωρήσουμε στους αλγορίθμους, είναι αναγκαίο να κάνουμε κάποιες δηλώσεις δεδομένων.

Αρχικά υποθέτουμε πως όλοι οι αισθητήρες έχουν την ίδια ακτίνα κάλυψης r στον 3-d χώρο. Επίσης η επιφάνεια κάλυψης μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση συντεταγμένου χώρου ως $z = f(x,y)$. Αν $z = c$ (c / *constant*) πρόκειται για επίπεδη επιφάνεια, ενώ αν $z = ax + by + c$ τότε πρόκειται για επιφάνεια με κλίσεις.

Στις γενικά πολύπλοκες επιφάνειες κάλυψης, η πεπατημένη είναι να απλοποιούμε την επιφάνεια, διαιρώντας σε πολλά τρίγωνα, ικανά να καλυφτούν από τη γνωστή 2-d κάλυψη. Έτσι και με στοχαστική τυχαία ανάπτυξη των αισθητήρων καταλήγουμε σε μια επαρκή κάλυψη.

Αποδεικνύεται πως η βέλτιστη κάλυψη ενός περίπλοκου χώρου είναι ένα συνεχές δύσκολο πρόβλημα. Προτείνονται δυο αλγόριθμοι, οι οποίοι διακρίτοποιούν το πρόβλημα και παρέχουν κατά προσέγγιση λύσεις.

Επεξήγηση σύμβολων

- N : μήκος του πλέγματος
 - m : αριθμός συνθηκών
 - n : αριθμός μεταβλητών
 - i : αριθμός εμφανίσεων της i th μεταβλητής ($1 \leq i \leq n$).
- e : αριθμός των άκμων

2.3.2 Αλγόριθμος 1 (Greedy Algorithm)

Input : Partition \mathcal{P} , function h of every pieces S_i
Output: A subset \mathcal{P}' of \mathcal{P}

```

1  $\mathcal{P}' \leftarrow \emptyset; \mathcal{C} \leftarrow \emptyset;$ 
2 while  $\mathcal{C} \not\subseteq \mathcal{P}$  do
3    $m \leftarrow 0, x \leftarrow 0;$ 
4   for every  $S_i$  in  $\mathcal{P} - \mathcal{P}'$  do
5     if  $|h(S_i) - \mathcal{C}| > m$  then
6        $m \leftarrow |h(S_i) - \mathcal{C}|; x \leftarrow i;$ 
7     end
8   end
9    $\mathcal{P}' \leftarrow \mathcal{P}' \cup \{S_x\}; \mathcal{C} \leftarrow \mathcal{C} \cup h(S_x);$ 
10 end
```

Επιλέγει μια θέση που μπορεί να αυξήσει την καλυπτόμενη περιοχή.

2.3.3 Αλγόριθμος 2 (Divide & Conquer)

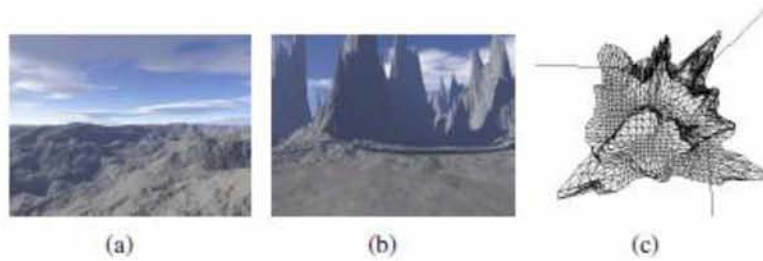
Input : Partition \mathcal{P} , the function h of every pieces S_i
Output: A subset \mathcal{P}' of \mathcal{P}

```

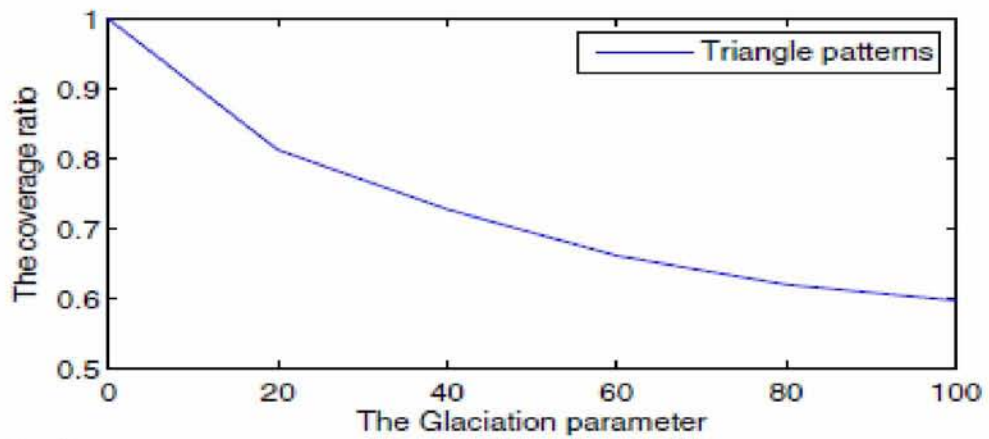
1 Divide  $\mathcal{P}$  into vertical strips to generate  $l$  shifting
  partitions  $P^1, P^2, \dots, P^l;$ 
2 for each shifting partition  $P^i$  do
3   for each strip group  $P_j^i \in P^i$  do
4     Divide  $P_j^i$  into horizontal strips to generate  $l$ 
     shifting partitions  $SP^1, SP^2, \dots, SP^l;$ 
5     for each shifting partition  $SP^u$  do
6       for each strip group  $SP_v^u \in SP^u$  do
7         Using brute-force algorithm to solve the
         subproblem  $SP_v^u$  and let the result be  $R_v^u;$ 
8       end
9        $R^u \leftarrow \bigcup_{v=1}^{\lceil \frac{m}{1 \times D} \rceil} R_v^u;$ 
10    end
11     $R_j^i \leftarrow \min_{|R^u|} R^u;$ 
12  end
13   $R^i \leftarrow \bigcup_{j=1}^{\lceil \frac{n}{1 \times D} \rceil} R_j^i;$ 
14 end
15  $\mathcal{P}' \leftarrow \min_{|R^i|} R^i;$ 
```

Διαρεί τη περιοχή σε κάθετες λωρίδες πλάτους D

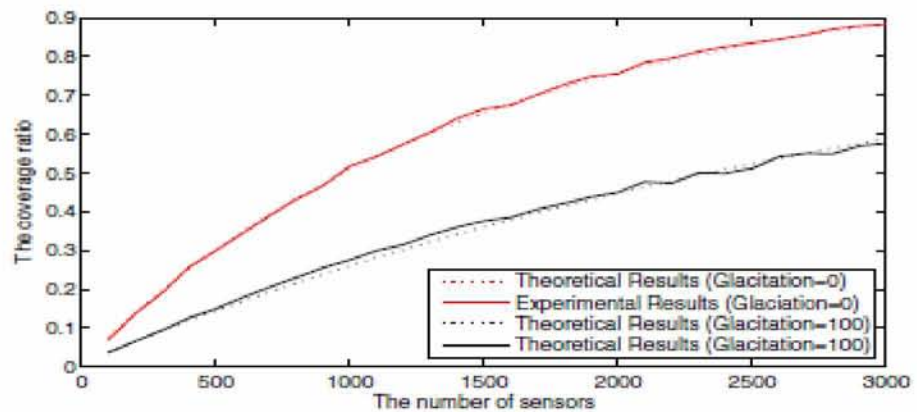
Λαμβάνοντας υπόψιν την παράμετρο *Glaciation*, σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του εδάφους παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα. Όταν $Glaciation = 0$ τότε η κάλυψη είναι 100%. Τριγωνοποιούμε τις επιφάνειες και έχουμε:



Εικόνα 5 : Περιοχή μετά από τριγωνοποίηση



Εικόνα 6



Εικόνα 7

Το ύψος κυμαίνεται από 300m – 2000m και η ακτίνα κάθε αισθητήρα είναι 30m

2.4 Συμπεράσματα

- Η επιφάνεια δε μπορεί να αποτιμηθεί σαν μια ενιαία συνάρτηση.
- Λάθη και μη αναλογίες μεταξύ επίπεδων επιφανειών και επιφανειών με κλίσεις.
- Σχέση μεταξύ μέτρου κάλυψης επιφάνειας και της επιφάνειας καθαυτής.
- Τελικώς το πρόβλημα της σύνδεσης.

3. Μεγάλης Κλίμακας Κάλυψη

Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) είναι η εστίαση πολλών ερευνητικών θεμάτων τα τελευταία χρόνια. Τα δίκτυα αισθητήρων που τροφοδοτούνται από τις μπαταρίες ή που φορτίζονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών από την επιτήρηση και την ασφάλεια σε στρατιωτική χρήση έως στη συλλογή δεδομένων σε αστική χρήση. Σαν ανάπτυξη WSN, οι ερευνητές προσπαθούν να διαδώσουν το δισδιάστατο δίκτυο αισθητήρων στην τρισδιάστατη περιοχή για μια ευρύτερη χρήση. Παραμελούμε την περίπτωση όταν οι κόμβοι είναι στο όριο δικτύων.

Η κάλυψη των δικτύων αισθητήρων αντιπροσωπεύει την ποιότητα της επιτήρησης μπορεί να παρέχει. Είναι πολύ σημαντικό να βρεθεί πώς η κάλυψη δικτύων εξαρτάται από τις διάφορες παραμέτρους δικτύων προκειμένου να δοθεί στα δίκτυα αισθητήρων ένα καλύτερο σχέδιο χρήσης για τα διαφορετικά σενάρια. Δεδομένου ότι ο περιορισμός ενέργειας και εύρους ζώνης είναι οι περιορισμοί των εφαρμογών δικτύων αισθητήρων, εργαζόμαστε στο πώς να αποφασίσουμε την πυκνότητα κόμβων αισθητήρων για να εγγυηθούμε μια ολική κάλυψη και να μειώσουμε τους κόμβους αισθητήρων πλεονασμού για να μειώσουμε την κατανάλωση ενέργειας. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος

κάλυψης για το τρισδιάστατο δίκτυο αισθητήρων μεγάλης κλίμακας. Ο αλγόριθμος κάλυψης που χρησιμοποιεί το διευκρινισμένο τρισδιάστατο πρότυπο δικτύων λύνει τα προβλήματα πυκνότητας και πλεονασμού των δικτύων αισθητήρων. Η πυκνότητα κάλυψης υπολογίζεται για να εγγυηθεί τη ολική κάλυψη. Η απόσταση μεταξύ του κόμβου και του τετραεδρικού παρακείμενου κόμβου της συγκρίνεται με την ακτίνα κάλυψης r , και εάν η μέγιστη απόσταση δεν είναι μεγαλύτερη από το r , μπορούμε να θέσουμε την τοποθέτηση των κόμβων.

3.1 Καθορισμός Προβλήματος

Ένα δίκτυο αισθητήρων θεωρείται πλήρως καλυπτόμενο εάν δεν υπάρχει καμία κενή περιοχή κάλυψης στο δίκτυο. Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στην κατασκευή ενός καλού δικτύου αισθητήρων είναι να διατηρηθεί η μακροχρόνια διάρκεια ζωής δικτύων καθώς επίσης και η ολική κάλυψη. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος σε ένα μεγάλης κλίμακας δίκτυο, μια μέθοδος είναι να εξασφαλιστεί μια ικανοποιητική πυκνότητα των διασκορπισμένων αισθητήρων κατά τη διάρκεια της επέκτασης κόμβων αισθητήρων και να απενεργοποιηθούν οι κόμβοι αισθητήρων πλεονασμού. Τα δύο προβλήματα που καλύπτονται είναι τα εξής:

I. *Πρόβλημα Κάλυψης*: Στις περιπτώσεις του προτύπου διανομής αισθητήρων, βρείτε την πυκνότητα των κόμβων αισθητήρων που επεκτείνονται στην τρισδιάστατη περιοχή.

Πριν από τη δήλωση του προβλήματος II, εισάγουμε τους ακόλουθους ορισμούς:

Ορισμός 1 (γειτονικό σύνολο): Το γειτονικό σύνολο S_i ορίζεται ως εξής: $N(S_i) = \{S_j \in N \mid d(S_i, S_j) < r, i \neq j\}$, όπου το N αποτελεί το σύνολο των κόμβων στο δίκτυο.

Ορισμός 2 (σύνολο επικοινωνίας): Το σύνολο επικοινωνίας του αισθητήρα S_i ορίζεται ως εξής: $C(S_i) = \{S_j \in N \mid d(S_i, S_j) < 2r, i \neq j\}$, όπου το N αποτελεί το σύνολο των κόμβων στο δίκτυο.

Ορισμός 3 (πλεονάζων κόμβος): Ένας κόμβος ονομάζεται πλεονάζων εάν ισχύει: $\bigcup_{S_j \in C(S_i)} C_j \supseteq C_i$, όπου το C_i είναι η ακτίνα κάλυψης του κόμβου S_i .

Π. *Πρόβλημα Κάλυψης Πλεονασμού*: Δεδομένου ενός συνόλου κόμβων και της περιοχής κάλυψής τους, βρείτε τους πλεονάζοντες κόμβους και επιλεκτικά απενεργοποιήστε τους έτσι ώστε να διασφαλιστεί μια πλήρης κάλυψη.

3.2 Τρισδιάστατο μοντέλο δικτύου

3.2.1 Τυπολογικό μοντέλο

Υποθέτουμε ότι οι θέσεις ενός μεγάλου αριθμού τυχαία διασκορπισμένων αισθητήρων ομοιόμορφα και ανεξάρτητα κατανεμημένων σε μια απέραντη τρισδιάστατη γεωγραφική περιοχή. Η θέση των αισθητήρων μπορεί να διαμορφωθεί με μια στατική διαδικασία σημείου Poisson. Ορίζεται η πυκνότητα της διαδικασίας σημείου Poisson ως λ από τον αριθμό αισθητήρων ανά μονάδα όγκου. Ο αριθμός αισθητήρων ($N(V)$) που βρίσκονται στην περιοχή V ακολουθεί μια διανομή Poisson της παραμέτρου $\lambda\|V\|$, όπου $\|V\|$ αντιπροσωπεύει τον όγκο της τρισδιάστατης περιοχής.

$$P(N(V)) = k = \frac{e^{-\lambda\|V\|} (\lambda\|V\|)^k}{k!}$$

3.2.2 Μοντέλο αισθητήρων

Λαμβάνεται μόνον υπ' όψιν ένα Boolean μοντέλο αισθητήρων. Ο αισθητήρας μπορεί μόνο να εντοπίσει γεγονότα και να ελέγξει το περιβάλλον στην περιοχή κάλυψής του r (ορισμός 4). Μια περιοχή καλύπτεται αν εμπίπτει στην περιοχή κάλυψης από τουλάχιστον έναν αισθητήρα. Ο χώρος χωρίζεται σε δύο περιοχές: την καλυπτόμενη περιοχή και την μη καλυπτόμενη, η οποία είναι το συμπλήρωμα της πρώτης.

Ορισμός 4 (περιοχή κάλυψης): Η περιοχή κάλυψης ενός αισθητήρα S είναι το σύνολο των σημείων όπου ένα φαινόμενο μπορεί να ανιχνευθεί από τον αισθητήρα S , π.χ. $A_s = \{p \in r^3\}$.

3.3 Αλγόριθμος κάλυψης για τρισδιάστατα δίκτυα αισθητήρων μεγάλης κλίμακας

3.3.1 Κάλυψη χώρου

Καθορίζουμε το διάστημα f ($0 < f < 1$) ως την πιθανότητα ενός σημείου να καλύπτεται στην περιοχή βασιζόμενοι στο μοντέλο δικτύου. Δείχνουμε ότι υπάρχει μια σχέση μεταξύ του f και της παραμέτρου πυκνότητας λ . Στον προγραμματισμό δικτύων, είναι απαραίτητο να αποφασιστεί η πυκνότητα αισθητήρων για να επιτευχθεί η απαραίτητη χωρική κάλυψη.

Θεωρώντας ένα τρισδιάστατο διάστημα όπου οι αισθητήρες διανέμονται ομοιόμορφα μέσου μιας πυκνότητας αισθητήρων λ . Για ένα αυθαίρετο σημείο p στο διάστημα V , ο αναμενόμενος αριθμός αισθητήρων που βρίσκονται σε αυτό το διάστημα είναι $\lambda \|V\|$, ενώ κάθε αισθητήρας έχει μορφή σφαίρας με όγκο $\frac{4}{3}\pi r^3$. Η πιθανότητα το p να μη βρίσκεται μέσα σε έναν τυχαίο αισθητήρα είναι:

$$P = 1 - \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{\lambda \|V\|}$$

Θεωρώντας τον αριθμό των αισθητήρων N , η πιθανότητα του σημείου p να μην ανήκει σε καμία περιοχή ευθύνης κάποιου αισθητήρα ισούται με P^N . Για μεγάλης κλίμακας δίκτυα, το $\|V\|$ προσεγγίζει το ∞ , και το P^N προσεγγίζει στο $e^{-\frac{4}{3}\lambda\pi r^3}$. Γι' αυτό η πυκνότητα που απαιτείται είναι:

$$f = 1 - e^{-\frac{4}{3}\lambda\pi r^3} \Rightarrow \lambda = -\frac{3}{4\pi r^3} \ln(1 - f)$$

3.3.2 Πλεονασμός κάλυψης

Στη ρεαλιστική κατάσταση, όχι μόνο οι αισθητήρες στο σύνολο γειτόνων αλλά και οι αισθητήρες στο σύνολο επικοινωνίας έχουν τη συμβολή για να καταστήσουν έναν κόμβο περιττό. Σκοπεύουμε να κρίνουμε εάν ένας κόμβος είναι περιττός ή όχι από την αναζήτηση του τετραεδρικού γειτονικού κόμβου στην επικοινωνία του και συγκρίνοντας τις αποστάσεις μεταξύ τους με ακτίνα κάλυψης r .

3.3.3 Ανακάλυψη του πλεονασμού κάλυψης

Η τετραεδροποίηση των συνόλων σημείου στο διάστημα είναι ένα υπολογιστικά σύνθετο γεωμετρικό πρόβλημα. Δεδομένου ότι έχει μια απέραντη εφαρμογή στις διαφορετικές περιοχές, οι ερευνητές έχουν κάνει πολλή εργασία για αυτό. Ο Chazelle παρουσιάζει έναν αλγόριθμο για να χωρίσει ένα τρισδιάστατο μη-κυρτό πολύτοπο σε έναν μικρό αριθμό στοιχειωδών κυρτών μερών. Απαιτεί $O(n+r^2)$ διάστημα και τρέχει σε $O((n+r^2)\log r)$ όπου το r και το n είναι ο αριθμός των ακρών και των ακμών ξεχωριστά.

Ο στόχος μας είναι να ψάξουμε τετραεδρικά γειτονικά σύνολα κόμβων του εξεταζόμενου κόμβου αντί να τριγωνοποιούμε κόμβους στο τρισδιάστατο χώρο. Καθώς το τετραεδρικό σύνολο γειτονικών κόμβων αποφασίζεται, συγκρίνουμε την απόσταση μεταξύ του κόμβου και του τετραεδρικού παρακείμενου κόμβου με ακτίνα κάλυψης r . Εάν η μέγιστη απόσταση δεν είναι μεγαλύτερη από το r , μπορούμε να θέσουμε τον πλεονασμό κόμβων. Ο αλγόριθμος είναι κάτω από την υπόθεση ότι δεν υπάρχει καμία «τρύπα» στο δίκτυο και η λεπτομέρεια περιγράφεται ως εξής:

Αρχικοποίηση: Για έναν αισθητήρα A , βρες το σύνολο επικοινωνίας $γ_i$ αυτών, δηλαδή το σύνολο $S = \{i \in N : d(A, i) < 2r, i \neq A\}$. Θέσε το τετραεδρικό σύνολο ως $Tetra\{\} = \emptyset$, ένα σύνολο κόμβων $Temp\{\} = \emptyset$ και μια μεταβλητή $temp=0$.

Ο αλγόριθμος: Επέλεξε τρία σημεία (B, C, D) από το S τα οποία είναι πιο κοντινά στο A , $Tetra\{\} = ABCD$, και διέγραψε το B, C και D από το S .

Αν το S είναι κενό τότε

```

{
    Επέλεξε έναν κόμβο  $E$  στο  $S$ 
    Αν το  $E$  είναι εσωτερικό σημείο του τετραέδρου στο  $Tetra\{\}$  τότε
        Χώρισε το τετράεδρο σε τρία νέα τετράεδρα και πρόσθεσέ τα στο
         $Tetra\{\}$ 
    Αλλιώς εάν το  $AE$  διαπερνά το επίπεδο των τετραέδρων στο  $Tetra\{\}$ 
        Σβήσε το  $E$  από το  $S$ 
    Αλλιώς
        Μετακίνησε το  $E$  από το  $S$  στο  $Temp\{\}$  αύξησε κατά 1
        Εάν  $temp==3$ 
            {
                Τετραεδροποίησε το  $A$  μαζί με τα τρία στοιχεία στο
                 $Temp\{\}$  και πρόσθεσε το αποτέλεσμα στο  $Tetra\{\}$ 
                Θέσε  $Temp\{\} = \emptyset$  και  $temp=0$ 
            }
}
}

```

Αποτέλεσμα: Θέσε το $TetraNeigh\{\}$ ως το σύνολο κόμβων όλων των κόμβων που κατασκεύασαν το τετράεδρο στο $Tetra\{\}$, υπολόγισε τις αποστάσεις ανάμεσα στο A και στους κόμβους στο $TetraNeigh\{\}$. Εάν το μέγιστο δεν είναι μεγαλύτερο από την ακτίνα κάλυψης r , το A είναι πλεονάζων κόμβος.

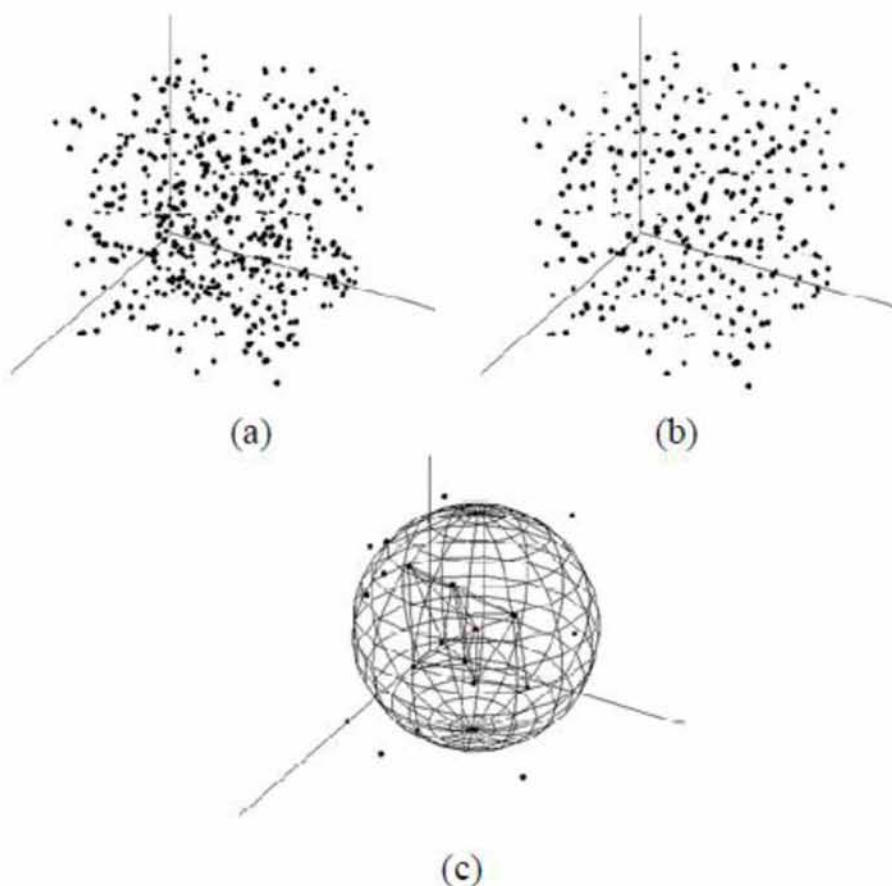
3.3.4 Μειούμενος πλεονασμός

Μόνο μέρος των κόμβων πλεονασμού μπορεί να απενεργοποιηθεί δεδομένου ότι μπορεί να κάνει «τρύπες» εάν οι διαδοχικοί γειτονικοί κόμβοι απενεργοποιούνται σε ταυτόχρονα. Κάνουμε τις συγκρίσεις για το βαθμό πλεονασμού (ορισμός 5) μεταξύ των αισθητήρων. Ο βαθμός πλεονασμού ενός κόμβου πλεονασμού που δεν έχει κανέναν πλεονασμό γειτόνων είναι 0 ενώ ένας κανονικός κόμβος είναι -1. Αρχίζουμε με να μειώνουμε το μέγιστο κόμβο βαθμού πλεονασμού, καθώς ο κόμβος απενεργοποιείται ο βαθμός πλεονασμού όλων των γειτόνων θα τεθεί -1. Τέτοιος βρόχος εκτελείται έως ότου όλοι οι βαθμοί πλεονασμού είναι -1.

Ορισμός 5 (βαθμός πλεονασμού): Για έναν πλεονάζων αισθητήρα, ο αριθμός του γειτονικού πλεονάζοντα κόμβου ορίζεται ως ο Βαθμός Πλεονασμού του.

Προσομοίωση και πειραματικά αποτελέσματα

Μια μειωμένη κάλυψη λαμβάνεται για μια δεδομένη τοποθέτηση των κόμβων αισθητήρων στο τρισδιάστατο δίκτυο αισθητήρων. Ένας αριθμός 500 κόμβων είναι αρχικά διασκορπισμένοι στην περιορισμένη τρισδιάστατη περιοχή (10m*10m*10m) (Εικόνα1 (α)). Υποθέστε ότι η απαραίτητη πυκνότητα αισθητήρων είναι 0.3 κόμβοι ανά κυβικό μέτρο. Η διασκορπισμένη πυκνότητα κόμβων είναι ελαφρώς υψηλότερη από την απαίτηση. Μετά το ψάξιμο και το κλείσιμο των κόμβων πλεονασμού από τον αλγόριθμο, οι κόμβοι 29% κλείνουν ως κόμβοι πλεονασμού (Εικόνα1 (b)). Μπορεί να δει ότι η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται πολύ.



Εικόνα 8: Πειραματικά αποτελέσματα

Η υπολογιστική πολυπλοκότητα εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό κόμβων στο δίκτυο και τον αριθμό κόμβων στην επικοινωνία που τίθεται για κάθε κόμβο. Για ένα μεγάλης κλίμακας δίκτυο, ο αλγόριθμος είναι βέλτιστος για την τοπική ανίχνευση πλεονασμού. Είναι αρκετά χρήσιμος για το αυτό-έλεγχο πλεονασμού. Για τον κόμβο στο κέντρο της σφαίρας επικοινωνίας (Εικόνα1 (c)), μπορεί να καταγραφεί ως κόμβος πλεονασμού δεδομένου ότι η μέγιστη τετραεδρική παρακείμενη γραμμή δεν είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα κάλυψης.

3.4 Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκε ένας αλγόριθμος κάλυψης χρησιμοποιώντας το διευκρινισμένο τρισδιάστατο πρότυπο δικτύων. Λύνει τα προβλήματα πυκνότητας και πλεονασμού αισθητήρων δικτύων. Ο αλγόριθμος οδηγεί σε μεγάλη ενεργειακή εξοικονόμηση.

4. Ανάπτυξη 3-d Ασυρμάτου Δικτύου Αισθητήρων για Κάλυψη με Περιορισμούς.

Εγκαθιστώντας ένα 3-d δίκτυο αισθητήρων, θέλουμε να επιτύχουμε τη μέγιστη κάλυψη με την ελαχίστη δυνατή χρήση αισθητήρων. Τα τυπικά σενάρια ανάπτυξης αισθητήρων επιβάλλουν περιορισμούς σχετικά με τις πιθανές θέσεις των αισθητήρων, καθώς και με την επιθυμητή κάλυψη, αλλά προς το παρόν δεν υπάρχει ενιαίος τρόπος να χειριστεί αυτά τα προβλήματα και τη βελτιστοποίηση του αριθμού των αισθητήρων που τοποθετείται.

Η προσέγγιση της διακριτοποίησης μας επιτρέπει να χειριζόμαστε τη τοποθέτηση του αισθητήρα ως ένα διακριτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, και ως εκ τούτου εφαρμόζει εύκολα κατανοητές και ευέλικτες διακριτές τεχνικές. Τα αποτελέσματά μας δείχνουν ότι αυτή η

προσέγγιση λύσεων, που ελαχιστοποιούν σχεδόν τον αριθμό των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται, παρέχουν ταυτόχρονα υψηλό βαθμό κάλυψης.

Μεγάλο μέρος της έρευνας σχετικά με την ανάπτυξη αισθητήρων, έχει επικεντρωθεί στη 2-d κάλυψη, αλλά αυτό δεν εφαρμόζεται στην περίπτωση μας. Στην δική μας περίπτωση, υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με τον τρόπο που οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν, όπως π.χ. οι αισθητήρες θα μπορούσαν μόνο να τοποθετούνται στους τοίχους και στις οροφές των διαδρόμων ενός κτηρίου. Από την άλλη λόγω των συχνών περίπλοκων οικοδομικών κτηρίων, ένας αισθητήρας μπορεί να μην καλύπτει 100% τον σφαιρικό χώρο, που θεωρητικά θα έπρεπε να καλύπτει. Αυτό μας οδηγεί στην εύρεση νέων τεχνικών τοποθέτησης των αισθητήρων.

4.1 Δήλωση Προβλήματος

Το πρόβλημα εγκατάστασης των αισθητήρων μπορεί να διαμορφωθεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης ως εξής: Ο αριθμός των αισθητήρων πρέπει να μειωθεί στο ελάχιστο, ενώ ορισμένοι περιορισμοί που θα πρέπει να πληρούνται είναι οι εξής:

- Η περιοχή κάλυψης, να καλύπτεται επαρκώς από τους αισθητήρες.
- Οι αισθητήρες τοποθετούνται σε "έγκυρες" τοποθεσίες. Κριτήριο για την έγκυρη κάλυψη μας είναι η υποχρέωση γενικής k-κάλυψης για κάποιο θετικό ακέραιο k.

Ας υποθέσουμε ότι η επιθυμητή περιοχή κάλυψης είναι η R. Επίσης υποθέτουμε ότι μας δίνεται ένα πεπερασμένο σύνολο των τοποθεσιών όπου L αισθητήρες μπορούν δυνητικά να τοποθετηθούν. Κάθε δυνητική θέση ℓ αισθητήρα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο

$$R_{\ell} \subset R$$

όπου όλα τα σημεία του R καλύπτονται από τον αισθητήρα της ℓ θέσεως. Αν στο σύνολο αυτό υπάρχουν k αισθητήρες που καλύπτουν ένα σημείο p τότε έχουμε k-κάλυψη.

Ο στόχος είναι να βρεθούν όλα εκείνα τα σημεία τοποθέτησης των αισθητήρων, όπου θα καλύπτουν επαρκώς την περιοχή, χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο δυνατό αριθμό αισθητήρων.

Ακολουθώντας την προσέγγιση της διακριτοποίησης – η οποία στην ουσία, ξεπερνά το πρόβλημα της συνεχούς βελτιστοποίησης – χρησιμοποιούμε πιο ευέλικτες τεχνικές για την εγκατάσταση των αισθητήρων.

Τι κερδίζουμε;

- Οι περιοχές κάλυψης κάθε αισθητήρα δε χρειάζεται να είναι αναγκαστικά σφαιρικές. Όντας πιο πολύπλοκα σχήματα, κερδίζουμε σε περιβάλλοντα κτηρίων.
- Οι πιθανές θέσεις των αισθητήρων, δεν αποτελούν απλά μέρος του προβλήματος, αλλά συμβολή στη λύση του, παρακάμπτοντας πιο εύκολα τυχόν κλασσικούς περιορισμούς. (Ευνοϊκή μεταχείριση σε 3-d δίκτυα)
- Τελικώς, καθαρό κέρδος. Τα αποτελέσματα ερευνών δείχνουν περιπτώσεις όπου ο τελικός αριθμός αισθητήρων πλησίαζε στον ελάχιστο αριθμό!

Παρ' όλα αυτά, η διακριτοποίηση δεν μπορεί να εγγυηθεί *k-κάλυψη* όλης της επιθυμητής περιοχής. Έτσι είναι πιθανό να υπάρχουν «τρύπες» στη κάλυψη, οι οποίες όμως να είναι αμελητέες.

Στην πράξη, για πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων π.χ. των επιχειρήσεων εκκένωσης έκτακτης ανάγκης, η κάλυψη είναι απολύτως εντάξει. Για παράδειγμα, αποδεικνύεται πως με 99% 3-d κάλυψη ενός χώρου, αν υπάρχει πυρκαγιά σε μια περιοχή-τρυπά, ο καπνός θα ανιχνευτεί από τον παρακείμενο αισθητήρα.

4.2 Αλγόριθμοι Διακριτοποίησης

Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι διακριτοποίησης, όπως απλοί άπληστοι αλγόριθμοι και αλγόριθμοι βασισμένοι σε Γραμμικό Προγραμματισμό. Ο πιο επιτυχημένος αλγόριθμος όμως, είναι βασισμένος στον *Iterated Enhanced Greedy (ITEG) algorithm*.

4.2.1 ITEG

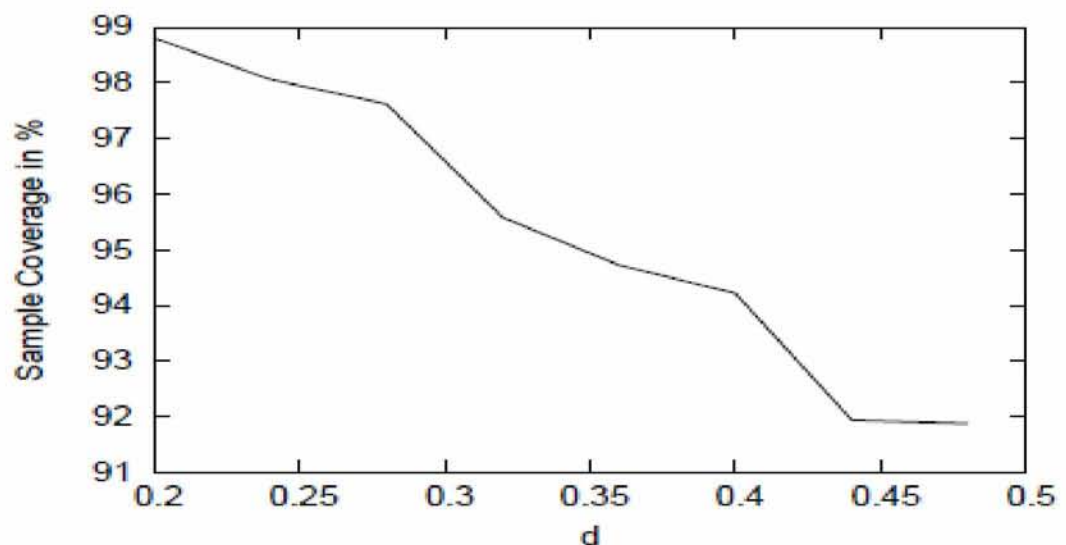
Ο *ITEG* χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο που ονομάζεται *Enhanced Greedy (EG)*. Η τροποποιημένη έκδοσή μας παρουσιάζεται παρακάτω:

Input: A set of possible sensor locations L , a representative set G , and a coverage value k
Output: A set of sensor locations S which are suggested locations for placing sensors
while $\bigcup_{s \in S} C(s)$ does not k -cover G **do**
 $S \leftarrow S \cup \{k_select_add()\}$
 while $remove_is_ok()$ **do**
 $S \leftarrow S - k_select_remove()$
 end while
end while
 $S = optimize(S)$

- **k select add():** Επιστρέφει την θέση ενός αισθητήρα, και προστίθεται στο S
- **k select remove():** Ομοίως
- **remove is ok():** Επιστρέφει περιττές θέσεις και προτείνει την αφαίρεση τους.
- **optimize():** Επιβλέπει τους αισθητήρες που υπερτερούν. Κάθε superior αισθητήρα, κάνει δύο άλλους περιττούς.

4.2.2 Απόδοση ITEG

Διακριτοποίηση (R, d, ℓ) , d απόσταση πλέγματος και χρήση μεθόδου Monte Carlo για τον υπολογισμό της καλυπτόμενης περιοχής:



Εικόνα 9: Βλέπουμε πως όσο το d μειώνεται τόσο η κάλυψη βελτιώνεται.

4.3 Συμπεράσματα Διακριτοποίησης

Η διακριτοποίηση είναι ένας ευέλικτος τρόπος για τη βελτιστοποίηση της εγκατάστασης των αισθητήρων σε ένα ασύρματο 3-d δίκτυο, με ύπαρξη περιορισμών όπως οι θέσεις των αισθητήρων και μη ομοιόμορφες περιοχές κάλυψης. Μέχρι στιγμής η ερευνά και τα αποτελέσματα πάνω στη τεχνική της διακριτοποίησης είναι όχι ιδιαίτερα ανεπτυγμένη, καθώς ο πιο απλός τρόπος διακριτοποίησης θεωρείται η διαίρεση της περιοχής σε πλέγματα. Είναι πιθανό πως υπάρχουν καλύτεροι τρόποι διακριτοποίησης, και αυτό αποτελεί χώρο για μελλοντική ερευνά.

5. Υποβρύχια Συστήματα

Μια ακόμη εφαρμογή των 3-d δικτύων αισθητήρων, είναι η παρακολούθηση υποβρύχιων συστημάτων. Άλλωστε με την επιδείνωση της παγκόσμιας ρύπανσης των υδάτων, παρατηρείται ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την παρακολούθηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος, για την επιστημονική έρευνα, την εμπορική εκμετάλλευση αλλά και την προστασία των ακτών.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, οι αισθητήρες αναπτύσσονται ομοιόμορφα στην επιφάνεια των υδάτων, στην περιοχή παρακολούθησης. Μετά την ανάπτυξη τους, βυθίζονται σε διάφορα βάθη, έτσι ώστε να διατηρείται η επιθυμητή περιοχή κάλυψης - παρακολούθησης. Τα αποτελέσματα ερευνών, δείχνουν πως αυτό το μοντέλο κάλυψης υπερτερεί αυτών των μονοδιάστατων ή και δισδιάστατων μοντέλων κάλυψης, με τυχαίο τρόπο ανάπτυξης και βύθισης των αισθητήρων.

5.1 UWSNs

Όπως έχει αναφερθεί, με τον όρο Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks (WSNs)), εννοούμε μια τεχνολογία απόκτησης πληροφοριών με την ανάπτυξη της ασύρματης επικοινωνίας, αισθητήρων και MEMS τεχνολογίας. Μια επέκταση αυτής της τεχνολογίας, είναι το Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs), το Υποβρύχιο Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων, το οποίο και διαφέρει σημαντικά από κάθε επίγειο δίκτυο αισθητήρων. Πιο συγκεκριμένα το UWSNs στηρίζεται στην τοπική και συντονισμένη συνεργασία δικτύου ανάμεσα σε μεγάλο αριθμό (πιθανώς εκατοντάδες ως χιλιάδες) χαμηλού κόστους αισθητήρων, καθιστώντας την μια νέα πρόκληση. Για εγγυημένη απόδοση του δικτύου, πρέπει να καθοριστεί εξ αρχής αν η περιοχή παρακολούθησης καλύπτεται ή όχι από συνεργαζόμενο δίκτυο αισθητήρων. Πρόβλημα στο οποίο έχουν δώσει λύση πολλά άλλα 2-d μοντέλα, αλλά όχι τα 3-d, μιας και το πρόβλημα εδώ είναι η παροχή μόνο κατά προσέγγιση πληροφοριών. Επιπλέον τα UWSNs περιορίζονται από επιπλέοντα κινητικότητα αναμονής, περιορισμένη ικανότητα σύνδεσης και καθυστέρηση διάδοσης.

Έτσι η κάλυψη ελέγχου για UWSNs αποτελεί ένα τυπικό τρισδιάστατο πρόβλημα ελέγχου κάλυψης.

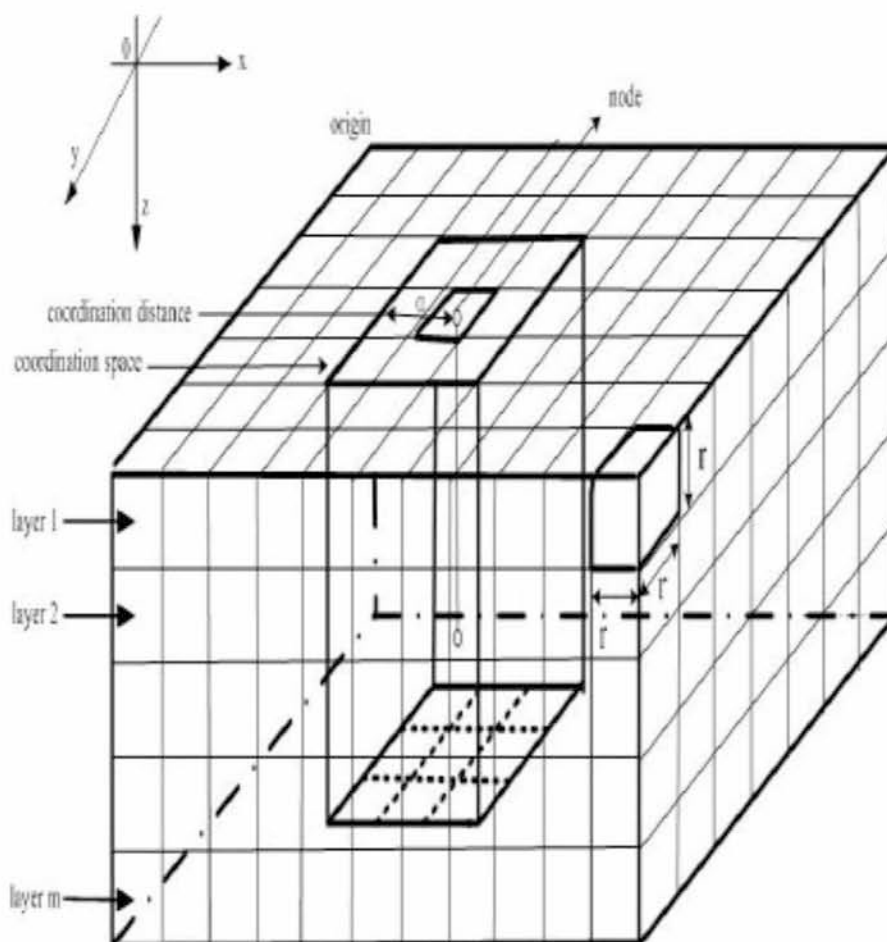
5.2 Προτεινόμενος Αλγόριθμος

Προτείνεται ένας αλγόριθμος κάλυψης UWSNs βασισμένος σε τυχαία ανάπτυξη στην επιφάνεια των αισθητήρων. (Οι αισθητήρες κατανέμονται τυχαία σε δυο διαστάσεις στην επιφάνεια των υδάτων). Συνήθη προβλήματα που

παρατηρούνται είναι πως η θέση του κόμβου δεν μπορεί να αλλάξει μετά την αρχική εγκατάσταση, και η συγκέντρωση κόμβων λόγω της τυχαίας εγκατάστασης, γεγονός που περιορίζει την τρισδιάστατη κάλυψη του υποβρύχιου χώρου για το σύνολο του δικτύου αισθητήρων. Ακόμη πρέπει να αναφερθεί πως κάθε υγρότοπος έχει τη δική του ιδιαιτερότητα σε σύγκριση με το τεράστιο μέγεθος της περιοχής όπως οι ωκεανοί, τα ποτάμια και οι λίμνες.

Έτσι, ορισμένος αριθμός των κόμβων διατίθεται τυχαία στην επιφάνεια κατά την αρχική εγκατάσταση. Κάθε κόμβος οργανώνει στη συνέχεια το δικό του βάθος, εκτιμώντας τα βάθη των γειτονικών του κόμβων, στο χώρο συντονισμού του. Η αρχική θέση δεν αλλάζει, μπορούμε όμως να παρέμβουμε και να αλλάξουμε τα βάθη βύθισης. (Αγνοούμε τυχόν ρεύματα στους υγροτόπους.).

Μοντελοποιούμε τον χώρο τοποθέτησης των αισθητήρων σε κύβο, και το σύστημα συντεταγμένων όπως φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Το σύστημα συντεταγμένων για τα τρισδιάστατα δίκτυα υποβρύχιων ασύρματο αισθητήρα.

Μοιράζουμε τον χώρο αισθητήρων σε r κύβους μεγέθους r . r είναι το μήκος (μέγεθος) των κύβων, στους οποίους έχουμε μοιράσει τον χώρο. Χρησιμοποιούμε μια ακόμη παράμετρο α , η οποία ονομάζεται απόσταση συντονισμού. Ο χώρος που

αποτελείται από ένα τετράγωνο κατά μήκος του άξονα Z ονομάζεται χώρος συντονισμού. Το σύστημα συντεταγμένων του χώρου θα πρέπει να πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

$$\begin{cases} x_i - \alpha \leq x_n \leq x_i + \alpha \\ y_i - \alpha \leq y_n \leq y_i + \alpha \end{cases}$$

Όπου x_i και y_i είναι συντεταγμένες ενός συγκεκριμένου κύβου και x_i και y_i είναι οι συντεταγμένες του κόμβου. Ενώ ένας κόμβος κανονίζει το βάθος του, ανταλλάσει πληροφορίες μόνο με τους γειτονικούς του κόμβους μέσα στο χώρο του συντονισμού του. Στον Z άξονα, όλοι οι κύβοι στο είναι ίδιο βάθος κατασκευής, ενώ για παράδειγμα, όλοι οι κύβοι μεταξύ 0 και βάθος r κατασκευάζονται στο στρώμα 1. Υπάρχουν γενικά στρώματα μ .

5.3 Μοντέλο Κάλυψης

Υποθέτοντας πως τα ρεύματα στους υγροτόπους είναι απαλά και δε δημιουργούν προβλήματα στους αισθητήρες, αρκεί να τους τοποθετήσουμε στα κατάλληλα βάθη. Εξ άλλου το σύστημα μας θα πρέπει να κατανεμηθεί καταλλήλως χωρίς να στηρίζεται σε ένα κεντρικό κόμβο, ο οποίος γνωρίζει τις όχι ενημερωμένες θέσεις των αισθητήρων. Η αξιολόγηση απόδοσης είναι πολύ σημαντικός παράγοντας στη την ανάλυση της χρηστικότητας και της εγκυρότητας της στρατηγικής ελέγχου της κάλυψης.

Ο έλεγχος κάλυψης στο εξής για UWSNs έχει τους ακόλουθους δύο βασικούς στόχους:

1) *Maximize coverage δ*

$$\delta = \frac{n_c}{n_n}$$

Όπου N_c είναι ο αριθμός των κύβων που καλύπτονται από τουλάχιστον έναν αισθητήρα και n_n είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων στον υποβρύχιο χώρο αισθητήρων. Κάλυψη εδώ σημαίνει ότι ο κύβος είναι εξ ολοκλήρου εντός μιας σφαίρας της οποίας η ακτίνα ισούται με την απόσταση ανίχνευσης του κόμβου.

2) Maximize average distance θ

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^k e_i}{k}.$$

Όπου e_i είναι η απόσταση μεταξύ δύο κόμβων στο κόμβο ζεύγους i . Εάν υπάρχουν κόμβοι n εντός του πεδίου του αισθητήρα μπορούμε να έχουμε τόσα ζεύγη κόμβων όσο το

$$k = \frac{n_n \cdot (n_n - 1)}{2}$$

Η μεγιστοποίηση της μέσης απόστασης αποσκοπεί στη μείωση της πιθανότητας ότι όλοι οι κόμβοι να συγκεντρωθούν σε ορισμένα βάθη. Λαμβάνοντας υπόψη και την κάλυψη και την μέση απόσταση, εισάγουμε τη βελτιστοποίηση ελέγχου κάλυψης ως εξής:

$$\max S = a\delta + b\theta.$$

Όπου S ονομάζεται ένας ολοκληρωμένος δείκτης, τα a και b είναι συντελεστές βάρους της κάλυψης δ και μέσης απόστασης θ αντίστοιχα.

5.4 Περιγραφή Αλγορίθμου

Εισαγάγουμε έναν ευρετικό αλγόριθμο για την επίλυση του προβλήματος κάλυψης UWSNs. Κάθε κόμβος ανταλλάζει πληροφορίες με τους γειτονικούς κόμβους στο διάστημα συντονισμού της. Η ομοιόμορφη ανάπτυξη λαμβάνει τα ακόλουθα μέτρα:

(1) Μοντελοποίηση του χώρου αισθητήρων ως κύβο και δημιουργία του 3-d συστήματος. Ομοιόμορφη ανάπτυξη ενός ορισμένου αριθμού κόμβων στην επιφάνεια του νερού (με ίσα διαστήματα κατά μήκος X και Y άξονα), καθορίζοντας τις συντεταγμένες κατά μήκος X , Y και Z άξονα. Αρχικά συντονίζει για κάθε κόμβο αισθητήρα τον άξονα Z ως 0;

(2) Προσδιορίζει για κάθε κόμβο τον χώρο συντεταγμένων του;

(3) Ρυθμίζει το βάθος του κάθε κόμβου ανάλογα με τον αριθμό και το βάθος των γειτονικών κόμβων του;

(4) Υπολογίζει το συνολικό δείκτη χρησιμοποιώντας τα βάθη των κόμβων, καθορίζοντας τα βάθη όταν ο συνολικός δείκτης μεγιστοποιείται στα τελικά βάθη;

Η προσαρμογή του βάθους του κάθε κόμβου έχει ως εξής:

Διαχωρίζει το βάθος του νερού της περιοχής σε στρώματα m . Για κάθε κόμβο:

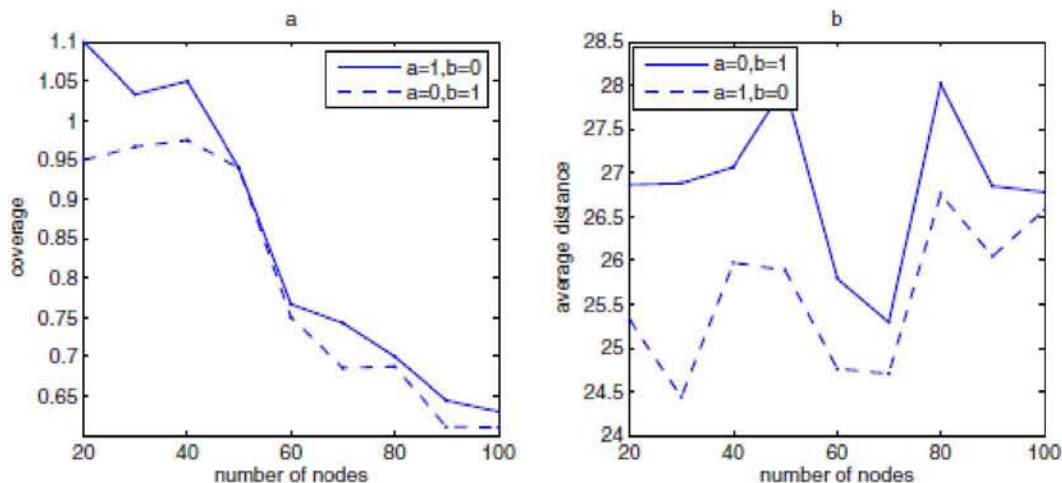
- 1) Σε περίπτωση που δεν έχει κανένα κόμβο γείτονα στο χώρο του συντονισμού του, τότε είναι εγκατεστημένος στο στρώμα 1;
- 2) Εάν έχει μόνο ένα κόμβο γείτονα του οποίου το βάθος είναι στο πάνω μισό του συνόλου του διαστήματος κάλυψης, τότε ο κόμβος έχει αναπτυχθεί σε m στρώμα;
- 3) Εάν έχει μόνο ένα κόμβο γείτονα του οποίου το βάθος είναι στο κάτω μισό του συνόλου του διαστήματος κάλυψης τότε ο κόμβος έχει αναπτυχθεί στο στρώμα 1;
- 4) Εάν έχει περισσότερους από έναν κόμβους γείτονα, τότε ο κόμβος έχει αναπτυχθεί στη μέση του μεγίστου και ελάχιστου βάθους;

Προκειμένου να συγκριθεί με μοντέλο δισδιάστατης τυχαίας και ομοιόμορφης ανάπτυξης, μπορούμε επίσης να εισάγουμε έναν αλγόριθμο ελέγχου για την κάλυψη UWSNs που βασίζεται σε μια μονοδιάστατη τυχαία ανάπτυξη. (Οι κόμβοι ακολουθούσαν μια τυχαία κατανομή σε μία διάσταση και μια ομοιόμορφη κατανομή στην άλλη διάσταση του χώρου.)

Χωρίς απώλεια της γενικότητας, οι κόμβοι ακολουθούν τυχαία κατανομή στον X άξονα και ομοιόμορφη διανομή στον Y άξονα. Στη συνέχεια, φροντίζει για τα βάθη με την ίδια μέθοδο με ομοιόμορφη ανάπτυξη. Αποτελέσματα και συγκρίσεις φαίνονται παρακάτω στην προσομοίωση.

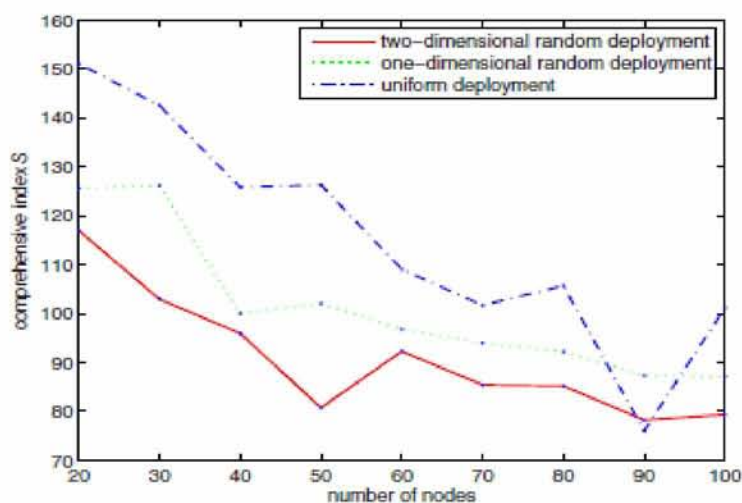
5.5 Προσομοίωση – Αποτελέσματα

Διάφοροι αριθμοί κόμβων αισθητήρων αναπτύσσονται σε ένα χώρο $60 \times 50 \times 30$ σε μέγεθος. Υποτίθεται ότι η αισθητήριος ακτίνα του κάθε κόμβου αισθητήρα είναι 14, ενώ τόσο η απόσταση r και η α απόσταση συντονισμού είναι 10. Εξετάζοντας σε δύο περιπτώσεις τον συνολικό δείκτη με τιμές (1) take $a=1$, $b=0$ (μεγιστοποίηση κάλυψης), (2) take $a=0$, $b=1$ (μεγιστοποίηση της μέσης απόστασης) έχουμε:



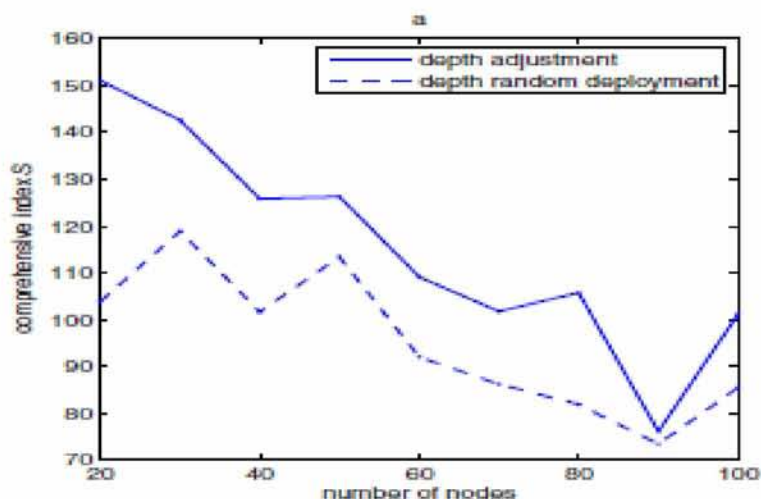
Εικόνα 11: Για μονοδιάστατη τυχαία ανάπτυξη, η κάλυψη στην περίπτωση (1) είναι μεγαλύτερη από ό, τι στην περίπτωση (2) στο a, ενώ η μέση απόσταση στην περίπτωση (2) είναι μεγαλύτερη από ό, τι στην περίπτωση (1) στο b.

Στην εικόνα 12 φαίνονται οι τιμές συνολικού δείκτη για 2-d και 1-d ανάπτυξη, για διαφόρους αριθμούς κόμβων. Όταν αυξάνονται οι κόμβοι, μειώνονται οι τιμές του συνολικού δείκτη.



Εικόνα 12

Τέλος στην Εικόνα 13 μια μέθοδος διανέμει ομοιόμορφα τους κόμβους στο νερό με τυχαία επιλογή βάθους, ενώ η άλλη μέθοδος διανέμει τους κόμβους κατά βάθος προσαρμοσμένο κατά τις συγκρίσεις άλλων βαθών. Με τον ίδιο αριθμό των κόμβων, οι τιμές του συνολικού δείκτη του βάθους προσαρμογής είναι εμφανώς μεγαλύτερο από το βάθος τυχαίας ανάπτυξης.



Εικόνα 13

5.6 Συμπεράσματα

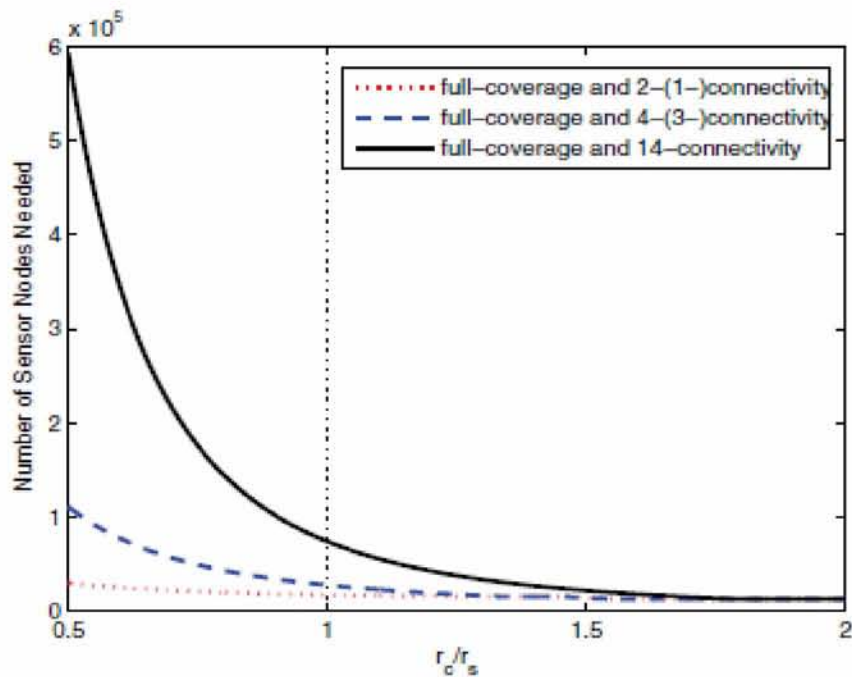
Προτείνουμε ένα μοντέλο κάλυψης για UWSNs που να βασίζεται στην ενιαία ανάπτυξη αισθητήρων στην επιφάνεια για τη σχετική σταθερότητα του υδάτινου περιβάλλοντος. Αυτός ο αλγόριθμος μπορεί να λειτουργεί σε κάθε κόμβο αισθητήρων. Αναπτύσσουμε τους κόμβους ομοιόμορφα στην επιφάνεια του νερού σε πρώτη φάση, και στη συνέχεια προσαρμόζουμε τα βάθη του καθενός, σύμφωνα με τις θέσεις των γειτονικών κόμβων στο χώρο του συντονισμού για τη μεγιστοποίηση του συνολικού δείκτη. Μαζί με την ανάλογη κάλυψη και μέση απόσταση, πετυχαίνουμε την μέγιστη κάλυψη του υποβρυχίου 3-d χώρου.

6. Χαμηλή Συνδεσιμότητα και Πλήρη Κάλυψη σε 3-d Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Με τον όρο χαμηλή συνδεσιμότητα, εννοούμε ότι υπάρχουν τουλάχιστον k ασυνεχείς διαδρομές μεταξύ δύο κόμβων αισθητήρων σε ένα WSN, όπου $k \leq 4$. Το πρόβλημα είναι το πώς να κατασκευαστεί ένα 3-d Wireless Sensor Network (WSN), το οποίο να επιτυγχάνει χαμηλή διασυνδεσιμότητα με πλήρη κάλυψη αλλά με τη χρήση των ελάχιστων αισθητήρων.

Παρατηρείται σε πολλές εφαρμογές του πραγματικού κόσμου, όπως υποστήριξη ευφυών συστημάτων 3-d όρασης, κατασκευή συστημάτων εναέριας άμυνας και συστημάτων παρακολούθησης της ρύπανσης. Σε τέτοια 3-d περιβάλλοντα τα WSN είναι δημοφιλή, από πλευράς κόστους και μονό, μιας και οι αισθητήρες των 3-d είναι σαφώς ακριβότεροι από τους αντίστοιχους 2-d. Οπότε η συνδεσιμότητα είναι σημαντική για οικονομικούς αλλά και όχι μόνο λόγους, καθώς αν το μοντέλο ανάπτυξης είναι γνωστό τότε η αξιοποίηση αυτών των συστημάτων φτάνει στο έπακρο.

Έχει αποδειχθεί η βελτιστότητα των μοτίβων *1-connectivity* & *2-connectivity*, για κάθε τιμή των r_c / r_s . Στο σχήμα παρακάτω φαίνεται πως με αυτά τα μοτίβα αντί του *14-connectivity*, μπορούμε να εξαλείψουμε μεγάλο αριθμό κόμβων. Συγκεκριμένα όσο μειώνεται ο παραπάνω λόγος, τόσο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων που εξαλείφουμε.



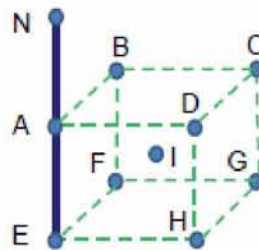
Εικόνα 14

Γενικώς τα μοτίβα ανάπτυξης των αισθητήρων στα WSN είναι πολύπλοκα, και συχνά απαιτούν μεγάλο αριθμό αισθητήρων. Ένα από τα πιο καθολικά, με σημαντική δομή μοτίβα θεωρείται το *Δικτυωτό Πλέγμα (Lattice)*.

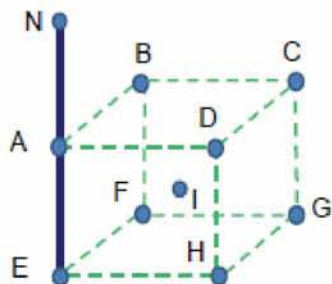
6.1 Περιγραφή

Με τη βοήθεια των παρακάτω σχημάτων θα περιγράψουν τα προτεινόμενα μοτίβα ανάπτυξης *1-connectivity* & *2-connectivity* για 3-d.

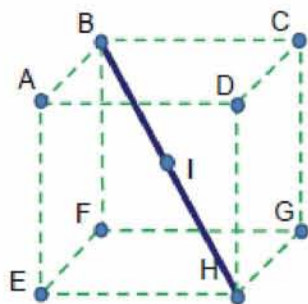
- Δεδομένων δυο *Lattice* Λ και Λ' το Λ θεωρείται καλύτερο αν χρειάζονται λιγότεροι αισθητήρες για την επίτευξη πλήρους κάλυψης.



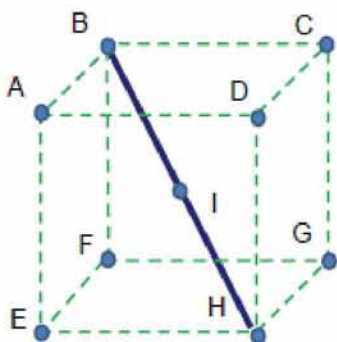
1. **Body-centered lattice Λ_{2-1} pattern when $r_c/r_s < 4/3$.**



2. **Body-centered lattice Λ_{2-2} pattern when $4/3 \leq r_c/r_s < 12/\sqrt{9 + 32\sqrt{3}}$.**



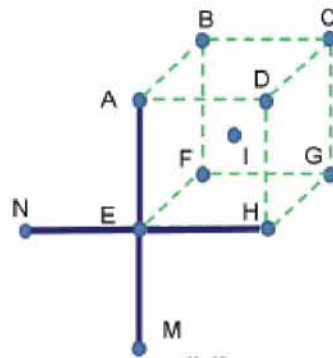
3. **Body-centered lattice Λ_{2-3} pattern when $12/\sqrt{9 + 32\sqrt{3}} \leq r_c/r_s < 2\sqrt{3}/\sqrt{5}$.**



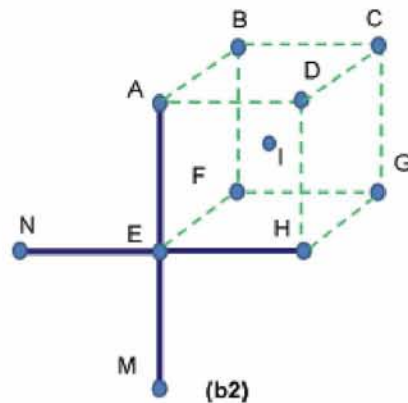
4. **Body-centered lattice Λ_{2-4} pattern when $2\sqrt{3}/\sqrt{5} \leq r_c/r_s$.**

- Για την επίτευξη 1-connectivity ή 2-connectivity και πλήρη κάλυψη σε 3-d χώρο, το Λ_{2-1} μοτίβο, είναι η βέλτιστη λύση όταν $r_c/r_s < 4/3$.
- Το Λ_{2-2} μοτίβο, όταν $4/3 \leq r_c/r_s < 12/\sqrt{9+32\sqrt{3}}$,
- Το Λ_{2-3} μοτίβο, όταν $12/\sqrt{9+32\sqrt{3}} \leq r_c/r_s < 2\sqrt{3}/\sqrt{5}$.
- Το Λ_{2-4} μοτίβο, όταν $2\sqrt{3}/\sqrt{5} \leq r_c/r_s$.

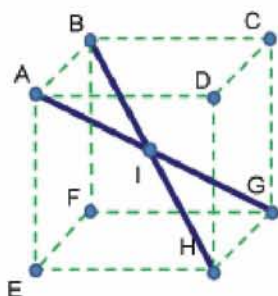
Με τη βοήθεια των παρακάτω σχημάτων θα περιγράψουν τα προτεινόμενα μοτίβα ανάπτυξης 3-connectivity & 4-connectivity για 3-d.



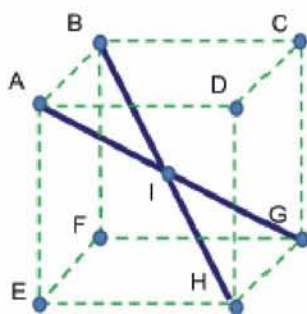
5. Body-centered lattice Λ_{4-1} pattern when $r_c/r_s < 4/3$.



6. Body-centered lattice Λ_{4-2} pattern when $4/3 \leq r_c/r_s < 2\sqrt{2}/\sqrt{3}$.



7. **Body-centered lattice Λ_{4-3} pattern when $2\sqrt[3]{2}/\sqrt{3} \leq r_c/r_s \leq 2\sqrt{3}/\sqrt{5}$.**



8. **Body-centered lattice Λ_{4-4} pattern when $2\sqrt{3}/\sqrt{5} \leq r_c/r_s$.**

Γίνεται σαφές πως η *1-connectivity* & *2-connectivity* είναι πιο αντιπροσωπευτικές όταν μιλάμε για χαμηλή συνδεσιμότητα, μιας και μια προσεκτικότερη ματιά στα Lattice Λ_{2-1} , Λ_{2-2} , Λ_{4-2} , Λ_{2-3} (Λ_{4-3}) και Λ_{2-4} (Λ_{4-4}) αποκαλύπτει πώς τα πρότυπα εξελίσσονται παράλληλα με την αύξηση του r_c / r_s .

Όταν το r_c είναι μικρό κυριαρχούν οι περιορισμοί στη συνδεσιμότητα, ενώ όταν το r_s είναι μικρό κυριαρχούν οι περιορισμοί στη κάλυψη.

6.2 Συμπεράσματα

Με την παρουσίαση των παραπάνω μοντέλων, για χαμηλή συνδεσιμότητα και πλήρη κάλυψη ($\kappa \leq 4$), διαπιστώνεται το πλεονέκτημα των *1-connectivity* & *2-connectivity*, υπό οποιαδήποτε τιμή του λογιού r_c/r_s . Προσφέρει την οικονομία πολλών αισθητήρων, αλλά το ίδιο πεδίο αποτελεί πρόσφορο έδαφος για περαιτέρω έρευνα.

7 Πλήρης Κάλυψη με k -καλυψη ($k = 14,6$) σε 3-d Δίκτυα.

Σε αυτήν την ενότητα, μελετάται το πρόβλημα των τρισδιάστατων δικτύων πλήρους-κάλυψης με την πολλαπλή συνδετικότητα. Σχεδιάζουμε ένα σύνολο σχεδίων για τη ολική κάλυψη και δύο αντιπροσωπευτικές απαιτήσεις συνδετικότητας, δηλ. 14 - και 6 - συνδετικότητα. Αποδεικνύουμε το βέλτιστό τους κάτω από οποιαδήποτε αναλογία της σειράς επικοινωνίας πέρα από την σειρά των κανονικών σχεδίων επέκτασης δικτυωτού πλέγματος. Πραγματοποιούμε επίσης μια μελέτη για τα προτεινόμενα σχέδια κάτω από τις πρακτικές τοποθετήσεις. Η εργασία αυτή είναι η πρώτη που παρέχει στα σχέδια επέκτασης αποδεδειγμένο βέλτιστο που επιτυγχάνουν και την κάλυψη και τη συνδετικότητα στα τρισδιάστατα δίκτυα.

Το κυρίως πρόβλημα στα 3D ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι το ακόλουθο: Ποιος είναι ο βέλτιστος τρόπος να επεκταθούν οι κόμβοι αισθητήρων σε ένα τρισδιάστατο διάστημα έτσι ώστε ο αριθμός απαραίτητων κόμβων ελαχιστοποιείται, ο όγκος καλύπτεται πλήρως, και να υπάρχουν τουλάχιστον K ανεξάρτητες ακμές μεταξύ οποιονδήποτε δύο κόμβων;

Αυτό το πρόβλημα είναι θεμελιώδες σε τρισδιάστατο WSNs. Η έρευνα προς την επίλυση αυτού του προβλήματος έχει και θεωρητική και πρακτική σημασία. Κατ' αρχάς, η ελαχιστοποίηση του αριθμού επεκταμένων κόμβων για να επιτύχει την κάλυψη και τη συνδετικότητα είναι σημαντική για οικονομικούς λόγους δεδομένου ότι οι κόμβοι αισθητήρων που επεκτείνονται στο τρισδιάστατο διάστημα είναι συνήθως ακριβοί. Δεύτερον, εάν το βέλτιστο σχέδιο επέκτασης είναι γνωστό, είναι έπειτα δυνατό να εξεταστεί η αποδοτικότητα των ευρείας χρήσεως σχεδίων στις πρακτικές τρισδιάστατες επεκτάσεις. Τρίτον, η γνώση των βέλτιστων σχεδίων μπορεί επίσης να παρέχει τις οδηγίες για το σχεδιασμό των αλγορίθμων ελέγχου τοπολογίας σε τρισδιάστατο WSNs.

7.1 Βέλτιστα Σχήματα

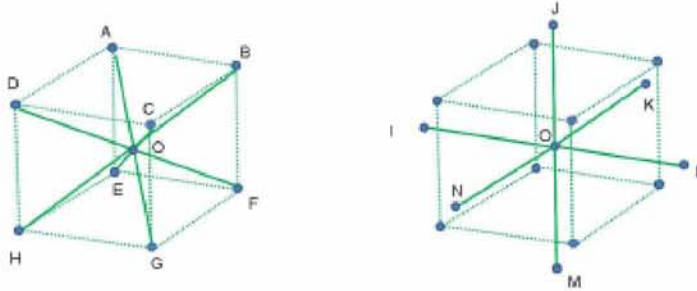
7.1.1 Α. Σχέδιο δικτυωτού πλέγματος για να επιτύχει την 14-συνδετικότητα

Το σχέδιο δικτυωτού πλέγματος για να επιτύχει τη ολική κάλυψη και τη συνδετικότητα 14 είναι διευκρινισμένο στην εικόνα 1. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1 (a1), αυτό το σχέδιο ακολουθεί ένα σώμα-κεντροθετημένο κυβικό (bcc) δικτυωτό πλέγμα που παράγεται από έναν κύβο ABCDEFGH (παραλληλεπίπεδο) και το κεντρικό σημείο του O . Το μήκος ακρών του κύβου $e = \min(4rs/\sqrt{5}, rc)$. Δείχνουμε αυτό το δικτυωτό πλέγμα bcc από Λ_{14} . Οι αισθητήρες επεκτείνονται σε κάθε σημείο Λ_{14} γεμίζοντας ολόκληρου τον τρισδιάστατο όγκο.

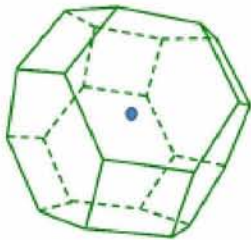
Στην εικόνα 1 (a1) και (a2), οι στερεές γραμμές αντιπροσωπεύουν συνδεμένες συνδέσεις, και οι διακεκομμένες γραμμές κατασκευάζουν τον κύβο. Λόγω της ιδιότητας της συμμετρίας, κάθε σημείο Λ_{14} μπορεί να θεωρηθεί κέντρο ενός κύβου όταν τα όρια του τρισδιάστατου όγκου αγνοούνται. Χωρίς απώλεια γενικότητας, χρησιμοποιούμε τον αισθητήρα θέση O για να επεξηγήσει τη συνδετικότητα. Οκτώ από 14 του που συνδέονται

οι γειτονικοί αισθητήρες είναι vertices του κύβου (αισθητήρες στη θέση A, το B, το Γ, το Δ, το Ε, το Φ, τα Γ, και το X) και ένα άλλα έξι είναι στα κέντρα έξι γειτονικών κύβων αυτού του κύβου (οι αισθητήρες στη θέση I, J, K, Λ, Μ και Ν).

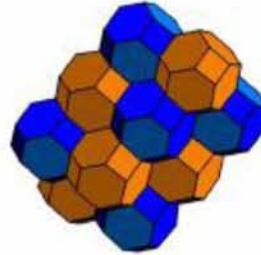
Θεώρημα 1: Το σχέδιο δικτυωτού πλέγματος Λ14 είναι ένα βέλτιστο σχέδιο δικτυωτού πλέγματος για να επιτύχει τη ολική κάλυψη και τη συνδετικότητα 14 στο τρισδιάστατο διάστημα



Εικόνα 15: Ο είναι ο κεντρικός αισθητήρας και υπάρχουν 8 γειτονικοί που συνδέονται μαζί του. (14-connectivity)

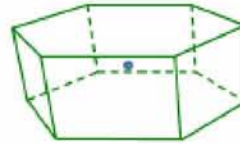
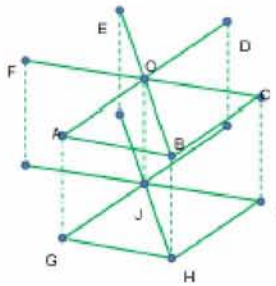


Εικόνα 16
The Voronoi polyhedron



Εικόνα 17
The lattice pattern achieves full coverage of a 3D volume, which is illustrated by Voronoi polyhedra generated by sensing spheres.

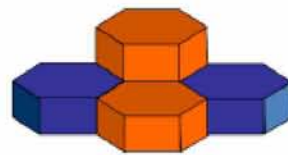
Ομοίως για 6-connectivity:



Εικόνα19 Voronoi polyhedron

Εικόνα 18

$$r_c/r_s < 9/\sqrt{43}$$



Εικόνα 20

this pattern achieves full coverage of a 3D volume, which is illustrated by Voronoi polyhedra

Διαπιστώνεται το πλεονέκτημα των 14 & 6 connectivity, στην πλήρη κάλυψη 3-d WSN, υπό οποιαδήποτε τιμή του λογού r_c/r_s .

8 Αλγόριθμος Κάλυψης Βάση Πιθανοτήτων

Όπως έχουμε δει η κάλυψη βασισμένη σε πλέγμα είναι μια καθολική προσέγγιση ελέγχου κάλυψης για τα WSNs. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει το δίκτυο με δισδιάστατο ή τρισδιάστατο πλέγμα και να ολοκληρώσει την περιφερειακή/αντικειμενική κάλυψη με την τοποθέτηση των αισθητήρων στα κατάλληλα σημεία πλέγματος όταν δίνεται ένα προκαθορισμένο γεωγραφικό περιβάλλον. Επίσης έχει παρουσιαστεί ένας αλγόριθμος ελέγχου κάλυψης βασισμένος στο πλέγμα (grid) για να λύσει την επέκταση αισθητήρων κάτω από τους περιορισμούς της τιμής και της ολικής κάλυψης. Εντούτοις, αυτή η προσέγγιση στηρίζεται στην «τέλεια» ανίχνευση αισθητήρων, δηλ. ένας αισθητήρας αναμένεται να παραγάγει μια δυαδική έκβαση ανίχνευσης σε κάθε περίπτωση. Ακόμη προτείνεται ένας αλγόριθμος ελέγχου κάλυψης βασισμένος στην πιθανότητα για την εγγενή αβεβαιότητα που συνδέεται για με τις αναγνώσεις αισθητήρων. Οι αλγόριθμοι μπορούν να επιτύχουν 1- κάλυψη, η οποία για κάθε σημείο πλέγματος στην περιοχή ελέγχου πρέπει να ανιχνευθεί από τουλάχιστον έναν αισθητήρα. Αλλά η ανθεκτικότητα και η μηδενική ανοχή στο λάθος απαιτούνται σε μερικές εφαρμογές όπως η στρατιωτική εφαρμογή όπου η K-κάλυψη επιδιώκεται. Η κ-κάλυψη σημαίνει ότι κάθε σημείο πλέγματος στην περιοχή ελέγχου πρέπει να ανιχνευθεί από τουλάχιστον τους K αισθητήρες, όπου $K > 1$.

Επομένως, μια πιθανότητα-βασισμένη στο προσέγγιση ελέγχου K-κάλυψης για τρισδιάστατα WSNs προτείνεται σε αυτήν την ενότητα. Διαμορφώνουμε το τρισδιάστατο διάστημα ελέγχου ως δίκτυο πλέγματος και εξασφαλίζουμε κάθε σημείο πλέγματος που ανιχνεύεται με την πιθανότητα T από τουλάχιστον K αισθητήρες. Η προσέγγισή μας παρέχει την πολύ υψηλή αξιοπιστία και απλοποιεί τον υπολογισμό με την ανάπτυξη ενός προτύπου κατώτατων ορίων αισθητήρων (για κοντό, STM). Η περίπτωση της προνομιακής κάλυψης (προνομιακός βαθμός κάλυψης και προνομιακή ακρίβεια ελέγχου) για μερικά σημεία πλέγματος αναλύεται επίσης και προσομοιώνεται. Ο PKCCA (Probability-based K-Coverage Control Algorithm) μπορεί να υιοθετηθεί σε περιπτώσεις ανίχνευσης αδύνατων σημάτων και υψηλών απαιτήσεων αξιοπιστίας.

8.1 Sensor Threshold Model (STM)

Υποθέτουμε ότι η τρισδιάστατη περιοχή ελέγχου αποτελείται από τα σημεία πλέγματος και η κοκκοποίηση του πλέγματος καθορίζεται από την ακρίβεια με την οποία επιδιώκεται η τοποθέτηση αισθητήρων. Υποθέτουμε ότι η πιθανότητα της ανίχνευσης ενός στόχου από έναν αισθητήρα ποικίλλει εκθετικά με την απόσταση μεταξύ του στόχου και του αισθητήρα. Εάν ένας στόχος είναι σε μια απόσταση d από έναν αισθητήρα, κατόπιν ανιχνεύεται από εκείνο τον αισθητήρα με την πιθανότητα $e^{-\alpha d}$, όπου η παράμετρος α ανίχνευσης ($\alpha > 0$) δείχνει το ποσοστό στο οποίο η πιθανότητα ανίχνευσης του μικραίνει με την απόσταση. Για κάθε δύο σημεία i και j πλέγματος στην περιοχή ελέγχου, καθορίζουμε την πιθανότητα ανίχνευσης p_{ij} για να δείξουμε την πιθανότητα ότι ένας στόχος στο σημείο j πλέγματος ανιχνεύεται από έναν αισθητήρα στο σημείο i πλέγματος. Η παρουσία εμποδίων στην περιοχή ελέγχου δεν λαμβάνεται υπόψη, το οποίο σημαίνει $p_{ij} = p_{ji}$. Θεωρώντας τη γρήγορη μείωση

σημάτων σε μερικές ειδικές εφαρμογές όπως η ανίχνευση νερού, η πιθανότητα ανίχνευσης μεταξύ του αισθητήρα και το στόχο τίθεται 0 όταν είναι λιγότερο από β . Κατά συνέπεια, η σειρά αντίληψης ενός αισθητήρα μπορεί να θεωρηθεί ως σφαίρα της οποίας η ακτίνα συνδέεται με τη δυνατότητα αντίληψης του αισθητήρα. Η παράμετρος β γνωστή ως κατώτατο όριο ελέγχου καθορίζει το μέγεθος της σφαίρας αντίληψης. Το STM μπορεί να περιγραφεί από:

$$p_{ij} = \begin{cases} e^{-\alpha d}, & e^{-\alpha d} > \beta \\ 0, & e^{-\alpha d} < \beta \end{cases}$$

8.2 Probability-based K-Coverage Control Algorithm (PKCCA)

Διαιρούμε την τρισδιάστατη περιοχή σε ένα n επί n επί n πλέγμα που έχει συνολικά $N = n^3$ σημεία πλέγματος. Ο στόχος PKCCA είναι να καθορισθεί ο ελάχιστος αριθμός αισθητήρων και θέσεων τους έτσι ώστε κάθε σημείο πλέγματος να είναι K -καλυμμένο με την πιθανότητα T . Η ακρίβεια T ανίχνευσης και ο βαθμός K κάλυψης είναι οι δύο είσοδοι στον αλγόριθμο.

Καθορίζουμε έναν πίνακα αισθητήρων $D = [p_{ij}]_{N \times N}$ για όλα τα ζευγάρια των σημείων πλέγματος στην περιοχή ελέγχου που αποτελείται από n^3 σειρές και n^3 στήλες. Όπου p_{ij} υπολογίζεται από το STM παραπάνω. Από τη μήτρα D ανίχνευσης αισθητήρων, καθορίζουμε τη μήτρα πιθανότητας αστοχίας $M = [m_{ij}]_{N \times N}$, όπου $m_{ij} = 1 - p_{ij}$. Ο PKCCA χρησιμοποιεί ένα άπληστο χαρακτηριστικό για να καθορίσει την καλύτερη τοποθέτηση ενός αισθητήρα τη φορά. Είναι επαναληπτικό, και τοποθετεί έναν αισθητήρα στην περιοχή ελέγχου κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης έως ότου να επιτευχθεί ένα προκαθορισμένο άνω όριο στον αριθμό αισθητήρων, ή ο ικανοποιητικός βαθμός κάλυψης με πιθανότητα T των σημείων πλέγματος.

Καθορίζουμε ένα διάνυσμα $L = (L_1, L_2, \dots, L_N)$ για να δείξουμε το σύνολο του βαθμού κάλυψης σημείων πλέγματος. Όπου το L_i δείχνει το βαθμό κάλυψης του i σημείου πλέγματος κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης. Το L αρχικοποιείται στο 0, δηλ. $L = (0, 0, \dots, 0)$. Ένας αισθητήρας τοποθετείται σε ένα σημείο πλέγματος έτσι ώστε το ποσό των πιθανοτήτων αστοχίας του αισθητήρα για άλλα σημεία πλέγματος στην περιοχή ελέγχου να είναι ελάχιστο. Όταν ο βαθμός κάλυψης ενός σημείου πλέγματος φθάνει σε μια ορισμένη αξία, ενημερώστε τη μήτρα πιθανότητας αστοχίας και διαγράψτε την αντίστοιχη σειρά και στήλη στη μήτρα πιθανότητας αστοχίας για να μειώσετε τη διάστασή της.

Τα βήματα του PKCCA περιγράφονται παρακάτω:

1. Αρχικοποίησε τον αριθμό των αισθητήρων στο 0.
2. Τοποθέτησε έναν αισθητήρα στο σημείο k του πλέγματος έτσι ώστε το \sum_k να είναι το ελάχιστο, όπου $\sum_k = m_{k1}, m_{k2}, \dots, m_{kN}$, $k=1, 2, \dots, N$

3. Εάν $m_{ki} < M_{\max}$, $i=1,2,\dots,N$, τότε πρόσθεσε 1 στο L_i και ανανέωσε το διάνυσμα $L = (L_1, L_2, \dots, L_N)$.
4. Πρόσθεσε 1 στον αριθμό των αισθητήρων.
5. Εάν το L_i έχει φθάσει τον καθορισμένο βαθμό κάλυψης, σβήσε την i^{th} γραμμή και στήλη από τον πίνακα M .
6. Γύρισε στο βήμα 2 έως ότου $L_i \geq \text{Con}$, $i=1,2,\dots,N$, ή έχει επιτευχθεί ένα προκαθορισμένο ανώτατο όριο στον αριθμό των αισθητήρων που έχουν τοποθετηθεί.

Για την περίπτωση της προνομιακής κάλυψης (προνομιακός βαθμός κάλυψης και προνομιακή ακρίβεια ανίχνευσης) μερικών υποπεριφερειών, μετά από την τροποποίηση λαμβάνει χώρα στον PKCCA αντίστοιχα:

1. Στην περίπτωση του προνομιακού βαθμού κάλυψης: θέστε έναν ευδιάκριτο βαθμό Con_i κάλυψης για κάθε σημείο πλέγματος. Για το βήμα 6), ο βρόχος ολοκληρώνει είτε όταν επιτυγχάνεται ένα παρόν ανώτερο όριο στον αριθμό αισθητήρων, είτε βαθμός κάλυψης κάθε σημείου πλέγματος επιτυγχάνεται.
2. Στην περίπτωση της προνομιακής ακρίβειας ανίχνευσης: θέστε μια διακριτή ακρίβειας ανίχνευσης T_i για κάθε σημείο πλέγματος, έτσι ώστε η μέγιστη αξία της πιθανότητας αστοχίας που επιτρέπεται για το σημείο i M_{\max}^i του πλέγματος να είναι $(1-T_i)$. Κατά συνέπεια, κάθε m_{ki} πιθανότητας αστοχίας συγκρίνεται με M_{\max}^i κάθε σημείου του πλέγματος στο βήμα 3) του PKCCA.

Ο τυχαίος αριθμός κάθε κόμβου είναι N , έτσι η υπολογιστική πολυπλοκότητα για PKCCA είναι $O(mN)$ όπου το m είναι ο αριθμός αισθητήρων που απαιτείται για μια δεδομένη κάλυψη της ολόκληρης τρισδιάστατης περιοχής. Δεδομένου ότι το m δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων, χρησιμοποιούμε το N ως ανώτερο όριο στο m και λαμβάνουμε την υπολογιστική πολυπλοκότητα του $O(N^2)$.

8.3 Πειραματικά Αποτελέσματα

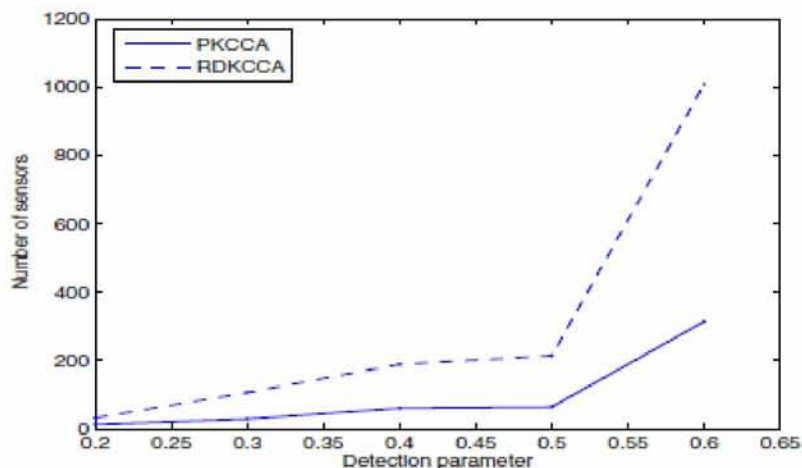
Ο στόχος μας είναι να βελτιστοποιήσουμε τον αριθμό αισθητήρων και να καθορίσουμε την τοποθέτησή τους με τη δεδομένη ακρίβεια T ανίχνευσης και το βαθμό κάλυψης K . Διαιρούμε την τρισδιάστατη περιοχή ελέγχου σε 5 επί 5 επί 5 πλέγμα που έχει συνολικά 125 σημεία. Κάθε σημείο πλέγματος πρέπει να ανιχνευθεί από τουλάχιστον 3 αισθητήρες με την πιθανότητα T .

Η παράμετρος ανίχνευσης α δείχνει το ποσοστό στο οποίο η πιθανότητα ανίχνευσης του αισθητήρα στο στόχο μειώνεται με την απόσταση μεταξύ τους. Το κατώτατο όριο β σειράς ελέγχου δείχνει τη σειρά αντίληψης του αισθητήρα. Η μέγιστη πιθανότητα αστοχίας που επιτρέπεται για κάθε πλέγμα M_{\max} παρουσιάζει ακρίβεια ανίχνευσης της προσέγγισης ελέγχου κάλυψης. Η επιλογή των παραμέτρων ανωτέρω επηρεάζει άμεσα τον αριθμό αισθητήρων που απαιτείται για να ολοκληρώσει το στόχο κάλυψης. Για το διαφορετικό α , β και M_{\max} , συγκρίνουμε τον αριθμό αισθητήρων που τοποθετούνται και την ευαισθησία με τις παραμέτρους

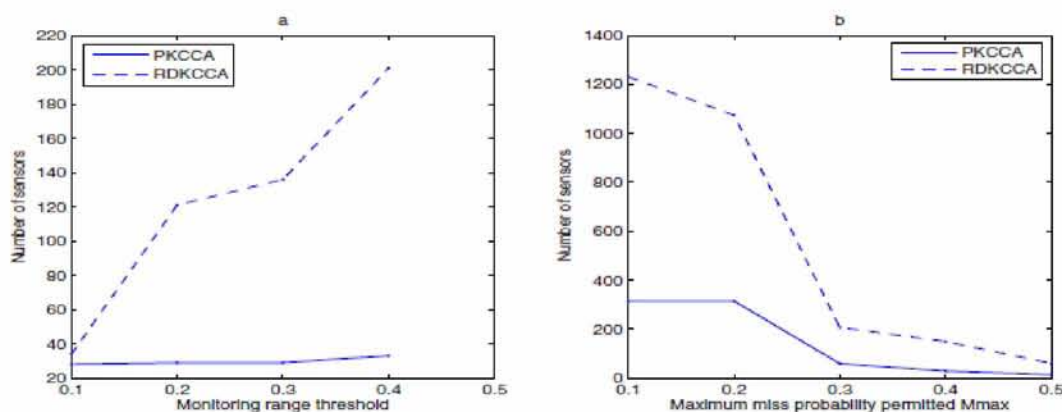
σε PKCCA, RDKCCA (ο τυχαία επεκταμένος αλγόριθμος ελέγχου K-κάλυψης για τρισδιάστατα WSNs, που πρόκειται να τοποθετήσει τυχαία έναν αισθητήρα κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης έως ότου επιτευχθεί ένα προκαθορισμένο ανώτερο όριο στον αριθμό αισθητήρων ή ικανοποιητικός βαθμός κάλυψης με την πιθανότητα T των σημείων πλέγματος) και UDKCCA (ομοιόμορφα επεκταμένος αλγόριθμος ελέγχου K-κάλυψης για τρισδιάστατα WSNs, το οποίο πρόκειται να τοποθετήσει ομοιόμορφα έναν σταθερό αριθμό αισθητήρων στην περιοχή ελέγχου και να παρατηρήσει το βαθμό κάλυψής του που επιτυγχάνεται με την πιθανότητα T).

Η εικόνα συγκρίνει την τάση του αριθμού αισθητήρων που απαιτείται σε PKCCA και RDKCCA με την αύξηση της παραμέτρου α ανίχνευσης. Για να φθάσει στην 3-κάλυψη για την ίδια περιοχή ελέγχου, ο αριθμός αισθητήρων που απαιτείται σε PKCCA και RDKCCA αυξάνεται με την αύξηση του α . Για μεγαλύτερο α , η δυνατότητα αντίληψης των αισθητήρων είναι πιο αδύναμη από το STM, κατά συνέπεια περισσότεροι αισθητήρες απαιτούνται για να ολοκληρώσουν την υποχρέωση κάλυψης. Επιπλέον, για το ίδιο α , οι αισθητήρες που απαιτούνται σε PKCCA είναι σημαντικά λιγότεροι απ' ό,τι σε RDKCCA, το οποίο είναι προφανέστερο όταν α είναι πολύ μεγάλο, γι' αυτό και η δυνατότητα αντίληψης των αισθητήρων είναι πολύ πιο αδύναμη. Επομένως, ο PKCCA μπορεί να εφαρμοστεί στο περιβάλλον ελέγχου με μικρή ικανότητα μετάδοσης σημάτων και να παρέχει υψηλή αξιοπιστία.

Αντίστοιχα, η τάση του αριθμού αισθητήρων που απαιτείται σε PKCCA και RDKCCA με την αύξηση του ορίου ελέγχου β και της μέγιστης πιθανότητας αστοχίας M_{max} συγκρίνεται στην εικόνα 2. Μπορεί να δει κανείς από την εικόνα 2(a) για να επιτευχθεί η 3-κάλυψη για την ίδια περιοχή ελέγχου, ο αριθμός αισθητήρων που απαιτούνται σε PKCCA και RDKCCA είναι περισσότεροι με μεγαλύτερο β . Για μεγαλύτερο β , ο όγκος της σφαίρας κάλυψης του αισθητήρα στο STM είναι μικρότερος, γι' αυτό η ακτίνα κάλυψης κάθε αισθητήρα είναι μικρότερη, έτσι περισσότεροι αισθητήρες απαιτούνται για να ολοκληρώσουν την κάλυψη. Επιπλέον, μπορούμε να δούμε ότι για το ίδιο κατώτατο όριο β σειράς ελέγχου, οι αισθητήρες που απαιτούνται σε PKCCA είναι σημαντικά λιγότεροι απ' ό,τι σε RDKCCA, το οποίο είναι προφανέστερο ότι όταν το β είναι πολύ μεγάλο, η ακτίνα κάλυψης των αισθητήρων είναι πολύ μικρή. Η αλλαγή της παραμέτρου β έχει πολλή επιρροή στον RDKCCA, ενώ ο PKCCA παρουσιάζει υψηλή αντοχή στην αλλαγή του β . Από την εικόνα 2(b), μπορούμε να δούμε ότι για να φθάσουμε στην 3-κάλυψη για την ίδια περιοχή ελέγχου, ο αριθμός αισθητήρων σε PKCCA και RDKCCA είναι μικρότερος με μεγαλύτερο M_{max} . Για μεγαλύτερο M_{max} , λιγότεροι αισθητήρες απαιτούνται για να ολοκληρώσουν το στόχο κάλυψης με τις χαμηλότερες απαιτήσεις. Επιπλέον, για το ίδιο M_{max} , οι αισθητήρες που απαιτούνται στον PKCCA είναι σημαντικά λιγότεροι απ' ό,τι στον RDKCCA. Ειδικά όταν το M_{max} είναι πολύ μικρό, οι αισθητήρες που απαιτούνται στον PKCCA είναι πολύ λιγότεροι απ' ό,τι στον RDKCCA επιτυγχάνοντας την ίδια κάλυψη με την υψηλότερη απαίτηση.



Εικόνα 20: Η τάση του αριθμού των αισθητήρων που απαιτούνται σε PKCCA και RDKCCA μεταβάλλοντας την παράμετρο α , $\beta=0,2$, $M_{max}=0.4$



Εικόνα 21: α. Η τάση του αριθμού αισθητήρων που απαιτείται σε PKCCA και RDKCCA με την αύξηση β , και $\alpha=0.3$, $M_{max}=0.4$ β. Η τάση του αριθμού αισθητήρων που απαιτείται σε PKCCA και RDKCCA με την αύξηση M_{max} , και $\alpha=0.3$, $\beta=0.2$.

8.4 Συμπεράσματα

Τα WSNs έχει μια ευρεία εφαρμογή στο περιβάλλον ελέγχου όπου η περιοχή ελέγχου είναι πάντα ένα τρισδιάστατο διάστημα και υπάρχει εγγενής αβεβαιότητα στις αναγνώσεις αισθητήρων. Αλλά η ανθεκτικότητα και η ανοχή στα σφάλματα απαιτούνται στο σύστημα έλεγχου αισθητήρων. Μια προσέγγιση βασισμένη στην πιθανότητα ελέγχου κάλυψης K για τρισδιάστατα WSNs, PKCCA, παρουσιάστηκε παραπάνω. Για την παραλλαγή της παραμέτρου α ελέγχου ανίχνευσης, ελέγχοντας το κατώτατο όριο β και τη μέγιστη πιθανότητα αστοχίας που επιτρέπεται για κάθε σημείο πλέγματος το M_{max} , τα αποτελέσματα προσομοίωσης δείχνουν ότι ο PKCCA χρησιμοποιεί τους λιγότερους αισθητήρες από τον RDKCCA για να ολοκληρώσουν

την ίδια τρισδιάστατη κάλυψη και ο PKCCA μπορούν να φθάσουν στον υψηλότερο βαθμό κάλυψης από τον RDKCCA και τον UDKCCA για τον ίδιο αριθμό αισθητήρων. Η περίπτωση της προνομιακής κάλυψης (προνομιακός βαθμός κάλυψης και προνομιακός έλεγχος ακρίβεια) για κάποιο πλέγμα τα σημεία αναλύονται επίσης και προσομοιώνονται, το οποίο παρουσιάζει ότι ο PKCCA ξεπερνά τον RDKCCA. Είναι μια καλή λύση για υψηλή αξιοπιστία και ανθεκτικότητα ανιχνεύοντας ειδικό περιβάλλον με αδύναμη διάδοση των σημάτων.

Συνολική βιβλιογραφία

- [1] **An Algorithm of Coverage Control for Wireless Sensor Networks in 3D Underwater Surveillance Systems**

Feng Chen, Peng Jiang, and Anke Xue
Institute of Information and Control, Hangzhou Dianzi University, Zhejiang, China

- [2] **A Coverage Algorithm for Three-dimensional Large-scale Sensor Network**

Rao Lei, Liu Wenyu, and Guo Peng
Department of Electronics and Information Engineering
Huazhong University of Science and Technology, P.R.C

- [3] **Surface Coverage in Wireless Sensor Networks**

Ming-Chen Zhao, Jiayin Lei, Min-You Wu
Shanghai Jiao Tong University
China

Yunhuai Liu
Hong Kong University of
Science and Technology, China

Wei Shu
The University of
New Mexico, USA

- [4] **Low-Connectivity and Full-Coverage Three Dimensional Wireless Sensor Networks**

Xiaole Bai
Dept. of Computer Science
And Engineering
The Ohio State University
Columbus, OH, USA

Chuanlin Zhang
Dept. of Mathematics
Jinan University

Guangzhou, P.R.CHINA

Dong Xuan
Dept. of Computer Science
and Engineering
The Ohio State University
Columbus, OH, USA

Jin Teng
Dept. of Computer Science
City University of Hong Kong,
Hong Kong, P.R.CHINA

Weijia Jia
Dept. of Computer Science
City University of Hong Kong,
Hong Kong, P.R.CHINA

[5] **Full-Coverage and k -Connectivity ($k = 14, 6$)
Three Dimensional Networks**

Xiaole Bai*, Chuanlin Zhang[†], Dong Xuan* and Weijia Jia
Department of Computer Science and Engineering
The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA

[6] **Wireless Sensor Deployment for 3D Coverage with Constraints**

Tycho Andersen and Srikanta Tirthapura
Dept. of Electrical and Computer Engineering, Iowa State University.

[7] **The Coverage Problem in Three-Dimensional
Wireless Sensor Networks**

Chi-Fu Huang, Yu-Chee Tseng, and Li-Chu Lo
Department of Computer Science and Information Engineering
National Chiao-Tung University, Hsin-Chu, 30050, Taiwan

[8] **Probability-Based Coverage Algorithm for 3D Wireless
Sensor Networks**

Feng Chen, Peng Jiang, and Anke Xue
Institute of Information and Control, Hangzhou Dianzi University, Zhejiang, China

[9] A Study of k-Coverage and Measures of Connectivity in 3D Wireless Sensor Networks

Habib M. Ammari, Member, IEEE, and Sajal K. Das, Senior Member, IEEE