

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΜΕΣΣΟΛΟΓΓΙΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΤΗΛΕΠ/ΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Μελέτη Ανάλυση και Ταξινόμηση Τεχνικών Ανάπτυξης
Ασύρματων Δικτύων σε Εκτάσεις Μεγάλης Κλίμακας”**

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: Μαγκαφά Άννα

ΑΜ: 0091

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Πραγιάτη Αγγελική

ΝΑΥΠΑΚΤΟΣ 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	7
1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	8
1.1 Εισαγωγή	8
1.2 Είδη Ασύρματων Δικτύων	8
1.3 Ζητήματα Σχεδιασμού Ασύρματων Κινητών Δικτύων	10
1.3.1 Χαμηλός Ρυθμός Μετάδοσης.....	10
1.3.2 Υψηλή μεταβλητότητα του ρυθμού μετάδοσης	11
1.3.3 Κινητικότητα	11
1.3.4 Ετερογενή Δίκτυα.....	11
1.3.5 Κίνδυνοι Ασφάλειας	12
1.3.6 Ευκολία Μεταφοράς.....	12
1.3.7 Περιορισμένες δυνατότητες αποθήκευσης	14
1.3.8 Αποτελέσματα διάδοσης στο ασύρματο κανάλι	15
1.3.9 Τεχνικές εντοπισμού και ανίχνευσης στόχου	16
1.4 Μελλοντική Εξέλιξη των Ασύρματων Δικτύων	16
2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ DEPLOYMENT ΓΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	18
2.1 Γενικά για τα Wireless Sensor Networks (WSN)	18
2.2 Καταγραφή Εφαρμογών των WSNs.....	19
2.2.1 Λίστα βασικών WSN εφαρμογών.....	19
2.3 Νέες προκλήσεις και εφαρμογές.....	22
2.3.1 Παραδείγματα εφαρμογών δικτύων αισθητήρων με κίνηση	22
2.4 Χαρακτηριστικά των τοπολογιών των WSN δικτύων	23
2.4.1 Point – to – point δίκτυα	23
2.4.2 Multidrop δίκτυα	24
2.4.3 Web – based δίκτυα	25
2.5 Ανάλυση τεχνικών deployment για WSN.....	26
2.5.1 Κατανεμημένα δίκτυα αισθητήρων και εικονικές δυνάμεις	26
2.5.2 Τεχνικές ανίχνευσης στόχου	33
2.5.3 Αυτό – διαμορφούμενα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	38
2.5.4 Ένας γενετικός αλγόριθμος για WSN	40

2.6	Χαρακτηριστικά που καθορίζουν την τεχνική που χρησιμοποιείται.....	46
2.7	Παράμετροι που αφορούν τα πρωτόκολλα επικοινωνίας για WSN.....	49
3.	ΤΕΧΝΙΚΕΣ DEPLOYMENT ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ	52
3.1	Γενικά για τα Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας.....	52
3.2	Ανάλυση τεχνικών deployment για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας	59
3.2.1	Ένας αυξητικός self – deployment αλγόριθμος για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας	59
3.2.2	Η θεωρία των δυναμικών πεδίων για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.....	64
3.3	Παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό	69
3.3.1	Κινητό Κέντρο Ελέγχου	71
3.3.2	Κινητοί Αναμεταδότες.....	71
3.3.3	Κινητοί Αισθητήρες	72
3.4	Χαρακτηριστικά των τοπολογιών δικτύων κινητής τηλεφωνίας.....	72
3.4.1	Τοπολογία αστέρα (star).....	72
3.4.2	Τοπολογία πλέγματος (mesh)	73
3.4.3	Υβριδικές τοπολογίες αστέρα – πλέγματος (hybrid)	75
3.5	Χαρακτηριστικά εφαρμογών	76
4.	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΔΙΚΤΥΑΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΣΤΟ 802.11	78
4.1	Γενικά για το IEEE 802.11x.....	78
4.2	Βασικές Μονάδες και Τεχνικός Εξοπλισμός Δικτύων WiFi.....	80
4.2.1	Σύστημα Διανομής (Distribution System).....	80
4.2.2	Σημεία Πρόσβασης (APs)	81
4.3	Ανάλυση χαρακτηριστικών των τοπολογιών των 802.11 δικτύων	84
4.3.1	Περιγραφή των τοπολογιών	84
4.3.2	Χαρακτηριστικά των τοπολογιών	88
4.4	Παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στην οικογένεια πρωτοκόλλων 802.11.....	91
4.5	Χαρακτηριστικά εφαρμογών που καθορίζουν τις τοπολογίες.....	97
4.5.1	Δικτυακή απόδοση κατά τη μετάδοση MPEG video	98
4.5.2	Ποιότητα υπηρεσιών (QoS) και διαχείριση εύρους ζώνης στα WLANs	100
4.5.3	Κίνηση δεδομένων φωνής και διαχείριση του handover στο 802.11b	103
5.	ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	107
5.1	Τεχνικές Deployment σε εφαρμογές WSN – δικτύων κινητής τηλεφωνίας	107
5.2	Κανόνες χρήσης τεχνικών deployment σε δίκτυα αισθητήρων –δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.....	111

5.3	Εφαρμογές WSN και WLANs στο σπίτι, το γραφείο, την βιομηχανία	115
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	120

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ένα point – to – point WSN.....	23
Εικόνα 2: Ένα multidrop WSN	24
Εικόνα 3: Ένα web – based WSN	25
Εικόνα 4: Μοντέλο ανίχνευσης θέσεων αισθητήρων	27
Εικόνα 5: Παράδειγμα εικονικών δυνάμεων με 4 αισθητήρες	28
Εικόνα 6: (a) μη επικαλυπτόμενες περιοχές, (b) επικαλυπτόμενες περιοχές.....	29
Εικόνα 7: Δυαδικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Αρχικές θέσεις των αισθητήρων	30
Εικόνα 8: Δυαδικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Τελικές θέσεις των αισθητήρων	30
Εικόνα 9: Δυαδικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Εικονικές κινήσεις των αισθητήρων	30
Εικόνα 10: Δυαδικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Βελτίωση στην τελική κάλυψη	30
Εικόνα 11: Πιθανοτικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Αρχικές θέσεις των αισθητήρων.....	31
Εικόνα 12: Πιθανοτικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Τελικές θέσεις των αισθητήρων	31
Εικόνα 13: Πιθανοτικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Εικονικές κινήσεις των αισθητήρων.....	31
Εικόνα 14: Πιθανοτικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Βελτίωση στην τελική κάλυψη.....	31
Εικόνα 15: Πραγματικό πεδίο ανίχνευσης αισθητήρων – Αρχικές θέσεις των αισθητήρων	32
Εικόνα 16: Πραγματικό πεδίο ανίχνευσης αισθητήρων – Τελικές θέσεις των αισθητήρων	32
Εικόνα 17: Πραγματικό πεδίο ανίχνευσης αισθητήρων – Εικονικές κινήσεις των αισθητήρων	32
Εικόνα 18: Πραγματικό πεδίο ανίχνευσης αισθητήρων – Βελτίωση στην τελική κάλυψη	32
Εικόνα 19: Trilateration μέθοδος	33
Εικόνα 20: multilateration: (a) ατομική, (b) επαναληπτική, (c) συνεργάσιμη	34
Εικόνα 21: APIT.....	34
Εικόνα 22: Μέθοδος coarse grained εντοπισμού, (a) απλή, (b) βελτιωμένη	35
Εικόνα 23: hop-counting τεχνική	35
Εικόνα 24: Εντοπισμός θέσης χρησιμοποιώντας μετρήσεις.....	36
Εικόνα 25: Σύγκριση λαμβανόμενου σχεδίου σημάτων.....	36
Εικόνα 26: Εντοπισμός μέσω mobile agent.....	37
Εικόνα 27: Κανονική ανάπτυξη σε κόμβους ((a) τριγωνική, (b) τετραγωνική) και μη κανονική τυχαία (c)	37
Εικόνα 28: Αρχιτεκτονική συστήματος κόμβου αισθητήρα αναγνώρισης ενέργειας	38
Εικόνα 29: Το «έξυπνο» υποσύστημα ασύρματης επικοινωνίας	40
Εικόνα 30: Οι φάσεις του GA-based αλγορίθμου	41
Εικόνα 31: Η συνάρτηση αξιολόγησης	43
Εικόνα 32: Το περιβάλλον εφαρμογής του GA.....	44
Εικόνα 33: Κάλυψη στο χρόνο ανάλογα με το ρυθμό μεταλλαγής	45
Εικόνα 34: Τοπολογίες αστέρα, peer – to – peer και cluster tree σε ένα IEEE 802.15.4 δίκτυο	50
Εικόνα 35: Εξέλιξη των προτύπων για τα κυβελωτά κινητά δίκτυα μέχρι την 3 ^η γενιά.....	54
Εικόνα 36: Το όραμα των δικτύων 4 ^{ης} γενιάς.....	55
Εικόνα 37: Τα 3 είδη πλεγμάτων που αξιοποιεί ο self – incremental αλγόριθμος	63
Εικόνα 38: Η εφαρμογή δυναμικού πεδίου σε περιβάλλον με φυσικό εμπόδιο	65
Εικόνα 39: Το περιβάλλον εφαρμογής του αλγορίθμου δυναμικού πεδίου	67
Εικόνα 40: Κάλυψη στο χρόνο για τον αλγόριθμο δυναμικού πεδίου	68
Εικόνα 41: Η περιοχή κάλυψης με την εφαρμογή του αλγορίθμου δυναμικών πεδίων	69
Εικόνα 42: Τοπολογία star κινητού δικτύου.....	73
Εικόνα 43: Τοπολογία mesh κινητού δικτύου	73
Εικόνα 44: 2D mesh με μέγιστο όριο 3 γειτονικούς κόμβους	74
Εικόνα 45: 2D mesh με μέγιστο όριο 4 γειτονικούς κόμβους	74
Εικόνα 46: 2D mesh με μέγιστο όριο 6 γειτονικούς κόμβους	75
Εικόνα 47: 3D mesh με μέγιστο όριο 6 γειτονικούς κόμβους	75
Εικόνα 48: Υβριδική τοπολογία κινητού δικτύου	75
Εικόνα 49: Το σύστημα διανομής στο 802.11	81
Εικόνα 50: Διασύνδεση και επικοινωνία χρηστών μέσω τοπικού AP.....	82
Εικόνα 51: Λαμβανόμενη ισχύς συναρτήσει απόστασης από AP	83
Εικόνα 52: Τοπολογία IBSS.....	84
Εικόνα 53: Τοπολογία BSS	85

Εικόνα 54: Τοπολογία infrastructure 2 BSSs	87
Εικόνα 55: Επίτευξη του roaming χρηστών στο ESS.....	87
Εικόνα 56: Το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου.....	95
Εικόνα 57: Η διαδικασία του handover στο 802.11	103
Εικόνα 58: Ενέργεια συναρτήσει του μεγέθους των πακέτων και της διαμόρφωσης	108
Εικόνα 59: Σύστημα διαχείρισης ενέργειας.....	109
Εικόνα 60: Το ασύρματο δίκτυο μιας εταιρίας.....	117

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα της πληροφορικής και των ασύρματων επικοινωνιών έχει οδηγήσει στην εδραίωση των ασύρματων δικτύων υπολογιστών και των ασύρματων δικτυακών φορητών συσκευών. Μια πληθώρα συσκευών, όπως laptops, PDAs, notebooks, κινητά τηλέφωνα, palmtops, κλπ., μπορούν να συνδέονται σε ασύρματα μέσα μετάδοσης, επιτρέποντας τη δυνατότητα επικοινωνίας ακόμα και εν κινήσει και υλοποιώντας το όραμα της επικοινωνίας παντού και πάντα (anywhere, anytime).

Ωστόσο, η ασύρματη επικοινωνία παρουσιάζει ένα σύνολο τεχνικών δυσκολιών που δεν παρουσιάζει η ενσύρματη. Τέτοιες δυσκολίες αφορούν φυσικούς παράγοντες όπως η επίδραση του περιβάλλοντος, ο θόρυβος και οι παρεμβολές στα μεταδιδόμενα σήματα αλλά και παράγοντες που οφείλονται στις τεχνικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιήσουν τα ασύρματα δίκτυα, όπως τα θέματα ενέργειας των κινητών κόμβων του δικτύου, η κάλυψη απρόσιτων περιοχών, η αποδοτικότητα του δικτύου, κλπ.

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSNs) είναι δυναμικά μεταβαλλόμενα δίκτυα. Η εξάντληση των ενεργειακών πόρων τους μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την παύση της λειτουργίας κάποιων κόμβων. Στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας η αυξημένη πυκνότητα των χρηστών οδηγεί σε μεγάλη πολυπλοκότητα πρόσβασης και η διατήρηση του χαμηλού κόστους με την προσθήκη νέων κόμβων δεν αποτελεί αμελητέο πρόβλημα. Τα χαρακτηριστικά των τοπολογιών των WLANs είναι υπεύθυνα για την υποστήριξη ή μη μιας σειράς από εφαρμογές πραγματικού χρόνου που είναι αρκετά ευαίσθητες σε θέματα παροχής υψηλού επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών (QoS) (π.χ. μετάδοση video, VoIP).

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται θέματα τεχνικών deployment, δηλαδή τεχνικών ανάπτυξης κόμβων σε διάφορους τύπους ασύρματων δικτύων. Οι τύποι των δικτύων που μελετώνται διεξοδικά είναι: 1) τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, 2) τα Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας, 3) τα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα.

Κύριος σκοπός της εργασίας είναι να εξαχθούν συμπεράσματα για τις ιδιαιτερότητες των ασύρματων τοπολογιών και για το πώς αυτές επηρεάζουν τις δικτυακές εφαρμογές. Η εργασία περιλαμβάνει μια διεξοδική μελέτη και ανάλυση τεχνικών και αλγορίθμων ανάπτυξης κόμβων σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προκειμένου να επιτυγχάνεται μέγιστη κάλυψη, υψηλή συνδεσιμότητα, χαμηλό κόστος και υψηλής ποιότητας ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Επίσης, μελετήθηκαν συγκεκριμένοι αλγόριθμοι και τεχνικές για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας με τις οποίες επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εκμετάλλευση του χώρου στον οποίο αυτά αναπτύσσονται. Τέλος, παρουσιάζονται συγκεκριμένες τεχνικές τοποθέτησης δικτυακών συσκευών σε WLANs, καθώς και τα χαρακτηριστικά των εφαρμογών που τις καθορίζουν, προκειμένου οι συσκευές να εξυπηρετούν την αυξανόμενη δικτυακή κίνηση.

Σε καθεμιά από τις 3 περιπτώσεις δικτύων καταλήγουμε στην καταγραφή εκείνων των χαρακτηριστικών των εφαρμογών που επί της ουσίας καθορίζουν το ποια τεχνική είναι κατάλληλη για ποια εφαρμογή. Έτσι οδηγούμαστε σε μια σειρά κανόνων χρήσης των αλγορίθμων ανάλογα με την περίπτωση του δικτύου και της εφαρμογής. Αυτοί οι κανόνες αφορούν παράγοντες όπως ο βαθμός κινητικότητας των κόμβων, η υψηλή απόδοση, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, η κάλυψη, η καλή σύνδεση και το χαμηλό κόστος διαχείρισης και συντήρησης.

ABSTRACT

The evolution of IT technology has led to the consolidation of wireless computer networks and the use of wireless network portable devices. Nowadays a plethora of devices such as laptops, PDAs, notebooks, cell phones, palmtops, etc., connect to one another through various wireless media, enabling communication on the move and implementing the vision of anywhere and anytime communication.

Nevertheless, wireless communication suffers from an extended set of technical problems and difficulties that wired communication does not. Such difficulties concern physical parameters such as environmental effects, the additive noise and interference to the transmitted signals, as well as parameters regarding the technical requirements that need to be satisfied i.e. energy issues of the mobile network nodes, coverage of inaccessible areas, overall network performance and throughput, etc.

Wireless Sensor Networks (WSNs) are dynamically changing networks. The exhaustion of their energy resources may cease the operation of many nodes and thus leading to the malfunction of the network. In mobile networks an increasing density of users leads to increased access complexity and the problem of preserving low costs by adding new nodes does not seem to be negligible. Additionally, the topology characteristics of WLANs are responsible for supporting or not a series of real-time applications that are extremely sensitive to a high level of Quality of Service (i.e. video transfer, Voice over IP, etc.).

This thesis handles technical deployment issues for different types of wireless networks. Our study focuses on the following types: 1) Wireless Sensor Networks (WSNs), 2) Mobile Communication networks, 3) Wireless Local Area Networks (WLANs).

The main purpose of this work is to draw conclusions for the particularities of wireless topologies and about how these topologies affect network applications. The thesis includes a detailed study and analysis of techniques and algorithms for deploying nodes into wireless sensor networks under the objectives of maximum area coverage, high connectivity, low costs and keeping up a high level of QoS. Furthermore, mobile network algorithms have been studied for the accomplishment of exploiting a given area. Finally, techniques are presented for using and properly placing WLAN devices (hubs, bridges, routers), as well as the characteristics of those applications that specify them, in order to best serve increasing network traffic.

For each one of the 3 networks types we conclude to the itemization of the application characteristics that define which technique is most suitable for which application. In this way, a list of rules is formed regarding the usage of algorithms according to the network type and the application characteristics. These rules concern parameters such as the level of node mobility, high performance, low power consumption, coverage and high connectivity as well as low administration and maintenance costs.

1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Ο ταχύτατα εξελισσόμενος τομέας των δικτύων κινητών επικοινωνιών έχει επιφέρει μία ιδιαίτερα αυξανόμενη απαίτηση για ασύρματη, πολυμεσική επικοινωνία. Στη ραγδαία εξέλιξη του τομέα αυτού συμβάλουν τα μέγιστα και οι απαιτήσεις της σύγχρονης αγοράς για ένα ενοποιημένο και λειτουργικό σύστημα κινητής τηλεφωνίας παρέχοντας παράλληλα πληθώρα ευρυζωνικών υπηρεσιών ψηφιακού περιεχομένου στους πελάτες – χρήστες του.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία επιτρέπουν πλέον στους χρήστες και τους φορητούς υπολογιστές να έχουν ασύρματες διασυνδέσεις, επιτρέποντας τη δυνατότητα επικοινωνίας ακόμα και εν κινήσει. Το όραμα των ασύρματων δικτύων είναι η δυνατότητα επικοινωνίας παντού και πάντα (anywhere, anytime). Ο κινητός υπολογισμός (mobile computing) αναμένεται να δώσει μια νέα διάσταση στον όρο υπολογισμός και να αλλάξει τους τρόπους με τους οποίους χρησιμοποιούνται οι υπολογιστές σήμερα.

Η ασύρματη δικτύωση αυξάνει σημαντικά τη χρησιμότητα μιας φορητής συσκευής. Παρέχει στους κινητούς χρήστες πολύπλευρη επικοινωνία με άλλα άτομα και έγκαιρη ενημέρωση για σημαντικά γεγονότα. Επίσης επιτρέπει συνεχή πρόσβαση στις υπηρεσίες και τους πόρους του ενσύρματου δικτύου. Ο συνδυασμός της δικτύωσης και της κινητικότητας θα δημιουργήσει νέες εφαρμογές και υπηρεσίες, όπως συνεργατικό λογισμικό για αυτοσχέδιες συναντήσεις, ηλεκτρονικούς πίνακες ανακοινώσεων που θα προσαρμόζουν τα περιεχόμενά τους ανάλογα με τα άτομα που είναι παρόντα και λογισμικό πλοήγησης για την καθοδήγηση χρηστών σε άγνωστα μέρη ή ταξίδια.

Ωστόσο, η ασύρματη επικοινωνία παρουσιάζει μεγαλύτερες δυσκολίες από την ενσύρματη, γιατί η επίδραση του περιβάλλοντος και η παρεμπόδιση ορισμένων μονοπατιών μετάδοσης εισάγουν θόρυβο και ηχώ στο μεταδιδόμενο σήμα. Οι ασύρματες συνδέσεις μπορεί να διακοπούν ή να υποβαθμιστούν από την κινητικότητα, καθώς οι χρήστες κινούνται εκτός της περιοχής κάλυψης των πομπών του δικτύου ή εντός περιοχών υψηλής παρεμβολής. Γενικά, οι ασύρματες συνδέσεις είναι χαμηλότερης ποιότητας από τις ενσύρματες με χαρακτηριστικά τους χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, τους υψηλούς ρυθμούς λαθών και τις συχνές και με απρόβλεπτο τρόπο διακοπές συνδέσεων.

1.2 Είδη Ασύρματων Δικτύων

Διακρίνουμε διάφορα είδη ασύρματων δικτύων, ανάλογα με τις εφαρμογές τους και την τεχνολογία που χρησιμοποιούν:

1. **Δίκτυα αισθητήρων (sensor networks):** Τα τελευταία χρόνια οι ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα της μικροηλεκτρονικής έκαναν δυνατή την κατασκευή μικρότερων και ταχύτερων ημιαγωγών. Τα ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων αποτελούνται από ένα πολύ μεγάλο πλήθος συσκευών που τοποθετούνται σε μια μεγάλη περιοχή ενδιαφέροντος και αυτό-οργανώνονται σε ένα ασύρματο δίκτυο προκειμένου να μετρήσουν/παρακολουθήσουν κάποια συγκεκριμένη μετρική (π.χ. περιβαλλοντική) και να αναφέρουν τις μετρήσεις. Οι συσκευές είναι μικρού μεγέθους, αυτόνομες,

μικροσκοπικές, εξοπλισμένες με αισθητήρες, επεξεργαστή και δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας.

2. **Κυψελικά (cellular) τηλεφωνικά δίκτυα:** Αυτή είναι η πιο διαδεδομένη εφαρμογή των ασύρματων δικτύων. Τα κυψελικά (στο μέλλον μικροκυψελικά) δίκτυα είναι ικανά να παρέχουν υπηρεσίες κατά πρώτο λόγο φωνής και κατά δεύτερο λόγο δεδομένων στους χρήστες. Οι εκτεταμένες περιοχές μετακίνησης απαιτούν από το δίκτυο να ενημερώνεται για τη νέα θέση του χρήστη. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης στα σημερινά κυψελικά δίκτυα είναι αρκετά χαμηλό για εφαρμογές που απαιτούν εντατική μεταφορά δεδομένων και αυτός είναι ο λόγος που αναζητούνται νέες λύσεις για αύξηση της χωρητικότητας.
3. **Μητροπολιτικά ασύρματα δίκτυα δεδομένων (ασύρματα MAN):** Πρόκειται για ειδικά δίκτυα που παρέχονται από ιδιωτικούς παροχείς υπηρεσιών. Τα δίκτυα αυτά καλύπτουν μια ορισμένη περιοχή (π.χ. στο μέγεθος μιας πόλης) και επιτρέπουν την μεταφορά δεδομένων μεταξύ των χρηστών που βρίσκονται σε αυτή.
4. **Τοπικά ασύρματα δίκτυα δεδομένων (WLAN):** Είναι ανάλογα με τα μητροπολιτικά, μόνο που η περιοχή που καλύπτουν είναι πολύ μικρότερη. Τα παραδοσιακά ενσύρματα LAN (π.χ. Ethernet) είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα, και το ίδιο αναμένεται να συμβεί στο μέλλον και με τα ασύρματα LAN. Η ιδέα είναι να επεκταθούν τα παραδοσιακά LANs με ένα ασύρματο interface ώστε να εξυπηρετούν μικρά και χαμηλής ισχύος κινητά τερματικά ικανά να έχουν ασύρματη πρόσβαση. Το ασύρματο LAN συνδέεται συνήθως σε ένα πιο εκτεταμένο σταθερό δίκτυο (π.χ. ενσύρματο LAN, WAN, Internet). Τα ασύρματα LAN έχουν περιορισμένη περιοχή κάλυψης και έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά σε τοπικό επίπεδο, εφόσον δεν παρέχουν προς το παρόν δικτυακή υποστήριξη για εκτεταμένης περιοχής μετακινήσεις.
5. **Δορυφορικά Δίκτυα:** Σε τέτοια δίκτυα η επικοινωνία μεταξύ των επίγειων σταθμών γίνεται μέσω του δορυφόρου ως ενδιάμεσος κόμβος. Ο δορυφόρος αναλαμβάνει να προωθήσει τα πακέτα που λαμβάνει από τους επίγειους σταθμούς αφετηρίας των πακέτων στους επιθυμητούς επίγειους σταθμούς-παραλήπτες. Τα δορυφορικά δίκτυα προσφέρονται μεταξύ άλλων και για περιοχές όπου τα συμβατικά κυψελικά δίκτυα είναι δύσκολο, αντιοικονομικό ή αδύνατον να αναπτυχθούν (ωκεανοί, δυσπρόσιτες περιοχές, περιοχές με πολύ μικρό αριθμό χρηστών).
6. **Δίκτυα μετάδοσης ραδιοπακέτων ή ad-hoc δίκτυα:** Ένα σύνολο κινητών κόμβων σχηματίζουν δυναμικά τέτοιου είδους «τυχαία» (ad-hoc) δίκτυα χωρίς να χρησιμοποιούν σταθερή υλική υποδομή. Η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων γίνεται είτε μέσω ενός κεντρικού κόμβου, είτε διαδοχικά από κόμβο σε κόμβο (multihop δίκτυα) που είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση. Σε multihop ad hoc δίκτυα, κάθε κόμβος είναι υπεύθυνος όχι μόνο για την προώθηση των δικών του πακέτων αλλά και για την προώθηση ως ενδιάμεσος κόμβος και πακέτων που έχουν την αφετηρία τους σε άλλους κόμβους. Για παράδειγμα η δρομολόγηση μπορεί να γίνει ως εξής: ο κάθε κόμβος στέλνει τα πακέτα στον πιο κοντινό προς αυτόν κόμβο που βρίσκεται προς την κατεύθυνση του προορισμού, αυτός τα προωθεί στην συνέχεια σε έναν κατάλληλο γείτονα του, κ.ο.κ., μέχρι να φτάσουν τα πακέτα στον προορισμό τους.
7. **Δίκτυα σελιδοποίησης (paging networks):** Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται για την προώθηση μικρών αλφαριθμητικών μηνυμάτων σε βομβητές (beepers). Η

υπηρεσία είναι συνήθως αποκλειστικά λήψης και έχει πολύ χαμηλό ρυθμό μετάδοσης.

8. **Άλλα μελλοντικά δίκτυα:** Εδώ συγκαταλέγονται σχέδια για ανάπτυξη δικτυακών περιβαλλόντων στα οποία η σύνδεση των κινητών χρηστών θα είναι άμεση μέσω κάποιων ειδικών εξαρτημάτων ενώ η επικοινωνία θα υποστηρίζεται για όλων των ειδών τις συσκευές. Παραδείγματος χάριν οικιακά δίκτυα (home networks), δίκτυα προσωπικής περιοχής (personal area networks), κλπ., όπου ακόμα και μικρές συσκευές (π.χ. διακόπτες φώτων, smart dust, κλπ) είναι πιθανοί δημιουργοί και αποδέκτες πακέτων.

1.3 Ζητήματα Σχεδιασμού Ασύρματων Κινητών Δικτύων

1.3.1 Χαμηλός Ρυθμός Μετάδοσης

Οι σχεδιαστές ασύρματων δικτύων έχουν να αντιμετωπίσουν περισσότερους περιορισμούς σε ότι αφορά την διαθέσιμη χωρητικότητα από ότι οι σχεδιαστές σταθερών δικτύων. Για παράδειγμα, το εύρος ζώνης μιας κυψέλης σε ένα ασύρματο κυψελικό δίκτυο μοιράζεται ανάμεσα στους χρήστες της κυψέλης και άρα μας ενδιαφέρει περισσότερο η διαθέσιμη χωρητικότητα ανά χρήστη και όχι η συνολική χωρητικότητα. Επειδή όμως το μέγεθος αυτό εξαρτάται από το μέγεθος και την κατανομή του πληθυσμού των χρηστών, η χωρητικότητα του δικτύου μετριέται σε bits/sec ανά κυβικό μέτρο και όχι απλά σε bits/sec όπως στα ενσύρματα δίκτυα.

Ένας τρόπος να αυξήσουμε τη χωρητικότητα του δικτύου είναι να προσθέσουμε περισσότερες κυψέλες είτε με επικαλυπτόμενες κυψέλες σε διαφορετικές συχνότητες είτε μειώνοντας το μέγεθος των κυψελών μέσω της μείωσης της ισχύος εκπομπής σε μια δεδομένη περιοχή. Η πρώτη τεχνική εφαρμόζεται με περιορισμούς, καθώς το διαθέσιμο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι περιορισμένο. Η δεύτερη τεχνική προτιμάται γενικότερα, γιατί είναι απλούστερη, μειώνει τις απαιτήσεις σε ισχύ και περιορίζει την πιθανότητα αλλοίωσης του σήματος, καθώς έχουμε λιγότερες συσκευές μέσα στην κυψέλη, ενώ η μείωση της περιοχής κάλυψης επιτρέπει στους πομπούς να έχουν μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης.

Το πρόβλημα του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης στις ασύρματες συνδέσεις μπορεί να αντιμετωπιστεί και με ορισμένες τεχνικές στο λογισμικό. Έτσι, τα modems χρησιμοποιούν συμπίεση για να αυξήσουν την χρήσιμη ρυθμο – απόδοση (throughput). Επίσης, επειδή οι μεταφορές μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων είναι πιο αποδοτικές από τις σύντομες μεταφορές, μια τεχνική που βελτιώνει τη χρήση της χωρητικότητας είναι η συγχώνευση πολλών μικρών αιτήσεων σε μια συνολική μεγαλύτερη. Η τεχνική αυτή, μαζί με τη συμπίεση μπορούν να αυξήσουν την απόδοση, μιας και οι μεγαλύτεροι όγκοι δεδομένων συμπιέζονται καλύτερα.

Ορισμένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση των αποσυνδέσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για το πρόβλημα του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Όπως η κίνηση του δικτύου γίνεται συνήθως σε καταιγισμούς (bursts), έτσι και οι αποσυνδέσεις εμφανίζουν συχνά καταιγιστική συμπεριφορά, μια και αυτές συμβαίνουν όταν η ζήτηση ξεπεράσει στιγμιαία το διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης. Τεχνικές όπως το lazy write-back και το prefetching μπορούν να μειώσουν τη ζήτηση στις χρονικές στιγμές όπου παρουσιάζεται αιχμή. Η πρώτη τεχνική μειώνει τη συνολική

επικοινωνία, όταν τα δεδομένα προς μετάδοση μεταβάλλονται ή σβήνονται πριν τη μετάδοσή τους. Η δεύτερη τεχνική προσπαθεί να μαντέψει ποια αρχεία θα ζητηθούν άμεσα, ώστε να ξεκινήσει η μετάδοσή τους προτού ζητηθούν, όμως οι άστοχες προβλέψεις έχουν ως συνέπεια σπατάλη της χωρητικότητας.

Η απόδοση ενός κινητού δικτύου μπορεί ακόμα να βελτιωθεί δρομολογώντας τα δεδομένα εξυπνότερα. Επίσης, όταν η διαθέσιμη χωρητικότητα δεν μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση, τότε πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στις διεργασίες όπου ο χρήστης περιμένει. Αν και οι τεχνικές αυτές δεν αυξάνουν το πραγματικό ρυθμό μετάδοσης, εντούτοις αυξάνουν την ικανοποίηση του χρήστη.

1.3.2 Υψηλή μεταβλητότητα του ρυθμού μετάδοσης

Ένα άλλο θέμα που ανακύπτει στο σχεδιασμό ενός κινητού δικτύου είναι η μεγάλη μεταβλητότητα στον ρυθμό μετάδοσης, που μερικές φορές φτάνει και τέσσερις τάξεις μεγέθους, μεταβλητότητα που δεν παρουσιάζεται στα ενσύρματα δίκτυα.

Ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζεται αυτό το φαινόμενο εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής. Διακρίνονται 3 κύριες περιπτώσεις:

1. Η εφαρμογή απαιτεί πάντα συνδέσεις υψηλού ρυθμού μετάδοσης και λειτουργεί μόνο όταν υπάρχει σύνδεση υψηλού ρυθμού.
2. Η εφαρμογή λειτουργεί υποθέτοντας ότι υπάρχουν συνδέσεις μόνο χαμηλού ρυθμού μετάδοσης και δεν εκμεταλλεύεται τον υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης όταν αυτός είναι διαθέσιμος.
3. Η εφαρμογή μπορεί να προσαρμόζεται ανάλογα με τους παρόντες διαθέσιμους πόρους, παρέχοντας στον χρήστη ένα μεταβλητό επίπεδο ποιότητας.

Η επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης ποικίλλει με το σκοπό της εφαρμογής.

1.3.3 Κινητικότητα

Η πιθανότητα αλλαγής θέσεως ενώ ένα κινητό τηλέφωνο ή ένας φορητός υπολογιστής που είναι συνδεδεμένος σε ένα δίκτυο καθιστά αναγκαία την ύπαρξη μηχανισμών για την διαχείριση της κινητικότητας με τρόπο ώστε να μην μειώνεται η απόδοση του συστήματος. Μερικά από τα προβλήματα που προκαλεί η κινητικότητα και πρέπει να επιλυθούν είναι τα εξής: προβλήματα αλλαγής καναλιού (handoffs) και αλλαγής δρομολόγησης κλήσεων σε κυβελικά δίκτυα, συνεχής αλλαγή της τοπολογίας ad hoc δικτύων, δυναμικές αλλαγές της δικτυακής διεύθυνσης ενός φορητού υπολογιστή, προσαρμογή των παραμέτρων διαμόρφωσης στην τρέχουσα θέση του χρήστη και άλλα.

1.3.4 Ετερογενή Δίκτυα

Σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα όπου οι χρήστες είναι συνεχώς συνδεδεμένοι με ένα δίκτυο, οι κινητοί χρήστες και οι φορητοί υπολογιστές αντιμετωπίζουν πιο ετερογενείς δικτυακές συνδέσεις. Καθώς μετακινούνται εκτός της περιοχής κάλυψης ενός συγκεκριμένου πομπού, συνδέονται με κάποιον άλλο πομπό, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται διαφορετική ποιότητα δικτύου σε διαφορετικές περιοχές. Παραδείγματος χάριν, μια αίθουσα συσκέψεων μπορεί να έχει καλύτερο ασύρματο εξοπλισμό από έναν

διάδρομο. Ακόμη, σε κάποια μέρη οι χρήστες μπορεί να έχουν πρόσβαση σε πολλούς πομπούς σε διαφορετικές συχνότητες, ή να έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούν ταυτόχρονα ασύρματη κι ενσύρματη σύνδεση.

Επίσης μπορεί να υπάρξει η ανάγκη ένα φορητό σύστημα να αλλάξει τρόπο σύνδεσης καθώς μετακινείται από εσωτερικούς σε εξωτερικούς χώρους κι αντίστροφα. Παραδείγματος χάριν, οι υπέρυθρες συνδέσεις δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εξωτερικό χώρο, γιατί απορροφούνται από το ηλιακό φως. Ακόμα και στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μόνο ραδιοεπικοινωνία, είναι δυνατό να αλλάξουν τα πρωτόκολλα πρόσβασης σε διαφορετικά δίκτυα, όπως στην περίπτωση που περνάμε από κυψελοειδή κάλυψη μέσα στην πόλη σε δορυφορική κάλυψη στην ύπαιθρο. Αυτή η ανομοιογένεια κάνει τη φορητή δικτύωση πιο πολύπλοκη από την παραδοσιακή ενσύρματη δικτύωση.

1.3.5 Κίνδυνοι Ασφάλειας

Καθώς είναι πολύ εύκολο να προσπελάσει κάποιος μια ασύρματη σύνδεση, είναι επίσης εύκολο να τεθεί σε κίνδυνο η ασφάλεια μιας σύνδεσης, ειδικά όταν η περιοχή κάλυψης είναι ευρεία. Επομένως, απαιτείται να ληφθούν επιπλέον μέτρα ασφάλειας κατά το σχεδιασμό ενός φορητού συστήματος.

Το θέμα της ασφάλειας περιπλέκεται περισσότερο όταν επιτρέπεται στους χρήστες να αλλάζουν επίπεδα (domains) ασφαλείας, π.χ. όταν επιτρέπεται στους ανώνυμους φορητούς υπολογιστές των ασθενών ενός νοσοκομείου να χρησιμοποιούν τους κοντινούς εκτυπωτές, ενώ δεν επιτρέπεται η πρόσβαση σε απομακρυσμένους εκτυπωτές και πόρους που προορίζονται για τη χρήση του προσωπικού μόνο.

Η ασφαλής επικοινωνία πάνω από μη ασφαλή κανάλια επιτυγχάνεται μέσω της κρυπτογράφησης, η οποία μπορεί να γίνει μέσω λογισμικού, ή πιο γρήγορα μέσω εξειδικευμένου υλικού. Η ασφάλεια του συστήματος βασίζεται σε ένα κλειδί κρυπτογράφησης το οποίο είναι γνωστό μόνο στους ενδιαφερόμενους. Η ασφαλής διαχείριση αυτών των κλειδιών είναι δύσκολη, αλλά μπορεί να αυτοματοποιηθεί με χρήση λογισμικού, όπως το Kerberos του MIT.

1.3.6 Ευκολία Μεταφοράς

Η ραγδαία εξέλιξη στην τεχνολογία του υλικού οδήγησε στην δημιουργία υπολογιστών χειρός ή palmtops. Συγκρινόμενοι με τους υπολογιστές γραφείου (desktops), οι υπολογιστές χειρός έχουν χαμηλής ταχύτητας CPU και περιορισμένη μνήμη. Έχουν, ωστόσο, τη δυνατότητα να τρέχουν μία μεγάλη ποικιλία εφαρμογών (π.χ. ημερολόγιο, spread sheets), καθώς και τη δυνατότητα ασύρματης σύνδεσης.

Η συντήρηση ενέργειας είναι πολύ κρίσιμη για τους υπολογιστές χειρός. Η ευκολία στην μεταφορά τους οδηγεί στην απαίτηση οι κατασκευαστές να χρησιμοποιούν λιγότερο ισχυρές και περισσότερο ελαφριές μπαταρίες (όπως AA ή AAA μπαταρίες). Αυτού του είδους οι μπαταρίες πρέπει να επαναφορτίζονται ή να αντικαθιστώνται αρκετά συχνά. Η επαναφόρτιση, έστω και μία φορά την ημέρα, είναι ένας μπελάς που πρέπει να αποφεύγεται. Υπάρχει επομένως μεγάλη πίεση στους κατασκευαστές τόσο του υλικού όσο και του λογισμικού να παρέχουν περισσότερο ενεργειακά αποτελεσματικά CPUs, μνήμες, αλλά και λογισμικό συστήματος.

Πιθανότατα, ο περιορισμός που δημιουργεί τη μεγαλύτερη έκπληξη, τουλάχιστον για τους επιστήμονες πληροφορικής, είναι ότι ο χρόνος ζωής της μπαταρίας αναμένεται να αυξηθεί μόνο κατά 20% μέσα στα επόμενα δέκα χρόνια. Πρόκειται για ένα πολύ μικρό ποσοστό συγκρινόμενο με τη ραγδαία πρόοδο στους τομείς της χωρητικότητας της μνήμης και της ταχύτητας της CPU. Φαίνεται, λοιπόν, ότι θα υπάρχει μακροχρόνια ανάγκη για ικανοποιητικές λύσεις στο θέμα της ενέργειας σε όλες τις εκφάνσεις του λογισμικού συστημάτων, συμπεριλαμβανομένης και της διαχείρισης δεδομένων. Τέτοιες λύσεις είτε θα αυξήσουν το χρόνο ζωής των μπαταριών είτε θα μειώσουν το μέγεθός τους χωρίς καμιά επίπτωση στο χρόνο μεταξύ επαναφορτίσεων.

Από την άλλη, οι σημερινοί υπολογιστές γραφείου (desktops), επειδή δεν υπάρχει ανάγκη για συχνή μετακίνησή τους, έχουν σχεδιαστεί ώστε να διαθέτουν αφθονία χώρου, καλωδίωσης και απώλειας θερμότητας. Αντίθετα οι υπολογιστές χειρός πρέπει να έχουν παρόμοιες ιδιότητες με αυτές ενός ρολογιού χειρός, δηλαδή να είναι μικροί, ελαφροί και να έχουν μεγάλη διάρκεια λειτουργίας. Παραχωρήσεις μπορούν να γίνουν σε κάθε μία από τις παραπάνω ιδιότητες με σκοπό να προαχθεί η λειτουργικότητα. Τελικά όμως, η αξία που έχει η κινητή συσκευή για τον χρήστη θα πρέπει να δικαιολογεί την δυσκολία μεταφοράς της συσκευής. Για τον ίδιο λόγο οποιοδήποτε εξειδικευμένο υλικό μπορεί να προσαρτηθεί σε έναν υπολογιστή χειρός και να αποφορτίσει τη CPU από εργασίες όπως η συμπίεση δεδομένων και η κρυπτογράφηση, θα πρέπει να δικαιολογεί την κατανάλωση ισχύος και χώρου.

Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφουμε τους σχεδιαστικούς περιορισμούς που εισάγει η ανάγκη για ευκολία μεταφοράς (portability). Οι κυριότεροι περιορισμοί είναι η χαμηλή ισχύς και ο υψηλός κίνδυνος απώλειας δεδομένων.

Χαμηλή Ισχύς

Η μπαταρία είναι το εξάρτημα που έχει το μεγαλύτερο βάρος σε έναν κινητό τηλέφωνο ή φορητό υπολογιστή. Η μείωση λοιπόν του βάρους της μπαταρίας είναι πολύ επιθυμητή αρκεί να μην περιορίζεται σημαντικά ο χρόνος λειτουργίας. Τα προβλήματα που δημιουργούν οι μικρές μπαταρίες χαμηλής ισχύος είναι η ανάγκη για συχνή φόρτιση και ο περιορισμός της συχνής χρήσης του κινητού τηλεφώνου ή φορητού υπολογιστή. Μια καλύτερη λύση είναι η μείωση της κατανάλωσης ισχύος επειδή έτσι μπορεί να μειωθεί το μέγεθος της μπαταρίας και να προαχθεί η ευκολία μεταφοράς, ή να επιμηκυνθεί ο χρόνος λειτουργίας.

Η κατανάλωση ισχύος είναι ανάλογη της ποσότητας CV^2F , όπου C είναι η χωρητικότητα των καλωδίων, V η διαφορά δυναμικού (τάση) και F η συχνότητα ρολογιού του επεξεργαστή. Η ποσότητα αυτή μας υποδεικνύει 3 τρόπους για εξοικονόμηση ισχύος:

- Η μείωση της χωρητικότητας C μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη κλίμακα ολοκλήρωσης καθώς και multichip τεχνολογίες (πολλά chip ενσωματωμένα σε ένα).
- Η τάση V μπορεί να μειωθεί επανασχεδιάζοντας τα chip ώστε να λειτουργούν σε μικρότερες τάσεις.
- Τέλος, μπορούμε να θυσιάσουμε υπολογιστική ταχύτητα προς εξοικονόμηση ισχύος μειώνοντας τη συχνότητα F του ρολογιού. Αυτό μπορεί επίσης να επιτευχθεί

επανασχεδιάζοντας τον επεξεργαστή ώστε να εκτελεί περισσότερες λειτουργίες ανά κύκλο ρολογιού.

Η κατανάλωση ισχύος μπορεί να μειωθεί όχι μόνο με τον καλύτερο σχεδιασμό του υλικού, αλλά και με την αποδοτικότερη χρήση. Χρησιμοποιώντας διαχειριστικό λογισμικό μπορούμε να μειώσουμε την ισχύ ορισμένων τμημάτων όταν βρίσκονται σε αδράνεια. Για παράδειγμα, μπορούμε να μειώσουμε την ταχύτητα του εσωτερικού δίσκου ή να κλείσουμε το φωτισμό της οθόνης. Επιπρόσθετα οι εφαρμογές μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση μειώνοντας τις ανάγκες τους για υπολογισμό, επικοινωνία και μνήμη και εκτελώντας τις περιοδικές λειτουργίες τους λιγότερο συχνά ώστε να αντισταθμίσουν την επιβάρυνση που δημιουργεί η έναρξη λειτουργίας (startup). Τέλος, επειδή η εκπομπή χρειάζεται τυπικά περίπου 10 φορές περισσότερη ισχύ από ότι η λήψη, μπορούμε να μειώσουμε τις δυνατότητες εκπομπής και να βελτιώσουμε τα χαρακτηριστικά λήψης.

Κίνδυνοι Απώλειας Δεδομένων

Οι φορητοί υπολογιστές έχουν αυξημένο κίνδυνο να υποστούν φυσική ζημιά, μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, απώλεια ή κλοπή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε παραβίαση του προσωπικού απορρήτου ή στην απώλεια δεδομένων. Οι παραπάνω κίνδυνοι μπορούν να περιοριστούν ελαχιστοποιώντας την αποθήκευση/διατήρηση δεδομένων στον υπολογιστή, χρησιμοποιώντας τον δηλαδή περισσότερο ως φορητό τερματικό και λιγότερο ως φορητό υπολογιστή.

Προκειμένου να εμποδιστεί η μη εξουσιοδοτημένη αποκάλυψη πληροφοριών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κρυπτογράφηση των δεδομένων που βρίσκονται στους δίσκους και στις κάρτες μνήμης. Επίσης, πρέπει να αποφεύγεται οι χρήστες να αφήνουν ανοιχτές τις συνδέσεις τους.

Μια μέθοδος ασφάλισης από απώλεια δεδομένων είναι η διατήρηση αντιγράφων σε μονάδες που δεν ανήκουν στο φορητό υπολογιστή. Χρησιμοποιώντας, μάλιστα, τις δυνατότητες που δίνουν τα ασύρματα δίκτυα, καινούργια δεδομένα μπορούν να αντιγραφούν με ασφάλεια σε απομακρυσμένους υπολογιστές.

1.3.7 Περιορισμένες δυνατότητες αποθήκευσης

Η χωρητικότητα σε μνήμη ενός υπολογιστή χειρός είναι περιορισμένη εξαιτίας της απαίτησης για μικρό φυσικό μέγεθος και μικρή κατανάλωση ισχύος. Οι δίσκοι οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά κόρον στους υπολογιστές γραφείου, έχουν πολλά μειονεκτήματα αν ενσωματωθούν σε μια ασύρματη συσκευή ή έναν υπολογιστή χειρός. Καταναλώνουν περισσότερη ισχύ από ότι τα chips μνήμης και μπορούν να υποστούν απώλειες δεδομένων σε άσχημες συνθήκες (π.χ. δονήσεις) που προκαλεί η μεταφορά/κίνηση. Γι' αυτό, τα περισσότερα προϊόντα τέτοιου είδους (PDAs, άλλες ασύρματες συσκευές) δεν διαθέτουν δίσκους.

Λύσεις για το πρόβλημα της περιορισμένης χωρητικότητας αποτελούν η συμπίεση των αρχείων, η πρόσβαση απομακρυσμένων αποθηκευτικών πόρων μέσω δικτύου, ο διαμοιρασμός βιβλιοθηκών, η συμπίεση εικονικών σελίδων μνήμης καθώς και η βελτιστοποίηση του λογισμικού που συνεπάγεται αντίστοιχη απλοποίηση των

αλγορίθμων που υλοποιούνται στο επίπεδο εφαρμογής. Παρ' όλο που οι σημερινοί δικτυωμένοι υπολογιστές έχουν μεγάλη επιτυχία στη χρησιμοποίηση κατανεμημένων συστημάτων αρχείων (distributed file systems), οι φορητοί υπολογιστές αντιμετωπίζουν αρκετά προβλήματα εξαιτίας των συχνών διακοπών της σύνδεσης.

1.3.8 Αποτελέσματα διάδοσης στο ασύρματο κανάλι

Δύο βασικά ζητήματα που αποτελούν σημαντικό εμπόδιο κατά τη μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων πάνω από ασύρματα κανάλια επικοινωνίας, είναι η εξασθένηση της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος και το φαινόμενο των πολλαπλών μονοπατιών.

Ισχύς σήματος

Η ισχύς του σήματος μεταξύ σταθμού βάσης και κινητής μονάδας σε ένα κυψελικό σύστημα ή μεταξύ δύο κινητών κόμβων σε ένα δίκτυο μετάδοσης ραδιοπακέτων, πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να διατηρείται η ποιότητα του σήματος στον δέκτη, αλλά να μην είναι τόσο μεγάλη που να δημιουργεί μεγάλη παρεμβολή στα κανάλια άλλων κυψελών ή στις μεταδόσεις άλλων κόμβων που χρησιμοποιούν το ίδιο εύρος συχνοτήτων.

Μπορούμε να χωρίσουμε 3 περιοχές γύρω από έναν πομπό:

- την **περιοχή μετάδοσης (transmission range)**, εντός της οποίας είναι εφικτή η επικοινωνία με τον επιθυμητό δέκτη με μικρή πιθανότητα λαθών.
- την **περιοχή αναγνώρισης (detection range)**, εντός της οποίας η ισχύς του σήματος είναι αρκετά ισχυρή ώστε ο δέκτης να μπορεί να αναγνωρίσει την ύπαρξη μετάδοσης, αλλά όχι αρκετά ισχυρή ώστε να μπορεί να λάβει αξιόπιστα τα δεδομένα.
- την **περιοχή παρεμβολής (interference range)**, εντός της οποίας το σήμα είναι ασθενές ώστε η μετάδοση να μην γίνεται πάντα αντιληπτή από τον δέκτη, αλλά το μεταδιδόμενο σήμα προσθέτει σημαντικά στον θόρυβο του καναλιού.

Φαινόμενο πολλαπλών μονοπατιών (multipath fading)

Το φαινόμενο αυτό προκαλείται μέσα από την παρεμβολή μεταξύ δύο ή περισσότερων εκδόσεων του μεταδιδόμενου σήματος που φτάνουν στον δέκτη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές λόγω ανακλάσεων στον περιβάλλοντα χώρο. Αυτά τα κύματα, τα οποία καλούνται multipath κύματα, συνδυάζονται στην κεραία του δέκτη (πότε ενισχυτικά και πότε καταστροφικά) για να δώσουν ένα προκύπτον σήμα που μπορεί να ποικίλλει ευρέως, ανάλογα με τη κατανομή της έντασης και του σχετικού χρόνου διάδοσης των κυμάτων και του εύρους ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος.

Το φαινόμενο πολλαπλών μονοπατιών εκτός από την διασυμβολική παρεμβολή που δημιουργεί, δημιουργεί επιπλέον προβλήματα εξαιτίας της βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης μεταβλητότητας της λαμβανόμενης ισχύος σήματος με τον χρόνο και με τον χώρο. Ανάλογα με το χρονικό διάστημα στο οποίο θεωρούμε τις μεταβολές αυτές, διακρίνουμε δύο είδη μεταβλητότητας, την βραχυπρόθεσμη (short term fading) και την μακροπρόθεσμη μεταβλητότητα (long term fading).

1.3.9 Τεχνικές εντοπισμού και ανίχνευσης στόχου

Ένα από τα κρίσιμότερα ζητήματα σχεδιασμού για ασύρματα δίκτυα, και ειδικότερα για δίκτυα αισθητήρων, είναι η δυνατότητα ανίχνευσης και εντοπισμού της τελικής θέσης που θα καταλάβουν οι κόμβοι κατά την ανάπτυξη (deployment) του δικτύου και της τελικής τοπολογίας που αυτό θα έχει. Σε γενικές γραμμές, οι τεχνικές εντοπισμού είναι μια διαδικασία που εκτελείται από το ίδιο το δίκτυο αφού στηθεί για να αυτό – οργανωθεί ως προς τις λειτουργίες που θα αναλάβει κάθε κόμβος. Την τελευταία 20ετία έχουν αναπτυχθεί ή έχουν προταθεί διάφορα σχήματα και τεχνικές εντοπισμού στόχου, οι περισσότερες υποκινούμενες από τις στρατιωτικές ανάγκες. Σήμερα, ωστόσο, έχει αναπτυχθεί ένα μεγάλο πλήθος από τέτοιες μεθόδους κυρίαρχα για μια σειρά από άλλες εφαρμογές επιστημονικής, κοινωνικής και ανθρωπο-κεντρικής φύσης.

Κάθε φορά, η επιλογή της καταλληλότερης τεχνικής εξαρτάται σε πολλές περιπτώσεις από την εφαρμογή στην οποία αυτή θα εφαρμοστεί. Ωστόσο σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ζητήματα όπως η επίδραση του θορύβου κατά τη διαδικασία του εντοπισμού, η ακρίβεια στην αναπτυσσόμενη τοπολογία, η απόδοση σε θέματα ενέργειας, η δυνατότητα μεγαλύτερης περιοχής κάλυψης, η ευελιξία και υποστήριξη σε πιθανή αύξηση των κόμβων του δικτύου και στη μεταδιδόμενη πληροφορία (κλιμάκωση).

Όλα τα παραπάνω ζητήματα καθιστούν τον εντοπισμό ένα ανοιχτό πεδίο έρευνας και με αυτό το ζήτημα καταπιάνεται και ένα μεγάλο κομμάτι της παρούσας εργασίας. Η διερεύνηση και η παρουσίαση νέων μηχανισμών και τεχνικών περιλαμβάνει την εκμετάλλευση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, το χρόνο απόκρισης των κόμβων και άφιξής τους στις θέσεις τους, τις διαφορές στους χρόνους άφιξης και τις γωνίες άφιξης εντός του 3D χώρου. Επιπλέον, κρίσιμα είναι και τα προβλήματα που αφορούν την ολοκλήρωση σταθμών και κόμβων με συγκέντρωση ακριβών πληροφοριών, η επαναληπτική αύξηση της ακρίβειας από καταναεμημένους αλγόριθμους, η εξαφάνιση της ανάγκης για ανακάλυψη των διαδρομών από τους κόμβους και οι βελτιωμένες δυνατότητες αποθήκευσής τους ανάλογα με την εφαρμογή.

1.4 Μελλοντική Εξέλιξη των Ασύρματων Δικτύων

Τα τελευταία χρόνια γίνονται σταθερά βήματα προόδου για την βελτίωση της απόδοσης των ασύρματων δικτύων με ολοένα αυξανόμενες ταχύτητες και νέα πρότυπα από οργανισμούς και συμμαχίες γνωστών εταιρειών. Χαρακτηριστικά είναι τα παραδείγματα των GSM, Bluetooth, GPRS, EDGE, UMTS, HiperLAN, HomeRF, 802.11a, 802.11b, 802.11g, WCDMA, OFDM, TDMA, IMT-2000, 3GPP, 802.15.4, Zigbee, κλπ.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των κινητών δικτύων είναι η δυνατότητα να παρέχουν πληροφορίες βασισμένες στη θέση του χρήστη. Πλέον, ο κάτοχος μιας φορητής συσκευής (π.χ. laptop, palmtop, κινητό τηλέφωνο, GPS συσκευή, κλπ.) μπορεί να αποστέλλει ερωτήματα σχετικά με το μέρος στο οποίο βρίσκεται (π.χ. τοπικές εκδηλώσεις, κοντινά φαρμακεία, χάρτης πλοήγησης), ενώ είναι δυνατό το ίδιο το δίκτυο να αποστέλλει χρήσιμες πληροφορίες και να φιλτράρει τα δεδομένα σύμφωνα με τη θέση του. Έτσι, η φορητή συσκευή αποκτά το ρόλο του συντρόφου / συμβούλου στην καθημερινή ζωή ενός ατόμου και παύει να είναι ένα απλό επικοινωνιακό μέσο.

Μπορούμε να πούμε ότι βιώνουμε μια πραγματική επανάσταση, αφού κάθε νέο μοντέλο φορητής συσκευής που εμφανίζεται διαθέτει ένα πλήθος νέων λειτουργιών σε σχέση με τα προηγούμενα. Συγκεκριμένα, οι φορητές συσκευές γίνονται όλο και πιο αλληλεπιδραστικές με το χρήστη. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση πολυμεσικών δυνατοτήτων και τεχνολογίες αναγνώρισης γραφής και φωνής. Τα νέα μοντέλα διαθέτουν ολοένα και μεγαλύτερες αποθηκευτικές δυνατότητες και ένα πλήθος διασυνδέσεων με άλλες παρόμοιες ή μεγαλύτερες (σταθερές) συσκευές και δίκτυα και συνεχώς αυξανόμενη αυτονομία και ταχύτητα επεξεργασίας.

2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ DEPLOYMENT ΓΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

2.1 Γενικά για τα Wireless Sensor Networks (WSN)

Στα τέλη της δεκαετίας του 90 αναπτύχθηκε στον κόσμο των υπολογιστών και της πληροφορικής το όραμα της λεγόμενης «Περιρρέουσας Νοημοσύνης» (Ambient Intelligence). Σε έναν κόσμο όπου έχει αναπτυχθεί η Περιρρέουσα Νοημοσύνη, οι συσκευές συλλέγουν και επεξεργάζονται πληροφορίες από το φυσικό περιβάλλον με σκοπό τον έλεγχο των φυσικών διεργασιών καθώς και την αλληλεπίδραση με τον άνθρωπο. Όσο το μέγεθος των συσκευών γίνεται όλο και μικρότερο, η ενσωμάτωσή τους στο περιβάλλον μας θα γίνεται εντονότερη : η τεχνολογία θα βρίσκεται παντού και πάντα (everywhere, everytime).

Για να γίνει πραγματικότητα το όραμα της Περιρρέουσας Νοημοσύνης απαιτούνται κάποιες βασικές τεχνολογίες, όπως η τεχνολογία των ενσωματωμένων συστημάτων (embedded systems) που είναι συστήματα ειδικού σκοπού και αποτελούν μια ευρέως γνωστή τεχνολογία. Ένας άλλος βασικός παράγοντας είναι η επικοινωνία. Δηλαδή οι συσκευές θα πρέπει να συνεργάζονται μεταξύ τους ανταλλάσσοντας πληροφορίες έτσι ώστε να μεταφέρονται στις κατάλληλες θέσεις σχηματίζοντας υπολογιστικά δίκτυα. Με την έννοια αυτή μπορεί να σχηματιστεί μια ολοκληρωμένη εικόνα του περιβάλλοντος χώρου και οι συσκευές να συλλέγουν δεδομένα για διάφορα στοιχεία του χώρου αυτού, όπως θερμοκρασία, υγρασία, φυσικά και τεχνητά εμπόδια, κλπ. Η ενσύρματη επικοινωνία είναι ακατάλληλη για τέτοιου είδους εφαρμογές. Έτσι η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των ενσωματωμένων συσκευών είναι αναπόφευκτη.

Έτσι, τα τελευταία χρόνια έχουν κάνει την εμφάνισή τους τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ή Wireless Sensor Networks (WSN), τα οποία πραγματοποιούν ως ένα σημείο το όραμα της Περιβαλλοντικής Νοημοσύνης. Τα WSNs αποτελούνται από έναν μεγάλο αριθμό κόμβων. Οι κόμβοι αυτοί μπορούν να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον, να επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους και να συνεργάζονται, φέροντας εις πέρας εργασίες που δε θα μπορούσε να ολοκληρώσει ένας μοναδικός κόμβος. Η δυνατότητα επικοινωνίας και συνεργασίας μεταξύ των κόμβων ανάγει τα WSNs σε ένα καταναμημένο σύστημα.

Οι κόμβοι αποτελούνται τουλάχιστον από αισθητήρες, περιορισμένη υπολογιστική μονάδα, ασύρματη μονάδα επικοινωνίας και λειτουργούν με μπαταρία. Τα WSNs είναι πολύ ισχυρά μιας και μπορούν να υποστηρίξουν πολλές εφαρμογές του πραγματικού κόσμου. Εξαιτίας της ευελιξίας τους αυτής δεν υπάρχει ένα μοναδικό σύνολο απαιτήσεων που να καθορίζει επακριβώς όλα τα WSNs. Για παράδειγμα, σε πολλές εφαρμογές η διατήρηση ενέργειας είναι πολύτιμη. Συχνά, η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι άμεσα συνυφασμένη με το μέγεθος του κόμβου, ενώ η τιμή του έχει άμεσο αντίκτυπο στην ποιότητα των αισθητήρων του, επηρεάζοντας την ακρίβεια του αποτελέσματός του.

Γενικά, αν οι κόμβοι που είναι κοντά στο υπό παρατήρηση φαινόμενο είναι απλοί, αλλά σε μεγάλο αριθμό, μπορούν να κάνουν την αρχιτεκτονική του συστήματος απλή και αποδοτικότερη ως προς τη διατήρηση της ενέργειας, καθώς διευκολύνουν την καταναμημένη δειγματοληψία (ο εντοπισμός ενός αντικειμένου, για παράδειγμα, απαιτεί καταναμημένο σύστημα).

Τα WSNs διαφέρουν από τα παραδοσιακά δίκτυα, μιας και είναι δυναμικά μεταβαλλόμενα. Η εξάντληση των ενεργειακών πόρων έχει ως αποτέλεσμα την παύση της

λειτουργίας κάποιων κόμβων ενώ, εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους, κάποιιοι μπορεί να καταστραφούν από εξωτερικούς παράγοντες. Έτσι ίσως χρειαστεί η εισαγωγή νέων κόμβων στο δίκτυο.

Παρακάτω, αφού κάνουμε μια γρήγορη παρουσίαση των τοπολογιών για WSN και των χαρακτηριστικών τους, θα ασχοληθούμε με την καταγραφή τεχνικών ανάπτυξης κόμβων στα δίκτυα αυτά. Σε κάθε περίπτωση, μας ενδιαφέρουν ζητήματα όπως η τοπολογία του δικτύου ώστε να επιτευχθεί καλή συνδεσιμότητα, μέγιστη κάλυψη, χαμηλό κόστος και υψηλής ποιότητας ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων.

2.2 Καταγραφή Εφαρμογών των WSNs

Η τεχνολογία των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές εφαρμογές του πραγματικού κόσμου και να φέρει στην επιφάνεια κάποιες εντελώς καινούριες. Ένα κρίσιμο και πρωτεύον συστατικό των κόμβων των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι ο αισθητήρας. Για πολλές παραμέτρους του φυσικού περιβάλλοντος υπάρχει η κατάλληλη τεχνολογία αισθητήρα που μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα WSN. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι είναι οι αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, ήχου, πίεσης και οι χημικοί αισθητήρες.

Έτσι, τα WSN έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν πληροφορίες που αφορούν ένα ευρύ φάσμα φυσικών συνθηκών-φαινομένων, όπως ([11]):

- Θερμοκρασία
- Υγρασία
- Φως
- Πίεση
- Κίνηση αντικειμένου
- Επίπεδο θορύβου
- Σύνθεση του εδάφους
- Παρουσία κάποιου αντικειμένου
- Γενικά χαρακτηριστικά κάποιου αντικειμένου, όπως μάζα, διαστάσεις, ταχύτητα κίνησης, θέση κ.α.

Λόγω της αξιοπιστίας, της αυτοδυναμίας, της ευελιξίας και της ευκολίας της επέκτασης των WSN, υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από εφαρμογές. Σε αυτό συμβάλλει ιδιαίτερα και το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους, ότι μπορούν εφαρμοστούν σε περιβάλλον με σχεδόν οποιοσδήποτε συνθήκες, όπως σε πεδία μάχης, σε βαθιούς ωκεανούς κ.α. Για το λόγο αυτό, πολλές φορές κρίνεται αναγκαία η χρήση προστατευτικών καλυμμάτων.

2.2.1 Λίστα βασικών WSN εφαρμογών

- **Πρόληψη Καταστροφών:** Μια από τις πιο συχνά αναφερόμενες εφαρμογές των WSNs είναι στην πρόληψη καταστροφών. Ένα τυπικό σενάριο για εφαρμογές αυτής της κατηγορίας είναι η ανίχνευση πυρκαγιών. Οι κόμβοι αισθητήρων είναι εξοπλισμένοι με θερμομέτρα και μπορούν να υπολογίσουν τη θέση τους τρέχοντας κάποιον αλγόριθμο εντοπισμού θέσης (localization). Τους κόμβους αυτούς μπορούμε να τους απλώσουμε σε

ένα οποιοδήποτε χώρο, π.χ. ένα δάσος, πετώντας τους από ένα αεροπλάνο. Έτσι σχηματίζεται ένας θερμοκρασιακός χάρτης της περιοχής και σε περίπτωση υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλής υγρασίας που υπονοούν πυρκαγιά ενημερώνουν τους πυροσβέστες.

- **Έλεγχος του περιβάλλοντος και της βιοποικιλότητας:** Τα WSNs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελέγχουν το περιβάλλον ως προς τους χημικούς τύπους ή ακόμα και για το σχηματισμό μιας εικόνας ως προς τον αριθμό των διαφορετικών ειδών πανίδας και χλωρίδας μιας περιοχής.
- **Ευφυή Κτίρια:** Πολλές φορές, άτομα που εργάζονται σε μεγάλα κτήρια γραφείων έχουν παρατηρήσει ότι η θερμοκρασία σπάνια είναι κατάλληλη, το επίπεδο υγρασίας κυμαίνεται σε ακραίες τιμές, η φωτεινότητα είτε δεν επαρκεί είτε είναι υπερβολική, υπάρχει έλλειψη καθαρού αέρα κ.α. Επιπλέον, τα μεγάλα κτίρια συχνά καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας εξαιτίας λανθασμένης χρήσης των συσκευών Air Conditioning. Μια αποδοτικότερη και ακριβέστερη παρακολούθηση της θερμοκρασίας, της υγρασίας και άλλων παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των μηχανικών καταπονήσεων σε κτίρια ή γέφυρες που βρίσκονται σε σεισμικά ενεργές ζώνες, ενώ άλλου τύπου αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό εγκλωβισμένων ανθρώπων σε περιπτώσεις σεισμού. Οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν στα κτίρια τη στιγμή της κατασκευής τους ή αφού έχουν κατασκευαστεί. Σε αυτές τις εφαρμογές η εξοικονόμηση ενέργειας για τους αισθητήρες είναι πολύ σημαντική απαίτηση.
- **Πυρανίχνευση:** Αν και έχουν παρθεί διάφορα σημαντικά μέτρα, οι πυρκαγιές συνεχίζουν να προκαλούν σημαντική απώλεια ανθρώπινων ζώων, καταστροφή περιουσιών και φυσικών πόρων. Ωστόσο, επειδή οι καιρικές συνθήκες που μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιά είναι προβλέψιμες, μπορούν να αναπτυχθούν σχετικές τεχνικές ανίχνευσης τέτοιων συνθηκών σε περιοχές που είναι επιρρεπείς σε πυρκαγιές. Εξαιτίας της δυνατότητάς τους να εκτείνονται ευρέως και πυκνά σε ένα περιβάλλον, τα WSN αποτελούν μια καλή επιλογή στην πυρανίχνευση, παρέχοντας άμεση προειδοποίηση και εντοπισμό της θέσης τυχόν επικείμενης πυρκαγιάς.
- **Διαχείριση Εγκαταστάσεων:** Τα WSNs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές διαχείρισης μεγάλων εγκαταστάσεων, όπως θέματα ασφάλειας. Η είσοδος των ανθρώπων στις εγκαταστάσεις μπορεί να γίνεται χωρίς κλειδιά, αλλά με τη χρήση κάποιου πομπού, ενώ μπορούν να εντοπίζονται πιθανοί εισβολείς. Επίσης, σε χημικές εγκαταστάσεις τα WSNs θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό διαρροών.
- **Συντήρηση Μηχανών:** Αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε δυσπρόσιτα σημεία μηχανών για να ελέγχουν τους κραδασμούς που υποδεικνύουν ανάγκη για συντήρηση. Παραδείγματα τέτοιων μηχανών είναι αυτόματες μηχανές εργοστασίων ή οι άξονες των τροχών των τρένων.
- **Εφαρμογές στη Γεωργία:** Η εφαρμογή WSNs σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις με τοποθέτηση αισθητήρων μέτρησης υγρασίας και ανάλυσης της σύστασης του εδάφους επιτρέπει την ακριβέστερη και αποδοτικότερη λίπανση και άρδευση των εκτάσεων. Επίσης, η εκτροφή ζώων μπορεί να ωφεληθεί τοποθετώντας αισθητήρες στα ζώα που ελέγχουν την κατάσταση της υγείας τους.
- **Παρακολούθηση οικοσυστημάτων:** Τα WSN που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση οικοσυστημάτων δημιουργούν μια κατηγορία εφαρμογών με πολυάριθμα δυνατά οφέλη για τη μελέτη της φύσης, επειδή μπορούν να παρέχουν

πληροφορίες για διάφορες περιβαλλοντολογικές συνθήκες συμπεριλαμβανομένων της σύνθεσης του εδάφους και του αέρα καθώς, επίσης, και της γενικής συμπεριφοράς των διάφορων φυτικών και ζωϊκών οργανισμών. Εξασφαλίζουν δε, μακροπρόθεσμα με τη συλλογή πληροφοριών και καταγραφή τους σε βάσεις δεδομένων, τον αυτόματο προσδιορισμό-αναγνώριση και την ανάλυση τυχόν συναφών γεγονότων που συμβαίνουν στο συγκεκριμένο κάθε φορά περιβάλλον – οικοσύστημα που τίθεται υπό παρακολούθηση.

- **Εφαρμογές στον τομέα της υγείας:** Η χρήση WSNs στον τομέα της υγείας μπορεί να αποδειχτεί πολύ ωφέλιμη. Ωστόσο, η χρήση τους δημιουργεί αρκετά ηθικά διλήμματα πάνω στο θέμα αυτό. Οι πιθανές εφαρμογές εκτείνονται από την άμεση τοποθέτηση αισθητήρων στον ίδιο τον ασθενή για την παρακολούθηση της υγείας του και, ίσως, αυτόματη χορήγηση φαρμάκων, μέχρι την παρακολούθηση των ιατρών και των ασθενών στα νοσοκομεία, επίβλεψη των χώρων του νοσοκομείου για εντοπισμό εντόμων και μικρών ζώων, παρακολούθηση της δραστηριότητας-κίνησης γιατρών και ασθενών στους χώρους του νοσοκομείου, κλπ.
- **Ευφυή οδικά συστήματα:** Στα ευφυή οδικά συστήματα αισθητήρες τοποθετούνται στους δρόμους, ακόμα και στα κράσπεδα των δρόμων, οι οποίοι συλλέγουν πληροφορίες για την κίνηση και την κατάσταση του οδικού δικτύου γενικότερα, και επικοινωνούν με τους οδηγούς δίνοντάς τους χρήσιμες πληροφορίες.
- **Εφαρμογές ιχνηλάτησης – ανίχνευσης (tracking):** Σε περίπτωση που απαιτείται η ιχνηλάτηση αντικειμένων σε μια περιοχή, διάφοροι αισθητήρες τοποθετούνται σε συγκεκριμένες συντεταγμένες έτσι ώστε να ιχνηλατούν-ανιχνεύουν κάθε αντικείμενο που περνά μέσα από την έκταση που καλύπτουν. Έτσι, ο στόχος είναι να ανιχνεύεται η θέση του αντικειμένου, κάθε φορά, με όσο πιο μεγάλη ακρίβεια γίνεται. Με τα WSN, η θέση των αντικειμένων μπορεί να ανιχνεύεται μέσω της ανίχνευσης της θέσης ενός κόμβου αισθητήρων που βρίσκεται «επικολημένο» στο κάθε αντικείμενο. Ο συγκεκριμένος κόμβος θα ιχνηλατείται καθώς μετακινείται μέσα στο πεδίο που καλύπτεται από τους άλλους κόμβους που αποτελούν το WSN, οι οποίοι βρίσκονται σε δεδομένες θέσεις. Έτσι, αντί να ανιχνεύουν την αλλαγή περιβαλλοντολογικών συνθηκών (αλλαγή του μαγνητικού πεδίου κλπ.), οι κόμβοι αισθητήρων παρατάσσονται έτσι ώστε να ανιχνεύουν *σήματα ραδιοσυχνότητας (RF signals)* ως μηνύματα από άλλους κόμβους (ή από τον κόμβο που ιχνηλατείται). Ένα τέτοιο σύστημα έχει τη δυνατότητα να γνωρίζει την ακριβή θέση του αντικειμένου προς ιχνηλάτηση και όχι μόνο τη θέση που ανιχνεύτηκε τελευταία.
- **Στρατιωτικές Εφαρμογές:** Τα WSNs μπορούν να είναι ενιαίο και αναπόσπαστο τμήμα των στρατιωτικών συστημάτων. Τα χαρακτηριστικά τους, όπως είναι η γρήγορη τοποθέτησή τους, η αυτό-οργάνωση και η ανοχή στα σφάλματα, τα μετατρέπουν σε μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τα στρατιωτικά συστήματα. Κάποιες από τις πιθανές στρατιωτικές εφαρμογές τους είναι η παρακολούθηση της κατάστασης των εξοπλισμών και των πολεμοφοδίων, η στενή παρακολούθηση του πεδίου της μάχης, η αναγνώριση των εχθρικών δυνάμεων όσον αφορά τον εξοπλισμό και τις κινήσεις τους, η εκτίμηση των καταστροφών μετά από μάχη καθώς και ο εντοπισμός και η αναγνώριση χημικής, ατομικής ή βιολογικής επίθεσης.
- **Οικιακές εφαρμογές:** Τα WSN μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη της οικιακής αυτοματοποίησης η οποία αναφέρεται σε συσκευές όπως η ηλεκτρική σκούπα, ο φούρνος μικροκυμάτων, το ψυγείο κ.α. Με άλλα λόγια, οι αισθητήρες

τοποθετούνται σε οικιακές συσκευές και παίζουν το ρόλο των κόμβων αισθητήρων αλληλεπιδρώντας μεταξύ τους και επικοινωνώντας με τους χρήστες μέσω του Διαδικτύου ή κάποιου άλλου δικτύου.

- **Άλλες εφαρμογές:** τα αυτο-ρυθμιζόμενα WSN μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε πολλούς άλλους τομείς, όπως ο έλεγχος ρομπότ και εργοστασιακών λειτουργιών, στην έρευνα και αλλού. Σε αυτό συμβάλλουν πάλι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτών των δικτύων που τα κάνουν να υπερέχουν έναντι άλλων.

2.3 Νέες προκλήσεις και εφαρμογές

Όταν τεθεί σε εφαρμογή η ιδέα της κίνησης των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων, ανακύπτει μια σειρά νέων προκλήσεων. Όταν μία περιοχή του δικτύου βρίσκεται μέσα στην εμβέλεια του κέντρου ελέγχου θεωρούμε ότι αυτή καλύφθηκε. Προφανώς, για να λειτουργήσει αποτελεσματικά ένα δίκτυο με κινητό κέντρο ελέγχου πρέπει η κίνηση να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε σε σύντομο χρονικό διάστημα να καλύπτεται ολόκληρη η περιοχή που εκτείνεται το δίκτυο. Στην περίπτωση που κάποιες περιοχές δεν καλυφθούν τότε η πληροφορία που έχουν συλλέξει οι συσκευές εκεί δεν παραδίδεται ποτέ.

Επιπλέον, η ταχύτητα με την οποία κινείται το κέντρο ελέγχου είναι περιορισμένη και, κατά κανόνα, μικρότερη από την ταχύτητα με την οποία γίνεται η διάδοση πληροφορίας από συσκευή σε συσκευή. Η κίνηση του κέντρου ελέγχου πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μειώνεται ο χρόνος κάλυψης του δικτύου και, κατά συνέπεια, να μην παρατηρούνται σημαντικές καθυστερήσεις στην συλλογή των δεδομένων.

Επιπρόσθετα, υπάρχουσες και εφαρμοσμένες τεχνικές και πρωτόκολλα για στατικά δίκτυα δεν μπορούν να αποδώσουν στο δυναμικό περιβάλλον ενός δικτύου με κινητικότητα. Θα πρέπει να τροποποιηθούν ή να αντικατασταθούν από λύσεις ειδικά σχεδιασμένες για δίκτυα αισθητήρων όπου η κίνηση θεωρείται εγγενές χαρακτηριστικό του συστήματος.

2.3.1 Παραδείγματα εφαρμογών δικτύων αισθητήρων με κίνηση

- **Υποθαλάσσια παρακολούθηση,** όπως η βύθιση ενός δικτύου αισθητήρων σε έναν ωκεανό για την ανίχνευση ναυαγίων ή συντριμμιών από συντριβές αεροσκαφών. Στις περιπτώσεις αυτές, εκτός από κάποιους κινητούς αισθητήρες, το δίκτυο μπορεί να περιλαμβάνει αυτόνομα υποθαλάσσια οχήματα (autonomous underwater vehicles – AUV), τα οποία περιφέρονται μέσα στο δίκτυο για τη συλλογή των δεδομένων.
- Δίκτυα που υποστηρίζουν **κινητές μικρής κλίμακας ομάδες από ρομπότ** που συνεργάζονται για την εκτέλεση μιας συνηθισμένης εργασίας. Καθώς εκτελούν τις λειτουργίες τους, τα ρομπότ ανταλλάσσουν πληροφορίες ή στέλνουν τις μετρήσεις που έχουν συλλέξει σε απομακρυσμένα κέντρα ελέγχου χρησιμοποιώντας το δίκτυο.
- Δίκτυα αισθητήρων για τη **συλλογή πληροφορίας σχετικά με τη θέση** κάποιου αντικειμένου/χρήστη/εξοπλισμού, όπως ο εντοπισμός αντικειμένων ή οι άνθρωποι σε ένα νοσοκομείο ή ακόμα κάποιο αντικείμενο σε μια αποθήκη, κτλ.
- Εφαρμογές υποβοήθησης της καθημερινότητας ηλικιωμένων ανθρώπων, μέσω συστημάτων ηλεκτρονικής υγείας (e-health), τα οποία αποτελούνται από αισθητήρες που μπορούν να φορεθούν, καθώς επίσης και από τηλεϊατρικό εξοπλισμό, τεχνικές δικτύωσης του σπιτιού και «έξυπνους» χώρους που βασίζονται σε δίκτυα αισθητήρων.

2.4 Χαρακτηριστικά των τοπολογιών των WSN δικτύων

Καθώς τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εισέρχονται όλο και περισσότερο στην αγορά και αποτελούν μια πρακτική επιλογή για τη δημιουργία ασύρματων δικτύων, ανακύπτει εύλογα τα ερωτήματα: κατά πόσο οι παραδοσιακές δικτυακές τοπολογίες μπορούν να προσαρμοστούν στο νέο αυτό μέσο επικοινωνιών;

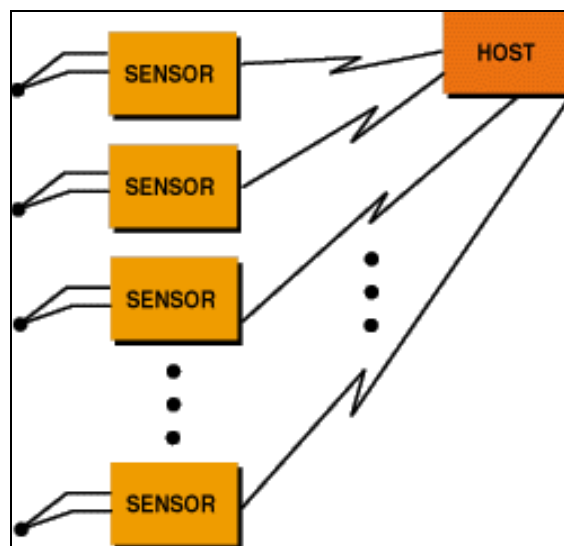
Η ανάπτυξη της δικτυακής τεχνολογίας έχει οδηγήσει στην καθιέρωση νέων ευέλικτων εναλλακτικών λύσεων οι οποίες ελαχιστοποιούν τα κόστη και την πολυπλοκότητα ενώ βελτιώνουν την αξιοπιστία. Τα πρώτα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούσαν απλές ενσύρματες καλωδιώσεις (twisted – pairs) για τον κάθε αισθητήρα. Στη συνέχεια, υιοθετήθηκε η τεχνολογία του Ethernet και η λογική των multidrop buses. Σήμερα, η βιομηχανία αναζητά νέους τρόπους ολοκλήρωσης των WSN με το Διαδίκτυο και με άλλα web – based δίκτυα.

Παρακάτω αναλύουμε τις 3 κύριες δικτυακές τοπολογίες (σημείου – προς – σημείο, multidrop, web) και αναδεικνύουμε τις δυνατότητες και τις αδυναμίες τους (πηγή [10]).

2.4.1 Point – to – point δίκτυα

Θεωρητικά αυτός ο τύπος δικτύου είναι από τους πιο αξιόπιστους αφού υπάρχει μόνο ένα σημείο αποτυχίας (point of failure) στην τοπολογία. Το σημείο αυτό είναι ο ίδιος ο διακομιστής, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

Στις point – to – point δικτυακές τοπολογίες, κάθε κόμβος – αισθητήρας απαιτεί μια ξεχωριστή ενσύρματη ζεύξη με το διακομιστή. Έτσι, το κόστος κατασκευής μπορεί να είναι μη αμελητέο ενώ η διαχείριση των απαραίτητων ρυθμίσεων και παραμετροποιήσεων της όλης συνδεσμολογίας μπορεί να είναι μη αποδοτική. Τέλος, με την παρούσα τοπολογία είναι φανερό ότι όλη η πληροφορία επεξεργάζεται αποκλειστικά από το διακομιστή χωρίς να υπάρχει σχεδόν καθόλου η δυνατότητα για κατανομή του φόρτου της επεξεργασίας.

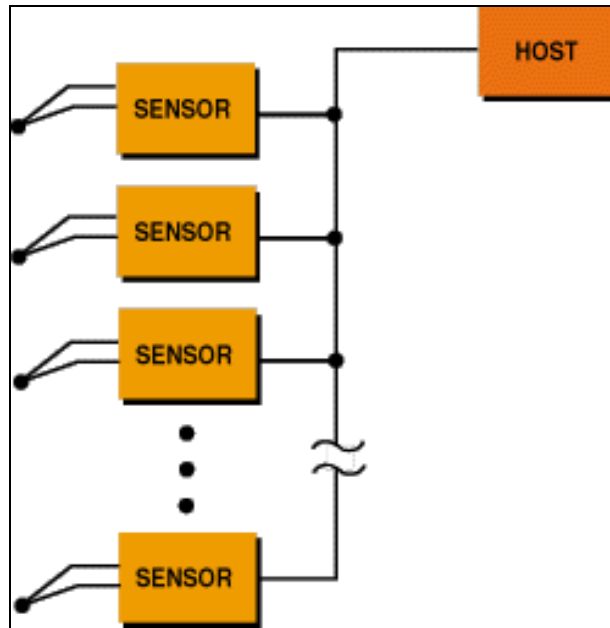


Εικόνα 1: Ένα point – to – point WSN

Μπορούμε να ενισχύσουμε μια τέτοια τοπολογία με την προσθήκη πλεοναζόντων διακομιστών ώστε αν κάποιος παρουσιάσει πρόβλημα να λειτουργεί ο άλλος. Ωστόσο μπορεί να υπάρξει πάλι πρόβλημα κατά την καλωδίωση μεταξύ 2 διακομιστών.

2.4.2 Multidrop δίκτυα

Η τεχνολογία αυτή μείωσε τον αριθμό των καλωδιώσεων μεταξύ πολλαπλών αισθητήρων και του διακομιστή. Ωστόσο εισήγαγε ένα νέο σημείο αποτυχίας, την κεντρική καλωδίωση σύνδεσης (multidrop bus), όπως φαίνεται και στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 2: Ένα multidrop WSN

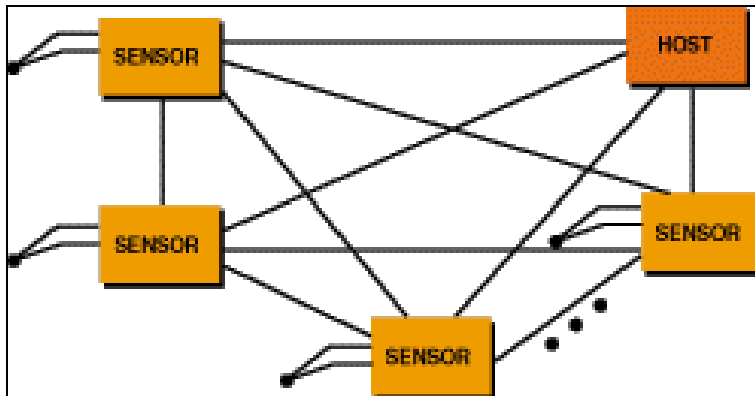
Σε ένα multidrop δίκτυο κάθε κόμβος στέλνει και λαμβάνει τις πληροφορίες του μέσω ενός κοινού μέσου μετάδοσης. Η απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου απαιτεί την χρήση εξειδικευμένων πρωτοκόλλων τόσο στο υλικό όσο και στο λογισμικό. Επιπλέον, αν και αρκετοί πάροχοι δικτυακών συσκευών και τεχνολογιών έχουν αναπτύξει εναλλακτικά σχέδια καλωδιώσεων, στις περισσότερες περιπτώσεις αυτά πάσχουν από αυξημένη πολυπλοκότητα.

Ένα άλλο μεγάλο ζήτημα κατά την υιοθέτηση της παραπάνω τοπολογίας είναι και τα προβλήματα που σχετίζονται με την ψηφιοποίηση των μεταδιδόμενων σημάτων. Με τις point – to – point τοπολογίες, η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα στο διακομιστή όπου με ένα απλό ρολόι χρονισμού μπορεί να διεξαχθεί ο χρονικός διαχωρισμός των εισερχόμενων αναλογικών σημάτων από τους πολλαπλούς αισθητήρες. Ωστόσο, η καταναμημένη αντίληψη που εισάγει η υλοποίηση μιας multidrop τοπολογίας αναδεικνύει ένα άλλο κρίσιμο ζήτημα που χρήζει άμεσης αντιμετώπισης: ο συγχρονισμός των ρολογιών των αισθητήρων αποτελεί μια σημαντική παράμετρο σχεδιασμού για κάθε καταναμημένο ψηφιακό σύστημα.

2.4.3 Web – based δίκτυα

Το όραμα της web διασύνδεσης, δηλαδή της ταυτόχρονης σύνδεσης όλων των κόμβων κάθε στιγμή, θα έπρεπε να «περιμένει» έως ότου να βρεθούν τρόποι αξιόπιστης διασύνδεσης των κόμβων χωρίς τη χρήση επιπλέον καλωδίωσης. Είναι γεγονός ότι οποιοδήποτε δίκτυο ενός σχετικά μεγάλου μεγέθους (με μερικές εκατοντάδες ή χιλιάδες κόμβους) είναι σχεδόν αδύνατο να υλοποιηθεί αν τα καλώδια πρέπει να συνδεθούν έτσι ώστε να εξυπηρετούν μόνο το συγκεκριμένο δίκτυο.

Όπως φαίνεται και στην επόμενη εικόνα, σε μια web τοπολογία κάθε κόμβος είναι δυναμικά συνδεδεμένος με όλους τους υπόλοιπους. Ένα κρίσιμο ζήτημα που ανακύπτει εδώ είναι η διατήρηση της συνδεσιμότητας όλων – προς – όλους ακόμα κι όταν ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται αλματωδώς. Η πολυπλοκότητα της διατήρησης μιας ισχυρής συνεκτικότητας του δικτυακού γραφήματος μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, ωστόσο πολλές συνδέσεις μπορούν να εξαλειφθούν με τη χρήση επαναληπτών και δρομολογητών, οι οποίοι δημιουργούν εικονικές συνδέσεις και εφαρμόζουν έξυπνους αλγόριθμους εύρεσης βέλτιστων μονοπατιών.



Εικόνα 3: Ένα web – based WSN

Τα πλεονεκτήματα της web συνδεσιμότητας για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καθίστανται εμφανή καθώς αυξάνεται το επίπεδο της «ευφυίας» των αισθητήρων. Συνεργαζόμενοι αισθητήρες μπορούν να αναλαμβάνουν, έστω και προσωρινά, τη διαχείριση μέρους ή όλου του δικτύου, υποκαθιστώντας τον διακομιστή και εξοικονομώντας μέρος των διαθέσιμων υπολογιστικών του πόρων.

Η λογική της συνεργασίας και της αμοιβαίας επικοινωνίας οδηγεί στην ανάπτυξη «έξυπνων» ασύρματων δικτύων που μπορούν να αυτό – οργανώνονται και να παραμετροποιούνται αναλόγως με τις συνθήκες. Ωστόσο μια σειρά από νέα προβλήματα ανακύπτουν με την υιοθέτηση της παραπάνω λογικής και αφορούν ένα εκτεταμένο πεδίο επιστημονικής έρευνας. Τέτοια προβλήματα είναι η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας των αισθητήρων, η απόδοση του δικτύου κατά τη λειτουργία του, εξειδικευμένοι αλγόριθμοι για κατανομή προτεραιοτήτων, πιστοποίησης, εξουσιοδότησης και ασφάλειας, κλπ.

2.5 Ανάλυση τεχνικών deployment για WSN

2.5.1 Κατανεμημένα δίκτυα αισθητήρων και εικονικές δυνάμεις

Σύμφωνα με το [9], τα κατανεμημένα δίκτυα αισθητήρων (DNS) είναι σημαντικά για έναν αριθμό εφαρμογών όπως ανίχνευση στόχου με συνεργασία και εντοπισμό των θέσεων των αισθητήρων. Η αποτελεσματικότητα ενός DNS καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την κάλυψη που παρέχεται μετά από την ανάπτυξη των κόμβων των αισθητήρων. Η τοποθέτηση των αισθητήρων επηρεάζει την κάλυψη, το κόστος επικοινωνίας και τη διαχείριση των πόρων.

Ως στρατηγική ανάπτυξης των κόμβων προτείνεται ένας **αλγόριθμος εικονικής δύναμης (VFA)** για μεγαλύτερη κάλυψη μετά από μια αρχική τυχαία τοποθέτηση των αισθητήρων. Για έναν δεδομένο αριθμό αισθητήρων, ο αλγόριθμος VFA προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την κάλυψη του πεδίου των αισθητήρων. Ένας συνετός συνδυασμός ελκτικών και απωστικών δυνάμεων χρησιμοποιείται για να καθορίσει τις νέες θέσεις των αισθητήρων που βελτιώνουν την κάλυψη. Μόλις προσδιοριστούν οι βέλτιστες θέσεις των αισθητήρων, με μια χρονική κίνηση οι αισθητήρες ανακατανέμονται σε αυτές τις θέσεις.

Αρχικά, οι αισθητήρες που αναγνωρίζουν το αντικείμενο – στόχο αναφέρουν το γεγονός στην κεφαλή της ομάδας. Η πληροφορία που μεταδίδεται στην κεφαλή είναι περιορισμένη: για να περιοριστεί το ποσό της πληροφορίας που χάνεται και να διατηρηθεί το εύρος μετάδοσης, οι αισθητήρες αναφέρουν μόνο την παρουσία του στόχου και δεν μεταδίδουν πληροφορία σχετικά με την ισχύ του σήματος, την αξιοπιστία της ανίχνευσης, κλπ. Η κεφαλή, με τη σειρά της, βασιζόμενη στην πληροφορία που έχει λάβει από τους αισθητήρες και την ανάπτυξη των κόμβων μέσα στην ομάδα, εκτελεί έναν αλγόριθμο εντοπισμού για να καθορίσει την πιθανή θέση του αντικειμένου.

Το πεδίο των αισθητήρων αντιπροσωπεύεται από ένα δισδιάστατο πλέγμα. Οι διαστάσεις του πλέγματος παρέχουν ένα μέτρο του πεδίου αισθητήρων. Η απόσταση μεταξύ των σημείων του πλέγματος μπορεί να προσαρμοστεί έτσι ώστε να εναλλάσσεται ο χρόνος υπολογισμού του VFA αλγόριθμου με την αποτελεσματικότητα της κάλυψης. Η ανίχνευση που γίνεται από τον κάθε αισθητήρα μοντελοποιείται ως κύκλος πάνω στο δισδιάστατο πλέγμα. Το κέντρο του κύκλου υποδεικνύει τον αισθητήρα ενώ η ακτίνα του υποδεικνύει το εύρος της ανίχνευσης από τον αισθητήρα.

Παρακάτω περιγράφουμε τον **Αλγόριθμο Εικονικής Δύναμης (Virtual Force Algorithm – VFA)**.

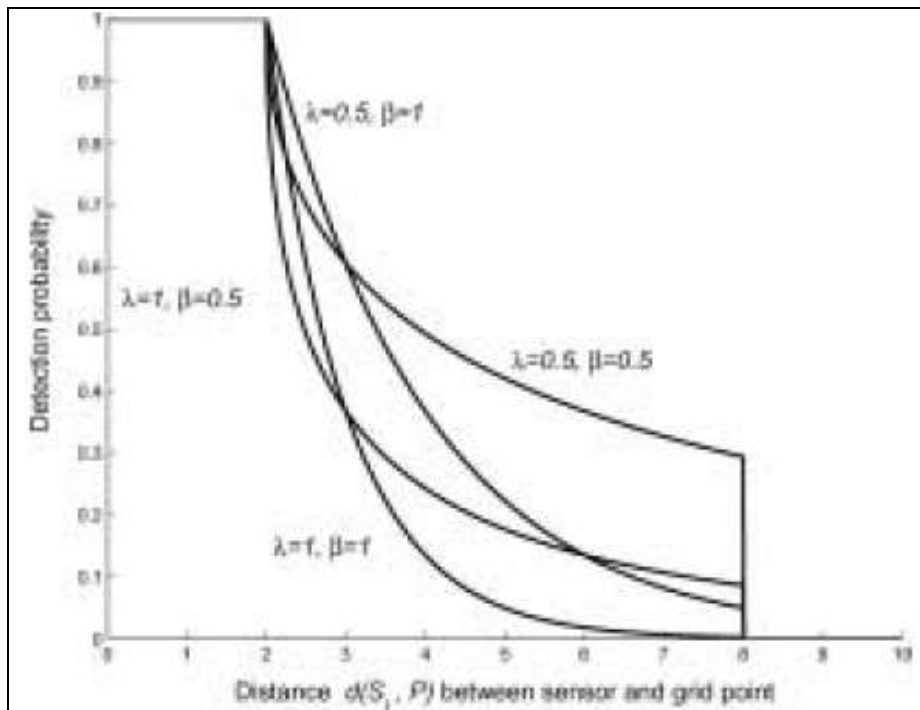
Για την αρχιτεκτονική ενός δικτύου αισθητήρων που βασίζεται στην ομαδοποίηση υποθέτουμε τα ακόλουθα:

- Μετά την αρχική και τυχαία ανάπτυξη των κόμβων όλοι οι αισθητήρες μπορούν να επικοινωνούν με την κεφαλή της ομάδας. Αυτή η επικοινωνία είναι απαραίτητη μόνο για τη μετάδοση των νέων τοποθεσιών στους κόμβους. Αυτό πραγματοποιείται μόνο μία φορά για κάθε κόμβο και δεν απαιτεί μεγάλη ποσότητα δεδομένων για μεταφορά, γι' αυτό και η ενέργεια που καταναλώνεται για αυτό το σκοπό αγνοείται.

- Η κεφαλή της ομάδας είναι υπεύθυνη για την εκτέλεση του VFA αλγόριθμου και τη μετακίνηση σε μια χρονική μονάδα των αισθητήρων στις επιθυμητές τοποθεσίες.
- Για τη μείωση του κίνησης στο δίκτυο και τη διατήρηση της ενέργειας οι αισθητήρες στέλνουν μόνο ένα μήνυμα ειδοποίησης «ναι» ή «όχι» στην κεφαλή της ομάδας όταν το αντικείμενο – στόχος έχει ανιχνευτεί. Η κεφαλή στη συνέχεια υποβάλλει ερωτήματα με έξυπνο τρόπο σε ένα σύνολο αισθητήρων έτσι ώστε να συγκεντρώσει περισσότερη και λεπτομερέστερη πληροφορία για το αντικείμενο – στόχο.

Ο αλγόριθμος VFA συνδυάζει τις ιδέες “potential field” και “disk packing”. Στο πεδίο των αισθητήρων κάθε αισθητήρας συμπεριφέρεται ως πηγή δύναμης για όλους τους υπόλοιπους αισθητήρες. Αυτή η δύναμη μπορεί να είναι είτε θετική (ελκτική) είτε αρνητική (απωστική). Εάν δυο αισθητήρες είναι τοποθετημένοι πολύ κοντά ο ένας στον άλλο τότε ασκούν αρνητικές δυνάμεις. Αυτό διαβεβαιώνει ότι οι αισθητήρες δεν είναι πλήρως ομαδοποιημένοι, πράγμα που οδηγεί σε φτωχή κάλυψη άλλων σημείων του πεδίου των αισθητήρων. Από την άλλη πλευρά, εάν ένα ζεύγος αισθητήρων βρίσκεται σε πολύ μακρινή απόσταση τότε ο ένας αισθητήρας ασκεί στον άλλο θετική δύναμη. Αυτό, με τη σειρά του, διαβεβαιώνει ότι μια ολική ομοιόμορφη κατανομή τοποθέτησης έχει επιτευχθεί.

Το πιθανοτικό μοντέλο ανίχνευσης θέσεων αισθητήρων που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



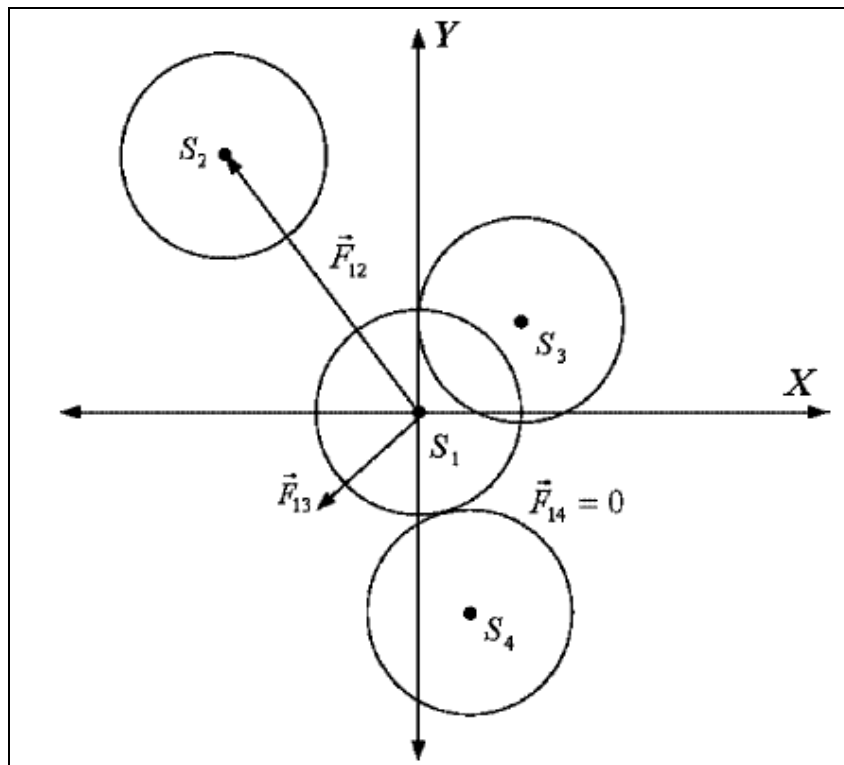
Εικόνα 4: Μοντέλο ανίχνευσης θέσεων αισθητήρων

Εικονικές Δυνάμεις

Έστω ότι συμβολίζουμε με s τον αισθητήρα και με F_{ij} τη δύναμη που ασκεί ο αισθητήρας s_i στον αισθητήρα s_j .

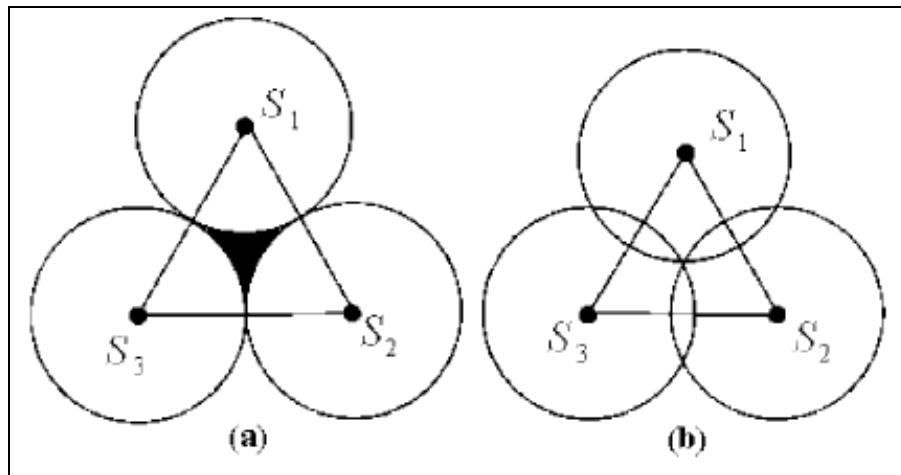
Εκτός από τις θετικές και τις αρνητικές δυνάμεις που ασκούνται σε έναν αισθητήρα, ασκούνται και δυνάμεις που προέρχονται από διάφορα εμπόδια και από περιοχές προνομιακής κάλυψης του πλέγματος. Ο τρόπος ανάπτυξης των αισθητήρων πρέπει να λάβει υπόψη του τη φύση του περιβάλλοντος, για παράδειγμα εμπόδια όπως κτίρια και δέντρα, ανώμαλες επιφάνειες, κλπ. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη για ασφάλεια, συγκεκριμένες περιοχές του πλέγματος πρέπει να καλυφθούν με μεγαλύτερη βεβαιότητα. Η γνώση των εμποδίων και των προνομιακών περιοχών υπονοεί την εκ των προτέρων γνώση του περιβάλλοντος.

Στην πράξη, η γνώση αυτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αρχική τυχαία ανάπτυξη των αισθητήρων, που με τη σειρά της ενδεχομένως να αυξήσει την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου. Στο μοντέλο εικονικής δύναμης που χρησιμοποιείται, υποθέτουμε ότι τα εμπόδια ασκούν αρνητικές δυνάμεις σε έναν αισθητήρα. Εάν είναι διαθέσιμη μια πιο λεπτομερής πληροφορία για τα εμπόδια και τις προνομιακές περιοχές τότε οι παράμετροι που αφορούν το είδος των δυνάμεων (θετικές ή αρνητικές) μπορούν να επιλεγούν πιο σωστά. Στην επόμενη εικόνα δίνεται ένα παράδειγμα εικονικών δυνάμεων με 4 αισθητήρες.



Εικόνα 5: Παράδειγμα εικονικών δυνάμεων με 4 αισθητήρες

Οι περιοχές ανίχνευσης 2 αισθητήρων μπορεί να υπερκαλύπτονται μπορεί και όχι. Εάν δεν υπερκαλύπτονται, τότε είναι εφικτή η κάλυψη ενός μεγάλου πλέγματος μόνο με ένα μικρό αριθμό αισθητήρων. Ωστόσο, μερικά σημεία του πλέγματος είναι πιθανό να μην καλυφθούν από κανένα αισθητήρα. Εάν οι περιοχές υπερκαλύπτονται, τότε όλα τα σημεία του πλέγματος καλύπτονται. Ένα μειονέκτημα όμως αυτής της υπερκάλυψης είναι ότι χρειάζονται περισσότεροι αισθητήρες για την κάλυψη του πλέγματος. Οι δύο αυτές περιπτώσεις παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα:



Εικόνα 6: (a) μη επικαλυπτόμενες περιοχές, (b) επικαλυπτόμενες περιοχές

Εντοπισμός αντικειμένου – στόχου

Στο πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται, όταν ένας αισθητήρας ανιχνεύει το στόχο τότε στέλνει μια ειδοποίηση στην κεφαλή της ομάδας. Για τη διατήρηση της ενέργειας και του εύρους μετάδοσης, το μήνυμα από τον αισθητήρα στην κεφαλή είναι πολύ μικρό, για την ακρίβεια μπορεί να περιοριστεί σε ένα μόνο δυαδικό ψηφίο. Η πληροφορία που περιέχει περισσότερη λεπτομέρεια αποθηκεύεται στην τοπική μνήμη και δίνεται στην κεφαλή ύστερα από την υποβολή ερωτήματος. Ανάλογα με τη ληφθείσα από τη κεφαλή πληροφορία, εκτελείται ένας πιθανοτικός αλγόριθμος εντοπισμού έτσι ώστε να βρεθούν οι υποψήφιος τοποθεσίες.

Μετά την εκτέλεση του VFA αλγορίθμου για την εύρεση των τελικών τοποθεσιών των αισθητήρων, παράγεται ένας πίνακας πιθανοτήτων ανίχνευσης για κάθε σημείο του πλέγματος. Ο πίνακας αυτός περιέχει όλες τις πιθανές ανιχνεύσεις που προέρχονται από τους αισθητήρες που μπορούν να ανιχνεύσουν το στόχο στο συγκεκριμένο σημείο του πλέγματος. Μετά την παραγωγή του πίνακα, γίνεται από την κεφαλή ο εντοπισμός εάν ο στόχος έχει ανιχνευτεί από έναν ή περισσότερους αισθητήρες.

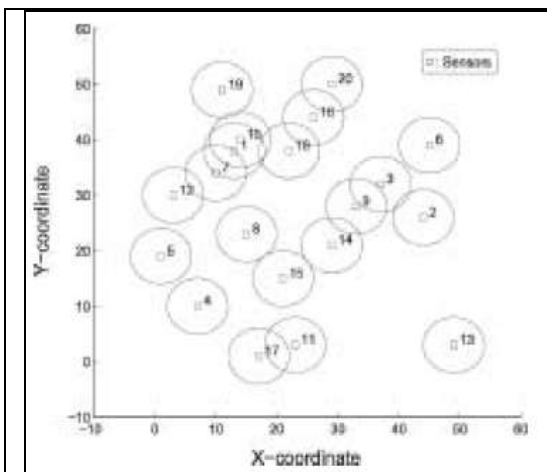
Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η ανάπτυξη των κόμβων απαιτεί μέγιστη βελτίωση στην κάλυψη για τυχαία κατανομή, την κάλυψη για τις προνομιακές περιοχές και την αποφυγή των εμποδίων. Για όλες τις μελέτες που παρουσιάζονται στο [9] χρησιμοποιήθηκαν 20 αισθητήρες. Κάθε αισθητήρας έχει ακτίνα ανίχνευσης 5 μονάδων και εύρος ανίχνευσης λάθους 3 μονάδων

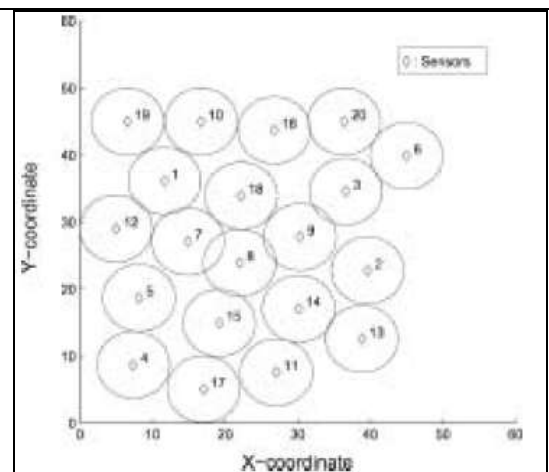
για το πιθανοτικό μοντέλο ανίχνευσης. Το πεδίο των αισθητήρων έχει διαστάσεις 50 x 50.

- **Μελέτη 1: Δυαδικό Μοντέλο Ανίχνευσης Αισθητήρων**

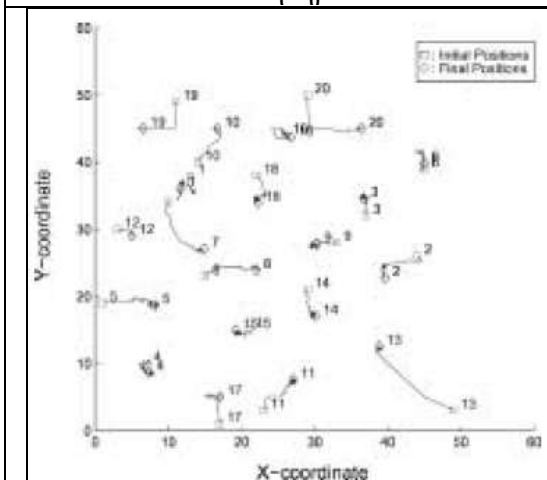
Οι εικόνες 7 – 10 παρουσιάζουν αποτελέσματα για το **δυαδικό μοντέλο** ανίχνευσης αισθητήρων. Στην εικόνα 7 παρουσιάζονται οι αρχικές θέσεις των αισθητήρων ενώ στην εικόνα 8 οι τελικές, όπως έχουν καθοριστεί από τον VFA αλγόριθμο. Η εικόνα 9 δείχνει τις εικονικές κινήσεις των αισθητήρων κατά τη διάρκεια του VFA αλγορίθμου. Τέλος, η εικόνα 10 παρουσιάζει τη βελτίωση στην τελική κάλυψη μετά την εκτέλεση του VFA αλγορίθμου.



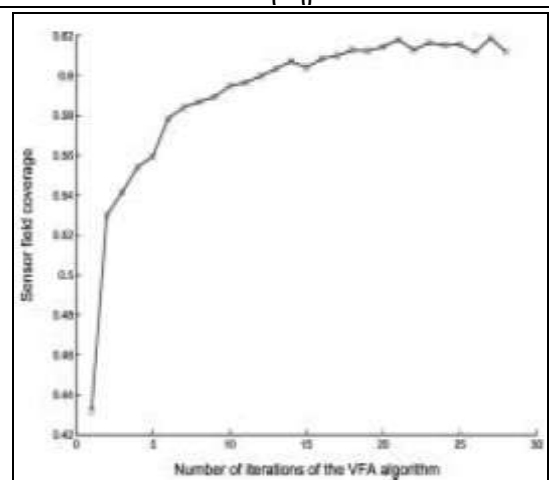
Εικόνα 7: Δυαδικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Αρχικές θέσεις των αισθητήρων



Εικόνα 8: Δυαδικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Τελικές θέσεις των αισθητήρων



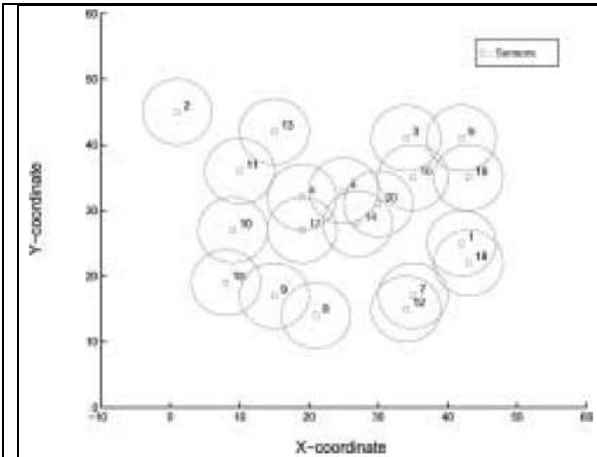
Εικόνα 9: Δυαδικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Εικονικές κινήσεις των αισθητήρων



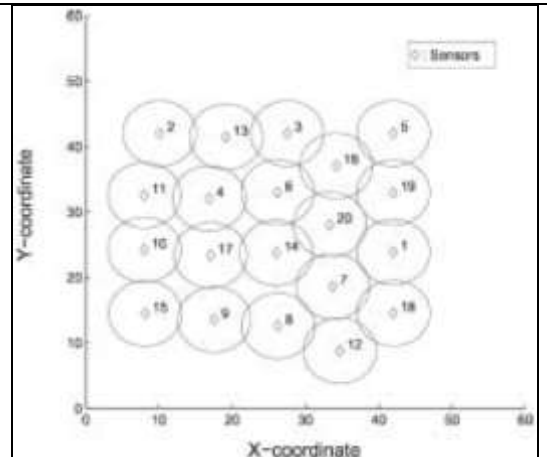
Εικόνα 10: Δυαδικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Βελτίωση στην τελική κάλυψη

- **Μελέτη 2: Πιθανοτικό Μοντέλο Ανίχνευσης Αισθητήρων**

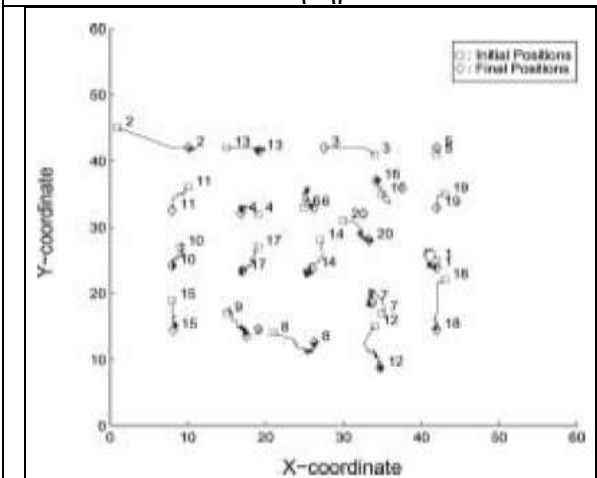
Οι εικόνες 11 – 14 παρουσιάζουν αποτελέσματα για το **πιθανοτικό μοντέλο** ανίχνευσης αισθητήρων. Στην εικόνα 11 παρουσιάζονται οι αρχικές θέσεις των αισθητήρων ενώ στην εικόνα 12 οι τελικές, όπως έχουν καθοριστεί από τον VFA αλγόριθμο. Η εικόνα 13 δείχνει τις εικονικές κινήσεις των αισθητήρων κατά τη διάρκεια του VFA αλγορίθμου. Τέλος, η εικόνα 14 παρουσιάζει τη βελτίωση στην τελική κάλυψη μετά την εκτέλεση του VFA αλγορίθμου.



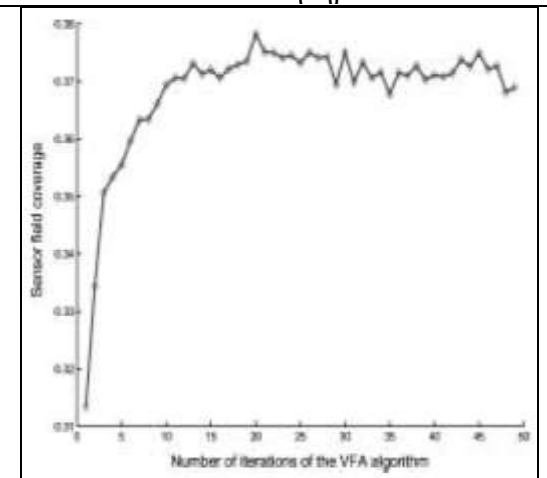
Εικόνα 11: Πιθανοτικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Αρχικές θέσεις των αισθητήρων



Εικόνα 12: Πιθανοτικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Τελικές θέσεις των αισθητήρων



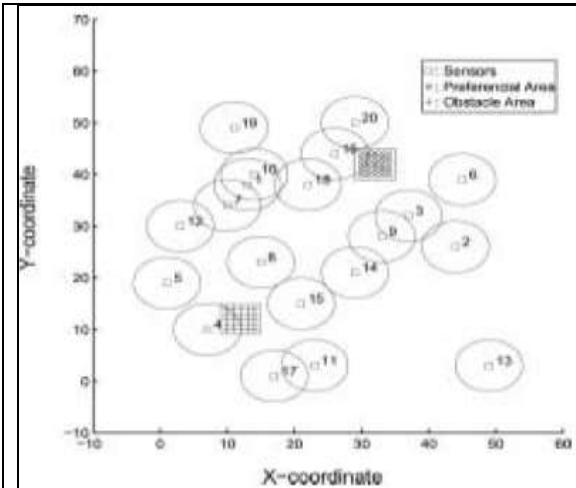
Εικόνα 13: Πιθανοτικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Εικονικές κινήσεις των αισθητήρων



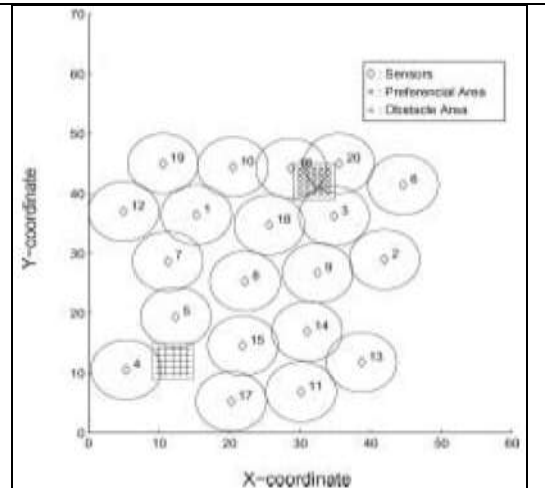
Εικόνα 14: Πιθανοτικό μοντέλο ανίχνευσης αισθητήρων – Βελτίωση στην τελική κάλυψη

- **Μελέτη 3: Πεδίο Αισθητήρων που Περιέχει Εμπόδια και Προνομακές Περιοχές**

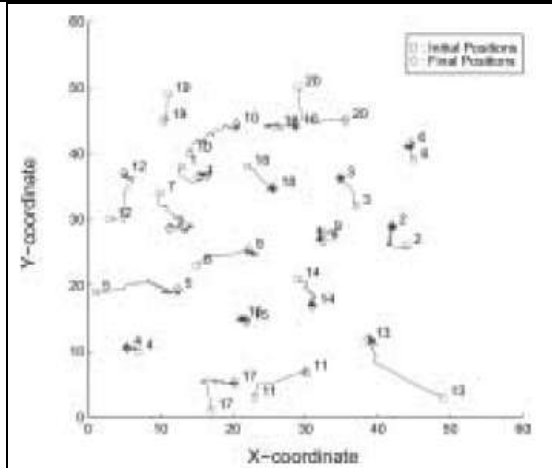
Οι εικόνες 15 – 18 παρουσιάζουν αποτελέσματα για ένα **πεδίο αισθητήρων που περιέχει εμπόδια και προνομακές περιοχές**. Στην εικόνα 15 παρουσιάζονται οι αρχικές θέσεις των αισθητήρων ενώ στην εικόνα 16 οι τελικές, όπως έχουν καθοριστεί από τον VFA αλγόριθμο. Η εικόνα 17 δείχνει τις εικονικές κινήσεις των αισθητήρων κατά τη διάρκεια του VFA αλγορίθμου. Τέλος, η εικόνα 18 παρουσιάζει τη βελτίωση στην τελική κάλυψη μετά την εκτέλεση του VFA αλγορίθμου.



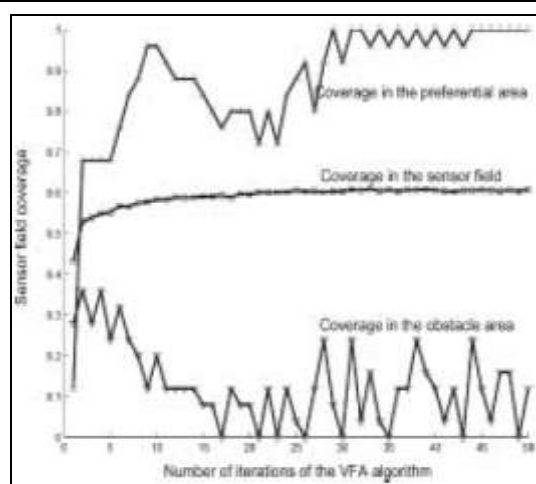
Εικόνα 15: Πραγματικό πεδίο ανίχνευσης αισθητήρων – Αρχικές θέσεις των αισθητήρων



Εικόνα 16: Πραγματικό πεδίο ανίχνευσης αισθητήρων – Τελικές θέσεις των αισθητήρων



Εικόνα 17: Πραγματικό πεδίο ανίχνευσης αισθητήρων – Εικονικές κινήσεις των αισθητήρων



Εικόνα 18: Πραγματικό πεδίο ανίχνευσης αισθητήρων – Βελτίωση στην τελική κάλυψη

2.5.2 Τεχνικές ανίχνευσης στόχου

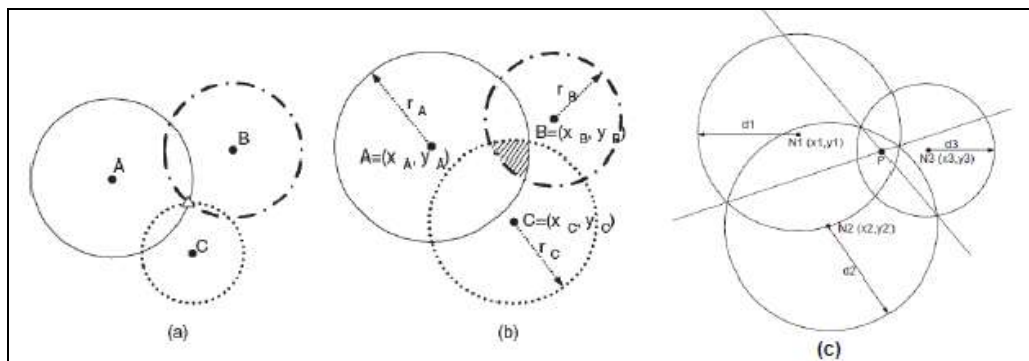
Η ανίχνευση στόχου είναι μια εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων που απαιτεί τη συνεργασία, την επικοινωνία και τον υπολογισμό σε ένα σύνολο πολλαπλών αισθητήρων. Στις εφαρμογές ανίχνευσης στόχου οι αισθητήρες παρατηρούν ανθρώπους, ζώα ή αντικείμενα τα οποία διέρχονται μέσα από το δίκτυο όπως, επίσης, και φυσικά φαινόμενα, περιβαλλοντικά γεγονότα, κλπ.

Για ένα δίκτυο αισθητήρων ανίχνευσης στόχου, η ανίχνευση συνίσταται σε τρία λειτουργικά χαρακτηριστικά:

- τον εντοπισμό όλων των κόμβων αισθητήρων,
- τον υπολογισμό των θέσεων των στόχων ανάλογα με τις θέσεις των αισθητήρων,
- την εφαρμογή διάφορων αλγορίθμων και πρωτοκόλλων δικτύου που επιτρέπουν την ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στους κόμβους.

Παρακάτω περιγράφουμε διάφορες μεθόδους ανίχνευσης στόχου και εύρεσης των κόμβων του δικτύου που παρουσιάζονται στο [1]. Βασικά στοιχεία για αυτές τις μεθόδους είναι οι **αναγνωριστικοί κόμβοι (beacon ή anchor nodes)**, οι οποίοι είναι αναγκαίο προαπαιτούμενο για την εύρεση των θέσεων των κόμβων του δικτύου. Οι αναγνωριστικοί κόμβοι μπορούν να είναι κόμβοι αισθητήρων που γνωρίζουν εξ αρχής τη θέση τους στο δίκτυο.

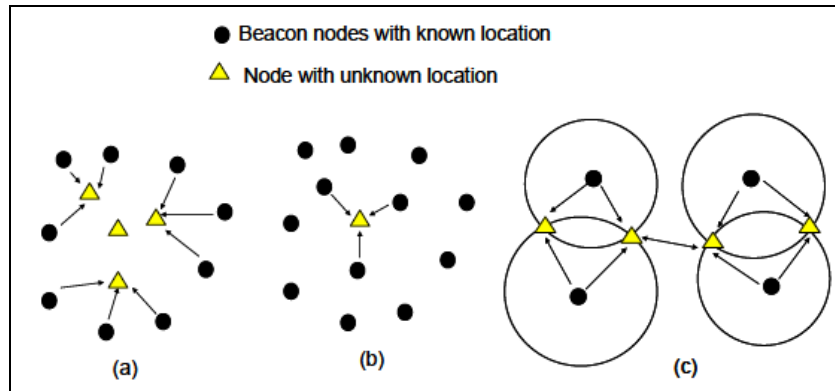
- Στην **Trilateration** μέθοδο το σύστημα έχει ένα αριθμό αναγνωριστικών κόμβων σε γνωστές θέσεις. Αυτοί οι κόμβοι μεταδίδουν σήματα έτσι ώστε οι υπόλοιπες συσκευές να μπορούν να καθορίσουν τη θέση τους βασιζόμενες στα σήματα αυτά. Εάν μια συσκευή μπορεί να «ακούσει» τουλάχιστον τρεις αναγνωριστικούς κόμβους τότε μπορεί και να καθορίσει τη θέση της. Η τεχνική ανάπτυξης κόμβων που χρησιμοποιείται είναι τυχαία με ομοιόμορφη κατανομή των κόμβων.



Εικόνα 19: Μέθοδος Trilateration

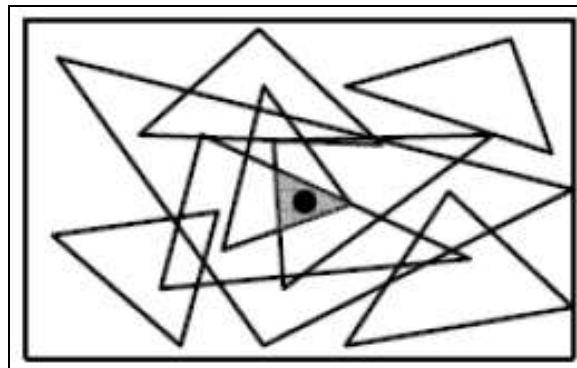
- Η **Multilateration** μέθοδος καταρρίπτει τον περιορισμό της προηγούμενης μεθόδου, δηλαδή ότι χρειάζονται τουλάχιστον τρεις αναγνωριστικοί κόμβοι για τον καθορισμό της θέσης της συσκευής. Διακρίνονται τρεις υποπεριπτώσεις:
 - η ατομική multilateration μέθοδος,
 - η επαναληπτική multilateration μέθοδος,
 - η συνεργάσιμη multilateration μέθοδος.

Το καταλληλότερο σήμα για τους αισθητήρες είναι οι υπέρηχοι και η τεχνική ανάπτυξης κόμβων που χρησιμοποιείται είναι η τυχαία αλλά ομοιόμορφη κατανομή των κόμβων.



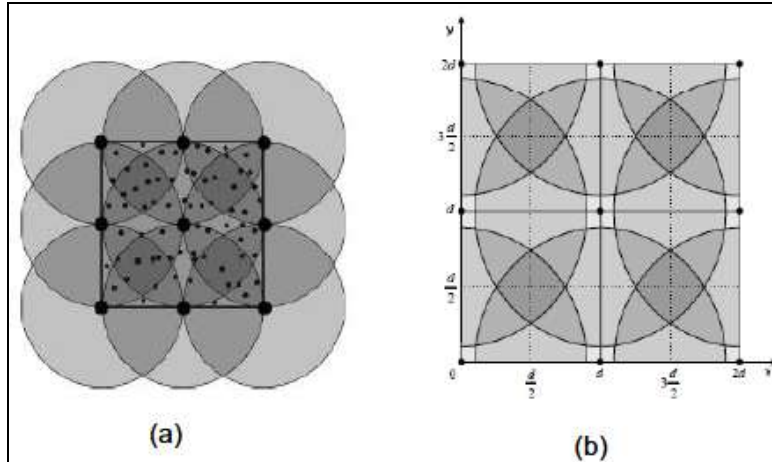
Εικόνα 20: multilateration: (a) ατομική, (b) επαναληπτική, (c) συνεργάσιμη

- Μια μέθοδος που βασίζεται σε σχήμα εντοπισμού ελεύθερου εύρους είναι η **APIT** και απαιτεί συσκευές αισθητήρων όπου ένα σύνολο από αυτές είναι εξοπλισμένο με υψηλής ισχύος πομπούς και πληροφορία τοποθεσίας που λαμβάνεται μέσω GPS ή κάποιου άλλου μηχανισμού. Χρησιμοποιώντας αυτούς τους αισθητήρες, η APIT υπολογίζει την τοποθεσία απομονώνοντας το περιβάλλον σε τριγωνικές περιοχές ανάμεσα στους αναγνωριστικούς κόμβους. Η παρουσία ενός κόμβου εντός ή εκτός των περιοχών του δίνει τη δυνατότητα να μειώνει την περιοχή μέσα στην οποία είναι πιθανό να βρίσκεται. Το σήμα του αισθητήρα που χρησιμοποιείται είναι το RSSI σήμα ισχύος ενώ για την τεχνική ανάπτυξης των κόμβων χρησιμοποιείται είτε η τυχαία τοποθέτηση είτε η ομοιόμορφη.



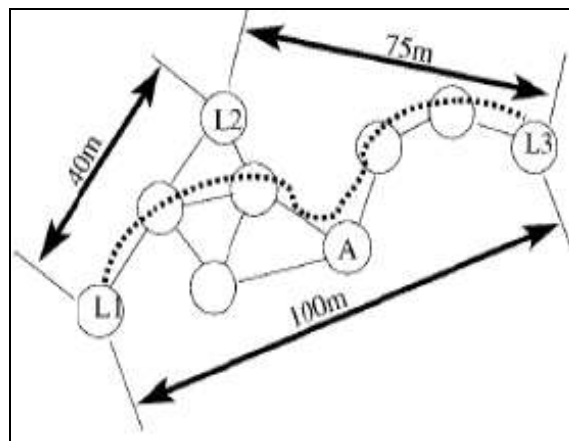
Εικόνα 21: APIT

- Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ο **coarse grained εντοπισμός** είναι μια μέθοδος υπολογισμού της θέσης τυχαία κατανεμημένων κόμβων. Χωρίς βελτιστοποίηση παρουσιάζει χαμηλή ακρίβεια η οποία εξαρτάται από το εύρος της μετάδοσης των σταθμών βάσης. Το σήμα του αισθητήρα που χρησιμοποιείται είναι το RF σήμα ασύρματης επικοινωνίας, ενώ η τεχνική ανάπτυξης των κόμβων χρησιμοποιεί τους αναγνωριστικούς κόμβους σε διάταξη πλέγματος και τους υπόλοιπους τυχαία και κανονικά κατανεμημένους.



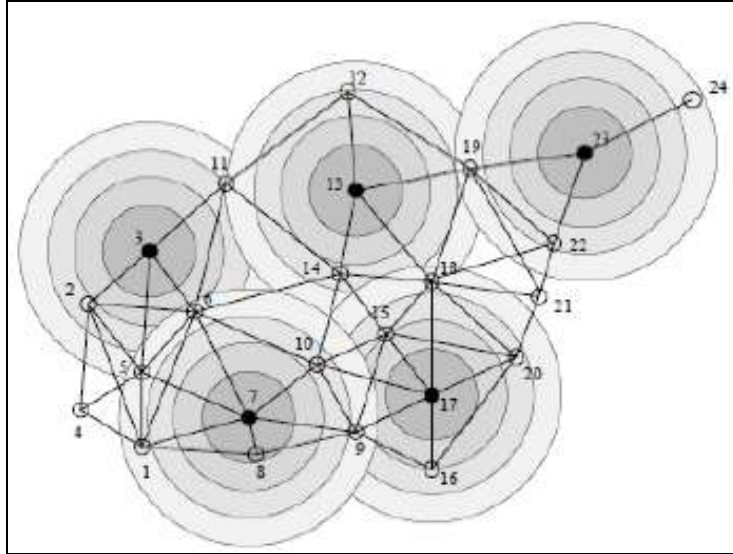
Εικόνα 22: Μέθοδος coarse grained εντοπισμού, (a) απλή, (b) βελτιωμένη

- Οι **hop-counting** τεχνικές χρησιμοποιούνται για να δώσουν τον εντοπισμό των κόμβων σε δίκτυα όπου η πυκνότητα των κόμβων είναι αραιή. Αυτό που κάνουν είναι να διαδίδουν ανακοινώσεις τοποθεσίας σε ολόκληρο το δίκτυο. Για το σήμα του αισθητήρα χρησιμοποιείται το RF σήμα ασύρματης επικοινωνίας, ενώ η ανάπτυξη των κόμβων είναι κατάλληλη για τοπολογίες που δε μεταβάλλονται συχνά.



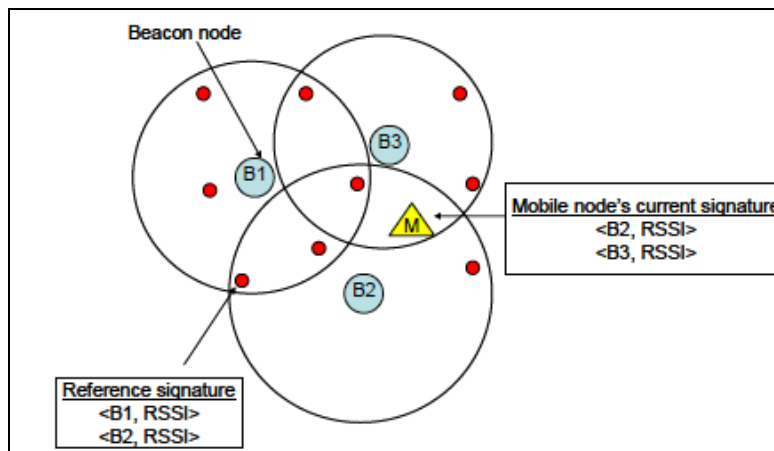
Εικόνα 23: hop-counting τεχνική

- Ο εντοπισμός των θέσεων ασύρματων κόμβων χρησιμοποιώντας **μετρήσεις** από πολλαπλούς, αραιά διατεταγμένους αναγνωριστικούς κόμβους είναι μια άλλη χρησιμοποιούμενη τεχνική. Κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται είτε ως αναγνωριστικός είτε ως άγνωστος. Οι άγνωστοι λαμβάνουν πακέτο από τους αναγνωριστικούς και έτσι καθορίζουν τη θέση τους. Για το σήμα του αισθητήρα χρησιμοποιείται το RSSI σήμα ισχύος, ενώ για την ανάπτυξη σε κόμβους πραγματοποιείται προσομοίωση για ένα σύνολο κόμβων.



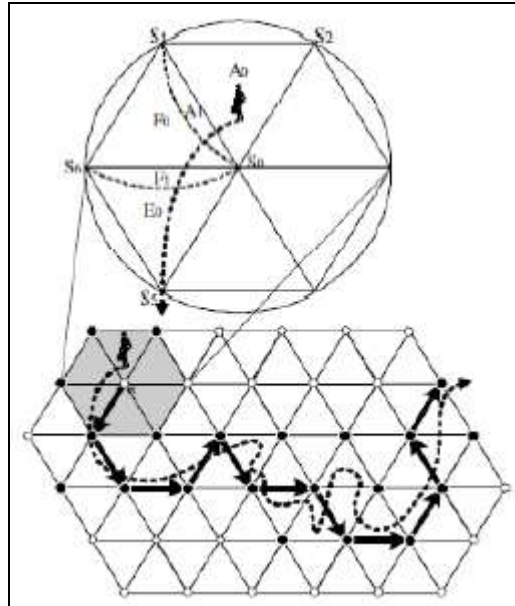
Εικόνα 24: Εντοπισμός θέσης χρησιμοποιώντας μετρήσεις

- Αντί του υπολογισμού της απόστασης μεταξύ ενός αναγνωριστικού κόμβου και ενός κινητού, μια διαφορετική προσέγγιση (εικόνα 25) προσπαθεί να **συγκρίνει** το λαμβανόμενο σχέδιο σημάτων έναντι των σχεδίων της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιούνται για εκπαίδευση. Και εδώ για το σήμα του αισθητήρα χρησιμοποιείται το RSSI σήμα ισχύος, ενώ η ανάπτυξη σε κόμβους είναι κατάλληλη για εσωτερικό περιβάλλον.

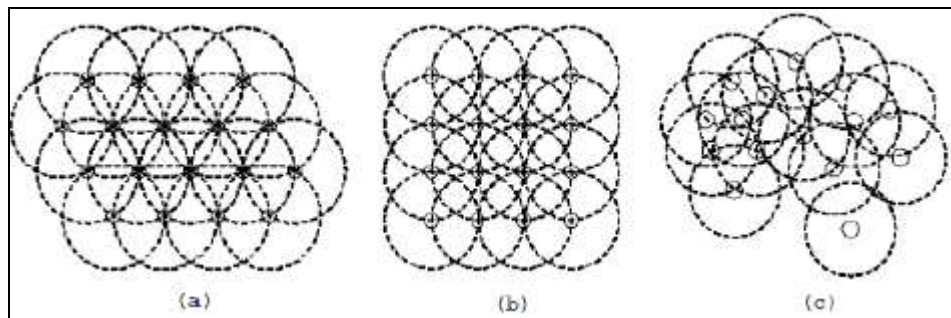


Εικόνα 25: Σύγκριση λαμβανόμενου σχεδίου σημάτων

- Σε επίπεδο δικτύου ο εντοπισμός των θέσεων μπορεί να γίνει μέσω της **συνεργασίας των αισθητήρων**. Μόλις ένα νέο αντικείμενο εισαχθεί στο σύστημα τότε ένας κόμβος (mobile agent) θα αρχικοποιηθεί, δίνοντας το μονοπάτι γι' αυτό το αντικείμενο. Το σήμα του αισθητήρα που χρησιμοποιείται είναι το RSSI σήμα ισχύος, ενώ η ανάπτυξη σε κόμβους είναι είτε κανονική τριγωνική, είτε κανονική τετραγωνική, είτε μη κανονική τυχαία (εικόνα 27).



Εικόνα 26: Εντοπισμός μέσω mobile agent



Εικόνα 27: Κανονική ανάπτυξη σε κόμβους ((a) τριγωνική, (b) τετραγωνική) και μη κανονική τυχαία (c)

Η μέθοδος εντοπισμού μέσω συνεργασίας προτείνεται για τον εντοπισμό κινούμενων αντικειμένων. Αντίθετα με τις υπόλοιπες μεθόδους που βασίζονται σε δίκτυα αισθητήρων, η μέθοδος αυτή έχει τη μόνη απαίτηση ότι ένας αισθητήρας μπορεί να είναι σε θέση να καθορίσει εάν ένα αντικείμενο είναι μέσα στο μέγιστο εύρος ανίχνευσης του αισθητήρα. Ένας αλγόριθμος εντοπισμού θέσεων μέσω συνεργασίας δίνεται στη συνέχεια:

1. Κάθε κόμβος μετρά τη διάρκεια για την οποία κάθε αντικείμενο είναι μέσα στην περιοχή του.
 2. Οι γειτονικοί κόμβοι ανταλλάσσουν αυτές τις τιμές και τις τοποθεσίες τους.
 3. Για κάθε χρονική στιγμή η θέση του αντικειμένου υπολογίζεται ως μια μέση τιμή των τοποθεσιών των κόμβων που ανιχνεύονται.
 4. Ένας αλγόριθμος Ελαχίστων Τετραγώνων εφαρμόζεται στο σύνολο των σημείων.
- Ο **κατανεμημένος αλγόριθμος πρόβλεψης εντοπισμού θέσεων (Distributed Predictive Tracking – DPT)** χρησιμοποιεί μια προσέγγιση που βασίζεται στην ομαδοποίηση. Ο αλγόριθμος DPT εφαρμόζεται μετά τη διάταξη των αισθητήρων και τη δημιουργία των ομάδων. Διαχωρίζει τους αισθητήρες σε αισθητήρες που

βρίσκονται στα όρια, σε αισθητήρες που βρίσκονται σε μια δοθείσα απόσταση από τα όρια και σε αισθητήρες που βρίσκονται εκτός των ορίων. Μόλις το αντικείμενο ανιχνευτεί, διεξάγεται μια σειρά λειτουργιών από τους αισθητήρες που βρίσκονται στο μονοπάτι του αντικειμένου. Το πρωτόκολλο παρέχει έναν καταναμημένο μηχανισμό για τον καθορισμό του βέλτιστου συνόλου αισθητήρων που είναι κατάλληλο γι' αυτήν την δουλειά. Οι αισθητήρες κατανέμονται τυχαία στο δίκτυο με ομοιόμορφη κατανομή.

2.5.3 Αυτό – διαμορφούμενα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

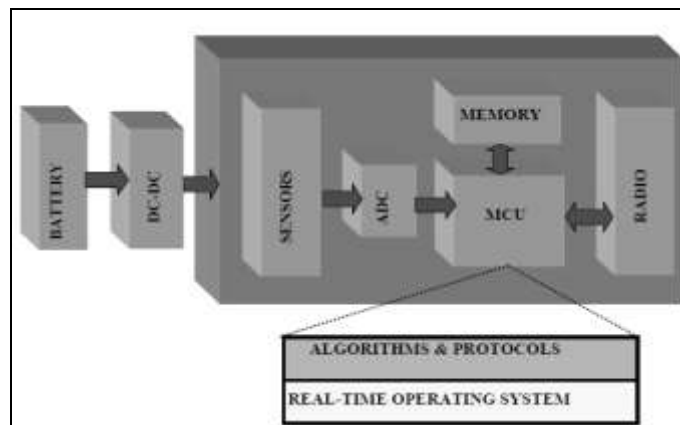
Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που αυτο-διαμορφώνονται μπορούν να γίνουν πολύτιμα σε πολλές αστικές και στρατιωτικές εφαρμογές για τη συλλογή, την επεξεργασία και τη διάδοση σύνθετων περιβαλλοντικών δεδομένων.

Οι κόμβοι αισθητήρων τροφοδοτούνται από μπαταρία και γι' αυτό λειτουργούν με αυστηρά οικονομικό ενεργειακό προϋπολογισμό. Επιπλέον, πρέπει να έχουν διάρκεια ζωής από μερικούς μήνες έως χρόνια από τη στιγμή που η αντικατάσταση της μπαταρίας δεν είναι εφικτή για δίκτυα με χιλιάδες ενσωματωμένους κόμβους.

Η διάρκεια ζωής ενός δικτύου μπορεί να μεγιστοποιηθεί μόνο λαμβάνοντας υπόψη την ενέργεια σε κάθε στάδιο σχεδιασμού και λειτουργίας του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Κατά συνέπεια πρέπει να δίνεται η δυνατότητα στο σύστημα να γίνονται δυναμικές ανταλλαγές μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας, της απόδοσης του συστήματος και της λειτουργικής αξιοπιστίας.

Αρχιτεκτονική συστήματος

Το πρώτο βήμα στο σχεδιασμό συστημάτων αισθητήρων αναγνώρισης ενέργειας περιλαμβάνει την ανάλυση των χαρακτηριστικών της παροχής ισχύος σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρα. Η αρχιτεκτονική ενός τυπικού ασύρματου κόμβου αισθητήρα δίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 28: Αρχιτεκτονική συστήματος κόμβου αισθητήρα αναγνώρισης ενέργειας

Ο κόμβος αποτελείται από 4 υποσυστήματα:

- i. **Μονάδα Μικροελεγκτή (MCU):** Η MCU είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο των αισθητήρων καθώς και για την εκτέλεση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας και των

- αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος, για το σύνολο των δεδομένων που έχουν συγκεντρωθεί στους αισθητήρες.
- ii. **Σύστημα ασύρματης επικοινωνίας (Radio):** Το σύστημα ασύρματης επικοινωνίας του αισθητήρα είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία μεταξύ γειτονικών κόμβων και του εξωτερικού κόσμου. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας στο σύστημα ασύρματης επικοινωνίας όπως ο ρυθμός δεδομένων, ο κύκλος ρολογιού, η μετάδοση ενέργειας και το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται.
 - iii. **Αισθητήρες (Sensors):** Οι μετατροπείς αισθητήρων μεταφράζουν τα φυσικά φαινόμενα σε ηλεκτρικά σήματα και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν είτε ως αναλογικές είτε ως ψηφιακές συσκευές ανάλογα με τον τύπο εξόδου που παράγουν.
 - iv. **Υποσύστημα παροχής ενέργειας:** Το υποσύστημα παροχής ενέργειας περιλαμβάνει τη μπαταρία και το μετατροπέα DC-DC και είναι υπεύθυνο για την τροφοδότηση των υπόλοιπων κόμβων:
 - **Παροχή ενέργειας στους κόμβους:** Η χρήση στοιχείων χαμηλής κατανάλωσης και η ανταλλαγή της περιττής απόδοσης με την αποθήκευση ενέργειας κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του κόμβου μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ενέργεια, έως και μερικές τάξεις μεγέθους. Για την αποθήκευση ενέργειας, το υποσύστημα θα πρέπει να απενεργοποιείται, όποτε αυτό είναι δυνατό.
 - **Μπαταρία:** Η μπαταρία παρέχει ενέργεια σε ολόκληρο τον κόμβο αισθητήρα και γι' αυτό παίζει καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό της διάρκειας ζωής του αισθητήρα.
 - **Μετατροπέας DC-DC:** Ο μετατροπέας DC-DC είναι υπεύθυνος για την παροχή ενέργειας σταθερής τάσης στον υπόλοιπο κόμβο χρησιμοποιώντας ολόκληρη τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Ο μετατροπέας μαζί με τον παράγοντα αποδοτικότητας παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Ένας χαμηλός παράγοντας αποδοτικότητας οδηγεί σε σημαντική απώλεια ενέργειας στο μετατροπέα, μειώνοντας έτσι το ποσό της ενέργειας που είναι διαθέσιμο στα υπόλοιπα στοιχεία του κόμβου αισθητήρα.

Βελτιστοποίηση ενέργειας σε επίπεδο κόμβου

Η ανάπτυξη στα κυκλώματα χαμηλής ισχύος και στο σχεδιασμό συστημάτων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη διαφόρων μικροεπεξεργαστών και μικροελεγκτών εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης ισχύος. Χρησιμοποιώντας αυτά τα κυκλώματα υλικού σε συνδυασμό με τη χρήση της δυναμικής διαχείρισης ισχύος (DPM), μπορεί να επιτευχθεί επιπλέον μείωση στην κατανάλωση ενέργειας, αυξάνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

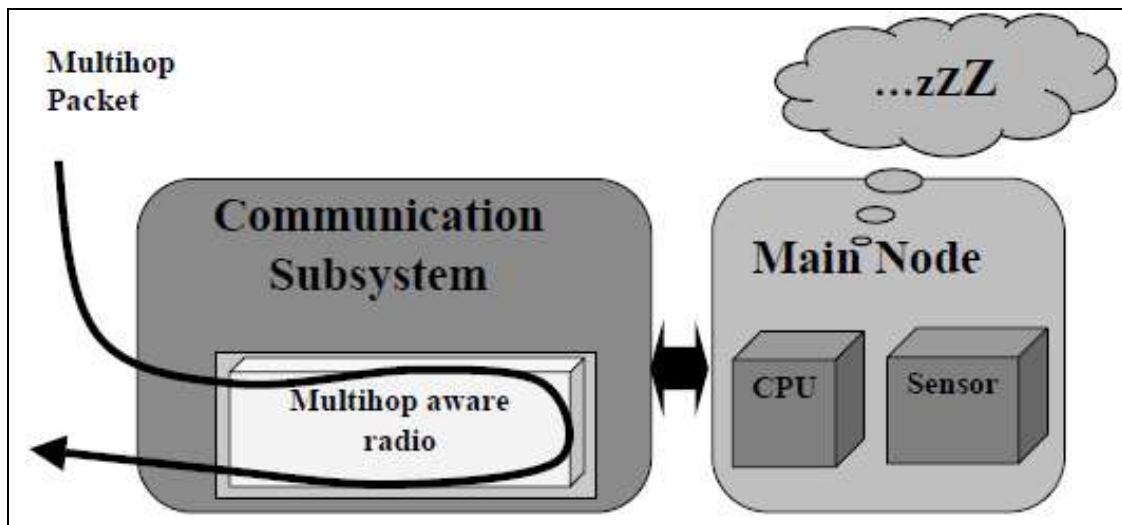
Ένα συχνά χρησιμοποιούμενο σχήμα DPM βασίζεται είτε στην απενεργοποίηση είτε στην τοποθέτηση σε *idle* κατάσταση διαφόρων στοιχείων του αισθητήρα. Επιπρόσθετες αποθηκεύσεις ενέργειας στην *ενεργή* κατάσταση είναι πιθανές χρησιμοποιώντας τη δυναμική διαβάθμιση τάσης (DVS). Το DVS προσαρμόζει δυναμικά την παροχή τάσης στον επεξεργαστή καθώς και τη συχνότητα λειτουργίας για

να καλύψει τις στιγμιαίες απαιτήσεις επεξεργασίας, ανταλλάσσοντας, κατά συνέπεια, την αχρησιμοποίητη απόδοση για την αποθήκευση ενέργειας.

Η διάρκεια ζωής του δικτύου αισθητήρων μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά εάν το λειτουργικό σύστημα (OS), το επίπεδο εφαρμογών και τα πρωτόκολλα δικτύου σχεδιαστούν έτσι ώστε να λαμβάνουν υπόψη τους την ενέργεια που καταναλώνεται.

Η διαχείριση ισχύος των υποσυστημάτων ασύρματης επικοινωνίας είναι επίσης σημαντική από τη στιγμή που η ασύρματη επικοινωνία είναι ένας μεγάλος καταναλωτής ενέργειας κατά τη λειτουργία του συστήματος. Η ενέργεια που καταναλώνεται στο υποσύστημα ασύρματης επικοινωνίας έχει δύο βασικά στοιχεία, ένα RF στοιχείο που εξαρτάται από την απόσταση μετάδοσης και από τις παραμέτρους της διαμόρφωσης, και ένα ηλεκτρονικό στοιχείο που καταγράφει την ενέργεια που καταναλώνεται από το κύκλωμα που πραγματοποιεί την σύνθεση συχνότητας, το φιλτράρισμα κτλ.

Ένας αισθητήρας ενεργεί και ως δρομολογητής προωθώντας τα πακέτα στους κόμβους όπου ανήκουν. Ένα πακέτο, ανεξάρτητα του τελικού προορισμού του, ταξιδεύει και υφίσταται επεξεργασία από όλο το υπολογιστικό υποσύστημα, με αποτέλεσμα το υψηλό κόστος ενέργειας. Η χρήση «έξυπνου» υλικού ως υποσύστημα ασύρματης επικοινωνίας (εικόνα 29) επιτρέπει στα πακέτα να αναγνωριστούν και να ανακατευθυνθούν από το υποσύστημα επικοινωνίας, αφήνοντας το υπολογιστικό σύστημα σε κατάσταση *sleep*, αποθηκεύοντας με αυτόν τον τρόπο ενέργεια.



Εικόνα 29: Το «έξυπνο» υποσύστημα ασύρματης επικοινωνίας

2.5.4 Ένας γενετικός αλγόριθμος για WSN

Στο [7] παρουσιάζεται ένας γενετικός αλγόριθμος (genetic algorithm) ο οποίος επιτυγχάνει μέγιστη κάλυψη (maximum coverage) του περιβάλλοντος σε online κινητά δίκτυα αισθητήρων πραγματικού χρόνου. Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται τόσο σε δυναμικά άγνωστα περιβάλλοντα όσο και σε δυναμικές δικτυακές τοπολογίες που μπορεί να μεταβάλλονται με το χρόνο. Επιπλέον, είναι σχεδιασμένος ώστε να επιτυγχάνει ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας.

Βήματα του αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος βασίζεται στην υπόθεση ότι κάθε κόμβος είναι εφοδιασμένος με έναν αισθητήρα, όπως για παράδειγμα μια πολυκατευθυντική κάμερα ή ένας λέιζερ σαρωτής κλίμακας, ο οποίος μπορεί να παρέχει στον κόμβο πληροφορίες όπως η σχετική απόσταση και η παρουσία των γειτονικών του κόμβων και άλλων εμποδίων του περιβάλλοντος.

Επιπλέον, ο αλγόριθμος θεωρεί ένα δίκτυο που αποτελείται από 2 στοιχεία: έναν εξυπηρετητή (server) και μια συστοιχία από ομάδες κόμβων (clusters). Ο server αναθέτει έναν σταθμό βάσης (base station) σε κάθε μια από τις ομάδες των κόμβων. Σκοπός των σταθμών σε κάθε cluster θα είναι η παρακολούθηση των διαδικασιών ανάπτυξης των κόμβων του cluster.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται οι φάσεις του αλγορίθμου οι οποίες επεξηγούνται αναλυτικά στη συνέχεια.

```
Deployment (MANET)

1. Initialization
  a. direction vector (DV)
  b. base station set (BSS)
  c.  $t_m$ ; default: infinity
  d.  $coverage_{target}$ ; default:  $\min(\sum_i^{n} cvble[i], field\_area)$ 

2. Sensor Data Collection
  after  $t_m$ , each node sends a sensor vector to its router
  sensor_vector = {id, rx_power, energy, coverage}

3. Recombination
  base-stations sort the sensor vector by the fitness function,
  recombines the fittest chromosomes, and send the new chromosomes
  back to the nodes

4. Mutation
  if  $\sum_i^{n} cvg[i][r] - \sum_i^{n} cvg[i][r-1] \leq coverage_{delta}$ 
    mutate DV and BSS
    decrement of  $t_m$  by  $t_{delta}$ 

5. Termination
  if  $t_m = 0$  or  $\sum_i^{n} cvg[i][r] \geq coverage_{target}$ 
    terminate
  else
    repeat 2 - 5
```

Εικόνα 30: Οι φάσεις του GA-based αλγορίθμου

- **Βήμα 1^ο – Αρχικοποίηση:** κατά τη φάση της αρχικοποίησης ο server θέτει τη μεταβλητή t_m που αποτελεί το άνω αποδεκτό φράγμα για το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Επίσης, ο χρήστης μπορεί να ορίσει και τη μεταβλητή $coverage_{target}$ που αφορά τον επιθυμητό στόχο της περιοχής κάλυψης. Επιπλέον, ο αλγόριθμος θέτει με τυχαίο τρόπο το διάνυσμα κατευθύνσεων (direction vector – DV) και το σύνολο των σταθμών βάσης (base station set – BSS). Τα DV και BSS αποτελούν για το γενετικό αλγόριθμο τα 2 «χρωμοσώματα» τα οποία μεταφέρουν την γενετική πληροφορία στις επερχόμενες γενεές.

- **DV** : το διάνυσμα DV αποτελείται από d στοιχεία καθένα από τα οποία αναπαριστά την πιθανότητα της κίνησης σε μια κατεύθυνση d_i . Με την έννοια αυτή το DV είναι το πιθανοτικό μοντέλο με βάση το οποίο ένας κόμβος μπορεί να κινείται σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Το άθροισμα των πιθανοτήτων για μία κατεύθυνση είναι ίσο με 1. Επιπλέον, η διαφορά μεταξύ 2 διαδοχικών στοιχείων του διανύσματος αναπαριστά την κατευθυντική «ευαισθησία» ή ανάλυση (direction resolution – DR). Ο DR καθορίζεται από τις δυνατότητες κίνησης των κόμβων (π.χ. η «ευαισθησία» της κίνησης του σερβο-μηχανισμού του οδομέτρου επί της πλακέτας του αισθητήρα).
- **BSS** : ο αλγόριθμος θεωρεί ότι όλοι οι κόμβοι είναι ομογενοποιημένοι (είναι ίδιοι και έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά). Έτσι, ο server θέτει με τυχαίο τρόπο τους σταθμούς βάσης σε κάθε cluster. Οπότε, το BSS είναι το σύνολο όλων μαζί των κόμβων – σταθμών βάσης. Επιπλέον, ο server αποφασίζει το μέγεθος του BSS δεδομένου του συνολικού αριθμού των κόμβων που διατίθενται στο δίκτυο.
- **Βήμα 2^ο – Συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες:** οι κόμβοι συλλέγουν δεδομένα μέσω του δικτύου για το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσονται και τα αποθηκεύουν στο διάνυσμα αισθητήρα (sensor vector – SV). Κάθε SV, πέραν των συλλεγόμενων δεδομένων κάλυψης, περιέχει το id και το επίπεδο ενεργειακής στάθμης του κόμβου καθώς και την λαμβανόμενη ισχύ από το σταθμό βάσης και από τους υπόλοιπους γειτονικούς κόμβους. Τα δεδομένα κάλυψης βασίζονται στη γνώση που αποκτά ο συγκεκριμένος κόμβος από τους γύρω του κόμβους. Τέλος, αν ένας κόμβος παρατηρεί ότι μια περιοχή καλύπτεται από n κόμβους, τότε το μέγεθος της κάλυψης που μετρά αυτός ο κόμβος θα είναι $\text{coverageArea} / n$.
- **Βήμα 3^ο – επανασυνδυασμός:** κατά τη φάση αυτή οι σταθμοί βάσης ταξινομούν τα διανύσματα αισθητήρων SV των κόμβων τους ανάλογα με τη συνάρτηση αξιολόγησης (fitness function). Έτσι, το διάνυσμα κατευθύνσεων DV με τους καλύτερα «αξιολογηθέντες» κόμβους (fittest nodes) εντός ενός cluster, επιλέγεται για να επανασυνδυαστεί. Δηλαδή, η επόμενη γενιά των χρωμοσωμάτων παράγεται μέσω του επανυπολογισμού των πιθανοτήτων του DV.
 - **Συνάρτηση αξιολόγησης:** ο μηχανισμός της συνάρτησης αυτής έχει ως σκοπό να αυξήσει την κάλυψη και να μειώσει τη λαμβανόμενη ισχύ που δέχεται ένας κόμβος από τους υπόλοιπους ενώ ταυτόχρονα να κρατήσει σε υψηλά επίπεδα την ενεργειακή στάθμη του κόμβου. Επιπλέον, η συνάρτηση προκειμένου να παράγει την επόμενη γενιά κόμβων, ρυθμίζει το DV για τους χειρότερα αξιολογηθέντες κόμβους με βάση το πιθανοτικό μοντέλο που προκύπτει από τους «καλύτερους». Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ο ψευδοκώδικας της συνάρτησης.

$$\text{fitness}(i) = \begin{cases} (\text{coverage}[i][r] - \text{coverage}[i][r-1]) \\ + (\text{rx_power}[i][r-1] - \text{rx_power}[i][t]) \\ - (\text{energy}[i][r-1] + \text{energy}[i][r-1] - \text{energy}_m) \\ \quad \text{for } \text{rx_power}[i][t] \geq \text{rx_power}_m \\ \\ -\alpha \\ \quad \text{for } \text{rx_power}[i][t] < \text{rx_power}_m \end{cases}$$

where coverage is the coverage area,
 rx_power is the receiver power,
 and energy is the remaining energy.

Εικόνα 31: Η συνάρτηση αξιολόγησης

- Βήμα 4^ο – μεταλλαγή:** όταν η διαδικασία της ανάπτυξης του δικτύου φτάσει σε μια στατική ισορροπία, ο αλγόριθμος μεταβάλλει με τυχαίο τρόπο το διάνυσμα κατευθύνσεων DV και το σύνολο των σταθμών βάσης BSS. Τότε οι πιθανότητες κίνησης του DV ανατίθενται με τυχαίο τρόπο σε κάποιους από τους κόμβους και ο server θέτει με τυχαίο τρόπο νέους σταθμούς βάσης. Με τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται η «ανατάραξη» της κατανομής των κόμβων εντός της δυναμικής περιοχής με κυρίαρχο στόχο την επιτευξη ενός καλύτερου γενικού βέλτιστου για το πρόβλημα μέγιστης κάλυψης και ελάχιστης κατανάλωσης ισχύος.
- Βήμα 5^ο – τερματισμός:** η μεταβλητή t_m που έχει τεθεί από τον server κατά τη διάρκεια του 1^{ου} βήματος της αρχικοποίησης καθορίζει και τον αριθμό των γενεών που θα παραχθούν. Μετά την παραγωγή κάθε γενιάς, η t_m μειώνεται κατά έναν παράγοντα t_{delta} έτσι ώστε όλοι οι κόμβοι να δημιουργούν διανύσματα αισθητήρων SV με μεγαλύτερη συχνότητα καθώς μια γενιά περνά πληροφορίες στην επόμενη. Μια τέτοια τεχνική επιτρέπει μια καλύτερη ρύθμιση της διαδικασίας ανάπτυξης έτσι ώστε να επιτυγχάνεται πιο γρήγορα μια στατική ισορροπία. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν το t_m φτάσει στην τιμή 0 ή όταν η κάλυψη φτάσει την επιθυμητή τιμή $\text{coverage}_{\text{target}}$.

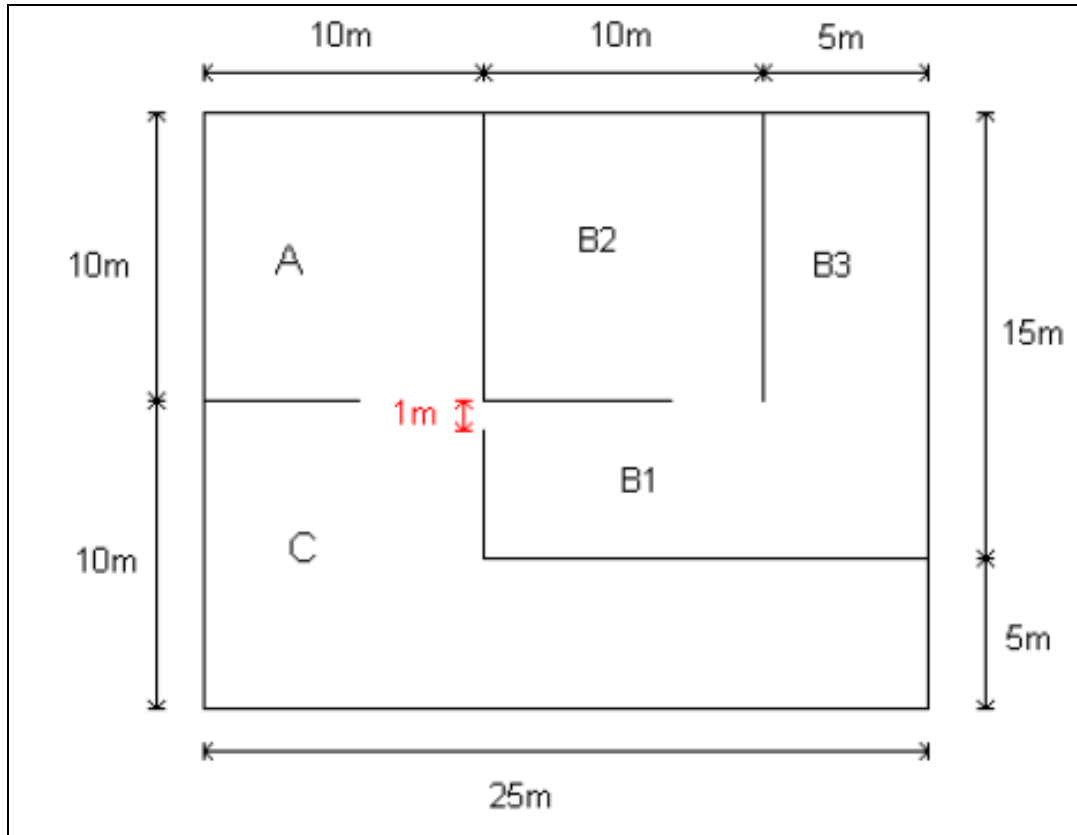
Στο σημείο αυτό μπορούμε να αναφέρουμε ότι ο αλγόριθμος μπορεί να επιτύχει τη βέλτιστη επίλυση στο πρόβλημα της κάλυψης αν «τρέξει» ιδανικά σε άπειρο χρόνο. Ωστόσο, ανάλογα και με την τιμή της μεταβλητής t_m , οι χρήστες μπορούν να θέσουν άνω όριο στο χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου καθώς και να επιβάλλουν διαφορετικές παραμέτρους ανάλογα με την περίπτωση του εκάστοτε προβλήματος (π.χ. κράτηση μεγαλύτερης ενεργειακής στάθμης για τους κόμβους).

Σχολιασμός πειραματικών μετρήσεων

Στο [7] καταγράφονται τα αποτελέσματα που έχει ο γενετικός αλγόριθμος όσον αφορά την περιοχή κάλυψης και την κατανάλωση ενέργειας. Από αυτά φαίνεται ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιτυγχάνει ένα πολύ ικανοποιητικό επίπεδο κάλυψης σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα και, μάλιστα, επιβάλλοντας στο περιβάλλον τοπικά μέγιστα (π.χ. μικρά διανοίγματα όπως πόρτες και παράθυρα, εντός ενός μεγάλου χώρου).

Επιπλέον, ο αλγόριθμος φαίνεται να έχει πολύ μικρή απώλεια πακέτων ενώ οι κόμβοι καταναλώνουν πολύ μικρά ποσά ενέργειας. Ωστόσο, αυξάνοντας τη διαδικασία της μεταλλαγής (mutation) μπορεί να αυξάνεται η περιοχή κάλυψης αλλά μεγαλώνει η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων.

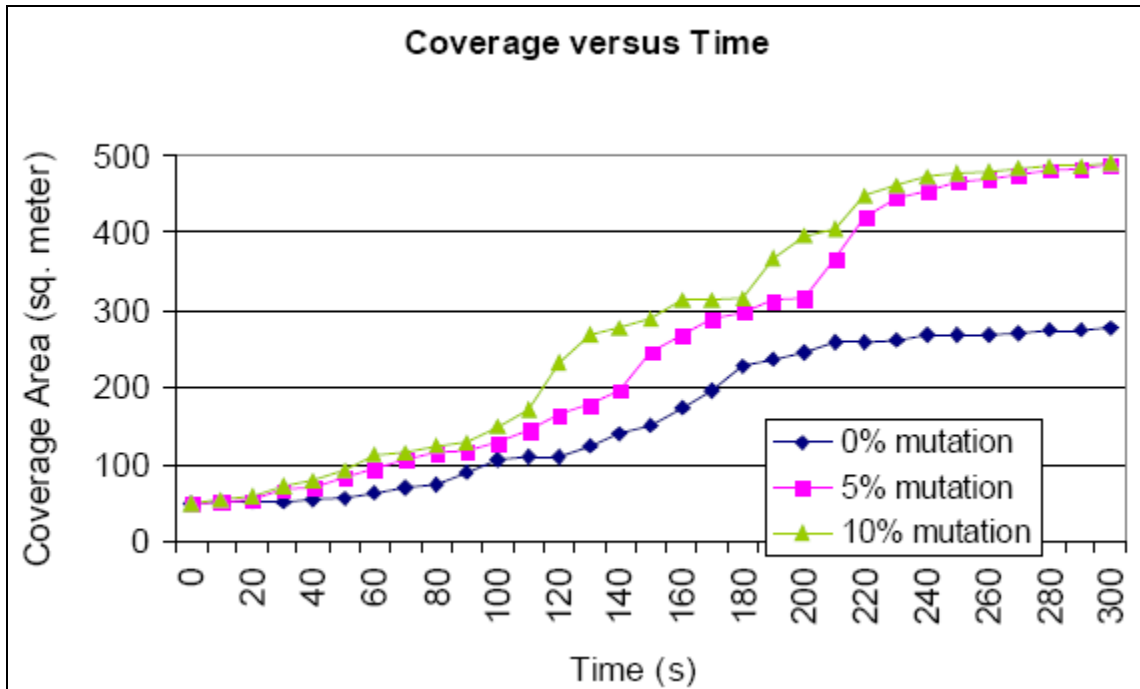
Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκε ένα περιβάλλον συνολικού εμβαδού 500 m² στο οποίο επιβλήθηκε ένα τοπικό μέγιστο. Αυτό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 32: Το περιβάλλον εφαρμογής του GA

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα επιβάλλεται ένα τοπικό μέγιστο (πόρτα πλάτους 1 μέτρου) μεταξύ της περιοχής C και B1.

- Περιοχή κάλυψης:** κατά τη διάρκεια του πειράματος τοποθετήθηκε ένας σταθερός server και 100 ασύρματοι κόμβοι εντός της περιοχής A. Ο server ανέθεσε 10 clusters από κόμβους με έναν κόμβο – σταθμό βάσης το καθένα. Ως χρόνος εκτέλεσης του πειράματος ορίστηκαν τα 60s ($t_m = 60s$) και ο χρόνος αναμονής προκειμένου να γεννηθεί η επόμενη γενιά ορίστηκε ο $t_{\delta} = 6s$. Το πείραμα διεξήχθη με 3 διαφορετικούς ρυθμούς μεταλλαγής (mutation) ορισμένους σε 0%, 5% και 10%. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον επόμενο πίνακα.



Εικόνα 33: Κάλυψη στο χρόνο ανάλογα με το ρυθμό μεταλλαγής

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούμε ότι η περιοχή κάλυψης αυξάνεται αισθητά με την αύξηση του ρυθμού μεταλλαγής. Για παράδειγμα, παρατηρήθηκε ότι για ρυθμό 0% η συνάρτηση αξιολόγησης δεν «άφηνε» τους κόμβους να απομακρυνθούν από τους σταθμούς βάσης τους και να εισέλθουν μέσω του τοπικού μεγίστου (πόρτας) στην περιοχή B και άρα να την καλύψουν. Αντίθετα, όταν αυξήθηκε ο ρυθμός, κάτι τέτοιο κατέστη εφικτό. Ωστόσο, με τη επιβολή του ρυθμού 10% στη μεταλλαγή απλώς το γενικό βέλτιστο επετεύχθη 10s νωρίτερα χωρίς όμως να αυξηθεί η περιοχή κάλυψης.

- Κατανάλωση ενέργειας:** για τη μέτρηση της ενέργειας ορίστηκε το μέγεθος των μεταδιδόμενων πακέτων στα 512 Kb ενώ για τη μετάδοσή τους χρησιμοποιήθηκε στο στρώμα ζεύξης το IEEE 802.11 MAC πρωτόκολλο με ρυθμούς μετάδοσης 11 Mbps. Κατά τη διάρκεια του πειράματος ο GA είχε ρυθμό απώλειας πακέτων 0.02%. Αντίστοιχα, υποθέτοντας ότι κάθε ενέργεια ενός αισθητήρα καταναλώνει 1J, η συνολική κατανάλωση για 10% μεταλλαγή ήταν σχετικά υψηλότερη σε σχέση με αυτή για 5% (5201J έναντι 4731J). Δηλαδή, με 10% ρυθμό μεταλλαγής το δίκτυο κατανάλωσε περίπου 400J παραπάνω για επικοινωνία.

Συμπερασματικά, η τυχαιότητα στην ανάθεση των σταθμών βάσης αύξησε τη συχνότητα της αλλαγής της δικτυακής ιεραρχίας, η οποία σημαίνει και αύξηση του ποσοστού της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων, ωστόσο οδήγησε στην επίτευξη του γενικού βέλτιστου σε μικρότερο χρονικό διάστημα.

2.6 Χαρακτηριστικά που καθορίζουν την τεχνική που χρησιμοποιείται

Πολλοί είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός δικτύου αισθητήρων. Οι παράγοντες αυτοί αποτελούν έναν οδηγό για τη δημιουργία των πρωτοκόλλων και των αλγορίθμων που εφαρμόζονται στα WSN. Επομένως, οι παράγοντες αυτοί θα αποτελούν και τα κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα που θα καθορίσουν το ποια ή ποιες τεχνικές (που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 2.5) θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση.

- **Ανοχή σε σφάλματα:** Για ένα δίκτυο αισθητήρων, η πιθανότητα να σταματήσει η λειτουργία κάποιων κόμβων λόγω καταστροφής ή εξάντλησης της ενέργειάς τους είναι πολύ μεγάλη. Το σφάλμα σε ένα κόμβο δε θα πρέπει να επηρεάζει τη συνολική λειτουργία του δικτύου. Επομένως, η αξιοπιστία ή η ανοχή σε σφάλματα ορίζεται ως η ικανότητα διατήρησης των λειτουργιών του δικτύου χωρίς διακοπές εξαιτίας αποτυχιών των κόμβων. Για να είναι ανεκτή η καταστροφή κάποιων κόμβων, η χρησιμοποίηση πλεοναζόντων κόμβων είναι απαραίτητη. Βεβαίως, όμως, τα επίπεδα της επιθυμητής αξιοπιστίας εξαρτώνται από την ίδια την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιείται το δίκτυο αισθητήρων.
- **Δυνατότητα κλιμάκωσης:** Ανάλογα με την εφαρμογή, ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να αποτελείται από έναν αριθμό κόμβων που φτάνει τις εκατοντάδες ή και τις χιλιάδες. Επομένως, τα πρωτόκολλα και οι αρχιτεκτονικές που εφαρμόζονται θα πρέπει όχι μόνο να ανταπεξέρχονται σε διαφορετικούς αριθμούς κόμβων, αλλά και να αξιοποιούν την πυκνότητα του δικτύου. Έτσι, η αρχιτεκτονική των WSN πρέπει να είναι κλιμακωτή και ευέλικτη ώστε να μπορεί να επιτευχθεί διεύρυνσή τους. Οι μέθοδοι που αποσκοπούν στην ανάπτυξη των δύο αυτών χαρακτηριστικών περιλαμβάνουν την ομαδοποίηση (clustering), τη multi-hop μετάδοση δεδομένων και τη συγκέντρωση της υπολογιστικής ισχύος ανά ομάδα κόμβων.
- **Περιορισμοί του υλικού:** Οι κόμβοι ενός δικτύου αισθητήρων απαρτίζονται από τέσσερις βασικές μονάδες: μονάδα ανίχνευσης, μονάδα επεξεργασίας δεδομένων, πομποδέκτη και μονάδα πηγής ενέργειας. Επιπλέον, μπορεί να υπάρχουν και κάποιες άλλες μονάδες, όπως ένα σύστημα εύρεσης τοποθεσίας, γεννήτρια ενέργειας και κινητήρας. Η μονάδα ανίχνευσης αποτελείται από τον αισθητήρα και από έναν Analog – to – Digital Converter ενώ η μονάδα επεξεργασίας συνδέεται με μια μονάδα μνήμης. Όλες οι παραπάνω μονάδες πρέπει να τοποθετηθούν σε μια συσκευή μεγέθους που μπορεί να είναι μικρότερη και από ένα κυβικό εκατοστό.
- **Χαμηλή αποθηκεύσιμη ενέργεια:** Το μικρό μέγεθος βάζει περιορισμούς και στην ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί σε έναν κόμβο. Για παράδειγμα, σε ένα smart dust κόμβο, η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια είναι της τάξης του 1 J. Ο χρόνος ζωής ενός κόμβου μπορεί να επιμηκυνθεί αντλώντας ενέργεια από το περιβάλλον του. Μια πιθανή τεχνική είναι η χρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών στοιχείων για αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας. Οι πομποδέκτες είναι απαραίτητος εξοπλισμός των κόμβων αλλά και η κύρια πηγή κατανάλωσης ενέργειας. Συνήθως χρησιμοποιούνται πομποδέκτες RF τεχνολογίας, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και συσκευές οπτικής επικοινωνίας.

Αν και η τεχνολογία στους μικροεπεξεργαστές έχει αναπτυχθεί τόσο ώστε να έχουν μεγαλύτερη υπολογιστική δύναμη σε μικρότερο μέγεθος, ωστόσο οι υπολογιστικές και οι δυνατότητες μνήμης που χρησιμοποιούνται στους κόμβους αισθητήρων δεν είναι πολύ μεγάλες. Η τυχαία τοποθέτηση των κόμβων αισθητήρων κάνει την χρήση ενός συστήματος

εύρεσης της ακριβούς τοποθεσίας του κόμβου απαραίτητη. Τα συστήματα αυτά απαιτούνται και από πολλούς αλγορίθμους δρομολόγησης. Σε πολλά δίκτυα αισθητήρων οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με ένα global positioning system (GPS).

- **Περιβάλλον – Προσαρμοστικότητα:** Οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων απαιτούν το στήσιμο των δικτύων σε οποιοδήποτε περιβάλλον. Οι συνθήκες που επικρατούν μπορεί να είναι ακραίες, όμως το δίκτυο θα πρέπει να λειτουργεί χωρίς διακοπές και με τη μέγιστη ακρίβεια. Οι αισθητήρες μπορεί να λειτουργούν:
 - στο βυθό ενός ωκεανού,
 - στο κέντρο ενός κυκλώνα,
 - στο πεδίο μιας μάχης,
 - σε μεγάλα κτίρια, σε σπίτια ή σε καταστήματα.

Για να ανταπεξέλθουν στις δυναμικές-ποικίλες συνθήκες λειτουργίας τους, τα WSN πρέπει να προσαρμόζονται στη μεταβαλλόμενη κατάσταση των συνδέσεων και της ροής δεδομένων κατά τη διάρκεια του χρόνου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση περιβάλλοντος με μεγάλο θόρυβο επικοινωνίας, θα πρέπει να «θυσιασθεί» ενέργεια προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια, αυξάνοντας το λόγο σήματος προς θόρυβο.

- **Κατανάλωση ενέργειας:** Οι κόμβοι των αισθητήρων είναι εξοπλισμένοι με μια περιορισμένη πηγή ενέργειας, λόγω του μικρού μεγέθους τους. Στις περισσότερες εφαρμογές η αναπλήρωση των ενεργειακών πόρων είναι αδύνατη. Επομένως, ο χρόνος ζωής ενός κόμβου σε ένα δίκτυο αισθητήρων και ως εκ τούτου και ο χρόνος ζωής του ίδιου του δικτύου, εξαρτάται άμεσα από τη διάρκεια ζωής των μπαταριών. Έτσι λοιπόν, η αποδοτική διαχείριση ενέργειας είναι πρωτεύουσας σημασίας κατά το σχεδιασμό ενός αλγορίθμου ή πρωτοκόλλου για ένα δίκτυο αισθητήρων.

Παρόλα αυτά, ο χρόνος ζωής ενός δικτύου έχει κάποια trade-offs σε σχέση με την ποιότητα υπηρεσιών: καταναλώνοντας περισσότερη ενέργεια αυξάνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που παράγει ένας κόμβος, όμως μειώνεται ο χρόνος ζωής του. Οι σχεδιαστές θα πρέπει να εξισορροπούν τους περιορισμούς αυτούς και να σχεδιάζουν πρωτόκολλα που τους αντιμετωπίζουν με το βέλτιστο τρόπο, ανάλογα βεβαίως και με την εφαρμογή.

Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας πρέπει να επιτυγχάνεται σε κάθε κομμάτι του δικτύου με διάφορους μηχανισμούς, όπως εξοικονόμηση ενέργειας στο MAC επίπεδο επικοινωνίας, περιορισμένης ενέργειας δρομολόγηση δεδομένων στο επίπεδο δικτύου κλπ. Επιπλέον, προσπάθειες πρέπει να καταβάλλονται προκειμένου να επιτευχθεί αύξηση της αποδοτικότητας των συστημάτων ως προς τη χρησιμοποίηση άλλων πόρων. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας αλγορίθμους με μικρή πολυπλοκότητα μπορεί να μειωθεί ο χρόνος υπολογισμών με αποτέλεσμα να μειωθούν επίσης, τόσο η κατανάλωση ενέργειας όσο και η καθυστέρηση διάδοσης δεδομένων. Οι αποδοτικές ως προς το εύρος ζώνης αρχιτεκτονικές και τα πρωτόκολλα μπορούν επίσης να μειώσουν την καθυστέρηση διάδοσης δεδομένων.

Τρεις είναι οι τομείς όπου καταναλώνεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας :

- **Μονάδα ανίχνευσης περιβάλλοντος:** Καθοριστικό ρόλο στην κατανάλωση ενέργειας από τη μονάδα ανίχνευσης παίζει η πολυπλοκότητα της ανίχνευσης. Τα επίπεδα θορύβου από το περιβάλλον μπορούν να προκαλέσουν αύξηση της πολυπλοκότητας ανίχνευσης. Επιπλέον, η σποραδική παρακολούθηση του περιβάλλοντος απαιτεί λιγότερη ενέργεια από τη συνεχή επιτήρηση.

- **Μονάδα επικοινωνίας:** Η αποστολή και λήψη δεδομένων είναι οι πιο δαπανηρές ενέργειες που επιτελεί ένας κόμβος. Μάλιστα, κατά την αποστολή των μηνυμάτων το σήθ θα πρέπει να ενισχυθεί ώστε να έχουμε αξιόπιστη μετάδοση και να υπάρχουν όσο το δυνατόν λιγότερα σφάλματα, τα οποία προκαλούνται από τον παρεμβάλλοντα θόρυβο και τις ανακλάσεις. Στον υπολογισμό της ενέργειας για την επικοινωνία πρέπει να συνυπολογιστεί και η ενέργεια που απαιτείται για την εκκίνηση του πομποδέκτη. Γενικά, η μονάδα επικοινωνίας και το πρωτόκολλο που αυτή υλοποιεί είναι πολύ σημαντικό κομμάτι τόσο για την απόδοση του δικτύου όσο και ως παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά την φάση του deployment. Για το λόγο αυτό, οι παράμετροι επικοινωνίας αναλύονται στην επόμενη ενότητα ξεχωριστά.
- **Μονάδα επεξεργασίας δεδομένων:** Για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται στη μονάδα επεξεργασίας δεδομένων, οι επεξεργαστές παρέχουν καταστάσεις λειτουργίας που καταναλώνουν διαφορετικά ποσά ενέργειας. Έτσι, ανάλογα με το φόρτο εργασίας, οι επεξεργαστές μεταβαίνουν στις αντίστοιχες καταστάσεις, χωρίς να απαιτείται η συνεχής κανονική τους λειτουργία.
- **Κόστος παραγωγής:** Εφόσον ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων, είναι σημαντικό το κόστος του κόμβου να έχει την ελάχιστη δυνατή τιμή. Έτσι, από τη στιγμή που ένας κόμβος αισθητήρα πρέπει να επιτελέσει ένα αρκετά μεγάλο αριθμό λειτουργιών, είναι ένα ενδιαφέρον (αλλά αρκετά δύσκολο) θέμα η επίτευξη της ελαχιστοποίησης της τιμής του.
- **Ποιότητα με περιορισμένους πόρους:** Η ποιότητα ενός συστήματος με WSN περιγράφεται από την ακρίβεια και την εγκυρότητα των δεδομένων που μεταδίδονται. Γενικά, το ποσό των δεδομένων που διακινούνται μέσα στο δίκτυο καθορίζουν το επίπεδο της ακρίβειας, αλλά από την άλλη υψηλό ποσό δεδομένων συνεπάγεται μεγάλη κατανάλωση του εύρους ζώνης και περισσότερο ανταγωνισμό κατά τη διάρκεια της μετάδοσης μεταξύ των κόμβων, που σημαίνει με τη σειρά του αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και καθυστέρηση διάδοσης των δεδομένων (μειώνεται η εγκυρότητα). Κάποια λύση μπορεί να δώσει η τοπική επεξεργασία δεδομένων περιορίζοντας το ποσό των δεδομένων που μεταδίδονται, αλλά η περιπλοκότητα των υπολογισμών και η χρήση της μνήμης μπορούν να προκαλέσουν μεγάλη καθυστέρηση της μετάδοσής τους και αύξηση της ενέργειας που καταναλώνεται.
- **Αυτορυθμιζόμενα δίκτυα:** Οι κόμβοι αισθητήρων πρέπει να μπορούν να ρυθμιστούν από μόνοι τους ώστε να δημιουργηθούν οι απαραίτητες συνδέσεις στο δίκτυο και να αρχίσει η λειτουργία του όλου συστήματος. Για το λόγο αυτό, τα WSN είναι ιδιαίτερα δυναμικά κατά τη διάρκεια ζωής τους. Οι καταστάσεις, τώρα, από τις οποίες διέρχονται οι κόμβοι με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας είναι: Απενεργοποίησης, «Υπνου», Εκκίνησης, Αναμονής, Εκπομπής, Λήψης και Αποτυχίας. Κατά συνέπεια, τα πρωτόκολλα των WSN πρέπει να έχουν την ικανότητα να δημιουργούν συνδέσεις αυτόνομα και ανεξάρτητα από την κατάσταση των κόμβων αισθητήρων, αποσκοπώντας παράλληλα στην επίτευξη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που έχουν, όπως εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση της καθυστέρησης διάδοσης των δεδομένων κλπ.
- **Ασφάλεια και απόκρυψη δεδομένων από τρίτους:** Η ασφάλεια και η απόκρυψη των μεταδιδόμενων δεδομένων αποτελεί δύο από τα σημαντικότερα

χαρακτηριστικά που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό των WSN, όπως στις περιπτώσεις των στρατιωτικών εφαρμογών και αλλού. Ωστόσο, η ασφάλεια φαίνεται να είναι ένα σημαντικό δύσκολο πρόβλημα προς επίλυση στα WSN εξαιτίας του γεγονότος ότι απαιτείται η χρησιμοποίηση περισσότερων πόρων, οι οποίοι ως γνωστόν είναι περιορισμένοι στα δίκτυα αυτά.

2.7 Παράμετροι που αφορούν τα πρωτόκολλα επικοινωνίας για WSN

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρέχουν συνήθως διαφορετικές μετρικές απόδοσης σε σχέση με τα κοινά ενσύρματα δίκτυα δεδομένων. Αυτές σχετίζονται με τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος και το μικρό κόστος παραγωγής και συντήρησης του δικτύου σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα όπου εκεί μετρώνται η αποτελεσματικότητα του καναλιού και το εύρος της μετάδοσης. Στα WSN κάθε φορά που μια συσκευή – αισθητήρας προσπελαύνει το μέσο (είτε για αποστολή είτε για λήψη δεδομένων) καταναλώνεται ενέργεια, οπότε η μέθοδος μέσω της οποίας θα γίνει η προσπέλαση από το πρωτόκολλο επικοινωνίας έχει σημαντική επίπτωση στην κατανάλωση.

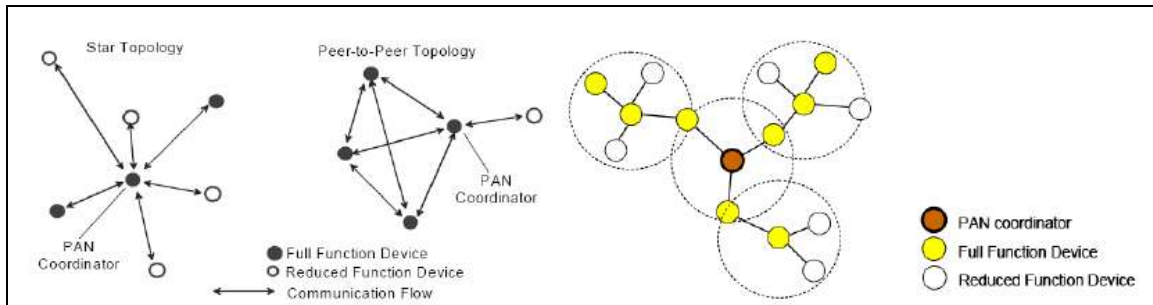
Το επικοινωνιακό μέσο (στην περίπτωση μας ο αέρας) έχει διάφορες διαστάσεις που μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πρωτόκολλα επικοινωνίας προκειμένου να ελέγξουν τη μετάδοση. Μερικές από αυτές είναι ο χρόνος, η συχνότητα και η κωδικοποίηση. Επίσης, πολλές φυσικές παράμετροι των ίδιων των συσκευών μπορούν να αξιοποιηθούν από τα πρωτόκολλα, όπως η κατεύθυνση της κεραίας, η ένταση της εκπεμπόμενης ισχύος και η ευαισθησία της λήψης.

Το IEEE 802.15.4 αποτελεί το πρώτο ανοικτό πρωτόκολλο επικοινωνίας για δίκτυα αισθητήρων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Σχεδιάστηκε ως ένα ευέλικτο πρότυπο κατάλληλο για αρκετές WSN τοπολογίες και εφαρμογές αισθητήρων ενώ βασίζεται σε χαρακτηριστικά που είναι σχεδιασμένα για να επιτρέπουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μικρό κόστος παραγωγής.

Παρακάτω αναλύονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό των πρωτοκόλλων επικοινωνίας για WSN και ιδιαίτερα για το 802.15.4. Οι παράμετροι αυτές σχετίζονται με τις ιδιαιτερότητες του φυσικού μέσου μετάδοσης ενώ εξαρτώνται άμεσα από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που καθορίζουν τις τεχνικές deployment που θα εφαρμοστούν για το χτίσιμο του εκάστοτε WSN δικτύου (παράγραφος 2.6).

- **Εξοικονόμηση ενέργειας:** Σε ένα LR – WPAN συμμετέχουν 2 είδη συσκευών: α) συσκευή πλήρους λειτουργίας (Full – Function Device – **FFD**) και β) συσκευή περιορισμένης λειτουργίας (Reduced – Function Device – **RFD**). Μια FFD μπορεί να βρίσκεται σε μια από 3 καταστάσεις, λειτουργώντας ως 1) συντονιστής δικτύου προσωπικού χώρου (PAN coordinator), 2) συντονιστής (coordinator) ή 3) ως τερματική συσκευή (end device). Μια FFD μπορεί να επικοινωνήσει με μια RFD ή με άλλες FFD, ενώ μια RFD είναι δυνατόν να επικοινωνήσει μόνο με μια FFD. Μια RFD είναι κατάλληλη για πολύ απλές εφαρμογές όπου δεν απαιτείται η αποστολή μεγάλου αριθμού πακέτων και μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με μια FFD κάθε φορά. Συνεπώς, η RFD μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαθέτοντας ελάχιστους πόρους και μικρή χωρητικότητα μνήμης.
- **Δυνατότητες κλιμάκωσης:** Το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 υποστηρίζει δύο

βασικές τοπολογίες: α) τοπολογία αστέρα και β) peer-to-peer τοπολογία, όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 34: Τοπολογίες αστέρα, peer – to – peer και cluster tree σε ένα IEEE 802.15.4 δίκτυο

Στην **τοπολογία αστέρα**, αφού ενεργοποιηθεί για πρώτη φορά η FFD, μπορεί να εγκαθιδρύσει το δίκτυό της και να λειτουργεί ως PAN coordinator. Όλα τα δίκτυα αστέρα λειτουργούν ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα, σε τρέχουσα λειτουργία, δίκτυα αστέρα. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή ενός PAN Identifier, ο οποίος δεν χρησιμοποιείται από κανένα άλλο δίκτυο εντός της περιοχής εκπομπής. Όταν ο PAN Identifier επιλεγεί, ο PAN coordinator μπορεί να επιτρέψει την είσοδο άλλων συσκευών (FFD και RFD) στο δίκτυό του.

Από την άλλη πλευρά, στην **peer-to-peer τοπολογία**, κάθε συσκευή έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με κάθε άλλη που περιλαμβάνεται στη σφαίρα επιρροής της. Μια συσκευή ορίζεται ως PAN coordinator καθώς μπορεί, για παράδειγμα, να αποτελεί την πρώτη συσκευή που επικοινωνεί στο δίκτυο.

Τέλος, μπορούν να εξαχθούν από την peer-to-peer δομή επιπρόσθετες τοπολογίες, όπως η **cluster tree μορφή**, στην οποία οι περισσότερες συσκευές είναι FFD, καθεμία από τις οποίες μπορεί να λειτουργήσει ως coordinator, παρέχοντας υπηρεσίες συγχρονισμού σε άλλες συσκευές ή coordinators. Μόνο ένας από τους coordinators διαθέτει τη λειτουργία του PAN coordinator, που μπορεί να κατέχει περισσότερους υπολογιστικούς πόρους από οποιαδήποτε άλλη συσκευή στο PAN.

- **Διάρκεια ζωής του δικτύου:** Το IEEE 802.15.4 Medium Access Control (MAC) πρωτόκολλο έχει τη δυνατότητα να παρέχει πολύ χαμηλούς χρονικούς κύκλους εξυπηρέτησης (duty cycles) πράγμα που είναι εξαιρετικά χρήσιμο σε εφαρμογές WSN που είναι ευαίσθητες στο χρόνο και η διάρκεια ζωής του δικτύου είναι πρωτεύουσας σημασίας.
- **Ασφάλεια:** Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπως και όλα τα ασύρματα δίκτυα, είναι ευπρόσβλητα σε επιθέσεις υποκλοπών, ακόμη και αλλοίωσης των μηνυμάτων. Οι περιορισμένες δυνατότητες των κόμβων σε υπολογιστική ισχύ και σε χώρους αποθήκευσης, κάνουν ακόμη πιο δύσκολη τη δημιουργία ασφαλών δικτύων αισθητήρων. Ο μηχανισμός κρυπτογράφησης που προτείνεται από το πρότυπο IEEE 802.15.4 βασίζεται σε ένα συμμετρικό κλειδί και άλλα κλειδιά που παρέχονται από τα ανώτερα επίπεδα του δικτύου. Ο μηχανισμός αυτός παρέχει τις εξής υπηρεσίες είτε συνδυασμούς αυτών: α) εμπιστευτικότητα των δεδομένων, β) πιστοποίηση των δεδομένων και γ) προστασία των αναμεταδόσεων. Το κοινό κλειδί μπορεί είτε να διαμοιράζεται μεταξύ δύο μόνο κόμβων είτε μεταξύ μιας μεγαλύτερης ομάδας

κόμβων. Στη δεύτερη περίπτωση εμποδίζεται η προσβολή από κόμβους εκτός της ομάδας, αλλά όχι από πιθανούς κινδύνους εντός της ομάδας.

3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ DEPLOYMENT ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ

3.1 Γενικά για τα Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας

Η ασύρματη επικοινωνία αποκτά ιδιαίτερη αξία σε μια χώρα όπως η Ελλάδα, που η μορφολογία του εδάφους της δεν επιτρέπει πολλές φορές τη χρήση εναλλακτικών μέσων μετάδοσης όπως για παράδειγμα οι οπτικές ίνες. Ειδικότερα οι τομείς της κινητής τηλεφωνίας και των ασύρματων τοπικών δικτύων είναι ταχύτατα εξελισσόμενοι τομείς οι οποίοι στις μέρες μας βρίσκονται σε ένα στάδιο μετεξέλιξής τους. Στην μεγάλη εξέλιξη των δύο αυτών τομέων συμβάλουν τα μέγιστα και οι απαιτήσεις των σύγχρονων καιρών για ένα ενοποιημένο και λειτουργικό σύστημα κινητής τηλεφωνίας παρέχοντας πληθώρα υπηρεσιών στους πελάτες – χρήστες του.

Σήμερα, πολλαπλά πρότυπα πρώτης και δεύτερης γενιάς, χρησιμοποιούνται παγκοσμίως στις κινητές επικοινωνίες. Διαφορετικά πρότυπα, εξυπηρετούν διαφορετικές εφαρμογές, με διαφορετικά επίπεδα κινητικότητας, χωρητικότητας και περιοχής εξυπηρέτησης (συστήματα τηλεϊδιοποίησης, ασύρματα τηλέφωνα, ασύρματοι τοπικοί βρόχοι, ιδιωτικός κινητός ασύρματος, κυψελωτά συστήματα και κινητά δορυφορικά συστήματα). Πολλά πρότυπα χρησιμοποιούνται μόνο σε μία χώρα ή περιοχή και τα περισσότερα είναι ασύμβατα μεταξύ τους.

Η πρώτη γενιά συστημάτων κυψελωτής κινητής τηλεφωνίας εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1980. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη γενιά δεν αποτέλεσε το ξεκίνημα των κινητών τηλεπικοινωνιών. Αντίθετα από πιο πριν είχαν εμφανιστεί αρκετά συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών τα οποία όμως δεν είχαν τα χαρακτηριστικά των δικτύων κινητής τηλεφωνίας με τον τρόπο που τα εννοούμε σήμερα. Το βασικότερο από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η κυψελωτή δομή του δικτύου. Στα κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας η περιοχή κάλυψης διαιρείται σε μικρά κελιά. Με αυτόν τον τρόπο οι ίδιες συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιούνται πολλές φορές στο ίδιο δίκτυο χωρίς να δημιουργούνται έντονα φαινόμενα παρεμβολής. Επομένως οι δυνατότητες του δικτύου αυξάνονται σημαντικά.

Η ανάπτυξη κυψελωτών συστημάτων δεύτερης γενιάς, καθοδηγήθηκε από την ανάγκη για τη βελτίωση της ποιότητας μετάδοσης, της χωρητικότητας του συστήματος και της κάλυψης. Περαιτέρω εξελίξεις στην τεχνολογία των ημιαγωγών και στις συσκευές μικροκυμάτων έφεραν την ψηφιακή μετάδοση στις κινητές επικοινωνίες. Η μετάδοση ομιλίας ακόμα κυριαρχεί στον αέρα, αλλά οι απαιτήσεις για τηλεομοιοτυπία, μικρά μηνύματα και μετάδοση δεδομένων, αυξάνονται ραγδαία. Συμπληρωματικές υπηρεσίες όπως η πρόληψη απάτης και η κρυπτογράφηση των δεδομένων χρήστη, έχουν γίνει δεδομένα χαρακτηριστικά που είναι συγκρίσιμα με αυτά στα σταθερά δίκτυα.

Η 2^η γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιεί ψηφιακή μετάδοση της κίνησης. Αυτή είναι και η κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των κινητών συστημάτων 1^{ης} και 2^{ης} γενιάς: ο διαχωρισμός αναλογικού – ψηφιακού. Έτσι, ένα κανάλι συχνοτήτων διαιρείται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από διαφορετικούς χρήστες (είτε με διαίρεση χρόνου – TDMA – είτε με διαίρεση κώδικα – CDMA). Επιπλέον χρησιμοποιούνται ιεραρχικές δομές κελιών, για την ακρίβεια η περιοχή κάλυψης διαιρείται σε macrocells, microcells και picocells, με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση των δυνατοτήτων των

δικτύων. Υπάρχουν τέσσερα κύρια πρότυπα για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς: το **Global System for Mobile communications (GSM)** και τα παράγωγά του.

Το βασικό σύστημα GSM χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων των 900 MHz. Όμως υπάρχουν και αρκετά παράγωγα τα οποία χρησιμοποιούν τις ζώνες των 1800 ή 1900 MHz. Ο βασικότερος λόγος ήταν η έλλειψη χωρητικότητας στη ζώνη των 900 MHz. Οι ζώνες των 1800 ή 1900 MHz μπορούν να εξυπηρετήσουν πολύ μεγαλύτερο αριθμό χρηστών, κυρίως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Η περιοχή κάλυψης όμως μειώνεται σε σχέση με τα συστήματα των 900 MHz.

Με τον όρο «γενιά 2,5» αναφερόμαστε στο ευρύτερο σύνολο των αναβαθμίσεων που έγιναν πάνω στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς. Πολλές από αυτές τις αναβαθμίσεις παρέχουν σχεδόν τις ίδιες δυνατότητες με αυτές των δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς. Παρόλο που η διαχωριστική γραμμή μεταξύ των δικτύων κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς και αυτών της γενιάς 2,5 είναι λεπτή, υπάρχουν ορισμένες τεχνολογίες οι οποίες χαρακτηρίζουν τη γενιά 2,5.

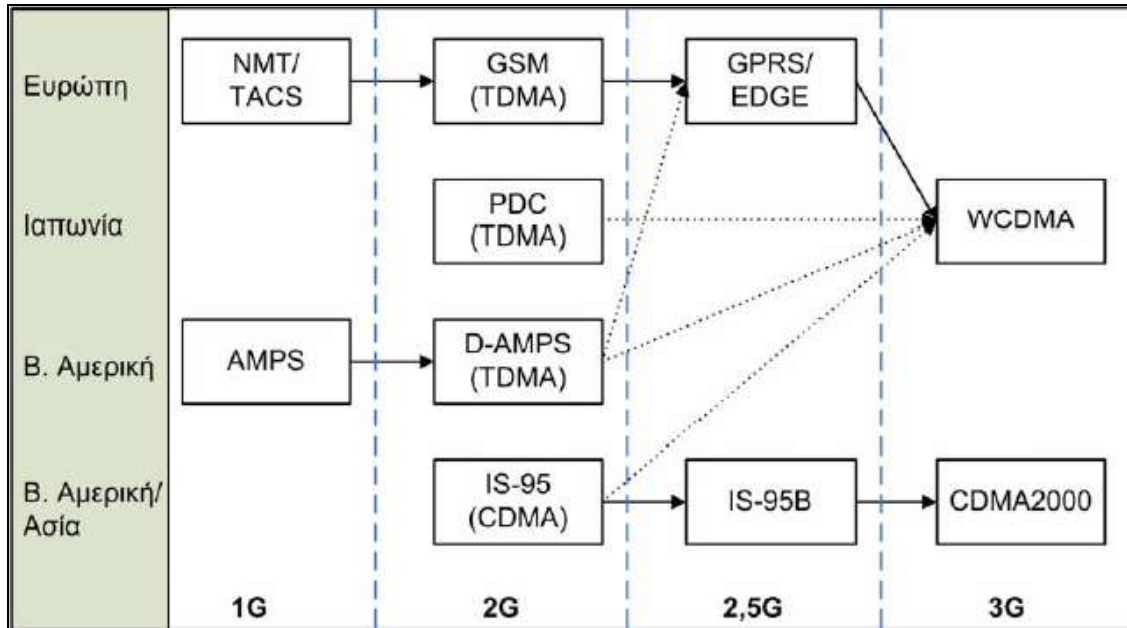
Τέτοιες τεχνολογίες είναι υπηρεσίες έξυπνου δικτύου (Intelligent Network – IN), με Προσαρμοζόμενη Εφαρμογή για Κινητή Επαυξημένη Λογική (Customized Application for Mobile Enhanced Logic – CAMEL), βελτιωμένη συμπίεση / αποσυμπίεση ομιλίας (COmpression / DECompression – CODEC), Επαυξημένο Πλήρη Ρυθμό (Enhanced Full Rate – EFR) και Προσαρμοστικό Πολλαπλό Ρυθμό (Adaptive Multirate –AMR), υπηρεσίες δεδομένων υψηλού ρυθμού και νέες αρχές μετάδοσης με Δεδομένα Μεταγωγής Κυκλώματος Υψηλής Ταχύτητας (High - Speed Circuit – Switched Data – HSCSD), Γενική Υπηρεσία Ασύρματου Πακέτου (General Packet Radio Service – GPRS) και Επαυξημένοι ρυθμοί Δεδομένων για Εξέλιξη του GSM (Enhanced Data rates for GSM Evolution – EDGE). Από τις παραπάνω, αυτές που ξεχωρίζουν είναι η **High – Speed Circuit-Switched Data (HSCSD)**, η **General Packet Radio Services (GPRS)** και η **Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE)**.

Η γρήγορη εξέλιξη των κινητών τηλεπικοινωνιών ήταν ένα από τα αναμφισβήτητα γεγονότα της δεκαετίας του 1990. Το πρώτο εμπορικό δίκτυο GSM λειτούργησε στη Φινλανδία το 1991. Την ίδια χρονιά, το ίδρυμα ETSI ξεκινούσε την προτυποποίηση της επόμενης γενιάς δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών. Το σύστημα που προέκυψε από αυτή την προτυποποίηση ονομάστηκε Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Το UMTS είναι ένα διάδοχο πρότυπο της τρίτης γενιάς του GSM, που είναι προς τα κάτω συμβατό με το GSM, χρησιμοποιώντας τον επαυξημένο πυρήνα δικτύου της φάσης 2+ του GSM. Η ανάπτυξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς δεν έγινε μόνο στο ETSI. Υπήρξαν πολλοί οργανισμοί και ερευνητικά ιδρύματα, σε παγκόσμιο επίπεδο, που είχαν τον ίδιο σκοπό.

Ο βασικός στόχος της ανάπτυξης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς είναι η παροχή των κινητών υπηρεσιών «οπουδήποτε» και «κάθε στιγμή». Αυτό σημαίνει ότι ένας χρήστης δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς μπορεί να μετακινείται οπουδήποτε και να εξυπηρετείται ακόμα και σε περιοχές όπου δεν υπάρχει κάλυψη από συστήματα τρίτης γενιάς αλλά υπάρχουν άλλου είδους ασύρματα δίκτυα. Για την ακρίβεια, ο χρήστης θα μπορεί να εξυπηρετείται από οικιακά ασύρματα συστήματα, από άλλα κυβελωτά κινητά δίκτυα καθώς και από δορυφορικά δίκτυα.

Επιπλέον, οι παρεχόμενες υπηρεσίες επεκτείνονται σε υπηρεσίες διαδικτύου και σε υπηρεσίες πολυμέσων με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (προβλέπονται ρυθμοί που

ξεκινούν από τα 144 Kbps και φτάνουν ακόμα και σε ρυθμούς της τάξης των Mbps). Με τον όρο υπηρεσίες πολυμέσων αναφερόμαστε σε υπηρεσίες κατά τις οποίες υπάρχει συνδυασμός εικόνας, ήχου και κειμένου σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο ψηφιακό περιβάλλον. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθούν τα επικρατέστερα, προς το παρόν, συστήματα τρίτης γενιάς τα οποία είναι: το **UMTS** (Ευρώπη), το **CDMA2000** (Βόρεια Αμερική) και το **NTT Docomo** (Ιαπωνία).



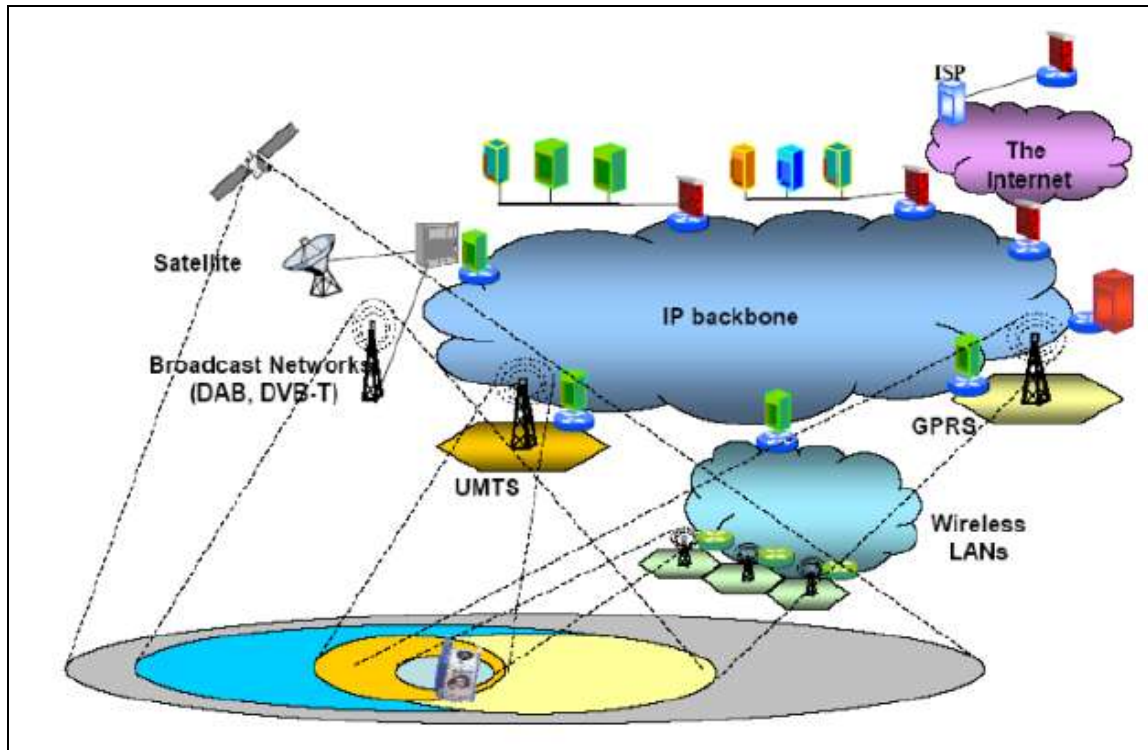
Εικόνα 35: Εξέλιξη των προτύπων για τα κυψελωτά κινητά δίκτυα μέχρι την 3^η γενιά

Με τον όρο «γενιά 3,5» αναφερόμαστε στη νέα γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας τα οποία εκτός από την τεχνολογία **WCDMA** έχουν ενσωματώσει την τεχνολογία **High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)**. Η HSDPA αποτελεί μία νέα τεχνολογία η οποία σχεδιάστηκε προκειμένου να αυξήσει τη χωρητικότητα του κατερχόμενου ασύρματου συνδέσμου για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς. Το γεγονός αυτό θεωρήθηκε απαραίτητο καθώς, στην πράξη, οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς αποδείχθηκαν χαμηλοί για πολυμεσικές εφαρμογές. Ιδιαίτερα στην περίπτωση που θα υπήρχαν πολλοί χρήστες πολυμεσικών εφαρμογών στο ίδιο κελί, αυτό θα σήμαινε ραγδαία πτώση της απόδοσης του δικτύου στο συγκεκριμένο κελί. Η βασική ιδέα του HSDPA είναι η προσθήκη ενός νέου τύπου ευρυζωνικού καναλιού το οποίο θα είναι βελτιστοποιημένο για πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Η τεχνολογία εξελίσσεται διαρκώς και παρά το γεγονός ότι η τρίτη γενιά δεν είναι ακόμη σε πλήρη λειτουργία, η ακαδημαϊκή εξερεύνηση της 4G κινητής επικοινωνίας έχει ήδη ξεκινήσει. Καταρχήν η τρίτη γενιά ασφαλώς ήταν το βασικότερο βήμα για την επίτευξη των προσωπικών τηλεπικοινωνιών, αλλά ωστόσο δεν κατάφερε να τις κάνει πραγματικότητα. Η τέταρτη γενιά θα προσεγγίσει περισσότερο τις προσωπικές επικοινωνίες παρέχοντας επικοινωνία οποιασδήποτε μορφής, σε κάθε χώρο και χρόνο, με οποιονδήποτε. Θα απαιτήσει, επίσης, καλή απόδοση επικοινωνίας, που θα αφορά κυρίως media παρά φωνή. Επιπρόσθετα, θα είναι υψηλότερου τεχνολογικού επιπέδου από τα 3G

συστήματα. Για παράδειγμα, σε σχέση με την ραδιο-τεχνολογία, η αρχή του κυψελωτού δικτύου θα ξεπεραστεί προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη κάλυψη. Στη χωρητικότητα το SDMA (Space Division Multiple Access) μπορεί να εισαχθεί με βάση τα FDMA, TDMA, CDMA. Το SDMA θα έχει προσαρμοστική εκπομπή, συνδέοντας τον κάθε χρήστη σαν να βρίσκεται σε ένα ασύρματο καλώδιο, και θα αυξάνει τη χωρητικότητα του ασύρματου συστήματος κατά κανόνα 1-2 φορές περισσότερο. Τα CN (core networks) θα υιοθετήσουν τη μεταγωγή πακέτου (κάτι σαν cell switching) ώστε να επιτρέψουν την κατανομή του εύρους κατά απαίτηση.

Όσον αφορά τις εφαρμογές, ένα τερματικό τέταρτης γενιάς δε θα παρέχει μόνο ομιλία ή εικόνα αλλά επιπλέον θα προειδοποιεί και θα ενημερώνει το χρήστη. Τα τερματικά μπορεί ακόμα να γίνουν μέρος του ανθρώπινου σώματος, ενημερώνοντας το χρήστη για την πίεσή του, τη θερμοκρασία του, κλπ. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται μια φανταστική απεικόνιση της 4G επικοινωνίας. Όπως υπολογίζεται η γενιά αυτή θα κάνει την εμφάνισή της στα επόμενα 5 χρόνια.



Εικόνα 36: Το όραμα των δικτύων 4^{ης} γενιάς

Παρακάτω περιγράφονται οι κυρίαρχες παράμετροι που σχετίζονται άμεσα με το σχεδιασμό των πιο διαδεδομένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Σε αυτές τις παραμέτρους στηρίζεται η εξέλιξη των γενεών των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, όπως αυτές περιγράφηκαν προηγουμένως, προσφέροντας ολοένα και πιο τελειοποιημένες τεχνολογίες οι οποίες εντάσσονται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο ενοποίησης σε ανώτερο επίπεδο των κινητών και ασύρματων δικτύων (εικόνα 36).

- **Αποδοτικότητα φάσματος:** Ως γνωστόν, το φάσμα αποτελεί ένα κοινό αγαθό το οποίο είναι περιορισμένο και συνεπώς οι σχεδιαστές των πρωτοκόλλων ψάχνουν συνεχώς τρόπους για να βελτιστοποιήσουν τη χρήση του. Μέχρι σήμερα έχουν

αναπτυχθεί μια σειρά από διαφορετικές τεχνικές που σχετίζονται με τις ιδιαιτερότητες του φυσικού μέσου (αέρας). Αυτές περιλαμβάνουν μεθόδους ψηφιακής τεχνολογίας πρόσβασης (duplex), πολυπλεξίας (multiplexing) και διαμόρφωσης (modulation).

- **Τεχνικές duplex:** Η επικοινωνία στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας βασίζεται στην duplex επικοινωνία (αμφίδρομη κατεύθυνσης) και οι 2 κυρίαρχες τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι οι: Frequency Division Duplex (FDD) και Time Division Duplex (TDD). Τα συστήματα FDD μπορούν να εφαρμοστούν σε περιπτώσεις συμμετρικής επικοινωνίας, π.χ. για μετάδοση φωνής, ενώ τα TDD εφαρμόζονται σε περιπτώσεις ασύμμετρων επικοινωνιών, μεταδόσεων που χαρακτηρίζονται από αιχμές τηλεπικοινωνιακού φόρτου, κλπ., όπως είναι η μετάδοση δεδομένων στο Internet. Τα συστήματα TDD χρησιμοποιούν το φάσμα αποδοτικότερα και είναι πιο ευέλικτα από τα FDD αφού μπορούν να ανταπεξέλθουν αποδοτικότερα στις ανάγκες των χρηστών, αλλάζοντας δυναμικά τους πόρους που διατίθενται για το upload ή download.
- **Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης:** ο στόχος της πολυπλεξίας είναι να εξυπηρετήσει όσο το δυνατόν περισσότερους χρήστες με τη χρήση του ίδιου bandwidth. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές multiplexing είναι: FDMA, TDMA, CDMA, hybrid CDMA/TDMA, OFDM. Από αυτές η OFDM έχει γίνει αρκετά δημοφιλής αφού κάνει αποδοτική χρήση του παρεχόμενου εύρους ζώνης και επιλύει τα προβλήματα της διακαναλικής παρεμβολής (co-channel interference) και του φαινομένου των πολλαπλών μονοπατιών (multipath fading).
- **Τεχνικές διαμόρφωσης:** ενώ στα 1G δίκτυα χρησιμοποιούνταν αναλογικές τεχνικές διαμόρφωσης, αυτές αντικαταστάθηκαν από ψηφιακές τεχνικές που παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα όπως: 1) ανθεκτικότητα στο θόρυβο και στις ατέλειες του καναλιού, 2) ευελιξία σε πολυπλεξία διαφόρων μορφών πληροφορίας, 3) ενσωμάτωση διαδικασιών ελέγχου σφαλμάτων, ισοστάθμισης, κωδικοποίησης πηγής, 4) ευελιξία σε ότι αφορά την υλοποίηση σε hardware και software.
- **Αποδοτική χρήση των πόρων:** Η μεταγωγή πακέτου συνεπάγεται ότι οι πόροι του συστήματος χρησιμοποιούνται μόνο όταν οι χρήστες στέλνουν ή δέχονται δεδομένα. Αντί να αφιερώνεται ένα ασύρματο κανάλι σε κάποιον χρήστη, για μία σταθερή χρονική περίοδο, οι διαθέσιμοι πόροι μπορούν να μοιραστούν σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα. Αυτή η αποδοτική χρήση των πόρων, συνεπάγεται ότι μεγάλοι αριθμοί χρηστών μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ίδιο εύρος ζώνης και να εξυπηρετηθούν από μία μοναδική κυψέλη. Ο πραγματικός αριθμός των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν εξαρτάται από τον τύπο της εφαρμογής που χρησιμοποιείται και από την ποσότητα δεδομένων που μεταφέρεται. Λόγω της αποδοτικότητας φάσματος του GPRS, υπάρχει λιγότερη ανάγκη για τη διατήρηση κενής χωρητικότητας που χρησιμοποιείται στις ώρες αιχμής. Έτσι, το GPRS, παρέχει στους διαχειριστές δικτύων τη δυνατότητα να μεγιστοποιήσουν τη χρήση των πόρων του δικτύου τους με έναν δυναμικό και ευέλικτο τρόπο.
- **Μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων:** Η ασύρματη διασύνδεση του EDGE, είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να διευκολύνει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από αυτούς που μπορούν να επιτευχθούν στα υπάρχοντα συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Με σκοπό την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων έχει εισαχθεί το 8PSK, μία γραμμική κωδικοποίηση υψηλού επιπέδου. Το 8PSK

προσφέρει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, μεγάλη αποδοτικότητα φάσματος και μέτρια πολυπλοκότητα υλοποίησης. Η κωδικοποίηση GMSK όπως ορίζεται στο GSM, αποτελεί επίσης μέρος της σύλληψης του EDGE. Ο ρυθμός συμβόλων είναι 271 ksps και για τις δύο κωδικοποιήσεις, οδηγώντας σε μεικτούς ρυθμούς δεδομένων ανά χρονική σχισμή. Το σχήμα του παλμού 8PSK είναι γραμμικοποιημένο GMSK, επιτρέποντάς του να χωρά στη φασματική μάσκα τη GSM. Επιπλέον, ο 8 PSK χρησιμοποιείται και στο δίκτυο UMTS, και άρα αποτελεί μια τεχνική κωδικοποίησης που χαρακτηρίζει όλα τα συστήματα τρίτης γενιάς.

- **Συμπληρωματική χρήση τεχνολογιών και προτύπων για μεγαλύτερη αξιοποίηση του παρεχόμενου εύρους ζώνης:** Είναι γενικά αποδεκτό ότι η κύρια μορφή κυκλοφορίας στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας στο μέλλον, θα είναι η κυκλοφορία δεδομένων, η οποία έχει ήδη αρχίσει να υποσκελίζει την κυκλοφορία φωνής. Με σκοπό τη δυνατότητα χρήσης προηγμένων εφαρμογών και υπηρεσιών, οι οποίες απαιτούν συνήθως μεγάλο εύρος ζώνης και πολυμεσικές δυνατότητες, η τρίτη γενιά συστημάτων κινητής τηλεφωνίας, βρίσκεται υπό ανάπτυξη. Για να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ δεύτερης και τρίτης γενιάς και να μειωθούν οι συνέπειες της καθυστέρησης εισαγωγής συστημάτων τρίτης γενιάς, εισήχθησαν οι τεχνολογίες GPRS και HSCSD, προσφέροντας κάποιες από τις δυνατότητες της τρίτης γενιάς, με βάση την υπάρχουσα υποδομή. Το EDGE, είναι μία τεχνολογία που ουσιαστικά αναβαθμίζει το GSM και τις GPRS και HSCSD, χτίζοντας πάνω στην υπάρχουσα βάση του GSM. Έτσι, δεν χρειάζεται νέα δικτυακά στοιχεία. Επίσης, παρέχει τη δυνατότητα αξιοποίησης των υπάρχουσών ζωνών συχνοτήτων με μεγαλύτερη αποδοτικότητα και χωρίς την ανάγκη για άδεια χρήσης άλλων ζωνών, που απαιτούν τα συστήματα τρίτης γενιάς. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του UMTS, ή ακόμα και σε συνδυασμό με αυτό, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα το UMTS σε υψηλό φόρτο αστικές περιοχές και το EDGE σε αγροτικές περιοχές.
- **Έλεγχος ποιότητας συνδέσμου:** Ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας είναι ότι διαφορετικοί χρήστες τείνουν να έχουν διαφορετικές ποιότητες καναλιών, σε λόγο σήματος – προς – παρεμβολή, λόγω διαφορών στην απόσταση από τον σταθμό βάσης, τις παρεμβολές και την ελάττωση της ισχύος του σήματος. Παρ' όλες τις προσπάθειες που έχουν καταβληθεί για τον έλεγχο της ποιότητας καναλιού μέσω ελέγχου ισχύος, τυπικά θα υπάρχει μία κατανομή της ποιότητας καναλιού μέσα στο σύστημα. Μία παραδοσιακή υπηρεσία όπως η ομιλία, απαιτεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας, κάτω απ' το οποίο η υπηρεσία είναι μη αποδεκτή, ενώ πάνω από αυτό, η υπηρεσία είναι καλή, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις της ποιότητας. Έτσι, ο διαχειριστής του δικτύου πρέπει να φροντίσει ώστε ελάχιστοι χρήστες να έχουν κακή ποιότητα καναλιού. Δυστυχώς, αυτό οδηγεί στο σύνηθες φαινόμενο ένα μεγάλο ποσοστό χρηστών να έχουν τέλεια ποιότητα υπηρεσίας, την οποία δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν. Το EDGE είναι σχεδιασμένο να βελτιώσει την κατάσταση, χρησιμοποιώντας έλεγχο ποιότητας συνδέσμου. Αυτός προσαρμόζει την προστασία δεδομένων στην ποιότητα του καναλιού, επιτυγχάνοντας βέλτιστο ρυθμό δεδομένων σε όλα τα κανάλια. Για να πετύχει αυτά τα χαρακτηριστικά, το EDGE εισάγει αρκετά υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης από αυτούς των GSM και TDMA/136. Αυτός είναι κι ο λόγος για την εισαγωγή του πυρήνα της ιδέας του EDGE, της κωδικοποίησης 8PSK.
- **Διασύνδεση με το Διαδίκτυο και με άλλα δίκτυα δεδομένων:** η υπηρεσία GPRS

αναπτύχθηκε ως μια προσπάθεια ενίσχυσης του συστήματος κινητής τηλεφωνίας GSM ώστε το τελευταίο να μπορεί να χειριστεί αποδοτικά κίνηση δεδομένων (data traffic) ανάμεσα σε υπολογιστικά συστήματα. Το GPRS επιτρέπει τη χρήση του κινητού για τη μεταφορά δεδομένων, συνήθως από το Διαδίκτυο, γρήγορα και εύκολα, ενώ παράλληλα παρέχει το πλεονέκτημα της αδιάκοπης σύνδεσης με αυτό. Ουσιαστικά αποτελεί την πρώτη σοβαρή προσπάθεια για διασύνδεση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας με άλλα δίκτυα, και πιο συγκεκριμένα με δίκτυα δεδομένων.

- **Μεγαλύτερες ταχύτητες και αποδοτικότερη διαχείριση του δικτύου:** Πριν την ένταξη του GPRS στις προδιαγραφές του GSM (1997) η μετάδοση δεδομένων πραγματοποιούνταν με την αποκλειστική χρήση κυκλωμάτων CSD (Circuit Switched Data) όπου η ταχύτητα περιοριζόταν στα 9,6 Kbits/s. Επιπρόσθετα, το κύκλωμα δεσμευόταν καθ' όλη τη διάρκεια της χρήσης, ανεξάρτητα από το αν πραγματοποιούνταν μεταφορά δεδομένων, με αποτέλεσμα την άσκοπη σπατάλη των διαθέσιμων πόρων του δικτύου. Αντίθετα, στο GPRS επιτρέπεται η ταυτόχρονη χρήση των ίδιων κυκλωμάτων από πολλούς χρήστες αφού αυτά αξιοποιούνται μόνο όταν πραγματοποιείται μεταφορά δεδομένων. Θεωρητικά το GPRS καθιστά εφικτή τη μεταφορά πληροφοριών στην ταχύτητα των 171,2 Kbits/s.
- **Παροχή νέων καλύτερων εφαρμογών και υπηρεσιών:** Το GPRS επικαλύπτει το υπάρχον GSM δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος με μία διεπαφή βασισμένη σε πακέτο. Έτσι, δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα να χρησιμοποιήσει μία υπηρεσία δεδομένων βασισμένη σε πακέτα. Με τον τρόπο αυτό, το GPRS διευκολύνει διάφορες νέες εφαρμογές που παλαιότερα δεν ήταν διαθέσιμες στα δίκτυα GSM, λόγω των περιορισμών ταχύτητας στα Δεδομένα Μεταγωγής Κυκλώματος (9.6 kbps) και το μήκος μηνύματος των 160 χαρακτήρων του SMS. Το GPRS καθιστά δυνατή τη χρήση όλων των διαδικτυακών εφαρμογών που είναι συνηθισμένες στα επιτραπέζια συστήματα υπολογιστών, από την περιήγηση, μέχρι τη συνομιλία (chat). Άλλες νέες εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν τη μεταφορά αρχείων και την οικιακή αυτοματοποίηση – τη δυνατότητα απομακρυσμένης χρήσης οικιακών συσκευών και μηχανημάτων. Επιπλέον, το πρότυπο UMTS δίνει τη δυνατότητα στους κινητούς χρήστες να προσθέσουν κινητικότητα στην ήδη υπάρχουσα εμπειρία τους με το διαδίκτυο, αξιοποιώντας την κινητή πρόσβαση στο διαδίκτυο (Mobile Internet Access) για το οικιακό τμήμα της αγοράς και την κινητή εσωτερική/ εξωτερική πρόσβαση (Mobile Intranet/Extranet Access) για το επαγγελματικό τμήμα. Η συσχέτιση ενός τερματικού με ένα άτομο επιτρέπει την πρόβλεψη ενός καθολικού εύρους υπηρεσιών βασισμένες στο διαδίκτυο, με βάση τις ανάγκες του χρήστη και ικανοποίηση των αναγκών αυτών μέσω κινητών portal. Αυτές είναι *υπηρεσίες που προσαρμόζονται με βάση της απαιτήσεις (Customized Infotainment Services)*.
- **Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS):** Οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας για τις τυπικές εφαρμογές μεταγωγής πακέτων ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό. Έτσι, η υποστήριξη διαφορετικών κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό. Το GPRS επιτρέπει τον καθορισμό προφίλ QoS με βάση τις παραμέτρους: Ακολουθία εξυπηρέτησης, αξιοπιστία, καθυστέρηση και όγκος έργου (throughput).
 - Η *ακολουθία εξυπηρέτησης* είναι η προτεραιότητα μίας εξυπηρέτησης σε σχέση με μία άλλη. Υπάρχουν τρία είδη προτεραιότητας: Υψηλή, κανονική και χαμηλή.
 - Η *αξιοπιστία* υποδεικνύει τα χαρακτηριστικά μετάδοσης που απαιτούνται από μία εφαρμογή: Ορίζονται 3 κλάσεις αξιοπιστίας που εγγυώνται ορισμένες μέγιστες

τιμές για την πιθανότητα απώλειας, διπλασιασμού, αλλοίωσης της σειράς και βλάβης (μη ανιχνεύσιμο σφάλμα) πακέτων.

- Οι *παράμετροι καθυστέρησης* ορίζουν μέγιστες τιμές για τη μέση καθυστέρηση και την καθυστέρηση του 95%. Η τελευταία είναι η μέγιστη εγγυημένη καθυστέρηση για το 95% των μεταφορών. Η καθυστέρηση ορίζεται ως η απ' άκρο σε άκρο καθυστέρηση μεταξύ δύο επικοινωνούντων κινητών σταθμών, ή μεταξύ ενός κινητού σταθμού και της διασύνδεσης προς ένα εξωτερικό δίκτυο πακέτων.
- Ο *όγκος έργου* καθορίζει το μέγιστο ρυθμό bits καθώς και το μέσο ρυθμό μετάδοσης από και προς το χρήστη.

Χρησιμοποιώντας αυτές τις κλάσεις, συγκεκριμένα προφίλ ποιότητας υπηρεσίας μπορούν να γίνουν αντικείμενο διαπραγματεύσεως μεταξύ του χρήστη και του δικτύου για κάθε σύνοδο, ανάλογα με την υπάρχουσα ζήτηση για ποιότητα υπηρεσίας και τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου. Η χρέωση της υπηρεσίας βασίζεται τότε στον όγκο της μεταδιδόμενης πληροφορίας, τον τύπο της υπηρεσίας και το επιλεγμένο προφίλ ποιότητας.

- **Ταυτόχρονη χρήση Υπηρεσιών Μεταγωγής Πακέτου και Υπηρεσιών Μεταγωγής Κυκλώματος:** Σε ένα δίκτυο GSM/GPRS, συμβατικές υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος (ομιλία, δεδομένα, SMS) και υπηρεσίες GPRS, μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα. Ορίζονται 3 κλάσεις κινητών σταθμών:
 - Ένας σταθμός κλάσης A υποστηρίζει ταυτόχρονη χρήση συμβατικών υπηρεσιών GSM και υπηρεσιών GPRS
 - Ένας σταθμός κλάσης B μπορεί να καταχωρηθεί στο δίκτυο με δυνατότητα χρήσης και των δύο υπηρεσιών, αλλά σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή μπορεί να χρησιμοποιεί μόνο τη μία εκ των δύο υπηρεσιών.
 - Ένας σταθμός κλάσης C μπορεί να προσαρτηθεί στο δίκτυο είτε για χρήση συμβατικού GSM είτε για χρήση GPRS. Ταυτόχρονη προσάρτηση και για τις δύο υπηρεσίες δεν είναι δυνατή, με τη μόνη εξαίρεση των μηνυμάτων SMS, που μπορούν να αποστέλλονται οποτεδήποτε.

3.2 Ανάλυση τεχνικών deployment για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

Παρακάτω θα ασχοληθούμε με την καταγραφή τεχνικών ανάπτυξης κόμβων σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιάσουμε συγκεκριμένους αλγόριθμους και τεχνικές με τις οποίες επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εκμετάλλευση του χώρου στον οποίο αναπτύσσεται το κινητό δίκτυο. Σε κάθε περίπτωση, μας ενδιαφέρουν ζητήματα όπως η πυκνότητα των κόμβων – χρηστών στο δίκτυο, η προσβασιμότητα που έχουν μεταξύ τους ή σε σχέση με άλλα δίκτυα, η επαρκής απόδοση του δικτύου, η ευκολία στη συντήρηση και τη διαχείρισή του καθώς και η διατήρηση του χαμηλού κόστους με την προσθήκη νέων χρηστών.

3.2.1 Ένας αυξητικός self – deployment αλγόριθμος για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

Στο [4] παρουσιάζονται τα βήματα ενός αλγορίθμου που εφαρμόζεται σε κινητά δίκτυα αισθητήρων ενώ δίνονται και πειραματικές μετρήσεις κατά την εφαρμογή του.

Ένα κινητό δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από μια συλλογή καταναμημένων κόμβων καθένας από τους οποίους διαθέτει ικανότητες «αίσθησης» μιας φυσικής ποσότητας, επεξεργασίας, επικοινωνίας και κινητικότητας. Το τελευταίο αυτό χαρακτηριστικό είναι και αυτό που διαφοροποιεί το κινητό από το σταθερό δίκτυο αισθητήρων. Η κινητικότητα των κόμβων – αισθητήρων διευκολύνει και διευθετεί μια σειρά από κρίσιμα ζητήματα, όπως την ικανότητα της αυτόματης ανάπτυξης (self – deploy) και της αυτό – διόρθωσης.

Περιγραφή του αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος είναι ταυτόχρονα **αυξητικός (incremental)** και **άπληστος (greedy)**. Αυξητικός είναι με την έννοια ότι μόνο ένας κόμβος αναπτύσσεται κάθε φορά και ο κάθε κόμβος που αναπτύσσεται χρησιμοποιεί τα δεδομένα που έχουν μέχρι εκείνη τη στιγμή συγκεντρωθεί από τους ήδη αναπτυγμένους κόμβους. Έτσι, ο νέο – αναπτυσσόμενος κόμβος καθορίζει τη βέλτιστη τοποθεσία στην οποία πρέπει να αναπτυχθεί.

Στόχος του αλγορίθμου είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής κάλυψης του δικτύου (total network coverage), δηλαδή της συνολικής έκτασης που μπορεί να «δει» το δίκτυο και, άρα, να αντλαμβάνονται οι αισθητήρες. Κατά την ίδια στιγμή, ο αλγόριθμος θα πρέπει να διασφαλίζει ότι ισχύει ο περιορισμός της ορατότητας (visibility constraint), δηλαδή ότι κάθε κόμβος του δικτύου θα πρέπει να «βλέπει» τουλάχιστον άλλον έναν κόμβο.

Παρακάτω περιγράφονται μια σειρά από κρίσιμες υποθέσεις που κάνει ο αλγόριθμος:

- **Ομογενοποιημένοι κόμβοι:** όλοι οι κόμβοι υποτίθεται ότι είναι ίδιοι (δηλαδή ότι έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά). Επιπλέον, κάθε κόμβος βρίσκεται πάνω σε μια κινητή πλατφόρμα ενώ είναι εφοδιασμένος με έναν αισθητήρα κλίμακας (range sensor), όπως για παράδειγμα ένας αισθητήρας λέιζερ ή μια συστοιχία sonar και μια συσκευή ασύρματης μετάδοσης, όπως για παράδειγμα μια κάρτα Ethernet.
- **Στατικό περιβάλλον:** το περιβάλλον υποτίθεται ότι είναι στατικό, δηλαδή κατά την ανάπτυξη του δικτύου η τοπολογία του περιβάλλοντος παραμένει σταθερή. Θεωρούμε, για παράδειγμα, ότι σε ένα περιβάλλον ενός κτιρίου οι οποιεσδήποτε ανοιχτές πόρτες παραμένουν ανοιχτές ενώ διάφορα πετάσματα – φυσικά εμπόδια δεν μετακινούνται. Φυσικά, η ίδια η διαδικασία της ανάπτυξης περιλαμβάνει την τροποποίηση του ήδη υπάρχοντος περιβάλλοντος αφού ήδη υπάρχοντες κόμβοι μπορεί να παρεμποδίζουν ο ένας τον άλλον.
- **Μη μοντελοποίηση του περιβάλλοντος:** ο αλγόριθμος υποτίθεται ότι αναπτύσσεται σε περιβάλλοντα τα οποία δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν ποσοτικά ή/και ποιοτικά (π.χ. το πόσο μεγάλος είναι ένας χώρος, αν είναι ξηρός ή υγρός, αν περιλαμβάνει και τι είδους εμπόδια, πόσο γρήγορα μεταβάλλεται με το χρόνο ή με μια άλλη φυσική ποσότητα, κλπ.). Πράγματι, σε ένα πραγματικό περιβάλλον (π.χ. σε μια φυσική καταστροφή) στο οποίο απαιτείται η ανάπτυξη κινητών κόμβων είναι σχεδόν αδύνατο να υπάρχει η εκ των προτέρων επίγνωση των χαρακτηριστικών του προκειμένου αυτό να μπορεί να μοντελοποιηθεί.
- **Πλήρης επικοινωνία:** υποθέτουμε ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι σε θέση να επικοινωνήσουν με έναν απομακρυσμένο σταθμό βάσης (remote station). Ο σταθμός

αυτός είναι υπεύθυνος για την ορθή εκτέλεση του αλγορίθμου. Είναι αξιοσημείωτο να αναφέρουμε ότι δεν είναι απαραίτητο όλοι οι κόμβοι να βρίσκονται εντός της ασύρματης εμβέλειας του σταθμού – βάσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα σύνολο κινητών κόμβων σχηματίζει ένα είδος «τυχαίου» (ad-hoc) δικτύου στο οποίο η επικοινωνία μπορεί να γίνεται τόσο μέσω ενός κεντρικού κόμβου (εδώ του σταθμού βάσης) όσο και μέσω διαδοχικών κόμβων μέσω μεταπήδησης (hopping) (multihop δίκτυα).

- **Εντοπισμός:** υποθέτουμε ότι οι χωρικές συντεταγμένες ενός κόμβου είναι γνωστές μέσω ενός τυχαίως εφαρμοζόμενου γενικού συστήματος καρτεσιανών συντεταγμένων. Ωστόσο, ο παρόν αλγόριθμος αξιοποιεί τον εντοπισμό μέσω ομάδων (team localization) κατά την οποία οι κόμβοι μπορούν να αυτοπροσδιορίζουν την τοποθεσία τους μετρώντας μόνο τις μεταξύ τους αποστάσεις.
- **Περιορισμός της ορατότητας:** Εδώ ακριβώς έρχεται και ο περιορισμός της ορατότητας (visibility constraint). Δηλαδή, για να εφαρμοστεί το team localization κατά τον εντοπισμό των κόμβων θα πρέπει κάθε κόμβος να «βλέπει» τουλάχιστον άλλον έναν κάθε φορά. Μάλιστα, για να καλύπτεται ο περιορισμός δεν είναι ανάγκη οι κόμβοι να είναι μεταξύ τους ορατοί κάθε στιγμή : υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος είναι εφοδιασμένος με μια μορφή οδομέτρου ή εσωτερικού πλοηγού ο οποίος επιτρέπει τον εντοπισμό κατά τη διάρκεια εκείνων των χρονικών διαστημάτων στα οποία ο κόμβος δεν μπορεί να προσεγγιστεί από άλλον.

Βήματα του αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος χωρίζεται στις παρακάτω 4 φάσεις : αρχικοποίηση, επιλογή, εκχώρηση, εκτέλεση

- **Βήμα 1^ο – Αρχικοποίηση:** κάθε κόμβος βρίσκεται κάθε φορά σε μία από τις 3 καταστάσεις : waiting, active, deployed. Όπως υποδηλώνουν και οι ονομασίες των καταστάσεων, ένας waiting κόμβος περιμένει για να γίνει deployed. Ένας active κόμβος βρίσκεται στη διαδικασία του deploying ενώ ένας deployed κόμβος έχει ήδη αναπτυχθεί εντός του δικτύου. Κατά την αρχικοποίηση, όλοι οι κόμβοι βρίσκονται σε κατάσταση waiting με την εξαίρεση ότι ένας μόνο κόμβος είναι σε κατάσταση deployed. Αυτός ο συγκεκριμένος κόμβος θα αποτελεί και το σημείο εκκίνησης του δικτύου (network anchor) ενώ δεν υπόκειται στον περιορισμό της ορατότητας.
- **Βήμα 2^ο – Επιλογή:** τα δεδομένα που συλλέγονται από τους κόμβους που είναι σε κατάσταση deployed συνδυάζονται προκειμένου να σχηματοποιηθεί ένας χάρτης του περιβάλλοντος. Αυτός ο χάρτης αναλύεται προκειμένου να επιλεγεί η τοποθεσία (θέση με βάση τις καρτεσιανές συντεταγμένες) ή ο στόχος (δηλαδή η θέση) του επόμενου κόμβου προς ανάπτυξη.
- **Βήμα 3^ο – Εκχώρηση:** κατά την πιο απλή περίπτωση, η επιλεγμένη τοποθεσία, με βάση τον προηγούμενο χάρτη, εκχωρείται στον επόμενο κόμβο που βρίσκεται σε κατάσταση waiting. Τότε η κατάσταση του κόμβου αλλάζει από waiting σε active. Στην πιο κοινή περίπτωση, η εκχώρηση είναι μια πιο περίπλοκη διαδικασία κατά την οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλα τα προβλήματα που προέρχονται από τους ήδη deployed κόμβους (αυτοί μπορεί να παρεμβάλλονται ως φυσικά εμπόδια για τους waiting κόμβους). Με την έννοια αυτή, για να λύσει ο αλγόριθμος τις όποιες

διενέξεις παρουσιάζονται μεταξύ των κόμβων, έχει τη δυνατότητα αναθεώρησης της εκχώρησης της κατάστασης για τους ήδη deployed κόμβους. Δηλαδή μπορεί να αλλάξει την κατάσταση ενός αριθμού κόμβων από deployed σε active.

- **Βήμα 4^ο – Εκτέλεση:** οι κόμβοι που είναι σε κατάσταση active αναπτύσσονται σειριακά στις τελικές τους θέσεις. Η κατάσταση κάθε κόμβου μπορεί να μεταβάλλεται από active σε deployed κατά την άφιξη του κόμβου στη θέση του.

Τα παραπάνω βήματα 2 έως και 4 επαναλαμβάνονται έως ότου όλοι οι κόμβοι αναπτυχθούν εντός του δικτύου.

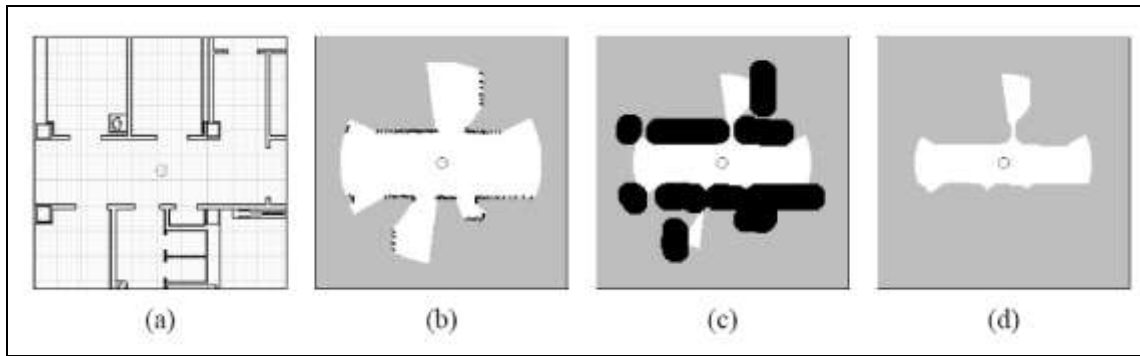
Η διαδικασία της επιλογής (βήμα 2 του αλγορίθμου) βασίζεται σε μια σειρά από σχετικά απλές πολιτικές επιλογής τοποθεσιών. Αυτές οι πολιτικές ακολουθούν ευριστικά μοντέλα (heuristics) προκειμένου να καθοδηγήσουν τη διαδικασία της επιλογής. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες των deployed κόμβων συνδυάζονται προκειμένου να δημιουργηθεί ένα **πλέγμα κατοχής (occupancy grid)**. Σε κάθε κελί αυτού του grid ανατίθεται μια από 3 καταστάσεις: free, occupied, unknown. Ένα κελί είναι free αν δεν περιέχει καθόλου εμπόδια. Αντίστοιχα, ένα occupied κελί περιέχει ένα ή περισσότερα εμπόδια ενώ ένα unknown κελί είναι άγνωστο αν περιλαμβάνει ή όχι εμπόδια.

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια Bayesian τεχνική προκειμένου να καθορίσει την πιθανότητα του να είναι κάθε κελί occupied και, με τον τρόπο αυτό, να υπολογίσει την κατάστασή του (προφανώς ορίζοντας συγκεκριμένα κατώφλια για τα επίπεδα των πιθανοτήτων των καταστάσεων).

Στο πλέγμα κατοχής, κάθε κελί που μπορεί να «δεί» ένας ή περισσότεροι κόμβοι μπορεί να ταξινομηθεί ως free ή occupied. Αντίστοιχα μόνο τα κελιά εκείνα που δεν μπορεί να τα δει κανένας κόμβος μαρκάρονται ως unknown. Μέσω, λοιπόν, του πλέγματος, μπορούμε να καλύπτουμε κάθε φορά τον περιορισμό της ορατότητας (visibility constraint) απλά με την ανάθεση τοποθεσιών στους κόμβους που βρίσκονται σε κάποιο ελεύθερο χώρο.

Ωστόσο τα κελιά του πλέγματος που μαρκάρονται ως free δεν αντιπροσωπεύουν απαραίτητα ασφαλείς deployment τοποθεσίες για τους νέους κόμβους : αφού οι κόμβοι έχουν πεπερασμένο μέγεθος, δεν μπορούν να τοποθετηθούν κοντά σε κελιά που είναι είτε σε κατάσταση occupied είτε σε κατάσταση unknown. Επιπλέον, μπορεί να υπάρχουν κελιά σε κατάσταση free και τα οποία είναι τελείως απρόσιτα. Για παράδειγμα, ένας κόμβος μπορεί να βλέπει ένα κελί που είναι free μέσω ενός μικρού χωροταξικού ανοίγματος, μέσα από το οποίο δεν μπορεί να διέλθει. Για τη διευθέτηση αυτών των προβλημάτων το πλέγμα χωρίζεται εκ των υστέρων στο **πλέγμα παραμετροποίησης (configuration grid)** και στο **πλέγμα προσιτότητας (reachability grid)**.

Τα 3 είδη πλεγμάτων φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Στο (a) φαίνεται το τμήμα ενός περιβάλλοντος εσωτερικού χώρου που περιλαμβάνει έναν απλό κόμβο. Στο (b) απεικονίζεται το πλέγμα κατοχής. Σ' αυτό τα λευκά κελιά είναι σε κατάσταση free, τα γκρι σε κατάσταση unknown και τα μαύρα σε κατάσταση occupied (δεν υπάρχουν ακόμα). Στο (c) φαίνεται το πλέγμα παραμετροποίησης. Σ' αυτό τα μαύρα κελιά είναι occupied, τα λευκά είναι free και τα γκρι σε κατάσταση unknown. Τέλος, στο (d) φαίνεται το πλέγμα προσιτότητας. Σ' αυτό τα λευκά κελιά είναι προσιτά ενώ τα γκρι είναι απρόσιτα.



Εικόνα 37: Τα 3 είδη πλεγμάτων που αξιοποιεί ο self – incremental αλγόριθμος

Από την παραπάνω εικόνα συμπεραίνουμε ότι το σύνολο των κελιών που είναι προσιτά (που μπορούν να τα «δεί» ο κόμβος στο κέντρο του χώρου στο (a)) είναι ένα υποσύνολο των κελιών που είναι free στο configuration grid. Τα τελευταία είναι, με τη σειρά τους, υποσύνολο των κελιών που είναι free στο occupancy grid. Έτσι, επιλέγοντας μια θέση που βρίσκεται εντός του χώρου που είναι προσιτός (δηλαδή το σύνολο των free reachable κελιών) διασφαλίζουμε ταυτόχρονα ότι ο κόμβος που πρόκειται να αναπτυχθεί στη θέση αυτή είναι ορατός από έναν τουλάχιστον άλλο κόμβο ο οποίος δεν έχει κανένα εμπόδιο με το περιβάλλον (δηλ. υπάρχει line – of – sight μεταξύ των 2 κόμβων).

Σχολιασμός πειραματικών μετρήσεων

Σύμφωνα με το [4], διεξήχθη μια σειρά από εκτενή πειράματα στα οποία πάρθηκαν μετρήσεις για 2 κρίσιμα ζητήματα απόδοσης: 1) την περιοχή κάλυψης του αλγορίθμου, 2) το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε στο περιβάλλον δωματίου της εικόνας 36(a) με 50 κόμβους εφοδιασμένους με αισθητήρες βεληνεκούς 4m. Ακολουθώντας την πολιτική της επιλογής μέσω μεγιστοποίησης του χώρου κάλυψης χρησιμοποιώντας το reachability grid, οι τιμές που πάρθηκαν για την κάλυψη έφταναν στο 70% έως 80% του συνολικού εμβαδού του χώρου. Αντίστοιχα, ο χρόνος εκτέλεσης μετρήθηκε σε ανεκτά πλαίσια των 10-20 sec.

- **Περιοχή κάλυψης:** Η περιοχή κάλυψης μετριέται μετρώντας τον αριθμό των free κελιών στο πλέγμα κατοχής και πολλαπλασιάζοντάς τον με το εμβαδό της περιοχής που καλύπτει κάθε ένα από τα κελιά αυτά. Σχολιάζοντας τα αποτελέσματα, είναι εμφανές ότι με αύξηση του αριθμού των deployed κόμβων (οι οποίοι είχαν στο πείραμα αισθητήρες σταθερού βεληνεκούς 4m) η περιοχή κάλυψης αυξάνεται γραμμικά, ανεξαρτήτως της πολιτικής επιλογής τοποθεσιών που θα ακολουθήσει ο αλγόριθμος κατά το βήμα 2 της επιλογής. Επιπλέον, θα περίμενε κανείς ότι η περιοχή κάλυψης αυξάνεται τετραγωνικά με την αύξηση του βεληνεκούς του αισθητήρα. Ωστόσο, σε ένα πραγματικό περιβάλλον κάτι τέτοιο είναι μάλλον απίθανο ακριβώς λόγω των φυσικών εμποδίων. Αυτά είναι, τελικά, και αυτά που θα κυριαρχήσουν κατά τη διαδικασία του deployment των κόμβων.
- **Χρόνος εκτέλεσης:** Από την εκτέλεση των πειραμάτων βγαίνει το συμπέρασμα ότι με σταθερό βεληνεκές των αισθητήρων των κόμβων (4m), ο υπολογιστικός χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι μια πολυωνυμική συνάρτηση (της μορφής bn^u) του αριθμού των deployed κόμβων. Μια τέτοια συνάρτηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι με τη σειριακή ανάπτυξη των κόμβων, ο χρόνος εκτέλεσης όλων των φάσεων του

αλγορίθμου είναι ανάλογος του αθροίσματος των αποστάσεων που διανύονται από όλους τους κόμβους που είναι active. Αυτό το άθροισμα ισούται με την απόσταση που θα διένυε ένας απλός κόμβος σε ένα περιβάλλον που θα ήταν πλήρως ελεύθερο από εμπόδια. Έτσι, ο χειρότερος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι της τάξης του $O(n^2)$, όπου n ο αριθμός των deployed κόμβων, ενώ αντίστοιχα η βέλτιστη περίπτωση είναι της τάξης του $O(n)$ ή ακόμα και του $O(n^{1/2})$.

Από τα πειράματα καταδεικνύεται ότι ο self – deployment αλγόριθμος που παρουσιάστηκε και οι ευριστικές μέθοδοι στις οποίες στηρίζεται τον καθιστούν ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την ανάπτυξη κόμβων σε ένα κινητό δίκτυο αισθητήρων.

3.2.2 Η θεωρία των δυναμικών πεδίων για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

Στο [5] παρουσιάζεται μια άλλη εκδοχή του προβλήματος της ανάπτυξης κόμβων σε κινητά δίκτυα αισθητήρων. Αυτή βασίζεται στη θεωρία των δυναμικών πεδίων (potential fields). Τόσο το περιβάλλον ανάπτυξης του δικτύου, το οποίο έχει άγνωστα χαρακτηριστικά στη γενική περίπτωση, όσο και τα χαρακτηριστικά του δικτύου και οι θεωρήσεις που γίνονται για τους κόμβους είναι οι ίδιες με την περίπτωση του αλγορίθμου της ενότητας 3.2.1.

Η κύρια διαφορά με την επίλυση που προτείνει ο self – incremental αλγόριθμος στο πρόβλημα της βέλτιστης κάλυψης στον ελάχιστο δυνατό χρόνο και με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους, είναι ότι η προσέγγιση που εξετάζεται εδώ βασίζεται στα δυναμικά πεδία. Σε αυτή την προσέγγιση οι κόμβοι μεταχειρίζονται ως εικονικά σωματίδια που υπόκεινται σε «εικονικές δυνάμεις». Αυτές οι δυνάμεις έχουν τα εξής χαρακτηριστικά :

- απωθούν τον κάθε κόμβο από τους γύρω του κόμβους και από διάφορα εμπόδια του περιβάλλοντος,
- διασφαλίζουν ότι μια αρχική συμπαγής ομαδοποίηση των κόμβων θα διαδοθεί αρκετά γρήγορα ώστε να μεγιστοποιήσει την περιοχή κάλυψης του δικτύου,
- καθοδηγούν τους κόμβους κατάλληλα ώστε να φτάσουν τελικά σε κατάσταση στατικής ισορροπίας στην οποία όλοι οι κόμβοι θα είναι πλήρως ακινητοποιημένοι,
- δίνουν τη δυνατότητα στο δίκτυο να αντιδρά στις όποιες εξωτερικές επιδράσεις – παρεμβάσεις γίνουν στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, αν ένα εμπόδιο αλλάξει θέση στο περιβάλλον, το δίκτυο θα επανασυσταθεί αυτομάτως για να προσαρμοστεί πλήρως στη νέα αλλαγή του περιβάλλοντος έτσι ώστε να επανέλθει στην κατάσταση της στατικής ισορροπίας.
- εφαρμόζονται στους κόμβους με τέτοιο τρόπο ώστε αυτοί να μετακινούνται μόνο αυτό είναι απαραίτητο, αποταμιεύοντας έτσι ένα μεγάλο κομμάτι ενέργειας.

Η εφαρμογή της θεωρίας των δυναμικών πεδίων θεωρεί μόνο μια υπόθεση για την ανάπτυξη των κόμβων: ότι κάθε κόμβος είναι εφοδιασμένος με κατάλληλο αισθητήρα που του επιτρέπει να καθορίζει την απόσταση και πληροφορίες διόπτευσης τόσο από τους γειτονικούς του κόμβους όσο και από τα διάφορα εμπόδια. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, ο κάθε κόμβος καθορίζει, στη συνέχεια, τις εικονικές δυνάμεις που εφαρμόζονται πάνω του και τις μετατρέπει σε κατάλληλα διανύσματα ελέγχου. Αυτά δίνονται ως είσοδος στους κινητήρες τους.

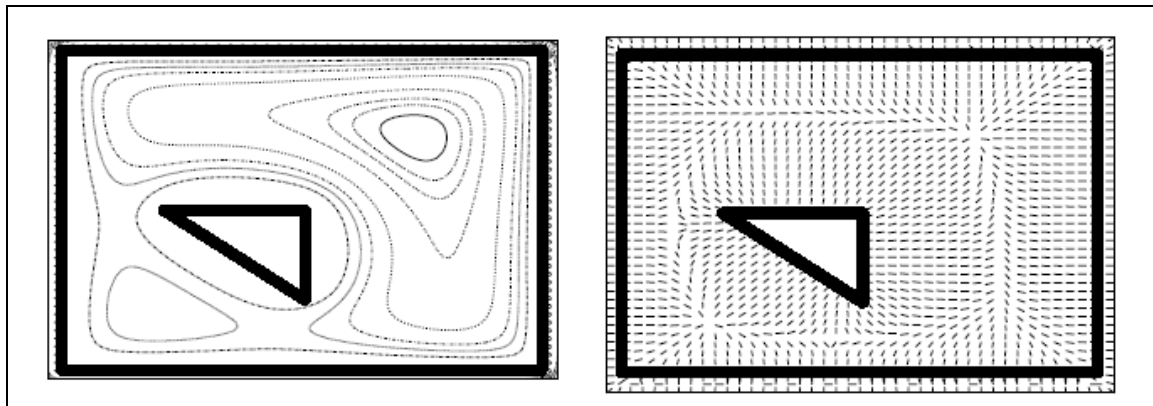
Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η παραπάνω προσέγγιση δεν απαιτεί τη διαχείριση καμιάς άλλης πληροφορίας. Ουσιαστικά, δηλαδή, **δεν απαιτεί την εκ των προτέρων επίγνωση ενός βασικού μοντέλου που μπορεί να περιγράψει επαρκώς το περιβάλλον, ούτε δεδομένα συντεταγμένων και άλλες πληροφορίες για την ενδο-επικοινωνία των κόμβων.** Με τον τρόπο αυτό, ο αλγόριθμος που βασίζεται στην προσέγγιση αυτή καθίσταται ιδιαίτερα ανθεκτικός και εφαρμόσιμος σε περιβάλλοντα όπου οι επικοινωνίες μεταξύ των κόμβων είναι δύσκολες έως αδύνατες ενώ είναι ιδιαίτερα κλιμακώσιμος, όσον αφορά την ποσότητα των κόμβων και το εύρος της περιοχής κάλυψης.

Θεωρητικό υπόβαθρο για δυναμικά πεδία

Σύμφωνα με την προσέγγιση των δυναμικών πεδίων το πρόβλημα της ανάπτυξης των κόμβων σε ένα άγνωστο περιβάλλον ουσιαστικά ανάγεται στο πρόβλημα της «πινακοθήκης» ή το πρόβλημα του «μουσείου» (art gallery or museum problem). Το πρόβλημα αυτό θεωρείται κλασικό στην υπολογιστική γεωμετρία (computational geometry) και αφορά τον καθορισμό, εντός ενός πολυγωνικού περιβάλλοντος, του ελάχιστου αριθμού των καμερών που απαιτούνται προκειμένου το περιβάλλον αυτό να καθίσταται πλήρως παρατηρήσιμο.

Θεωρώντας, λοιπόν, την έννοια του δυναμικού πεδίου στο πρόβλημα της ανάπτυξης κόμβων, τα πεδία θα πρέπει να δημιουργούνται με τέτοιο τρόπο γύρω από κάθε κόμβο έτσι ώστε αυτοί να απωθούνται από γειτονικούς κόμβους και από άλλα φυσικά εμπόδια. Με αυτή την προϋπόθεση το δίκτυο μπορεί να διαδωθεί από μόνο του εντός του άγνωστου περιβάλλοντος.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ένα δυναμικό πεδίο που παράγεται εντός ενός περιβάλλοντος.



Εικόνα 38: Η εφαρμογή δυναμικού πεδίου σε περιβάλλον με φυσικό εμπόδιο

Στην αριστερή εικόνα οι κλειστές γραμμές ορίζουν ίσες τιμές δυναμικού ενώ στη δεξιά φαίνεται η κατεύθυνση των δυνάμεων που αναπτύσσονται με βάση τις γραμμές αυτές.

Σύμφωνα με το μαθηματικό υπόβαθρο του δυναμικού πεδίου που εισάγει το [5], η ιδέα της θεωρίας του αλγορίθμου μπορεί να αναλυθεί στα επόμενα βήματα :

- κάθε κόμβος υπόκειται σε μια δύναμη F που θα αποτελεί ένα βαθμωτό άνυσμα επί του δυναμικού πεδίου U : $F = -\nabla U$.

- χωρίζουμε το δυναμικό πεδίο U σε ένα κομμάτι U_0 εξαιτίας των εμποδίων και ένα άλλο κομμάτι U_n εξαιτίας των υπολοίπων κόμβων. Τότε θα ισχύει : $U = U_0 + U_n$ και αντίστοιχα $F = F_0 + F_n$.

- αν θεωρήσουμε ότι κάθε κόμβος και κάθε εμπόδιο διαθέτει μια ηλεκτρική διαφορά

δυναμικού τότε μπορούμε να γράψουμε για τα U_0 και U_n :
$$U_0 = -k_0 \sum_i \frac{1}{r_i}$$
 και

$$U_n = -k_n \sum_i \frac{1}{r_i}$$
. Στις σχέσεις αυτές τα k_0, k_n είναι σταθερές που εκφράζουν την

δύναμη του πεδίου και r_i είναι η ευκλείδια απόσταση μεταξύ του κόμβου και του εμποδίου i (για τη U_0) ή του κόμβου i (για τη U_n).

- Οπότε, από τις παραπάνω σχέσεις, αν θεωρήσουμε ως x τη θέση του κόμβου και x_i τη θέση του εμποδίου i , τότε η απόσταση r_i θα είναι : $r_i = |x_i - x|$.
- Έχοντας εκφράσει τις U_0 και U_n , η συνολική δύναμη F_0 και F_n αντίστοιχα θα αποτελεί τη μερική παράγωγο (ανάλυση του ανάδελτα) επί όλων των αποστάσεων x του δυναμικού πεδίου.

- Με μαθηματικούς όρους θα είναι :
$$F_0 = -\frac{dU_0}{dx} = -\sum_i \frac{dU_0}{dr_i} \frac{dr_i}{dx} \Rightarrow F_0 = -\sum_i \frac{1}{r_i^2}$$
 και

$$F_n = -\frac{dU_n}{dx} = -\sum_i \frac{dU_n}{dr_i} \frac{dr_i}{dx} \Rightarrow F_n = -\sum_i \frac{1}{r_i^2}.$$

Από τα παραπάνω βήματα είναι ξεκάθαρο ότι μπορούμε να υπολογίσουμε τις δυνάμεις που πρέπει να ασκηθούν στους κόμβους απευθείας από τα δεδομένα που λαμβάνουν αυτοί από τους αισθητήρες τους, **χωρίς τη χρήση κάποιου χάρτη ή ενός καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων.**

Επίτευξη στατικής ισορροπίας

Πρίν την εκτέλεση του αλγορίθμου είναι απαραίτητο και ένα ακόμα στοιχείο. Θα πρέπει ουσιαστικά να φανεί ότι το δίκτυο ως ολότητα θα πρέπει σε κάποια χρονική στιγμή, με βάση τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις στους κόμβους, να φτάσει σε κατάσταση στατικής ισορροπίας (δηλαδή σε κατάσταση όπου όλοι οι κόμβοι είναι ακίνητοι). Για να γίνει αυτό θα πρέπει να μελετηθεί η συνολική ενέργεια του δικτύου ως φυσικού συστήματος.

Κάθε κόμβος, ως φυσικό σώμα εντός του δυναμικού πεδίου, διαθέτει τόσο δυναμική όσο και κινητική ενέργεια. Η δυναμική ενέργεια αποδίδεται στον κόμβο εφόσον αυτός βρίσκεται εντός του δυναμικού πεδίου ενώ η κινητική προκύπτει από την κίνηση του κόμβου λόγω των δυνάμεων που ασκούνται πάνω του. Οπότε η συνολική ενέργεια του συστήματος θα αποτελεί το άθροισμα όλων των ενεργειών των κόμβων.

Αν σε κάθε κόμβο μάζας m ασκηθεί δύναμη F , τότε η συνολική επιτάχυνση του κόμβου θα ικανοποιεί την παρακάτω **εξίσωση κίνησης (equation of motion)**:

$$\ddot{x} = (F - v\dot{x}) / m$$

όπου \ddot{x} είναι η επιτάχυνση (2^η παράγωγος της απόστασης), \dot{x} είναι η ταχύτητα (1^η παράγωγος της απόστασης) και v είναι ένας συντελεστής τριβής που εφαρμόζεται στην ταχύτητα που αναπτύσσει ο κόμβος.

Με βάση την παραπάνω σχέση, ο συντελεστής τριβής είναι υπεύθυνος για την απώλεια ενέργειας κατά την ανάπτυξη του δικτύου. Οπότε η συνολική ενέργεια του συστήματος θα μειώνεται μονοτονοειδώς στο 0 με την πάροδο του χρόνου. Κι ακριβώς επειδή η δυναμική ενέργεια του συνόλου των κόμβων έχει κάτω φράγμα που ορίζεται από το εφαρμοζόμενο δυναμικό πεδίο, η συνολική κινητική ενέργεια του συστήματος θα τείνει ασυμπτωτικά στο 0. Επομένως, το δίκτυο θα πρέπει οπωσδήποτε να φτάσει κάποια στιγμή σε στατική ισορροπία.

Ωστόσο η παραπάνω θεώρηση δεν έχει λάβει υπόψη ότι το ίδιο το περιβάλλον είναι δυναμικό και μπορεί κι αυτό να μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα. Με την έννοια αυτή, οι όποιες αλλαγές του περιβάλλοντος μπορεί να προσθέτουν ή να αφαιρούν ποσά από τη συνολική ενέργεια του συστήματος. Δηλαδή σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον περιμένουμε ότι το δίκτυο δεν θα φτάσει ποτέ σε στατική ισορροπία.

Μια τέτοια κατάσταση, όμως, δεν θα ισχύσει στις συχνότερες περιπτώσεις όπου ένα περιβάλλον μεταβάλλεται στο χρόνο περιοδικά ή κατά διαστήματα. Ως παράδειγμα αναφέρουμε ένα δίκτυο που αναπτύσσεται εντός ενός κλειστού δωματίου. Το δίκτυο θα εξαπλωθεί προκειμένου να καλύψει όλο το διαθέσιμο χώρο και μετά θα σταματήσει. Ωστόσο, αν μια πόρτα του δωματίου που ήταν κλειστή, ξαφνικά ανοίξει, τότε το δίκτυο θα αναπτυχθεί εκ νέου, διαδιδόμενο και πέρα από τον αρχικό χώρο που κάλυπτε, φτάνοντας σε κάποια άλλη νέα ισορροπία.

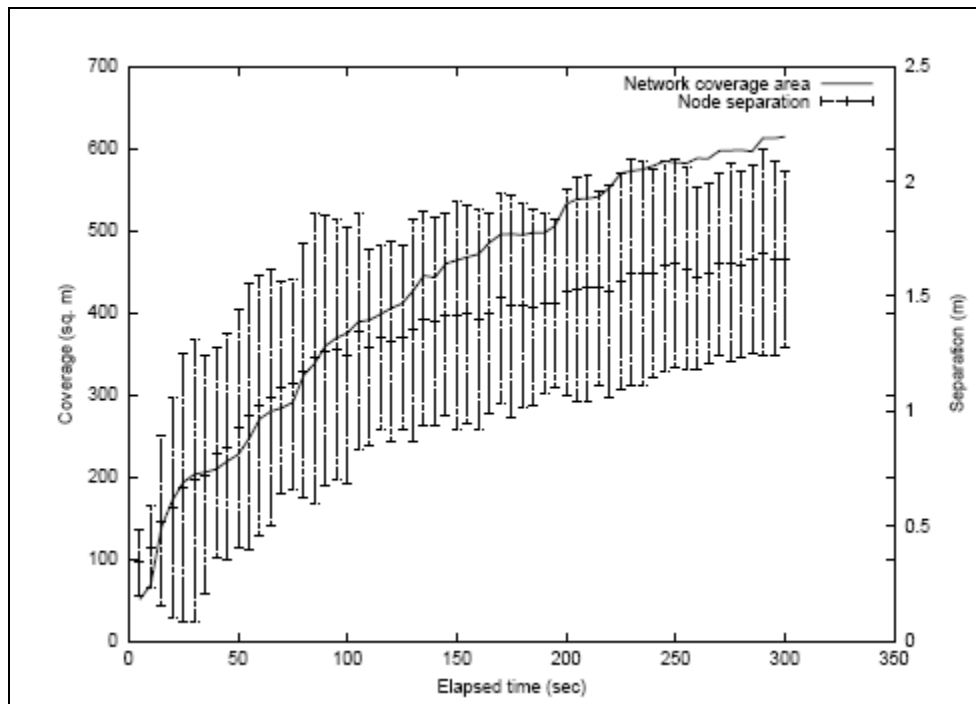
Σχολιασμός πειραματικών μετρήσεων

Σύμφωνα με το [5], για τις ανάγκες της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ένα δίκτυο αποτελούμενο από 100 κόμβους καθένας από τους οποίους ήταν εφοδιασμένος με έναν αισθητήρα σάρωσης λέιζερ, μια πολύ-κατευθυντική κινητή ρομποτική βάση και μια ανακλαστική πηγή φωτός. Μέσω των ανακλαστικών πηγών κάθε κόμβος αναγνωρίζει έναν άλλον κόμβο από ένα φυσικό εμπόδιο. Το πείραμα διεξήχθη σε έναν όροφο νοσοκομείου, όπως δείχνει η παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 39: Το περιβάλλον εφαρμογής του αλγορίθμου δυναμικού πεδίου

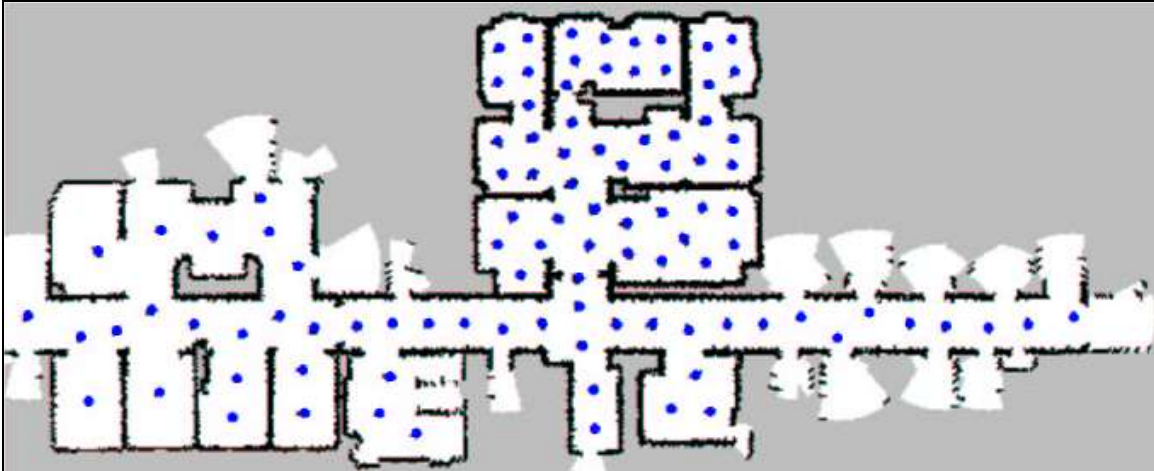
Κατά τη διάρκεια του πειράματος (300s) καταμετρήθηκαν τόσο η περιοχή κάλυψης όσο και ο χρόνος που χρειάστηκε το δίκτυο για να αναπτυχθεί πλήρως. Η σχέση αυτή φαίνεται στην επόμενη γραφική παράσταση. Από αυτή είναι εμφανές ότι ο ρυθμός κάλυψης είναι αρκετά μεγάλος στα πρώτα δευτερόλεπτα της εκτέλεσης του πειράματος ενώ μειώνεται αισθητά όσο περνάει ο χρόνος. Επιπλέον, η περιοχή κάλυψης (μαύρη συνεχής γραμμή στο διάγραμμα) φαίνεται να προσεγγίζει τα 600 τετραγωνικά μέτρα (στο τέλος του πειράματος) ενώ συνεχίζει να αυξάνεται (έστω με μικρό ρυθμό) και μετά την πάροδο των 300s.



Εικόνα 40: Κάλυψη στο χρόνο για τον αλγόριθμο δυναμικού πεδίου

Ένα άλλο σημαντικό συμπέρασμα που βγαίνει από το πείραμα είναι η ομαλότητα που παρουσιάζει ο μέσος όρος των αποστάσεων μεταξύ των κόμβων. Εντός του χρόνου εκτέλεσης του πειράματος αυτός διατηρήθηκε περίπου στο 1,5 μέτρο με αυξομείωση της τάξης των 0,4 μέτρων. Κάτι τέτοιο οφείλεται κυρίως στην ανυπαρξία ρητής απόδοσης συντεταγμένων στους κόμβους από κάποιο κεντρικό μηχανισμό καθώς και στην δομική μεταβλητότητα του περιβάλλοντος (πολλά πετάσματα, μικρές και πυκνές είσοδοι, κλπ.).

Η περιοχή κάλυψης που πέτυχε το δίκτυο στο παραπάνω πείραμα με την εφαρμογή της θεωρίας των δυναμικών πεδίων ήταν ιδιαίτερα υψηλής ποιότητας. Αυτή φαίνεται στην επόμενη εικόνα, όπου με άσπρο είναι η ορατή περιοχή από τους κόμβους, με μπλε είναι οι κόμβοι και με γκρι είναι οι περιοχές που δεν έχουν καλυφθεί.



Εικόνα 41: Η περιοχή κάλυψης με την εφαρμογή του αλγορίθμου δυναμικών πεδίων

Από την εικόνα αναδεικνύεται και ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του αλγορίθμου. Η περιοχή κάλυψης είναι συνεχής και δεν υπάρχουν κενά ως προς την κάλυψη των επιμέρους περιοχών. Κάτι τέτοιο οφείλεται στην επίτευξη ενός σταθερού μέσου ορίου απόστασης μεταξύ των κόμβων.

3.3 Παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό

Ο σχεδιασμός των δικτύων κινητής τηλεφωνίας στηρίζεται σε μια σειρά τεχνικών προκλήσεων και παραγόντων που θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό τους. Η λεπτομερής καταγραφή και η μελέτη αυτών των παραγόντων μπορεί να απαντήσει στο ερώτημα του ποια τεχνική deployment θα εφαρμοστεί για να τηρεί τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

- **Εκτενής και ταυτόχρονα τυχαία παράταξη των κόμβων:** Τα περισσότερα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων αισθητήρων, οι οποίοι απλώνονται τυχαία στις περιοχές ενδιαφέροντος ή παρατάσσονται πυκνά σε συγκεκριμένα κρίσιμα σημεία (απρόσιτες περιοχές). Το σύστημα πρέπει να αυτορυθμίζεται πριν την έναρξη της εφαρμογής που εξυπηρετεί.
- **Πλεονασμός δεδομένων:** Η πυκνή παράταξη των κόμβων συμβάλλει στον υψηλό συσχετισμό των δεδομένων που παρέχονται από κάποιον από αυτούς με τα δεδομένα των γειτονικών του.
- **Περιορισμένοι πόροι:** Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας περιορίζονται από τέσσερις τύπους πόρων: ενέργεια, υπολογιστική ισχύς, μνήμη και εύρος ζώνης. Λόγω του μικρού μεγέθους των κόμβων, η μόνη δυνατή πηγή ενέργειας είναι οι μπαταρίες. Επιπλέον, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αναπτύσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε οι κόμβοι τους να μην είναι προσπελάσιμοι, οπότε οι μπαταρίες των τελευταίων δεν μπορούν να επαναφορτισθούν ή να αντικατασταθούν. Συγχρόνως, οι μνήμες τους είναι περιορισμένες με συνέπεια να μπορεί να επιτευχθεί επίσης περιορισμένη υπολογιστική ισχύς, ενώ το εύρος ζώνης στο ασύρματο μέσο επικοινωνίας είναι σημαντικά μικρό.

- **Ad hoc αρχιτεκτονική και αυτόνομη λειτουργία:** Η έλλειψη συγκεκριμένης υποδομής και της ανθρώπινης επέμβασης στη λειτουργία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας κάνουν το σύστημα να σχεδιάζεται έτσι ώστε να δημιουργεί, να διατηρεί και γενικά να ελέγχει από μόνο του τις συνδέσεις μέσα στο δίκτυο (αυτόνομο).
- **Δυναμικές τοπολογίες και περιβάλλον:** Η τοπολογία και η συνδεσιμότητα ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας συχνά ποικίλλει εξαιτίας της περιορισμένης αξιοπιστίας των κόμβων ως προς τις λειτουργίες τους. Για παράδειγμα, μπορεί ένας κόμβος να σταματήσει να λειτουργεί λόγω εξάντλησης της παρεχόμενης ενέργειας οποιαδήποτε στιγμή, χωρίς να ενημερώσει κατάλληλα τους άλλους κόμβους εκ των προτέρων. Επίσης, νέοι κόμβοι μπορούν να προστεθούν σε τυχαία χρονική στιγμή και θέση σε μια περιοχή χωρίς να υπάρχει προγενέστερη δήλωση του συνόλου των κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο. Επιπλέον, το περιβάλλον που παρακολουθούν τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ποικίλλει και αυτό, πράγμα το οποίο μπορεί να κάνει μερικούς κόμβους να δυσλειτουργήσουν.
- **Επιρρεπές σε λάθη ασύρματο μέσο:** Οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω του ασύρματου μέσου επικοινωνίας, στο οποίο συμβαίνουν αρκετά λάθη. Για παράδειγμα, σε μερικές εφαρμογές το περιβάλλον επικοινωνίας είναι αρκετά θορυβώδες και μπορεί να προκαλέσει αλλοιώσεις στα δεδομένα των μεταδιδόμενων σημάτων.
- **Ποικιλία από εφαρμογές:** τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάπτυξη ποικίλων εφαρμογών, όπως στόχευση, ανίχνευση αντικειμένων, παρακολούθηση συνθηκών περιβάλλοντος, και άλλες εφαρμογές παρεμφερείς της παραγράφου 2.2 οι απαιτήσεις για τις διάφορες εφαρμογές ποικίλλουν και αυτές σημαντικά.
- **Ασφάλεια:** Η εξασφάλιση της απόκρυψης (κρυπτογράφησης) των μεταδιδόμενων δεδομένων και η ασφάλεια της επικοινωνίας είναι ιδιαίτερα σημαντικές κατά το σχεδιασμό των κινητών δικτύων.
- **Ποιότητα συστήματος:** Η ποιότητα που παρέχεται από ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας επηρεάζεται άμεσα από την ακρίβεια με την οποία τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους κόμβους αντιπροσωπεύουν αυτό που πραγματικά συμβαίνει στο περιβάλλον τους. Σε αντίθεση με άλλα δίκτυα, ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας στηρίζεται στη συνάθροιση των λαμβανόμενων δεδομένων από κάθε κόμβο για την περιγραφή, για παράδειγμα, ενός φαινομένου και όχι σε μεμονωμένα δεδομένα. Κατά συνέπεια, το πλήθος ή η πυκνότητα των κόμβων προσδιορίζει και την αντίστοιχη ποιότητα του συστήματος. Ωστόσο, μία άλλη παράμετρος που επηρεάζει την ποιότητα είναι το γεγονός ότι σε συστήματα στα οποία χρησιμοποιούνται δίκτυα κινητής τηλεφωνίας υπάρχει σημαντική καθυστέρηση. Αυτή κάνει τα δεδομένα κάθε χρονική στιγμή να μην αντιπροσωπεύουν την παρούσα κάθε φορά κατάσταση του περιβάλλοντος του δικτύου, αλλά μία προηγούμενη ή μεταβατική, γεγονός το οποίο μπορεί πολλές φορές να οδηγήσει σε λανθασμένες αντιδράσεις από μέρους των χειριστών του συστήματος.

Για όλες τις παραπάνω παραμέτρους θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η αρχιτεκτονική υποδομή του δικτύου. Παρακάτω περιγράφουμε τα κυριότερα συστατικά της.

3.3.1 Κινητό Κέντρο Ελέγχου

Η προσέγγιση του **κινητού κέντρου ελέγχου** είναι μια συνηθισμένη λύση για την εκμετάλλευση της κίνησης έτσι ώστε το κέντρο ελέγχου να φτάνει σε κοντινή απόσταση από τους κόμβους που ανιχνεύουν γεγονότα. Επίσης, είναι μια εξαιρετική προσέγγιση για την επίτευξη μιας εξισορρόπησης φορτίου ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου. Έτσι, η χρήση ενός κινητού κέντρου ελέγχου συχνά προσφέρει μεγάλη βελτίωση στο χρόνο ζωής του δικτύου.

Το κινούμενο κέντρο ελέγχου μπορεί να κινείται τυχαία, προβλέψιμα ή ελεγχόμενα. Η τυχαία κίνηση ισοδυναμεί με την περίπτωση όπου άνθρωποι «φοράνε» το κέντρο ελέγχου, το έχουν πάνω τους δηλαδή, και κινούνται τυχαία συλλέγοντας της πληροφορίες από αισθητήρες που έχουν τοποθετηθεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή (όπως η αγορά για παράδειγμα). Προβλέψιμη μπορεί να είναι η κίνηση ενός λεωφορείου ή τρένου, ενώ ρομπότ μπορούν να κινούνται ελεγχόμενα για να εκτελέσουν ένα συγκεκριμένο έργο.

Οι καθυστερήσεις στη μετάδοση των δεδομένων είναι η κύρια αδυναμία των τυχαίων και των προβλέψιμων μοντέλων κίνησης. Στα μοντέλα αυτά, οι κόμβοι αφού ανιχνεύσουν τις πληροφορίες από το περιβάλλον τους, πρέπει να περιμένουν το κέντρο ελέγχου να εισέλθει στην εμβέλειά τους για να συλλέξει τα δεδομένα. Ο χρόνος της αναμονής μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές στις δύο αυτές προσεγγίσεις, προκαλώντας μεγάλες καθυστερήσεις στη μεταφορά των δεδομένων. Συνεπώς, οι δύο αυτές προσεγγίσεις πιθανώς να είναι ακατάλληλες για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

Χρησιμοποιώντας ελεγχόμενη κίνηση, συγκεκριμένοι αλγόριθμοι οδηγούν τις κινούμενες οντότητες κατά έναν επιθυμητό τρόπο, ξεπερνώντας το πρόβλημα της καθυστέρησης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το τίμημα είναι το κόστος υλοποίησης (σε υλικό) των κέντρων ελέγχων. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη ένα ισχυρότερο μοντέλο (όπως καθολική γνώση του δικτύου), σε αντίθεση με το αρκετά ασθενέστερο μοντέλο της τυχαίας κίνησης.

Η προσέγγιση του κινητού κέντρου ελέγχου έχει αρκετά μειονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι όλοι οι κόμβοι θα πρέπει να γνωρίζουν τη θέση του, ώστε να δρομολογούν τα δεδομένα προς αυτό. Επιπλέον, στις περισσότερες περιπτώσεις, το κέντρο ελέγχου αποτελεί μια πύλη (gateway) σε ένα backbone δίκτυο. Θα είναι, λοιπόν, δύσκολο να κατασκευαστεί ένα δίκτυο όπου ένα κινητό κέντρο ελέγχου θα είναι συνέχεια συνδεδεμένο με το backbone δίκτυο.

3.3.2 Κινητοί Αναμεταδότες

Η χρήση κινητών κέντρων ελέγχου είναι πιο αποδοτική από τη χρήση κινητών αναμεταδοτών, ιδιαίτερα ως προς το χρόνο ζωής του δικτύου. Όμως οι αναμεταδότες είναι πιο ευεργετικοί σε εφαρμογές όπου δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί κινητό κέντρο ελέγχου (για παράδειγμα αφιλόξενο έδαφος).

Εισάγοντας κινητούς αναμεταδότες ως κόμβους με άφθονους πόρους σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, μπορεί να επιτευχθεί η επιμήκυνση του χρόνου ζωής των κόμβων που

αποτελούν σημεία συμφόρησης στο δίκτυο. Οι κινητοί αναμεταδότες μπορούν να κινούνται τυχαία, προβλέψιμα ή ντετερμινιστικά.

3.3.3 Κινητοί Αισθητήρες

Ενώ οι κινήσεις των κέντρων ελέγχου και των αναμεταδοτών βελτιώνουν κυρίως το χρόνο ζωής του δικτύου, οι κινητοί κόμβοι, μέσω της ρύθμισης της τοπολογίας του δικτύου, οδηγούν στη βελτίωση του ποσοστού κάλυψής του ενώ, επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βελτίωση της διαδικασίας ανίχνευσης. Με στόχο την όσο το δυνατόν καλύτερη εκπλήρωση των λειτουργιών επίβλεψης για τις οποίες σχεδιάστηκε ένα δίκτυο αισθητήρων, αυτό πρέπει να καλύψει το μεγαλύτερο μέρος της υπό παρατήρηση περιοχής όπου συμβαίνουν τα γεγονότα.

Η λειτουργία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μετακινώντας τους κόμβους των αισθητήρων προς επιθυμητές θέσεις. Κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερος σημαντικό όταν δεν είναι δυνατή η επανατοποθέτηση νέων αισθητήρων. Εξαιτίας των περιορισμένων αποθεμάτων ενέργειας σε κάθε αισθητήρα, η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντικό θέμα στο σχεδιασμό οποιουδήποτε πρωτοκόλλου για κινητούς κόμβους αισθητήρων. Εφόσον οι κινήσεις των κόμβων και η μεταφορά των δεδομένων καταναλώνουν ενέργεια, θα πρέπει τα πρωτόκολλα που σχεδιάζονται να ελαχιστοποιούν τις μετακινήσεις και τα μηνύματα που ανταλλάσσονται και, παράλληλα, να ικανοποιούν ένα ικανοποιητικό όριο κάλυψης του δικτύου.

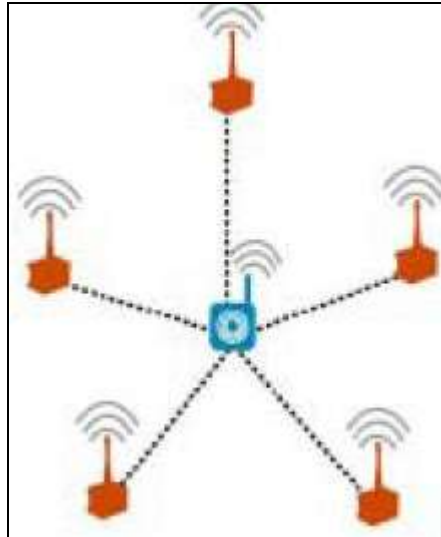
3.4 Χαρακτηριστικά των τοπολογιών δικτύων κινητής τηλεφωνίας

Σε προηγούμενη παράγραφο αναλύσαμε μια σειρά κρίσιμων παραμέτρων που πρέπει να καλύπτονται κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Τέτοιες παράμετροι καθορίζουν την επιλογή της καταλληλότερης τοπολογίας για ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Πιο συγκεκριμένα, κατά την εγκαθίδρυση των ασύρματων ζεύξεων μεταξύ των κινητών κόμβων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ζητήματα όπως η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, η ευκολία χρήσης, οι δυνατότητες κλιμάκωσης, οι χρόνοι απόκρισης κατά την αμφίδρομη επικοινωνία, το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη μετάδοση και η αξιοπιστία.

Παρακάτω παρουσιάζουμε 3 χαρακτηριστικές δικτυακές τοπολογίες για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (αστέρα, πλέγματος, υβριδική) και αναδεικνύουμε τις δυνατότητες και τις αδυναμίες τους.

3.4.1 Τοπολογία αστέρα (star)

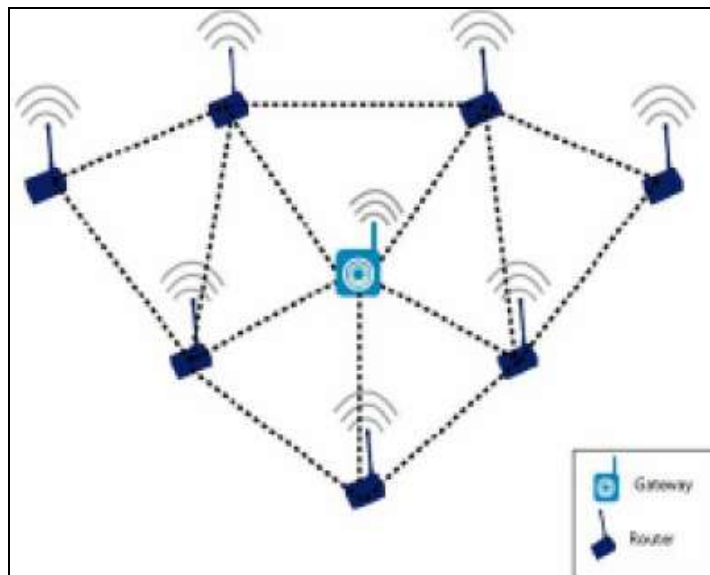
Στην τοπολογία αστέρα υπάρχει ένας κεντρικός σταθμός βάσης (gateway) και μια σειρά κόμβων (endpoints) που συνδέονται σ' αυτόν μέσω απλής ασύρματης ζεύξης. Η αποστολή και η λήψη δεδομένων από και προς κάθε κόμβο – αισθητήρα γίνεται με απευθείας επικοινωνία με το σταθμό βάσης (single hopping) ενώ, αντίθετα, οι κόμβοι δεν μπορούν να επικοινωνήσουν άμεσα μεταξύ τους.



Εικόνα 42: Τοπολογία star κινητού δικτύου

Κύρια πλεονεκτήματα της παραπάνω τοπολογίας είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους και η δυνατότητα εύκολης κλιμάκωσης. Αντίθετα η παραπάνω τοπολογία παρουσιάζει σοβαρό πρόβλημα αν «χαθεί» ο σταθμός βάσης (ουσιαστικά καταρρέει). Έτσι, δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστη επιλογή και στο γεγονός αυτό συντείνει και η ανυπαρξία εναλλακτικών μονοπατιών για τη διευθέτηση της κίνησης.

3.4.2 Τοπολογία πλέγματος (mesh)



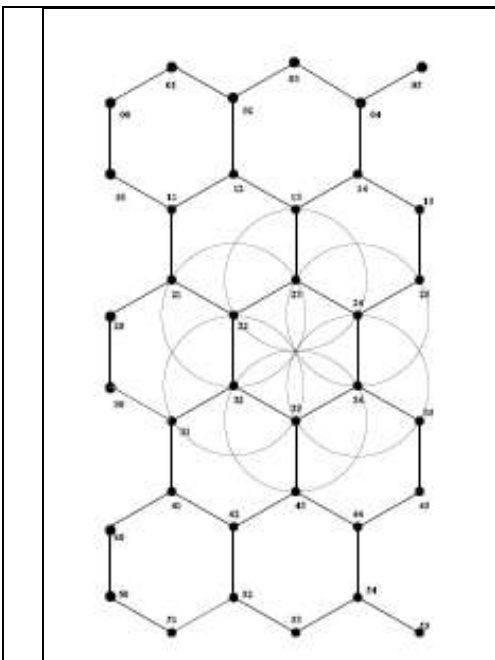
Εικόνα 43: Τοπολογία mesh κινητού δικτύου

Στο είδος αυτό της τοπολογίας υπάρχει μεν ένας κεντρικός σταθμός βάσης, ωστόσο οι κόμβοι – αισθητήρες μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας πλέγματα. Στην περίπτωση αυτή κάποιιοι, αν όχι όλοι οι κόμβοι, θα πρέπει να είναι ικανοί να δρομολογούν την κίνηση προς άλλους κόμβους. Με την έννοια αυτή, η πληροφορία που

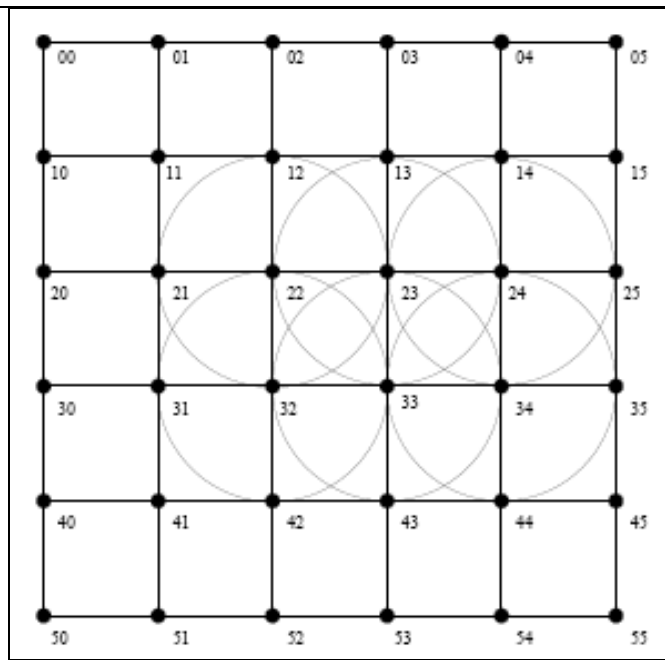
αποστέλλει ένας κόμβος προς έναν άλλον ενδέχεται να περάσει κι από άλλους κόμβους (multi-hopping).

Κύριο πλεονέκτημα της mesh τοπολογίας είναι ότι είναι αρκετά πιο αξιόπιστη από αυτήν του αστέρα αφού δεν υπάρχει ένα συγκεκριμένο σημείο αποτυχίας του δικτύου. Επιπλέον, σε περίπτωση αποτυχίας κάποιου κόμβου υπάρχει μια σειρά εναλλακτικών διαδρομών που μπορούν να εξυπηρετήσουν την κίνηση και να αποφευχθεί έτσι η κατάρρευση του δικτύου. Αντίθετα, ένα αρνητικό χαρακτηριστικό της ύπαρξης πολλαπλών κόμβων – δρομολογητών είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας λόγω της μεγαλύτερης χρήσης όλο και περισσότερων πόρων (μνήμη, CPU) και η αυξανόμενη καθυστέρηση κατά την επικοινωνία.

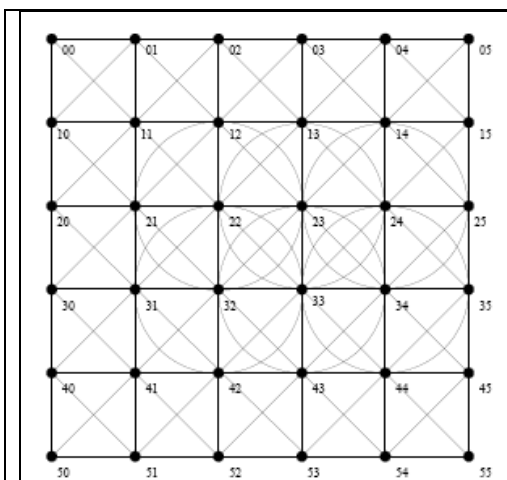
Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται διάφορες 2D και 3D mesh τοπολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν σε πλήθος πρακτικών εφαρμογών (πηγή [12]).



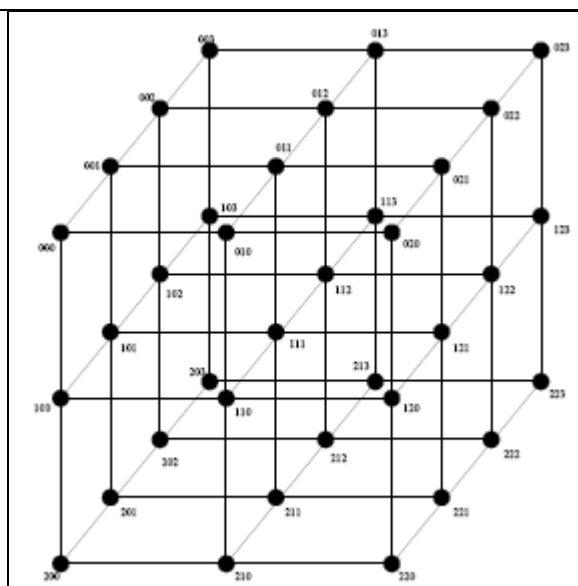
Εικόνα 44: 2D mesh με μέγιστο όριο 3 γειτονικούς κόμβους



Εικόνα 45: 2D mesh με μέγιστο όριο 4 γειτονικούς κόμβους



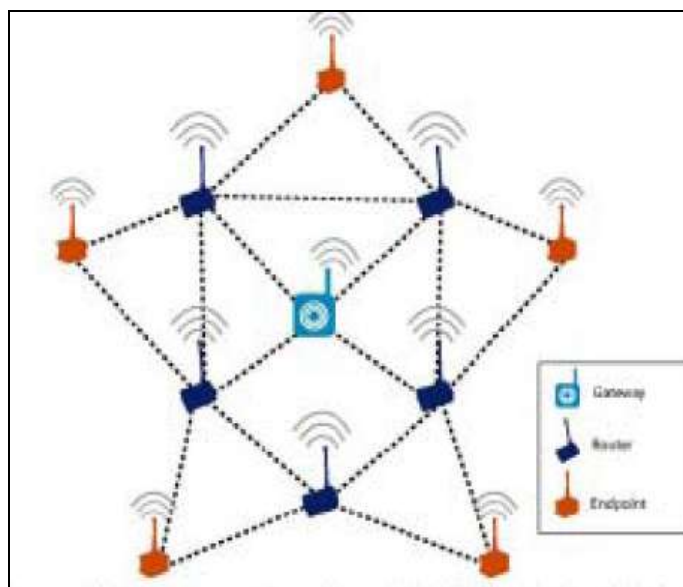
Εικόνα 46: 2D mesh με μέγιστο όριο 6 γειτονικούς κόμβους



Εικόνα 47: 3D mesh με μέγιστο όριο 6 γειτονικούς κόμβους

3.4.3 Υβριδικές τοπολογίες αστέρα – πλέγματος (hybrid)

Σε μια υβριδική τοπολογία μπορούν να αξιοποιηθούν και οι 2 παραπάνω λογικές τοπολογιών. Πιο συγκεκριμένα, οι κόμβοι – αισθητήρες μπορούν να συνδεθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν μια τοπολογία αστέρα στο κέντρο του οποίου θα υπάρχει όχι ένας απλός σταθμός βάσης αλλά μια συστάδα από δρομολογητές. Αυτοί θα συνδέονται μεταξύ τους έτσι ώστε να σχηματοποιούν ένα mesh το οποίο στο κέντρο του θα έχει έναν κεντρικό σταθμό βάσης.



Εικόνα 48: Υβριδική τοπολογία κινητού δικτύου

Κύριο πλεονέκτημα της hybrid τοπολογίας είναι η αυξημένη αξιοπιστία αφού πάλι δεν έχουμε ένα συγκεκριμένο σημείο αποτυχίας του δικτύου ενώ υπάρχει πάλι μια πληθώρα εναλλακτικών επιλογών δρομολόγησης. Σε σχέση με την mesh τοπολογία, η hybrid παρουσιάζει μείωση όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων, αφού δεν είναι όλοι οι κόμβοι δρομολογητές ενώ όσοι δεν είναι επικοινωνούν απευθείας μόνο με έναν ή περισσότερους δρομολογητές. Ωστόσο, ο περιορισμός αυτός μπορεί να αποβεί ένα σημαντικό πρόβλημα κατά την κλιμάκωση του δικτύου.

3.5 Χαρακτηριστικά εφαρμογών

Σε ένα πολύ συνηθισμένο σενάριο, ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας αποτελείται από κόμβους οι οποίοι ανιχνεύουν γεγονότα από το τριγύρω περιβάλλον τους και, χρησιμοποιώντας ένα αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης, στέλνουν τα δεδομένα που συνέλεξαν στο κέντρο ελέγχου. Σε αυτό το σενάριο έχει παρατηρηθεί πως οι κόμβοι που βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο ελέγχου εξαντλούν πιο γρήγορα τα αποθέματα ενέργειας που διαθέτουν. Οι κόμβοι αυτοί αναμεταδίδουν δεδομένα από όλους τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου προς το κέντρο ελέγχου, καθώς επίσης και τα πακέτα από το κέντρο ελέγχου προς όλο το υπόλοιπο δίκτυο. Κατά συνέπεια, οι κόμβοι που είναι τοποθετημένοι πιο κοντά στα κέντρα ελέγχου «πεθαίνουν» σύντομα από την εξάντληση της ενέργειάς τους με αποτέλεσμα τα κέντρα ελέγχου να αποσυνδέονται από το υπόλοιπο δίκτυο. Το πρόβλημα αυτό αναφέρεται ως το «πρόβλημα των γειτόνων του κέντρου ελέγχου».

Η ιδέα της κίνησης στα δίκτυα αισθητήρων δίνει σημαντικές νέες δυνατότητες οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν στην ικανοποίηση των χαρακτηριστικών και των απαιτήσεων που παρουσιάζουν οι εφαρμογές των κινητών δικτύων. Μερικές από αυτές τις απαιτήσεις αναλύονται παρακάτω:

- **Μικρές και φθηνές συσκευές κόμβων αισθητήρων:** Το χαμηλό κόστος και το μικρό μέγεθος των συσκευών αισθητήρων αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που συμβάλλουν στην τυχαία ανάπτυξη και επέκταση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας σε μια περιοχή ενδιαφέροντος. Για μια μεγάλης κλίμακας εφαρμογή, το κόστος των συσκευών αισθητήρων συμβάλλει σημαντικά στο συνολικό κόστος της εφαρμογής αυτής. Εκτός αυτού, όσο μικρότερη είναι η συσκευή, τόσο μικρότερη αλλοίωση δημιουργείται στα δεδομένα των αισθητήρων και τόσο πιο εύκολα γίνεται η τοποθέτησή τους για το σχηματισμό του δικτύου.
- **Αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου:** Το κυριότερο πλεονέκτημα από την ύπαρξη ενός ή περισσότερων κινητών κέντρων ελέγχου είναι η αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου. Όπως περιγράψαμε παραπάνω, λόγω των πολλών από κόμβο σε κόμβο μεταδόσεων, ξοδεύονται σημαντικά ποσά ενέργειας, ενώ λόγω της στάσιμης τοποθέτησης του κέντρου ελέγχου, η περιοχή γύρω από αυτό δέχεται μεγάλο φόρτο εργασίας. Ένα τέτοιο φαινόμενο οδηγεί στη εξάντληση των συσκευών και τη διακοπή της λειτουργίας του δικτύου.
- **Μικρότερη επικοινωνία μεταξύ των συσκευών:** Ένα κινητό κέντρο ελέγχου μπορεί να μειώσει την απόστασή του από τις συσκευές, απαιτώντας έτσι λιγότερες μεταδόσεις για τη μεταφορά των δεδομένων. Συνεπώς, εξοικονομούνται σημαντικά ποσά ενέργειας στις συσκευές. Από την άλλη, για τη μετακίνηση του κέντρου ελέγχου ξοδεύεται ενέργεια. Ωστόσο θεωρείται ότι η λειτουργικότητα του δικτύου δεν επηρεάζεται, αφού το κέντρο ελέγχου μπορεί να είναι κάποιο όχημα που κατευθύνεται από ανθρώπους ή κάποιο αυτόματο ρομπότ που περιοδικά επιστρέφει σε σταθμούς υποστήριξης για

ανεφοδιασμό.

- **Αποδοτική διαχείριση αραιών δικτύων:** Ένα σημαντικό όφελος των κινητών κέντρων ελέγχου είναι η δυνατότητα για καλύτερο χειρισμό δικτύων με χαμηλό αριθμό κόμβων που μπορεί να μην συνδέονται μεταξύ τους. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πρέπει να είναι σε θέση να ανακαλύπτουν μονοπάτια από διαδοχικούς κόμβους – γείτονες. Σε αραιά δίκτυα είναι πολύ πιθανόν να μην υπάρχει τέτοιο μονοπάτι προς κάποιους κύβους. Το κινητό κέντρο ελέγχου μπορεί να γεφυρώσει τέτοια κενά και αυτό συνεπάγεται το γεγονός ότι μπορεί να μειωθεί ο αριθμός των κόμβων που πρέπει να απλωθούν σε μία περιοχή, μειώνοντας έτσι το λειτουργικό κόστος του δικτύου. Επιπλέον, οι κόμβοι μπορούν να μειώσουν και την ισχύ εκπομπής τους στα αναγκαία επίπεδα για την επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου, μειώνοντας έτσι ακόμα περισσότερο την κατανάλωση ενέργειας.
- **Προβληματικές περιοχές:** Το κινητό κέντρο ελέγχου μπορεί να παρακάμψει προβληματικές περιοχές που βρίσκονται μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος, όπως είναι μικρές λίμνες, περιοχές με πυκνή βλάστηση ή ανώμαλο έδαφος που εμποδίζουν την επικοινωνία. Στην περίπτωση των στατικών δικτύων απαιτούνται εξειδικευμένα πρωτόκολλα που ξοδεύουν πολύ ενέργεια για να παρακάμψουν τέτοιες προβληματικές περιοχές. Επομένως η παρακολούθηση πιο τραχιών περιοχών γίνεται ευκολότερη.
- **Αξιοπίστη επικοινωνία:** Σε πολλές εφαρμογές, τα δεδομένα πρέπει να μεταδοθούν αξιόπιστα μέσω ενός θορυβώδους, επιρρεπούς σε λάθη και χρονικά μεταβαλλόμενου ασύρματου καναλιού (π.χ. εντός ενός δυναμικού άγνωστου και χρονικά μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος). Έτσι, η μετάδοση από κόμβο σε κόμβο εμπεριέχει μία πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος σε κάθε μετάδοση. Επιπλέον, η συνολική πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος στην επικοινωνία ανάμεσα σε δύο απομακρυσμένους κόμβους αυξάνεται αθροιστικά με κάθε μετάδοση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η επαλήθευση και η διόρθωση των δεδομένων σε κάθε επίπεδο επικοινωνίας του δικτύου είναι κρίσιμα για την παροχή ακριβέστερων αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση εμφάνισης σφάλματος, είτε ξαναμεταδίδονται τα δεδομένα σπαταλώντας ενέργεια είτε χάνονται. Η μείωση του αριθμού μεταδόσεων που απαιτούνται στην περίπτωση του κινητού κέντρου ελέγχου βοηθά στην αποφυγή τέτοιων προβλημάτων.
- **Προστασία κρίσιμων δεδομένων:** σε στρατιωτικές εφαρμογές και γενικότερα εφαρμογές που υπάρχουν θέματα εμπιστευτικών δεδομένων, γίνεται πιο δύσκολη η υποκλοπή τους. Στην περίπτωση του στατικού δικτύου, ο αντίπαλος μπορεί να υποκλέψει μεγάλο μέρος της πληροφορίας χρησιμοποιώντας συσκευές παρακολούθησης ή καταλαμβάνοντας κόμβους σε στρατηγικά σημεία. Με την μείωση του αριθμού μεταδόσεων και τη μείωση της απόστασης που διανύει η πληροφορία, μόνο ένα πολύ μικρό μέρος της γίνεται διαθέσιμο σε όλο το δίκτυο και επομένως μειώνεται η ποσότητα των διαρροών πληροφορίας.
- **Τοπική επεξεργασία και συνάθροιση δεδομένων:** Προκειμένου να αποβληθεί κάπως ο πλεονασμός στα δεδομένα, οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να συνεργαστούν έτσι ώστε να αναπτύξουν ποικίλη τοπική επεξεργασία. Έτσι, αντί να στέλνουν τα μη επεξεργασμένα δεδομένα κατευθείαν στον προορισμό, οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν τοπικά να τα αθροίζουν-ομαδοποιούν και να τα επεξεργάζονται, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής, και ύστερα να τα στέλνουν κατάλληλα μορφοποιημένα.

4. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΔΙΚΤΥΑΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΣΤΟ 802.11

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks – WLANs) είναι σχεδιασμένα βάσει μίας τεχνολογίας σύμφωνα με την οποία ένα τερματικό (π.χ. κάποιος προσωπικός υπολογιστής ή οποιαδήποτε άλλη συσκευή που χρησιμοποιεί την τεχνολογία WLAN) επικοινωνεί με άλλα τερματικά χωρίς τη χρήση καλωδίων. Τα WLAN παρέχουν όλα τα προνόμια των ενσύρματων τοπικών δικτύων, είναι όμως πολύ πιο ευέλικτα, δεν θέτουν περιορισμούς στην επικοινωνία «βάσει γεωγραφικής θέσης» και είναι αποδεδειγμένα από δυσκίνητο και ακριβό εξοπλισμό. Η ακτίνα δράσης ενός τέτοιου δικτύου μπορεί να είναι από κάποιες δεκάδες μέχρι και κάποιες εκατοντάδες μέτρα και, με την έννοια αυτή, επιτρέπουν τη διασύνδεση ενός κτιρίου ή μίας πανεπιστημιούπολης.

Προκειμένου να επιτευχθεί η διασύνδεση ασυρμάτων τοπικών δικτύων και ο κάθε χρήστης να έχει πρόσβαση τόσο σε ασύρματα όσο και σε ενσύρματα δίκτυα, οι παγκόσμιοι οργανισμοί δημιουργίας προτύπων θέσπισαν πρότυπα λειτουργίας στα οποία βασίζονται τα σημερινά ασύρματα τοπικά και προσωπικά δίκτυα (WPANs – Wireless Personal Area Networks). Κάνοντας μια έρευνα αγοράς στην αγορά πληροφορικής, κάποιος θα παρατηρούσε την μεγάλη αφθονία σε προϊόντα που υλοποιούν διάφορα ασύρματα πρωτόκολλα και τα οποία υπόσχονται εύκολες και, κυρίως, γρήγορες λύσεις για τις δικτυακές μας ανάγκες. Την τελευταία δεκαετία πολλά είναι τα πρότυπα που διεκδικούν ένα κομμάτι της αγοράς. Bluetooth, HiperLAN και 802.11x είναι κάποια από τα πολυδιαφημιζόμενα ονόματα προτύπων.

Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγράψουμε ένα από τα πιο διαδεδομένα πρότυπα για το σχεδιασμό WLANs, το πρότυπο IEEE 802.11. Αναλύοντας τα χαρακτηριστικά του και τις τοπολογίες που μπορεί να υποστηρίξει, θα οδηγηθούμε σε κρίσιμα συμπεράσματα για τις τεχνικές τοποθέτησης των δικτυακών συσκευών και τα χαρακτηριστικά των εφαρμογών εκείνων που τις καθορίζουν, προκειμένου οι συσκευές να εξυπηρετούν την αυξανόμενη δικτυακή κίνηση. Από αυτά θα γίνει φανερό γιατί το 802.11 αποτελεί ένα από τα ελάχιστα success stories μιας αγοράς τηλεπικοινωνιών που χαρακτηρίζεται από γενική ύφεση.

4.1 Γενικά για το IEEE 802.11x

Στην ασύρματη δικτύωση το μέσο μετάδοσης των δεδομένων είναι οι ραδιοσυχνότητες. Τα δεδομένα προς μετάδοση μεταφέρονται σε ένα κύμα, το οποίο ονομάζεται φέρον, μέσω της διαδικασίας της διαμόρφωσης. Το πιο βασικό πρόβλημα κατά τη δημιουργία ενός ασύρματου δικτύου είναι να μπορούν ταυτόχρονα πολλοί χρήστες να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο. Λύση στο πρόβλημα αυτό δίνουν τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, όπως είναι η Time Division Multiple Access (TDMA – πολύπλεξη διαίρεσης χρόνου), η Frequency Division Multiple Access (FDMA – πολύπλεξη διαίρεσης συχνότητας) και Code Division Multiple Access (CDMA – πολύπλεξη με διαίρεση κωδικών) ή συνδυασμός αυτών (π.χ. FDMA/TDMA).

Το πλέον χρησιμοποιημένο πρότυπο για τη δημιουργία ενός ασύρματου δικτύου είναι το **IEEE 802.11 (Wireless Ethernet)** το οποίο καλύπτει μόνο τα δύο κατώτερα στρώματα του μοντέλου OSI (Open System Interconnection): 1) το Physical Layer

(PHY) και 2) το Medium Access Control (MAC). Το 802.11 δημιουργήθηκε τον Ιούνιο του 1997, έχει ταχύτητα 2Mbps, αποτελεί το πρώτο πρότυπο για ασύρματη δικτύωση και ακολουθείται από τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα μέχρι και σήμερα.

Υπήρξε καθοριστικό στην εξάπλωση των ασυρμάτων δικτύων, καθώς η προτυποποίηση έδινε τη δυνατότητα διαλειτουργικότητας στις συσκευές που το χρησιμοποιούσαν. Ωστόσο, επειδή δεν υποστήριζε υψηλές ταχύτητες (1 Mbps και 2 Mbps, ταχύτητες πολύ μικρές σε σύγκριση με τα 10 Mbps και τα 100 Mbps που προσφέρει το ενσύρματο Ethernet) η χρήση του περιοριζόταν, πρόβλημα το οποίο σιγά σιγά βρίσκει λύση καθώς εμφανίζονται νέες παραλλαγές του 802.11 που αύξησαν την ταχύτητα αλλά, ταυτόχρονα, βελτίωσαν και κάποια από τα χαρακτηριστικά του. Έτσι, κατά τα επόμενα χρόνια από την αρχική του έκδοση, δημιουργήθηκαν υποπρότυπα του IEEE 802.11, όπως τα IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11e, IEEE 802.11f, IEEE 802.11g, IEEE 802.11i.

Για την ανάπτυξη του πρωτοκόλλου 802.11 ελήφθησαν υπόψη οι επόμενες σημαντικές διαφορές ανάμεσα σε ενσύρματα και ασύρματα LAN:

- **Ενέργεια:** Οι συσκευές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί να είναι είτε φορητές (portable), δηλαδή μπορούν να μεταφερθούν, αλλά για να λειτουργήσουν θα πρέπει να είναι σε κάποιο σταθερό σημείο (όπως για παράδειγμα είναι ένα laptop), είτε κινητές (mobile), δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν εν κινήσει (palmtop, κινητό τηλέφωνο). Και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται η χρήση μπαταριών έτσι ώστε να υποστηριχθούν τα διάφορα ηλεκτρονικά στοιχεία, αλλά και η ασύρματη κάρτα δικτύου που κατά κανόνα καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, με συνέπεια να εξαντλούνται πιο γρήγορα οι μπαταρίες της συσκευής. Έτσι, υλοποιήθηκαν διάφορες λειτουργίες ελέγχου της ισχύος οι οποίες υλοποιούνται στο επίπεδο MAC.
- **Εύρος ζώνης συχνοτήτων:** Για τη μετάδοση των δεδομένων το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί την μπάνα των 2.4 GHz. Για να αποφεύγονται παρεμβολές από ραδιοφωνικά σήματα στις ΗΠΑ, η Federal Communications Commission (FCC) είναι υπεύθυνη για την εκχώρηση μικρών περιοχών στο φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων. Η χρήση οποιασδήποτε από τις ζώνες που ορίζει η FCC πρέπει να συνοδεύεται από ειδική άδεια. Ωστόσο, η FCC παράλληλα χαρακτηρίζει ως ελεύθερα κάποια τμήματα του ραδιοφωνικού φάσματος. Αυτές οι μπάντες ονομάζονται ISM (Industrial Scientific and Medical) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς άδεια. Έτσι, με διάφορες μεθόδους και τεχνικές που εφαρμόζει το πρωτόκολλο 802.11 επιτυγχάνει υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στη μπάνα των ISM.
- **Ασφάλεια:** Επειδή στα ασύρματα δίκτυα τα σήματα μεταδίδονται σε πολύ μεγαλύτερες περιοχές από αυτές που καλύπτει ένα καλώδιο ή μία οπτική ίνα, το θέμα της ασφάλειας επικεντρώνεται στο να λαμβάνουν την πληροφορία μόνο όσοι είναι εξουσιοδοτημένοι. Επίσης, με διάφορες συνεχώς αναπτυσσόμενες και βελτιωμένες προδιαγραφές και μεθόδους γίνεται η κρυπτογράφηση των δεδομένων.
- **Διευθυνσιοδότηση:** Επειδή η τοπολογία ενός ασύρματου δικτύου είναι δυναμική, η διεύθυνση προορισμού δεν ανταποκρίνεται πάντα στην ίδια φυσική θέση του προορισμού. Έτσι προκύπτει πρόβλημα δρομολόγησης πακέτων μεταξύ κινητών

σταθμών, το οποίο μπορεί να λυθεί με τη χρήση διάφορων πρωτοκόλλων όπως είναι το Mobile IP, το οποίο βασίζεται στο πρωτόκολλο μεταφοράς TCP/IP.

Ακριβώς επειδή σήμερα τα ασύρματα δίκτυα που βασίζονται στην οικογένεια προτύπων 802.11 είναι τα πλέον διαδεδομένα, με ήδη μεγάλη ποικιλία σχετικών προϊόντων στην αγορά, το ίδιο το 802.11 θέτει το πλαίσιο για μια προτυποποιημένη ασύρματη δικτυακή επικοινωνία ευρείας ζώνης.

4.2 Βασικές Μονάδες και Τεχνικός Εξοπλισμός Δικτύων WiFi

Τα ασύρματα δίκτυα 802.11 αποτελούνται από τις κάτωθι τέσσερις βασικές μονάδες:

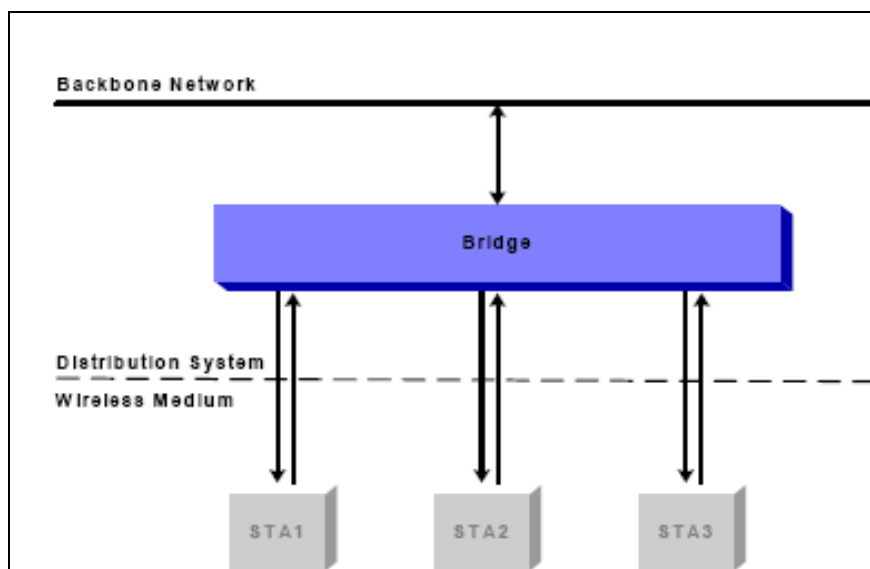
- **Σύστημα διανομής (Distribution System):** Το σύστημα διανομής ενώνει τα διάφορα AP του ίδιου δικτύου, επιτρέποντάς τους να ανταλλάσσουν πλαίσια. Ωστόσο, το 802.11 δεν προσδιορίζει τον τρόπο που θα γίνεται αυτό.
- **Σημείο πρόσβασης (Access Point – AP):** Το AP είναι η μονάδα που παίζει το ρόλο γέφυρας μεταξύ του ενσύρματου και του ασύρματου δικτύου, μετατρέποντας κατάλληλα τα πλαίσια που ανταλλάσσονται μεταξύ αυτών.
- **Ασύρματο μέσο μετάδοσης (Wireless Medium):** Έχουν οριστεί διάφορα φυσικά στρώματα που χρησιμοποιούν είτε ραδιοσυχνότητες είτε υπέρυθρες ακτίνες για τη μετάδοση των πλαισίων μεταξύ των σταθμών του ασύρματου δικτύου.
- **Σταθμοί (Stations):** Οι σταθμοί που ανταλλάσσουν πληροφορία μέσω του ασύρματου δικτύου συνήθως είναι φορητές συσκευές (για παράδειγμα laptops), χωρίς όμως αυτό να είναι απαραίτητο.
- **Basic Service Set (BSS):** Η βασική δομική μονάδα κάθε 802.11 δικτύου αποκαλείται Basic Service Set (BSS) ή κυνέλη και αποτελείται από μία ομάδα σταθμών που επικοινωνούν μεταξύ τους. Τα όρια του BSS καθορίζονται από την περιοχή ραδιοκάλυψης, που ονομάζεται Basic Service Area (BSA). Ένας σταθμός σε ένα BSS μπορεί να επικοινωνεί με οποιονδήποτε άλλο σταθμό στο ίδιο BSS.

4.2.1 Σύστημα Διανομής (Distribution System)

Το σύστημα διανομής είναι υπεύθυνο για τη διασύνδεση ομάδων από APs, δηλαδή BSSs και τη δημιουργία ESSs (παράγραφος 0). Με αυτόν τον τρόπο καθιστά δυνατή την ανταλλαγή πλαισίων ανάμεσα σε σταθμούς που ανήκουν σε διαφορετικά BSSs εντός του ίδιου ESS. Το σύστημα διανομής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του 802.11, αν και δεν περιγράφεται στο πρότυπο η υλοποίησή του αλλά μόνο οι υπηρεσίες που πρέπει να προσφέρει στους ασύρματους σταθμούς.

Για τη σωστή παράδοση των πλαισίων, τα APs επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός πρωτοκόλλου που ονομάζεται Inter Access Point Protocol (IAPP), γνωστό και ως IEEE 802.11f, το οποίο δεν έχει προδιαγραφεί στο αρχικό 802.11. Εφόσον ανά πάσα στιγμή κάθε σταθμός μπορεί να ανήκει σε ένα μόνο BSS, έχοντας προχωρήσει στο association με το αντίστοιχο AP, πρέπει όλα τα APs να ενημερώνονται μέσω του συστήματος διανομής, ώστε να προωθούν τα πλαίσια προς το συγκεκριμένο σταθμό στο κατάλληλο AP.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται καλύτερα η λειτουργία του συστήματος διανομής.



Εικόνα 49: Το σύστημα διανομής στο 802.11

Το σύστημα διανομής είναι δυνατόν να είναι κι αυτό ασύρματο δίκτυο. Τέτοια περίπτωση είναι η διασύνδεση δύο LANs σε διαφορετικές φυσικές τοποθεσίες μέσω μιας ασύρματης ζεύξης σημείο – προς – σημείο. Τότε το ασύρματο δίκτυο χρησιμεύει ως γέφυρα που ενώνει τα δύο LANs στο στρώμα ζεύξης δεδομένων. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται wireless bridging.

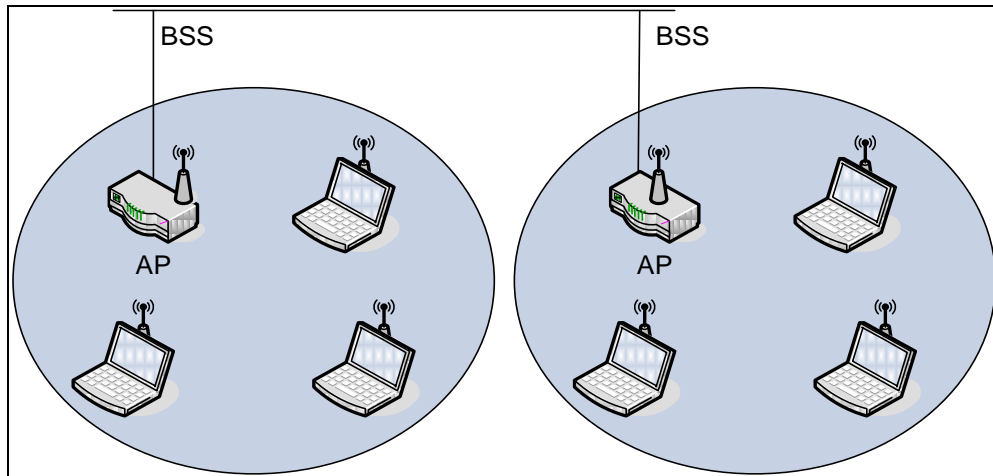
Σημειώνεται τέλος ότι οι σταθμοί χρησιμοποιούν κανονικές 48-μπιτες διευθύνσεις MAC, κάτι που κάνει τη θεώρηση του ασύρματου δικτύου ως επέκταση του ενσύρματου ευκολότερη.

4.2.2 Σημεία Πρόσβασης (APs)

Τα APs παίζουν το ρόλο γέφυρας μεταξύ του συστήματος διανομής και του ασυρμάτου δικτύου. Μπορούν να θεωρηθούν και αυτά ως μέρη του συστήματος διανομής, τουλάχιστον όσον αναφορά το interface τους προς το ενσύρματο LAN που αποτελεί το μέσο μετάδοσης του συστήματος διανομής. Στην παραπάνω εικόνα τα βέλη αντιπροσωπεύουν ροή πλαισίων από και προς το σύστημα διανομής μέσω ενός AP.

Έτσι, αν ο σταθμός STA1 θέλει να στείλει ένα πλαίσιο στον STA2 αυτό πρέπει να πάει στο αντίστοιχο AP, να μετατραπεί σε πλαίσιο του μέσου μετάδοσης του συστήματος διανομής (συνήθως Ethernet), να μεταδοθεί στο AP που εξυπηρετεί το STA2, να μετατραπεί ξανά σε πλαίσιο 802.11 και να μεταδοθεί από το AP στον STA2.

Σε γενικές γραμμές τα APs αποτελούνται από ασύρματες μονοκατευθυντικές ή πολυκατευθυντικές ή τομεακές κεραίες. Ο τρόπος με τον οποίο διασυνδέονται και επικοινωνούν οι κεραίες των χρηστών με την κεραία ενός τοπικού AP φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



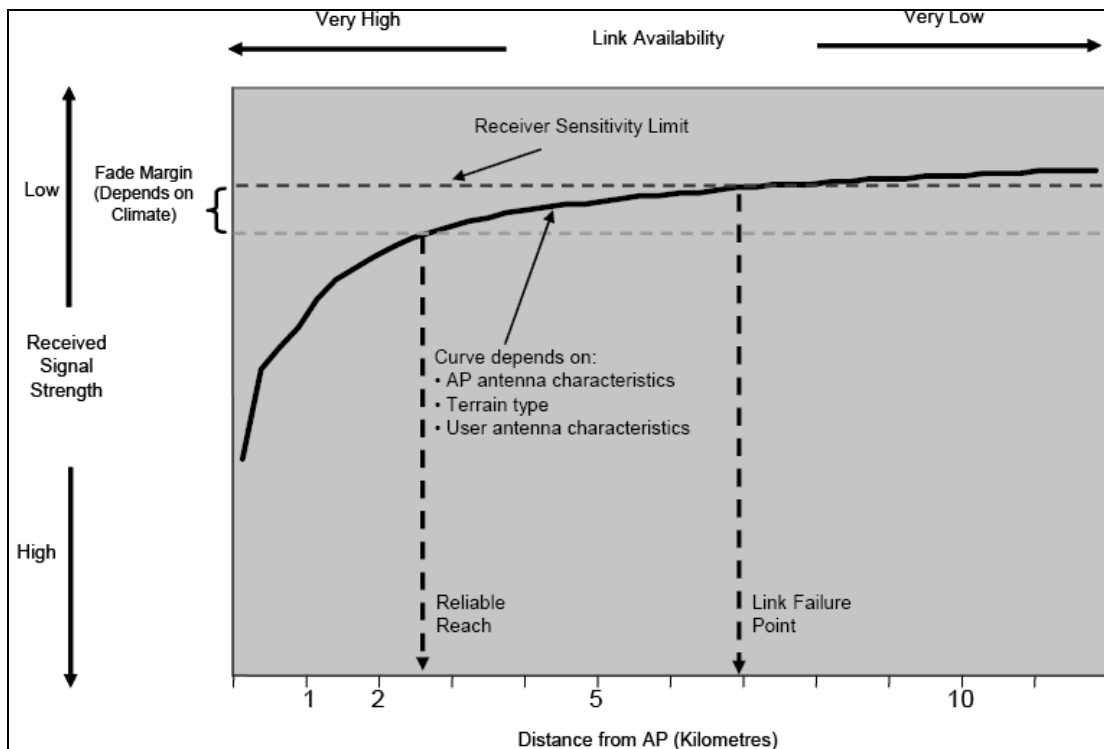
Εικόνα 50: Διασύνδεση και επικοινωνία χρηστών μέσω τοπικού AP

Το κέρδος μίας κεραίας μετριέται σε dBi. Τρία dBi αντιστοιχούν σε διπλασιασμό της ισχύος. Για αυτό, μία κεραία με κέρδος 9 dBi μπορεί να λαμβάνει σήματα 8 φορές μικρότερης ισχύος. Όσο πιο μακριά είναι ο χρήστης από ένα AP τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι το κέρδος (gain) της ασύρματης κεραίας. Αυτό προσφέρει μεγαλύτερο εύρος κάλυψης, καθώς και μεγαλύτερη σταθερότητα στη μετάδοση σε κοντινότερες αποστάσεις. Επιπλέον, για να βελτιώσουμε την επικοινωνία μεταξύ των κεραίων και χωρίς εμπόδια, μπορούμε να τοποθετήσουμε την κεραία σε ένα ψηλό σημείο. Ο τύπος της κεραίας καθώς και το πόσο ψηλά θα χρειαστεί να ανυψωθεί εξαρτάται, ως επί το πλείστον, από το πόσο μακριά βρίσκεται ο χρήστης από το AP.

Έτσι, για αποστάσεις μικρότερες του 1 km από το τοπικό AP, οι απλές κεραίες μπορεί να φέρουν ικανοποιητικό αποτέλεσμα, ωστόσο μία κατευθυντική κεραία θα ήταν πιο αποδοτική. Σε περιπτώσεις όπου θέλουμε να καλύψουμε περιοχές σε απόσταση 3 – 6km, χρησιμοποιούνται κεραίες με κέρδος 14 dBi (όπως οι κεραίες Yagi) ενώ παράλληλα απαιτείται ανύψωση 2 με 4 μέτρα. Για πολύ απομακρυσμένους χρήστες, απαιτείται η χρήση υπερυψωμένων παραβολικών κεραίων με κέρδος γύρω στα 25 dBi.

Η μέγιστη απόσταση κάλυψης ενός AP οριοθετείται από τα σημεία εκείνα στα οποία το τερματικό εμφανίζει μη αποδεκτά επίπεδα απόδοσης. Το επίπεδο απόδοσης αναφέρεται στο ποσοστό του χρόνου στο οποίο το δίκτυο είναι διαθέσιμο. Έτσι, όσο μακρύτερα είναι ένας χρήστης από ένα AP τόσο μικραίνει η πιθανότητα το δίκτυο να είναι διαθέσιμο. Εξαιτίας των καιρικών φαινομένων ένα ασύρματο δίκτυο είναι πρακτικά αδύνατον να είναι 100% διαθέσιμο.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η λαμβανόμενη ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος σε σταθμό συναρτήσεως της απόστασής του από ένα AP, και άρα το επίπεδο απόδοσης (διαθεσιμότητα) του ασύρματου δικτύου.



Εικόνα 51: Λαμβανόμενη ισχύς συναρτήσει απόστασης από AP

Στον οριζόντιο άξονα της παραπάνω εικόνας απεικονίζεται η απόσταση του δέκτη από το AP η οποία αυξάνεται προς τα δεξιά. Στον κατακόρυφο άξονα δίδεται η ισχύς του σήματος καθώς αυτή αυξάνεται μετακινούμενη προς τα κάτω. Έτσι, η καμπύλη της γραφικής παράστασης δείχνει την ισχύ του σήματος σε διαφορετικές αποστάσεις από το AP.

Η καμπύλη αυτή εξαρτάται από μία σειρά παραμέτρων. Για παράδειγμα, αν τοποθετήσουμε την κεραία σε ψηλότερο σημείο, η καμπύλη θα μετακινηθεί προς τα κάτω. Το ποσοστό διαθεσιμότητας του δικτύου μεταβάλλεται αναλογικά με την απόσταση του χρήστη από το AP. Όπως φαίνεται και στο πάνω μέρος της εικόνας, όσο μετακινούμαστε προς τα δεξιά τόσο μειώνεται η διαθεσιμότητα. Η κατώτερη επιθυμητή τιμή που θέλουμε το δίκτυο να είναι διαθέσιμο είναι το 95% του χρόνου.

Ακόμη, η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή που αναπαριστά την ευαισθησία του δέκτη, δείχνει το όριο της ισχύος του σήματος κάτω από το οποίο ο δέκτης δεν μπορεί να εντοπίσει το σήμα. Σήματα με ισχύ μικρότερη από αυτό το όριο, απορρίπτονται από το δέκτη ως θόρυβος. Το σημείο στο οποίο η διακεκομμένη αυτή γραμμή τέμνει την καμπύλη της ισχύος, ονομάζεται «σημείο αποτυχίας της ζεύξης» (link failure point). Η απόσταση στην οποία αντιστοιχεί αυτό το σημείο, το σήμα είναι τόσο ασθενές ώστε δεν μπορεί να ανιχνευτεί από το δέκτη και η διαθεσιμότητα γίνεται σχεδόν ίση με 0%. Είναι προφανές, ότι χρήστες που βρίσκονται πέρα απ' αυτή την απόσταση δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν, εκτός και αν αλλάξει το ύψος στο οποίο βρίσκεται η κεραία ή το κέρδος της.

Για αυτό, είναι προφανές ότι χρειάζεται να εισάγουμε ένα συγκεκριμένο περιθώριο σχετικά με το πόσο χαμηλή μπορεί να είναι η ισχύς ενός σήματος, με σκοπό να μειωθεί το φαινόμενο της εξασθένησης σήματος. Αυτό το όριο αντικατοπτρίζει τις προτιμήσεις

μας σχετικά με μία αποδεκτή διαθεσιμότητα του δικτύου. Σε περιπτώσεις όπου το κλίμα είναι βροχερό και με πολλή υγρασία χρειάζεται να επεκτείνουμε το περιθώριο αυτό.

Η οριζόντια γραμμή κάτω από την γραμμή ευαισθησίας του δέκτη απεικονίζει την ευαισθησία προστιθέμενου του περιθωρίου διαλείψεων. Το σημείο που τέμνει η ευαισθησία την καμπύλη αντιστοιχεί σε μία απόσταση η οποία χαρακτηρίζεται ως αξιόπιστη κάλυψη.

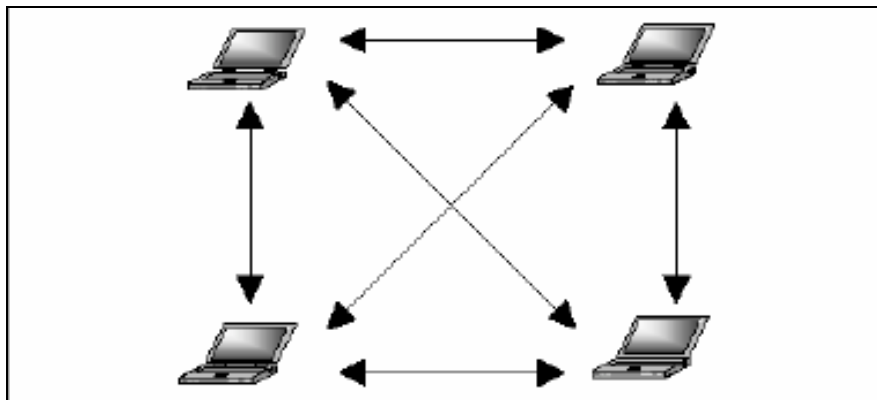
4.3 Ανάλυση χαρακτηριστικών των τοπολογιών των 802.11 δικτύων

4.3.1 Περιγραφή των τοπολογιών

Το πρότυπο του wifi ορίζει τρεις τρόπους επικοινωνίας μεταξύ κόμβων ενός ασύρματου δικτύου:

- **IBSS (Independent Basic Service Set) ή ad hoc.**
- **BSS (Basic Service Set) ή infrastructure**
- **ESS (Extended Service Set)**

IBSS



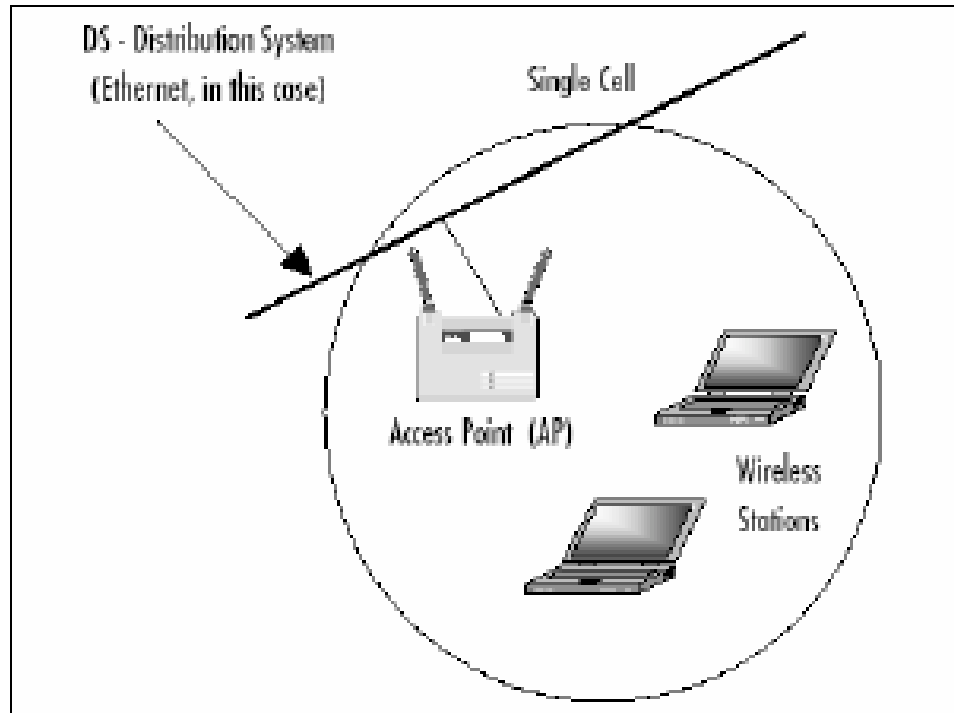
Εικόνα 52: Τοπολογία IBSS

Με αυτό τον τρόπο 2 ή περισσότερες συσκευές επικοινωνούν άμεσα η μία με την άλλη. Κάθε κόμβος θεωρείται ομότιμος (peer) και, έτσι, το δίκτυο απαρτίζεται από μονοπάτια. Συνήθως, αυτός ο τρόπος χρησιμοποιείται για μικρά δίκτυα. Έχει, παρόλα αυτά, μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς ένα ad hoc δίκτυο μπορεί να περιέχει πολλά μονοπάτια για επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων, και έτσι παρέχει μεγάλη αξιοπιστία λόγω εφεδρείας μονοπατιών, αλλά και αυξημένη ταχύτητα. Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η τοπολογία ενός IBSS.

Όπως φαίνεται και από την εικόνα, σε ένα independent δίκτυο κάθε σταθμός επικοινωνεί απευθείας με όλους τους υπόλοιπους. Το IBSS αποτελείται το λιγότερο από δύο σταθμούς και συνήθως είναι προσωρινό, δηλαδή δημιουργείται για κάποιο σκοπό (π.χ. καταστροφή, μετάδοση ενός γεγονότος ή σπάνιου φαινομένου, κλπ.) και μετά διαλύεται. Είναι ο απλούστερος τύπος ασύρματου δικτύου.

BSS

Στην δεύτερη τοπολογία, το 802.11 δίκτυο αποτελεί ένα κυψελωτό δίκτυο παρόμοιο των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η κυψέλη στην ορολογία του 802.11 ονομάζεται Basic Service Set (BSS). Όλα τα μέλη του επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός κεντρικού διανομέα που ονομάζεται Base Station ή κοινώς Access Point (AP), κατά το μοντέλο client – server. Σε αυτή την περίπτωση δεν χρειάζεται η άμεση οπτική επαφή ανάμεσα σε όλους τους κόμβους. Αρκεί όλοι να μπορούν να επικοινωνήσουν με το Access Point.



Εικόνα 53: Τοπολογία BSS

Κάθε Access Point, έχει ένα όνομα που το αναγνωρίζει ανάμεσα σε άλλα που ίσως να βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Αυτό είναι το SSID (Service Set Identifier). Το SSID είναι πολλές φορές και αυτό που πρέπει να ξέρουμε για να συνδεθούμε σε κάποιο ελεύθερο Access Point. Επίσης, κάθε Access Point εκπέμπει σε ένα από τα 14 κανάλια (λιγότερα ίσως σε κάποιες χώρες) εκπομπής που ορίζει το πρωτόκολλο. Για την μείωση των παρεμβολών μεταξύ των APs, είναι προτιμότερο να επιλέγονται κανάλια λειτουργίας που διαφέρουν κατά 4 (π.χ. τα 1-5-9-13 για 4 APs στον ίδιο χώρο), έτσι ώστε να μην επικαλύπτονται οι εκπομπές τους.

Ένα Access Point χρησιμοποιεί πολυκατευθυντική κεραία (Omnidirectional), καθώς πρόκειται για κεραίες που εκπέμπουν κυκλικά το σήμα τους, πράγμα που είναι και το ζητούμενο όταν θέλουμε να έχουμε την μέγιστη κάλυψη του περιβάλλοντος χώρου. Αντιθέτως, οι σταθμοί μπορούν να χρησιμοποιούν κατευθυντικές κεραίες για να επιτύχουν συνδέσεις με μακρινά (>300m) APs, κάτι βέβαια που εισάγει νέα προβλήματα στο δίκτυο (πρόβλημα κρυμμένου κόμβου – hidden node). Για λειτουργία σε αποστάσεις <300m είναι καλό να χρησιμοποιούνται πολυκατευθυντικές κεραίες πολύ μικρού

κέρδους (<5dBi), καθώς επαρκούν για την επίτευξη σύνδεσης. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η τοπολογία ενός BSS.

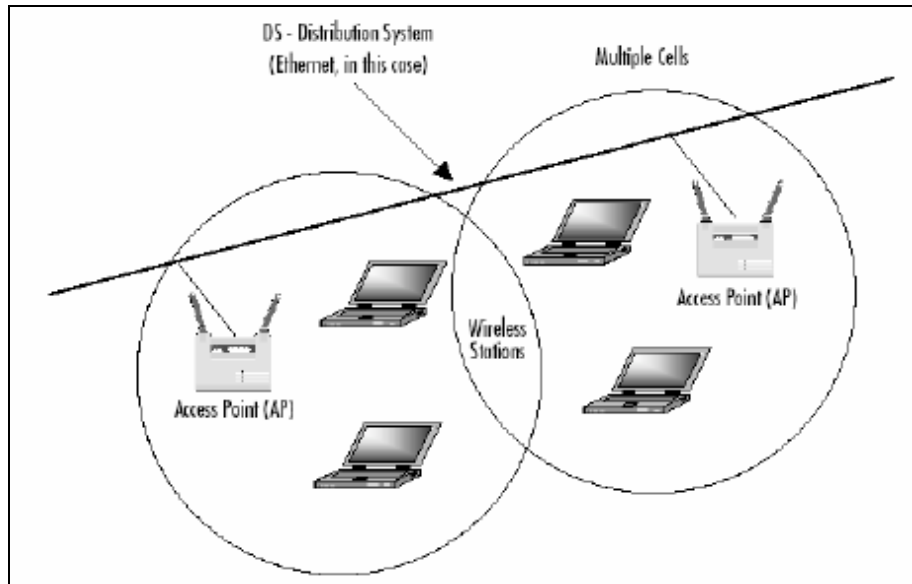
Όπως φαίνεται και από την εικόνα, το BSS διακρίνεται από την παρουσία ενός AP σε αυτό. Το AP, εκτός από το ότι συνδέει το BSS με το ενσύρματο δίκτυο, είναι υπεύθυνο για την ανταλλαγή πλαισίων μεταξύ των σταθμών και, γενικότερα, για τον κεντρικό έλεγχο της λειτουργίας του BSS. Όταν ένας σταθμός θέλει να στείλει ένα πλαίσιο σε έναν άλλο σταθμό, το πλαίσιο αρχικά αποστέλλεται στο AP και αυτό, με την σειρά του, το στέλνει στον τελικό προορισμό του. Η BSA (Basic Service Area) σε αυτήν την περίπτωση είναι η περιοχή όπου υπάρχει ραδιοκάλυψη από το AP. *Έτσι, σε αντίθεση με το IBSS, όπου όλοι οι σταθμοί πρέπει να βρίσκονται στην περιοχή ραδιοκάλυψης των υπολοίπων για να επικοινωνήσουν με αυτούς, εδώ αρκεί να βρίσκονται στην περιοχή ραδιοκάλυψης του AP, άσχετα με την μεταξύ τους απόσταση.*

Για να συμμετέχει ένας σταθμός στο BSS πρέπει να ακολουθήσει τη διαδικασία του association με το AP. Η διαδικασία αυτή ξεκινάει πάντα με πρωτοβουλία του σταθμού και είναι απόφαση του AP αν ο σταθμός θα γίνει τελικά δεκτός στο BSS. Το 802.11 δεν ορίζει μέγιστο αριθμό σταθμών που μπορούν να συμμετάσχουν σε ένα BSS, αλλά τίθενται περιορισμοί στις διάφορες υλοποιήσεις AP.

ESS

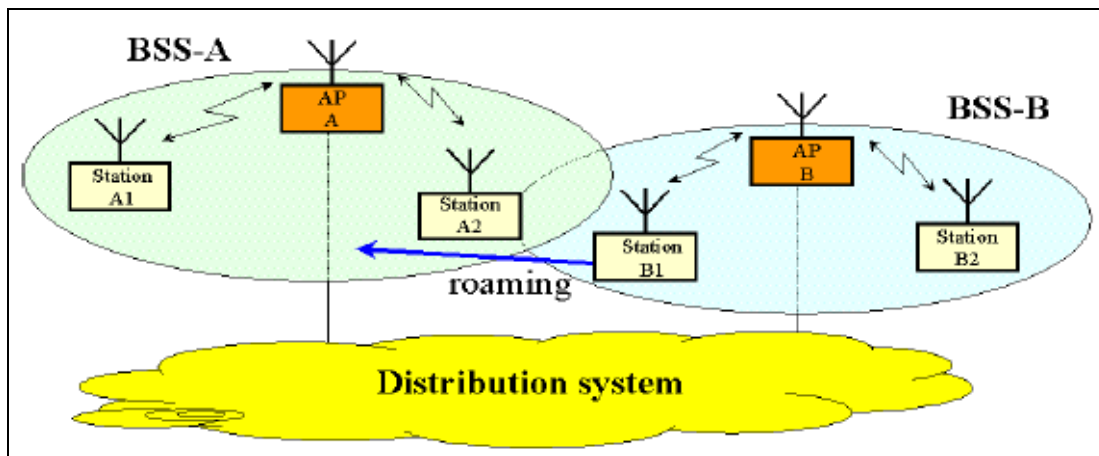
Η τοπολογία μέσω APs μπορεί να έχει την μορφή μίας και μόνο κυψέλης, όμως πολλές κυψέλες μπορούν να γεφυρωθούν μέσω ενός Συστήματος Διανομής. Το σύστημα διανομής μπορεί να είναι μια ενσύρματη εγκατάσταση ή δεσμευμένοι ασύρματοι clients που αναλαμβάνουν την γεφύρωση 2 ή περισσότερων υπο – δικτύων. Όλο το διασυνδεδεμένο infrastructure δίκτυο, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος διανομής και των Access Points, είναι ορατό στα ανώτερα επίπεδα του OSI μοντέλου σαν ένα μοναδικό 802 δίκτυο, το οποίο στο στάνταρτ περιγράφεται σαν Extended Service Set. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η τοπολογία ενός ESS που αποτελείται από 2 BSSs.

Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει τα APs να επικοινωνούν στο στρώμα ζεύξης δεδομένων μέσω του δικτύου κορμού, επιτελώντας τη λειτουργία της γέφυρας για τους σταθμούς διαφορετικών BSSs. *Το ESS τελειώνει όταν παρεμβληθεί μεταξύ των AP's οντότητα δικτύου που λειτουργεί σε υψηλότερο στρώμα, όπως είναι ο δρομολογητής (router).* Το 802.11 προσφέρει κινητικότητα σε ένα ESS, αρκεί το δίκτυο κορμού να είναι ένα απλό LAN ή και VLAN (Virtual LAN). Σε κάθε άλλη περίπτωση η σύνδεση στα ανώτερα επίπεδα θα χαθεί, εκτός κι αν χρησιμοποιείται κάποια άλλη τεχνολογία όπως το Mobile IP.



Εικόνα 54: Τοπολογία infrastructure 2 BSSs

Το ESS προσφέρει στα δίκτυα 802.11 ένα τεράστιο πλεονέκτημα: το *roaming* χρηστών ανά τα διαθέσιμα *Access Points*. Ένας σταθμός ενός BSS, μπορεί να κινείται ελεύθερα αλλάζοντας BSSs (δηλαδή *Access Points*) χωρίς ούτε αυτός, ούτε και το δίκτυο να βλέπουν κάποια αλλαγή, ή να χρειάζονται νέες ρυθμίσεις. Κάθε BSS επικοινωνεί με τα υπόλοιπα BSSs για την διαμεταγωγή των πακέτων αλλά και για την εναλλαγή των σταθμών, καθώς αυτοί αλλάζουν BSS, μέσω του Συστήματος Διανομής. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει τις λειτουργίες αυτές.



Εικόνα 55: Επίτευξη του roaming χρηστών στο ESS

Την ευθύνη για τις παραπάνω λειτουργίες έχουν 9 υπηρεσίες που προσφέρει το σχήμα ESS. Τέσσερις από αυτές ανήκουν στην ομάδα των υπηρεσιών σταθμού (**station services**) και οι υπόλοιπες ανήκουν στην ομάδα υπηρεσιών διανομής (**distribution services**).

Οι υπηρεσίες σταθμού απαρτίζονται από τις authentication, de-authentication, data delivery, και privacy, ενώ παρέχουν στο ασύρματο δίκτυο λειτουργικότητα παρόμοια με αυτή ενός στάνταρ ενσύρματου δικτύου 802.3.

- **authentication:** παρέχει ένα είδος ταυτότητας σε κάθε σταθμό. Χωρίς αυτήν, ο σταθμός δεν έχει το δικαίωμα να συνδεθεί στο WLAN. Ένας σταθμός έχει την δυνατότητα να πιστοποιήσει την ύπαρξή του σε περισσότερα από ένα Access Points. Αυτού του είδους η προ-πιστοποίηση, παρέχει την δυνατότητα στα κοντινά του συγκεκριμένου σταθμού BSSs, να είναι έτοιμα για να δεχθούν το σταθμό αυτό καθώς αυτός θα κινηθεί στον χώρο του.
- **de-authentication:** χρησιμοποιείται για να καταστραφεί η ταυτότητα ενός σταθμού που για οποιοδήποτε λόγο δεν μπορεί πλέον να υπάρχει στο τοπικό ασύρματο δίκτυο. Όταν η διαδικασία αυτή ξεκινήσει, ο σταθμός δεν μπορεί πλέον να έχει πρόσβαση στο δίκτυο, μέχρι να ξαναπεράσει από την φάση authentication. Με αυτό τον τρόπο ελευθερώνονται πόροι στο Access Point για άλλες συσκευές.
- **data delivery:** είναι η διαδικασία μεταφοράς δεδομένων σε έναν σταθμό και αφορά την πρόσβαση στο ασύρματο μέσο εντός του επιπέδου MAC.
- **privacy:** χρησιμοποιεί έναν RC4 αλγόριθμο για να παρέχει κρυπτογράφηση στα δεδομένα που εκπέμπονται.

Πέντε διαδικασίες διανομής αναλαμβάνουν την αποστολή των δεδομένων καθώς ένας ασύρματος σταθμός κινείται μεταξύ πολλαπλών BSSs : association, reassociation, disassociation, integration, και distribution.

- **association:** ένας σταθμός χρησιμοποιεί την διαδικασία αυτή μόλις συνδεθεί στο AP. Αυτή η λειτουργία δημιουργεί τα λογικά μονοπάτια μεταξύ των συσκευών και αποφασίζει για τον τρόπο με τον οποίο θα επικοινωνήσει το Σύστημα Διανομής με τον σταθμό. Αν δεν συμβεί αυτή η διαδικασία τότε το ΣΔ δεν θα ξέρει που να στείλει τα πλαίσια δεδομένων. Ένας σταθμός μπορεί να είναι authenticated σε περισσότερα από ένα Access Point αλλά associated μόνο με ένα.
- **disassociation:** χρησιμοποιείται για να σταματήσει την «συνεργασία» ενός σταθμού και ενός BSS, λόγω του είτε αυτός σταμάτησε την λειτουργία του ή κινήθηκε προς κάποιο άλλο BSS.
- **distribution:** χρησιμοποιείται από τα APs για να αποφασίσει τον στόχο των πακέτων που εκπέμπονται, δηλαδή αν είναι για κάποια άλλη ασύρματη συσκευή ή προορίζονται για το ΣΔ.
- **integration:** είναι αυτή η υπηρεσία που «μεταφράζει» τα πακέτα που προέρχονται από ασύρματους σταθμούς (802.11 πακέτα) σε πακέτα για το ενσύρματο ΣΔ (πακέτα 802.3), αλλά και το αντίθετο.

4.3.2 Χαρακτηριστικά των τοπολογιών

Από την παρουσίαση των παραπάνω τοπολογιών φαίνεται ότι ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο είναι μία συλλογή από κινητούς κόμβους οι οποίοι μπορούν να συνδεθούν δυναμικά με έναν αυθαίρετο τρόπο και να σχηματίζουν ένα προσωρινό δίκτυο, χωρίς την εκ των προτέρων ύπαρξη οποιουδήποτε κεντρικού διαχειριστή ή σταθερής υποδομής. Κάθε κόμβος ενός τέτοιου δικτύου διαθέτει ασύρματο σύστημα επικοινωνίας και μπορεί να επικοινωνεί με τους γείτονές του είτε με τη χρήση ραδιοκυμάτων είτε με τη χρήση υπέρυθρων ακτίνων.

Εφόσον, οι κόμβοι επικοινωνούν μέσω ασύρματων συνδέσεων θα πρέπει να αντιμετωπίζουν τις *συνέπειες της επικοινωνίας μέσω ραδιοκυμάτων, όπως ο θόρυβος, η εξασθένιση σήματος (fading) και οι παρεμβολές*. Επιπλέον, οι συνδέσεις αυτές διαθέτουν λιγότερο *bandwidth* από τις συνδέσεις των ενσύρματων δικτύων.

Επειδή η ακτίνα επικοινωνίας των κόμβων είναι συνήθως περιορισμένη, μπορεί δύο κόμβοι, οι οποίοι επιθυμούν να ανταλλάξουν πακέτα, να μην μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας, *επειδή βρίσκονται ο ένας εκτός της εμβέλειας επικοινωνίας του άλλου*. Σε περιπτώσεις σαν αυτή, κρίνεται αναγκαία η παρέμβαση ενδιάμεσων κόμβων, οι οποίοι προωθούν τα πακέτα δεδομένων προς τους παραλήπτες τους, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η επικοινωνία απομακρυσμένων κόμβων. Επομένως, *κάθε κόμβος του δικτύου θα πρέπει να μπορεί να συμπεριφέρεται και σαν δρομολογητής*, προωθώντας κίνηση από άλλους κόμβους και λαμβάνοντας μέρος στην ανακάλυψη και τη διατήρηση διαδρομών για άλλους κόμβους του δικτύου.

Η *τοπολογία του δικτύου είναι γενικά δυναμική*, αφού οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων μπορεί να μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου, εξαιτίας της κινητικότητάς τους, καθώς επίσης και των αφίξεων νέων κόμβων ή των αναχωρήσεων κόμβων του δικτύου. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι δεν υπάρχει κάποιος κορμός από συνδέσεις με καλώδια μέσω του οποίου να μπορεί να γίνει δρομολόγηση, καθιστά *απαραίτητη την ύπαρξη αποτελεσματικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης*. Αυτά θα επιτρέπουν στους κόμβους να βρίσκουν και να διατηρούν διαδρομές οι οποίες πιθανόν να αποτελούνται από πολλαπλά βήματα με τέτοιο τρόπο ώστε να μην χρησιμοποιούνται περισσότεροι πόροι του δικτύου από όσους είναι απαραίτητοι.

Επίσης, *οι ατμοσφαιρικές συνθήκες καθώς και τα φυσικά εμπόδια επιδρούν στην εμβέλεια επικοινωνίας των κόμβων του δικτύου*. Κάποια ακόμα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών περιλαμβάνουν την περιορισμένη ενέργεια και το περιορισμένο εύρος ζώνης που παρέχονται στους κόμβους του δικτύου, καθώς επίσης και ο υψηλός ρυθμός λαθών στη μετάδοση λόγω της ασύρματης φύσης των συνδέσεων. Εξαιτίας των περιορισμών αυτών, οι προδιαγραφές για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα θα πρέπει να πληρούν κάποια ιδιαίτερα στάνταρ.

Παρακάτω συνοψίζουμε τα στάνταρ αυτά.

- **Δυναμική τοπολογία:** Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των ασύρματων τοπικών δικτύων είναι η δυναμική τους τοπολογία. Οι κόμβοι είναι ελεύθεροι να κινηθούν αυθαίρετα και να εισέρχονται και να εξέρχονται από το δίκτυο κατά βούληση. Για το λόγο αυτό, η τοπολογία του δικτύου μπορεί να αλλάζει τυχαία και με πολύ γρήγορους ρυθμούς σε απρόβλεπτες στιγμές ενώ μπορεί να αποτελείται τόσο από αμφίδρομες όσο και από μονόδρομες συνδέσεις.
- **Μη κεντροποιημένος έλεγχος:** Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών είναι ότι δεν χρησιμοποιούν οποιονδήποτε κεντροποιημένο έλεγχο, με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται ότι το δίκτυο δεν θα καταρρεύσει αν κάποιος συγκεκριμένος κόμβος βγει εκτός της ακτίνας επικοινωνίας των υπολοίπων.
- **Έξυπνη διαχείριση των δικτυακών μεταβολών:** Τα δίκτυα αυτά χειρίζονται αποδοτικά τις μεταβολές που προκύπτουν στην τοπολογία τους, καθώς και πιθανές δυσλειτουργίες των κόμβων τους. Αν για παράδειγμα, προκύψει διακοπή κάποιας σύνδεσης, στην περίπτωση που κάποιος κόμβος εγκαταλείψει το δίκτυο ή απλά μετακινηθεί, τότε οι επηρεαζόμενοι κόμβοι θα πρέπει απλά να αναζητήσουν νέες

διαδρομές για τους προορισμούς. Αν και το γεγονός αυτό αυξάνει την καθυστέρηση στην παροχή των υπηρεσιών, λόγω της αναζήτησης της διαδρομής που απαιτείται, το δίκτυο εξακολουθεί να είναι λειτουργήσιμο.

- **Περιορισμένο κόστος:** Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα έχουν γενικά περιορισμένο κόστος διαχείρισης σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα. Επιπλέον, στα ενσύρματα δίκτυα η φυσική διασύνδεση και επομένως και η τοπολογία του δικτύου καθορίζονται ρητά και εκ των προτέρων από το διαχειριστή του συστήματος. Αντίθετα, στα ασύρματα δίκτυα, λόγω της ασύρματης φύσης του μέσου μετάδοσης, δεν έχουμε κάποιον τέτοιο περιορισμό στην τοπολογία του δικτύου.
- **Αυτό – ρυθμιζόμενα δίκτυα:** Τα δίκτυα αυτά είναι αυτορυθμιζόμενα (self-configuring) και μπορούν να διατηρούν τις συνδέσεις του δικτύου και τις πληροφορίες δρομολόγησης χωρίς την ανάγκη ύπαρξης κάποιου διαχειριστή του δικτύου. Έτσι, αν δύο κόμβοι βρίσκονται ο ένας εντός της ακτίνας επικοινωνίας του άλλου μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους οποιαδήποτε στιγμή θελήσουν. Κάτι τέτοιο δείχνει ότι τα ασύρματα WLANs μπορούν κάλλιστα να αναπτυχθούν σε περιοχές όπου δεν υπάρχει εγκατεστημένη υποδομή δικτύωσης.
- **Χαμηλό εύρος ζώνης και throughput:** Όπως είναι φυσικό, οι ασύρματες συνδέσεις έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης και χρονικά μεταβαλλόμενη χωρητικότητα η οποία είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή των ενσύρματων. Επίσης, ο ρυθμός μεταγωγής (throughput) των ασυρμάτων επικοινωνιών, λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις της πολλαπλής πρόσβασης, της εξασθένησης σήματος (fading), του θορύβου, των παρεμβολών κλπ., είναι συχνά πολύ μικρότερο από το μέγιστο δυνατό. Ένα αποτέλεσμα των σχετικά μικρών χωρητικότητων των συνδέσεων είναι η **συμφόρηση**, η οποία αποτελεί τον κανόνα και όχι την εξαίρεση για τα δίκτυα αυτά.
- **Περιορισμένη ενέργεια των κόμβων:** Ένα μειονέκτημα των ασύρματων WLANs είναι ότι λειτουργούν με περιορισμένη ενέργεια. Έτσι, μερικοί ή όλοι οι κόμβοι του δικτύου μπορεί να στηρίζονται για την ενέργειά τους σε μπαταρίες ή άλλα εξαντλήσιμα μέσα. Για τους κόμβους αυτούς, το πιο σημαντικό κριτήριο σχεδίασης συστήματος για βελτιστοποίηση πρέπει να είναι η διατήρηση της ενέργειας.
- **Χαμηλή ασφάλεια των επικοινωνιών:** Κάθε ασύρματο WLAN παρουσιάζει περιορισμένη ασφάλεια του φυσικού μέσου και, άρα, καθίσταται πιο επιρρεπές σε απειλές όπως η αυξημένη πιθανότητα υποκλοπής και απάτης, οι επιθέσεις άρνησης υπηρεσιών (Denial of Service Attacks). Οι υπάρχουσες τεχνικές ασφάλειας συνδέσεων εφαρμόζονται συχνά στα ασύρματα δίκτυα έτσι ώστε να μειωθούν οι απειλές της ασφάλειας τους.
- **Ανάγκη για κλιμάκωση:** Το γεγονός ότι κάποια ασύρματα δίκτυα (π.χ. κινητά δίκτυα για εφαρμογή σε στρατιωτικές επιχειρήσεις) μπορεί να είναι σχετικά μεγάλα (π.χ. δεκάδες ή εκατοντάδες κόμβων ανά περιοχή δρομολόγησης), δημιουργεί την ανάγκη για κλιμάκωση (scalability). Με βάση όμως τα παραπάνω χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων δικτύων, οι μηχανισμοί για την επίτευξη της κλιμάκωσης σε αυτά είναι κάτι το καινούργιο.

4.4 Παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στην οικογένεια πρωτοκόλλων 802.11

Παρακάτω περιγράφονται οι κυρίαρχες παράμετροι που σχετίζονται με το σχεδιασμό του 802.11 πρωτοκόλλου και των διάφορων παραλλαγών του.

- **Αξιοπίστη παράδοση και παραλαβή δεδομένων:** Όπως συμβαίνει σε κάθε ασύρματο δίκτυο το MAC (αλλά και το φυσικό) επίπεδο παρουσιάζει σημαντική αναξιοπιστία. Ο θόρυβος, οι παρεμβολές, και άλλα αποτελέσματα της διάδοσης προκαλούν την απώλεια ενός σημαντικού αριθμού MAC πλαισίων. Ακόμα και με την χρήση κωδικών διόρθωσης λαθών, ένας αριθμός MAC πλαισίων μπορεί να μην παραληφθεί ορθά. Αυτό το ζήτημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με την χρήση μηχανισμών αξιοπιστίας υψηλότερων επιπέδων, όπως αποτελεί για παράδειγμα το πρωτόκολλο TCP. Όμως οι χρονομετρητές οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αναμετάδοση στα υψηλότερα επίπεδα είναι τυπικά της τάξης των μερικών δευτερολέπτων. Είναι έτσι πιο αποτελεσματικό τα λάθη αυτά να αντιμετωπιστούν στο MAC επίπεδο. *Για αυτόν τον σκοπό το IEEE 802.11 πρότυπο περιλαμβάνει ένα πρωτόκολλο ανταλλαγής πλαισίων.* Όταν ένα σταθμός παραλαμβάνει ένα πλαίσιο δεδομένων από έναν άλλο σταθμό τότε επιστρέφει ένα πλαίσιο επιβεβαίωσης στον σταθμό ο οποίος αποτελεί τον αποστολέα. Αυτή η συναλλαγή δεν μπορεί να διακοπεί εξαιτίας της μετάδοσης ενός άλλου σταθμού. Εάν η πηγή δεν λάβει μια επιβεβαίωση μέσα σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα επειδή καταστράφηκε το πλαίσιο δεδομένων ή το πλαίσιο επιβεβαίωσης, η πηγή αναμεταδίδει το πλαίσιο.

Ο βασικός μηχανισμός μετάδοσης δεδομένων στο IEEE 802.11 πρότυπο περιλαμβάνει την ανταλλαγή δύο πλαισίων. Για να επιτύχουμε περαιτέρω αξιοπιστία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μηχανισμός ανταλλαγής 4 πλαισίων. Σε αυτό το σχήμα, η πηγή αρχικά δημιουργεί ένα πλαίσιο αίτησης αποστολής (Request To Send – RTS) το οποίο και αποστέλλει στον προορισμό. Ο προορισμός στην συνέχεια απαντά με ένα πλαίσιο έγκρισης αποστολής (Clear To Send – CTS). Αφού η πηγή λάβει το CTS πλαίσιο, μεταδίδει τα πλαίσια δεδομένων και ο προορισμός απαντά με μία επιβεβαίωση. Το RTS πλαίσιο προειδοποιεί όλους τους σταθμούς που βρίσκονται εντός της περιοχής παραλαβής της πηγής, ότι θα πραγματοποιηθεί μία μετάδοση. Αυτοί οι σταθμοί αποφεύγουν κάθε μετάδοση έτσι ώστε να αποφευχθεί κάποια σύγκρουση μεταξύ δύο πλαισίων, τα οποία μεταδίδονται την ίδια χρονική στιγμή. Παρόμοια, το CTS πλαίσιο προειδοποιεί όλους τους σταθμούς που βρίσκονται εντός της περιοχής παραλαβής του προορισμού ότι πρόκειται να πραγματοποιηθεί μία μετάδοση.

- **Ευελιξία κατά τον έλεγχο πρόσβασης:** Η ομάδα εργασίας του 802.11 προτύπου έχει ορίσει 2 τύπους πρωτοκόλλων σχετικά τον MAC μηχανισμό: 1) τα πρωτόκολλα κατανεμημένης πρόσβασης τα οποία (όπως το Ethernet) κατανέμουν την απόφαση μετάδοσης σε όλους τους σταθμούς, χρησιμοποιώντας έναν μηχανισμό ανίχνευσης του φέροντος και 2) τα πρωτόκολλα κεντρικοποιημένης πρόσβασης τα οποία αναθέτουν την απόφαση μετάδοσης από κάποιον σταθμό σε μια κεντρική οντότητα.
 - Ένα πρωτόκολλο κατανεμημένης πρόσβασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ad hoc δίκτυο με ομότιμους σταθμούς και, επίσης, σε άλλες διαμορφώσεις WLAN οι οποίες παρουσιάζουν κυρίως καταιγιστική κίνηση. Το χαμηλότερο επίπεδο του MAC επιπέδου αποτελεί την *κατανεμημένη λειτουργία συντονισμού (Distributed*

Coordination Function – DCF). Η DCF λειτουργία χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο ανταγωνισμού για την παροχή πρόσβασης στο δίκτυο. Συνήθως η ασύγχρονη κίνηση χρησιμοποιεί την DCF λειτουργία. Το DCF υπο-επίπεδο κάνει χρήση ενός απλού αλγορίθμου πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος (carrier sense multiple access – CSMA). Εάν ένας σταθμός θέλει να μεταδώσει ένα MAC πλαίσιο ανιχνεύει το μέσο. Εάν το μέσο είναι ανενεργό, ο σταθμός μπορεί να μεταδώσει, διαφορετικά ο σταθμός πρέπει να περιμένει μέχρι η τρέχουσα μετάδοση να ολοκληρωθεί. Η DCF λειτουργία δεν υποστηρίζει κάποιον μηχανισμό ανίχνευσης των συγκρούσεων (π.χ. το CSMA/CD) διότι η ανίχνευση των συγκρούσεων δεν είναι πρακτική σε ένα ασύρματο δίκτυο. Για να εξασφαλίσουμε την επαρκή λειτουργία αυτού του αλγορίθμου, η DCF λειτουργία περιλαμβάνει μία σειρά καθυστερήσεων η οποία ισοδυναμεί με ένα σχήμα προτεραιότητας.

- Ένα πρωτόκολλο κεντρικοποιημένης πρόσβασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου ένας αριθμός ασύρματων σταθμών συνδέονται μεταξύ τους, ενώ υπάρχει και ένας σταθμός βάσης ο οποίος συνδέεται στο ενσύρματο LAN. Αυτό το πρωτόκολλο είναι κυρίως χρήσιμο εάν κάποια από τα δεδομένα προς αποστολή είναι υψηλής προτεραιότητας. Η *σημειακή λειτουργία συντονισμού* (*Point Coordination Function - PCF*) αποτελεί έναν κεντρικοποιημένο MAC αλγόριθμο ο οποίος χρησιμοποιείται για την παροχή υπηρεσιών χωρίς ανταγωνισμούς (contention-free). Η PCF λειτουργία λειτουργεί πάνω από την DCF και εκμεταλλεύεται χαρακτηριστικά της DCF λειτουργίας για να εξασφαλίσει την πρόσβαση στους χρήστες του δικτύου.
- **Εξοικονόμηση ενέργειας στο φυσικό επίπεδο:** Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι σταθμοί σε ένα ασύρματο WLAN δίκτυο λειτουργούν ως επί το πλείστον με μπαταρίες, οπότε η διάρκεια ζωής των μπαταριών αποτελεί έναν κρίσιμο πόρο για την λειτουργία του δικτύου. Ωστόσο η χωρητικότητα των μπαταριών δεν μπορεί να αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό, οπότε διάφορες προσπάθειες πραγματοποιούνται για τον σχεδιασμό ενεργό-αποδοτικού υλικού. Μία φορητή συσκευή αποτελείται από επιμέρους τμήματα υλικού τα οποία καταναλώνουν ενέργεια: επεξεργαστής, μνήμη, δίσκος, οθόνη και ασύρματη κάρτα διεπαφής δικτύου (Wireless Network Interface Card – WNIC) η οποία μπορεί να καταναλώσει σχεδόν το 10-50% της ολικής ενέργειας του συστήματος, το οποίο και ερμηνεύει το γεγονός σημαντικής μείωσης της διάρκειας ζωής της μπαταρίας ενός φορητού υπολογιστή. Επομένως, είναι απαραίτητη η υποστήριξη λειτουργίας των WNIC με χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Έτσι, όσον αφορά τη διαμόρφωση, οι 2 κυρίαρχες τεχνικές διαμόρφωσης ευρέως φάσματος που προδιαγράφονται στο 802.11 για το φυσικό στρώμα είναι η τεχνική FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) και η DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Κύριο πλεονέκτημα της FHSS έναντι της εναλλακτικής DSSS αποτελούν τα απλούστερα και φθηνότερα ηλεκτρονικά για την υλοποίηση των ανάλογων συσκευών και άρα η επίτευξη χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας.
- **Εξοικονόμηση ενέργειας στο MAC επίπεδο:** Οι μηχανισμοί διαχείρισης της ισχύος και εξοικονόμησης ενέργειας που αφορούν τις ασύρματες επικοινωνίες διαχωρίζονται σε μηχανισμούς ελέγχου της ισχύος μετάδοσης του αποστολέα και σε γενικότερους μηχανισμούς διαχείρισης της ισχύος. Οι *αλγόριθμοι διαχείρισης της ισχύος* ταξινομούνται επιπλέον σε αλγορίθμους MAC επιπέδου, επιπέδου δικτύου

καθώς και υψηλότερων επιπέδων. Προφανώς, η κατανάλωση ενέργειας σε έναν σταθμό συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την πολιτική που έχει υιοθετηθεί στο MAC επίπεδο και οι αλγόριθμοι MAC επιπέδου ταξινομούνται, περαιτέρω, σε αλγόριθμους μετάβασης των σταθμών σε ανενεργή κατάσταση και αλγόριθμους ελέγχου της ισχύος μετάδοσης. Παρακάτω παρουσιάζονται 3 ενεργο – αποδοτικά MAC πρωτόκολλα ελέγχου της ισχύος μετάδοσης σε ένα ασύρματο WLAN δίκτυο:

- **Πρωτόκολλο PCDC:** Αποτελεί ένα πρωτόκολλο ελέγχου της ισχύος μετάδοσης για ασύρματα δίκτυα, η χρήση του οποίου μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο. Τα RTS/CTS πλαίσια δεν προκαλούν αναβολή των μεταδόσεων σε όλους τους παραλήπτες τους και επιπλέον επιπρόσθετη πληροφορία αποφυγής των συγκρούσεων μεταξύ των πακέτων περιλαμβάνεται στα CTS πλαίσια τα οποία στέλνονται μέσω ενός ξεχωριστού καναλιού ελέγχου. Το πρωτόκολλο τελικά επιτρέπει ταυτόχρονες μεταδόσεις πακέτων χωρίς να παρεμβάλλονται μεταξύ τους οι διάφορες μεταδόσεις.
- **Πρωτόκολλο PCMA:** Ένα επιπλέον πρωτόκολλο ελέγχου της ισχύος μετάδοσης σε ασύρματα δίκτυα η χρήση του οποίου οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου στηρίζεται στο μοντέλο αποφυγής συγκρούσεων on/off.
- **Πρωτόκολλο PCM:** Η λειτουργία του PCM πρωτοκόλλου αποτελεί μια παραλλαγή της ιδέας μετάδοσης των RTS/CTS πλαισίων με μέγιστη ισχύ μετάδοσης, ενώ τα πλαίσια δεδομένων και επιβεβαίωσης μεταδίδονται με την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ.
- **Δυνατότητα συνύπαρξης διαφορετικών δικτύων και χρηστών:** Όσον αφορά την μετάδοση, η τεχνική FHSS βασίζεται στην ιδέα της αλλαγής της φέρουσας ενός σήματος μέσα σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και σύμφωνα με μια συγκεκριμένη ψευδοτυχαία ακολουθία (hopping pattern). Μοιάζει με την κλασσική FDMA (Frequency Division Multiple Access), με τη διαφορά ότι κάθε χρήστης χρησιμοποιεί διάφορες φέρουσες ανάλογα με το hopping pattern του. Για να επιτευχθεί επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη πρέπει ο δέκτης να γνωρίζει το hopping pattern του πομπού και να υπάρχει καλός συγχρονισμός μεταξύ τους. Πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η δυνατότητα συνύπαρξης διαφορετικών ασυρμάτων δικτύων, αρκεί τα hopping patterns τους να είναι διαφορετικά, δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή κάθε σύστημα να μεταδίδει σε διαφορετική φέρουσα. Τότε τα hopping patterns ονομάζονται ορθογώνια και η συνολική διέλευση μεγιστοποιείται. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα συνύπαρξης με χρήστες που εκπέμπουν σήματα στενής ζώνης. Αν η εκπομπή γίνεται με αρκετά μεγάλη ισχύ τότε η παρεμβολή από το Frequency Hopping σύστημα σε αυτούς είναι αμελητέα. Αλλά και η δική τους παρεμβολή στο Frequency Hopping σύστημα είναι αμελητέα, εφόσον μπλοκάρουν μία μόνο φέρουσα από όσες αυτό χρησιμοποιεί.
- **Υψηλός ρυθμός μετάδοσης:** Η τεχνική Direct Sequence είναι η πιο επιτυχημένη τεχνική που έχει χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τα ασύρματα δίκτυα. Σε σχέση με τη Frequency Hopping τεχνική μετάδοσης απαιτεί περισσότερη ενέργεια για να επιτύχει παρόμοια διέλευση, όμως το μεγάλο πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί εύκολα να αναβαθμιστεί για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης.

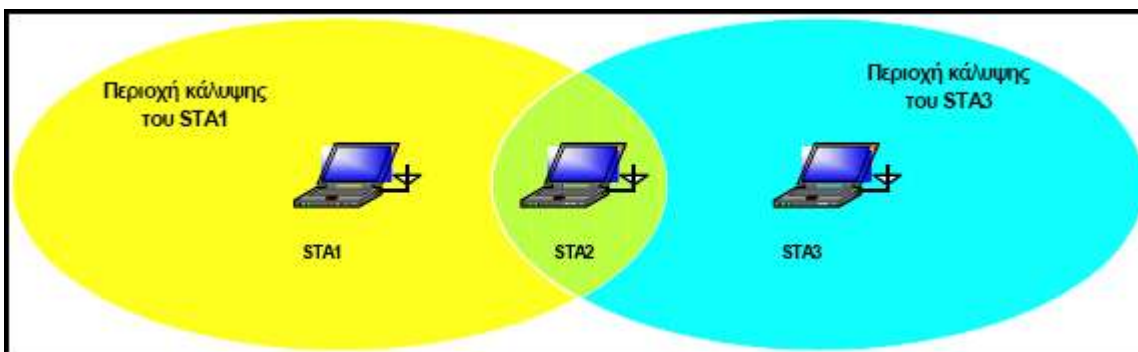
- **Ανοχή σε παρεμβολές:** Όσον αφορά την μετάδοση, η τεχνική DSSS αντικαθιστά κάθε bit πληροφορίας με μία σειρά από bits που ονομάζεται spreading code (κώδικας εξάπλωσης). Τα bits του spreading code κατά σύμβαση ονομάζονται chips. Τα chips μεταδίδονται σε πολύ υψηλότερο ρυθμό από τα αρχικά bits πληροφορίας και έτσι το φάσμα του μεταδιδόμενου σήματος «απλώνεται». Για παράδειγμα αν αντικαθίσταται κάθε bit με μια ακολουθία από 10 chips, το τελικό σήμα θα καταλαμβάνει 10 φορές μεγαλύτερο φασματικό εύρος από το αρχικό. Υποθέτουμε πάντα ότι ο χρόνος μετάδοσης bits είναι ο ίδιος και στις δύο περιπτώσεις, δηλαδή ότι τα 10 chips πρέπει να μεταδοθούν στον ίδιο χρόνο με το αρχικό bit. Ο αριθμός των chips που κωδικοποιούν κάθε bit ονομάζεται και processing gain (κέρδος επεξεργασίας) ή και spreading ratio (παράγοντας εξάπλωσης). Αυτή η τεχνική έχει, λοιπόν, το χαρακτηριστικό ότι διευρύνει το φάσμα του προς μετάδοση σήματος, μειώνοντας ταυτόχρονα το πλάτος του, δηλαδή απλώνει την ισχύ του σήματος σε πολύ μεγαλύτερο φασματικό εύρος. Ο δέκτης εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή εξάγει τα αρχικά bits πληροφορίας, δημιουργώντας ξανά ένα σήμα στενής ζώνης. Για να το κάνει αυτό πρέπει να γνωρίζει το spreading code που χρησιμοποίησε ο πομπός. Ένα πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η ανοχή σε παρεμβολές στενής ζώνης, καθώς και μεγαλύτερη ασφάλεια, εφόσον το «απλωμένο» σήμα μοιάζει σαν απλός θόρυβος σε πομπό που λαμβάνει μόνο σήμα στενής ζώνης.
- **Επίτευξη ασφάλειας:** Κάθε δικτυακή υποδομή έχει 3 βασικά στοιχεία τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη σχετικά με την ασφάλεια του δικτύου: την εμπιστευτικότητα, την ακεραιότητα και τον έλεγχο πρόσβασης. Στην περίπτωση ενός ασύρματου δικτύου, η ικανοποίηση και των 3 αυτών αναγκών δεν είναι απλή υπόθεση καθώς το ασύρματο μέσο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεν είναι ασφαλές από τη φύση του. Τα στοιχεία γενικά που θα πρέπει να ικανοποιούνται είναι:
 - *Εξασφάλιση της εμπιστευτικότητας* σε φυσικό επίπεδο με χρήση κρυπτογράφησης. Ακόμα και αν κάποιος υποκλέψει δεδομένα δεν θα πρέπει να είναι σε θέση να τα διαβάσει.
 - Προστασία του δικτύου από *μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση*. Κάθε άτομο που χρησιμοποιεί το δίκτυο θα πρέπει να είναι πιστοποιημένο μέσω κατάλληλων ασφαλών μηχανισμών.
 - Εξασφάλιση της *ακεραιότητας των δεδομένων* και *αποφυγής παραχάραξης* τους με κατάλληλους μηχανισμούς.

Τα παραπάνω δεν είναι σε θέση από μόνο του κάποιο πρωτόκολλο να τα εξασφαλίσει. Κάθε κατασκευαστής έχει ενσωματώσει διαφορετικούς μηχανισμούς ασφαλείας, οπότε και η τελική επιλογή θα γίνει με βάση την αξιολόγηση του υλικού. Από τη στιγμή που ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο είναι μια τεχνολογία βασισμένη σε εκπομπές broadcast, κάθε σταθμός που βρίσκεται σε κάποια απόσταση από έναν σταθμό που εκπέμπει μπορεί να «ακούσει» την εκπομπή, οπότε και να την υποκλέψει.

- Για την αντιμετώπιση του γεγονότος αυτού αναπτύχθηκε το *Wired Equivalent Privacy* (ή *WEP*). Το WEP ήταν βασισμένο στον αλγόριθμο RC4 και υλοποιήσεις του υπάρχουν τόσο με 64-bit μήκος κλειδιού όσο και με 128-bit. Το WEP έχει μια ασθενή υλοποίηση ενός πίνακα αρχικοποίησης 24-bit. Στις πιο πολλές υλοποιήσεις ο πίνακας αρχικοποιεί την ασύρματη συσκευή μετάδοσης με 0 και

αυξάνει κατά ένα για κάθε πακέτο που στέλνεται. Σε ένα αρκετά φορτωμένο δίκτυο, οι αριθμοί του πίνακα (2^{24}) μπορούν να εξαντληθούν σε περίπου 8 ώρες και μετά ο πίνακας επιστρέφει στην τιμή μηδέν και αρχίζει να αυξάνει κατά ένα ξανά. Καθώς αυτός ο πίνακας μεταδίδεται μη κρυπτογραφημένος, το κλειδί κρυπτογράφησης υπόκειται σε μια γρήγορη brute-force επίθεση από κατάλληλα εργαλεία λογισμικού, όπως το AirSnort.

- Σαν απάντηση στα προβλήματα του WEP, οι διάφοροι κατασκευαστές υλοποίησαν δικά τους σχήματα κρυπτογράφησης και ελέγχου πρόσβασης για να εξασφαλίσουν την ακεραιότητα των δεδομένων. Η Cisco, για παράδειγμα, υλοποίησε το Lightweight Extensible Authentication Protocol, ένα υποσύνολο του πρότυπου EAP που χρησιμοποιείται για έλεγχο πρόσβασης μέσω Radius καθώς και κρυπτογράφηση σε επίπεδο πακέτου χρησιμοποιώντας μια αρχική έκδοση ενός ισχυρού συστήματος κρυπτογράφησης που ονομάζεται *Temporal Key Integrity Protocol (TKIP)*.
- Σήμερα το τοπίο της ασφάλειας / κρυπτογράφησης στα ασύρματα δίκτυα έχει αλλάξει προς το καλύτερο με την εισαγωγή του *Wi-Fi Protected Access (ή WPA)*. Το WPA είναι ένα υποσύνολο του 802.11i προτύπου πρόσβασης. Είναι μια συνολική λύση για τον έλεγχο πρόσβασης καθώς και για την κρυπτογράφηση, χρησιμοποιώντας τα πρότυπα 802.1x και EAP για την πιστοποίηση των χρηστών και το πρότυπο TKIP με μεθόδους ελέγχου της ακεραιότητας για την αποφυγή επιθέσεων τύπου Man-in-the-middle (παραχάραξη πακέτων). Το WPA είναι σχεδιασμένο για να είναι προς τα εμπρός συμβατό με το 802.11i.
- **Επίλυση του προβλήματος του κρυμμένου κόμβου (hidden node):** Όπως αναφέρθηκε και στη μελέτη της αξιόπιστης παράδοσης/παραλαβής δεδομένων παραπάνω, για να διασφαλιστεί ότι μία συγκεκριμένη ανταλλαγή πλαισίων θα γίνει χωρίς διακοπή από μετάδοση τρίτου σταθμού, το πρότυπο 802.11 υποστηρίζει το μηχανισμό RTS/CTS. Προστατεύοντας την ανταλλαγή πλαισίων, ο μηχανισμός RTS/CTS βελτιώνει την απόδοση της χρήσης του ασύρματου δικτύου σε περιπτώσεις μεγάλου φόρτου εξαιτίας της ύπαρξης πολλών τερματικών και αντιμετωπίζει το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου. Το πρόβλημα αυτό απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 56: Το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, ο σταθμός STA1 δεν γνωρίζει την ύπαρξη του STA3, εφόσον αυτός είναι έξω από την περιοχή κάλυψής του. Το ίδιο συμβαίνει και με τον STA3, ο οποίος δεν γνωρίζει την ύπαρξη του STA1, για τον ίδιο λόγο με

την προηγούμενη περίπτωση. Ο STA2 βρίσκεται στην κοινή περιοχή κάλυψης των STA 1 και STA3 και συνεπώς μπορεί να ανταλλάσσει πλαίσια και με τους δύο. Το πρόβλημα δημιουργείται στην περίπτωση που οι STA1 και STA3 επιχειρούν να επικοινωνήσουν με τον STA2 ταυτόχρονα. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία συγκρούσεων και τα πλαίσια που έχουν εκπεμφθεί χάνονται. Τη λύση, λοιπόν, σ' αυτό το πρόβλημα έρχεται να δώσει ο μηχανισμός RTS/CTS. Σύμφωνα μ' αυτόν, ο κόμβος STA2 θα εκπέμψει ένα πλαίσιο CTS σε απάντηση του RTS που θα του έχει στείλει νωρίτερα ο STA1. Αυτό το πλαίσιο CTS θα το λάβει και ο STA3 (καθώς «ακούει») και, έτσι, θα αποφύγει να μεταδώσει κι αυτός κάποιο πλαίσιο που θα προκαλούσε σύγκρουση. Τον ίδιο ρόλο παίζει και το πλαίσιο RTS που μεταδίδει ο STA1, δηλαδή ενημερώνει άλλους κρυφούς κόμβους που μπορεί να βρίσκονται γύρω του και δεν βλέπουν τον STA2.

- **Μη κεντρικοποιημένος έλεγχος και δυναμικές τοπολογίες ανάλογα με την εφαρμογή:** Στην παράγραφο 4.3.1 αναλύθηκαν λεπτομερώς όλοι οι τρόποι επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων ενός ασύρματου δικτύου: **IBSS (Independent Basic Service Set)** ή **ad hoc, BSS (Basic Service Set)** ή **infrastructure, ESS (Extended Service Set)**. Παρακάτω τονίζουμε μερικές βασικές τους ιδιότητες που καταδεικνύουν την ευχέρεια των δυνατοτήτων που προσφέρει το 802.11 πρωτόκολλο όσον αφορά την επιλογή της καταλληλότερης τοπολογίας για μια ασύρματη εφαρμογή.
 - Στην IBSS τοπολογία 2 ή περισσότερες συσκευές (peers) επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους (*χωρίς κεντρικό σταθμό*) μέσω συγκεκριμένων μονοπατιών. Λόγω της ύπαρξης πολλαπλών μονοπατιών (εναλλακτικών διαδρομών) μεταξύ των κόμβων παρέχεται μεγάλη αξιοπιστία και αυξημένη ταχύτητα. Το IBSS είναι συνήθως προσωρινό και δημιουργείται για κάποιο σκοπό (π.χ. καταστροφή, μετάδοση ενός γεγονότος ή σπάνιου φαινομένου, κλπ.) και μετά διαλύεται.
 - Στην BSS τοπολογία, το 802.11 δίκτυο αποτελεί ένα κυψελωτό δίκτυο παρόμοιο των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Όλα τα μέλη της κυψέλης (BSS) επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω Access Points (APs), κατά το μοντέλο client – server. Οι κόμβοι δεν είναι απαραίτητο να επικοινωνούν οπτικά μεταξύ τους, αρκεί όλοι να μπορούν να επικοινωνήσουν με το AP. Τα APs συνδέουν το BSS με ένα πιθανό ενσύρματο δίκτυο και έχουν τον κεντρικό έλεγχο της λειτουργίας του BSS. Για να συμμετέχει ένας σταθμός στο BSS πρέπει να ακολουθήσει τη διαδικασία του association με το AP το οποίο και αποφασίζει, τελικά, αν ο σταθμός θα γίνει τελικά δεκτός στο BSS.
 - Στην ESS τοπολογία πολλά APs που συγκροτούν κυψέλες μπορούν να συνδέονται μέσω ενός συστήματος διανομής. Σε αυτήν την περίπτωση τα APs επικοινωνούν στο στρώμα ζεύξης δεδομένων μέσω του δικτύου κορμού, επιτελώντας τη λειτουργία της γέφυρας για τους σταθμούς διαφορετικών BSSs. Το 802.11 προσφέρει κινητικότητα σε ένα ESS, αρκεί το δίκτυο κορμού να είναι ένα απλό LAN ή και VLAN (Virtual LAN). Έτσι, ένας σταθμός ενός BSS μπορεί να κινείται ελεύθερα αλλάζοντας BSSs χωρίς ούτε αυτός, ούτε και το δίκτυο να βλέπουν κάποια αλλαγή, ή να χρειάζονται νέες ρυθμίσεις. Κάθε BSS επικοινωνεί με τα υπόλοιπα BSSs για την διαμεταγωγή των πακέτων αλλά και για την εναλλαγή των σταθμών, καθώς αυτοί αλλάζουν BSS, μέσω του αυστήματος διανομής.

- **Ποιότητα υπηρεσιών:** Στα WLAN, όπως και στην περίπτωση των LAN η ποιότητα υπηρεσιών από άκρη σε άκρη δεν είναι εξασφαλισμένη. Οι αλγόριθμοι πρόσβασης στο μέσο DCF και PCF δεν υποστηρίζουν μηχανισμούς DiffServ και κατ' επέκταση QoS. Το υποπρότυπο 802.11e παρέχει λειτουργίες Quality of Service (QoS) με εισαγωγή προτεραιοτήτων στα πακέτα των δικτύων 802.11 για μεταδόσεις VoIP και streaming media. Η πραγματοποίηση αυτού του στόχου απαιτεί τη συνεννόηση μεταξύ σταθμών πελατών και APs, αλλά και από τον διαχειριστή του δικτύου. Την λύση έρχεται να δώσει ο αλγόριθμος πρόσβασης στο μέσο HCF που ονομάζεται και Enhanced DCF (EDCF). Ο σκοπός του EDCF είναι να προσφέρει πρόσβαση στο μέσο είτε με ανταγωνισμό είτε χωρίς ανταγωνισμό μεταξύ των σταθμών, προσφέροντας ταυτόχρονα έναν μηχανισμό προτεραιοτήτων. Παράλληλα, χρησιμοποιεί στοιχεία από τους DCF και PCF και διατηρεί τη συμβατότητα με αυτούς. Ένα BSS που υποστηρίζει το πρότυπο IEEE 802.11e ονομάζεται QoS supporting BSS.
- **Ακόμη υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης:**
 - Το υποπρότυπο 802.11b (το πιο δημοφιλές μέχρι σήμερα) χρησιμοποιεί την τεχνική HR/DSSS (High Rate/ Direct Sequence Spread Spectrum) και την διαμόρφωση CCK (Complementary Code Keying - χρησιμοποιεί το πλήρες εύρος ζώνης συχνοτήτων κάθε υποκαναλιού για να διαμορφώσει τα σήματά του). Η HR/DSSS μπορεί να θεωρηθεί σαν επέκταση του αρχικού DSSS φυσικού στρώματος, που ορίστηκε στο 802.11, και, μάλιστα, χρησιμοποιεί τα ίδια κανάλια με αυτό, πετυχαίνοντας αρκετά μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης.
 - Το υποπρότυπο 802.11a επιτυγχάνει μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης για πολυμεσικές εφαρμογές σε εσωτερικούς χώρους αξιοποιώντας την τεχνική της πολυπλεξίας OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing / Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας). Η βασική ιδέα της είναι η διαίρεση ενός κύριου υψηλού ρυθμού σε πολλούς μικρότερους ρυθμούς και η χρήση αυτών για την αποστολή των δεδομένων ταυτόχρονα. Όλα τα «αργά» κανάλια πολυπλέκονται τελικά σε ένα «γρήγορο» κανάλι και μεταδίδονται. Με την ορθογωνοποίηση λύνεται το πρόβλημα της σπατάλης του εύρους ζώνης προκειμένου να διαχωριστούν τα κανάλια μεταξύ τους.

4.5 Χαρακτηριστικά εφαρμογών που καθορίζουν τις τοπολογίες

Στην παρούσα παράγραφο θα δούμε διάφορες διαδικτυακές εφαρμογές και τα χαρακτηριστικά τους προκειμένου να οδηγηθούμε σε βέλτιστες πρακτικές που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την τοπολογία κρίσιμων δικτυακών συσκευών, όπως δρομολογητών και εξυπηρετητών σε ασύρματα δίκτυα 802.11.

Πιο συγκεκριμένα, θα δούμε την επίδραση που ασκεί η τοπολογία του δικτύου στην απόδοση μιας ιδιαίτερα απαιτητικής διαδικτυακής εφαρμογής, της αποστολής και λήψης MPEG streamed video. Επιπλέον, θα μελετηθεί ο ρόλος που παίζει ο βαθμός κινητικότητας των κόμβων σε ένα WLAN προκειμένου να γίνει αποδοτική διαχείριση του διαθέσιμου εύρους ζώνης για την εξυπηρέτηση των handoffs (αλλαγών καναλιού) και για επίτευξη ιδανικότερης ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Services – QoS). Τέλος, θα δούμε την περίπτωση της μεταφοράς φωνητικών μηνυμάτων και το κατά πόσο αυτή

επηρεάζεται από τα φαινόμενα του handover (αλλαγής Access Point από έναν κινητό σταθμό).

4.5.1 Δικτυακή απόδοση κατά τη μετάδοση MPEG video

Στο [2] αναλύεται η δικτυακή απόδοση κατά τη μετάδοση MPEG video χρησιμοποιώντας ροές δεδομένων που κατασκευάζονται μέσω του προτύπου MPEG-1. Από την ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας προκύπτει ότι τα χαρακτηριστικά του δικτύου όσον αφορά τα σφάλματα και η επιλογή του πρωτοκόλλου μετάδοσης με την οποία γίνεται η αποστολή του βίντεο έχει μεγάλο αντίκτυπο στην ποιότητα του ληφθέντος βίντεο. Τα πειράματα έγιναν χρησιμοποιώντας UDP, μια αναξιόπιστη μέθοδο μετάδοσης, η οποία δεν μειώνει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων υπό την παρουσία δικτυακής συμφόρησης, όπως γίνεται στο TCP. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Το μέγεθος των ρυθμών απώλειας διαφέρει για τις διαφορετικές διαδρομές και τους διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, κάτι που είναι άμεσα συνυφασμένο με την τοπολογία του δικτύου που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον, ο μέσος ρυθμός απώλειας πακέτων ήταν μεγαλύτερος για την περίπτωση του 1 Mbps απ' ότι για την περίπτωση των 384 kbps, όπως και ήταν αναμενόμενο.
- Ο ρυθμός απώλειας πακέτων των διαφόρων συνδέσεων παρουσίαζε διακυμάνσεις ανάλογα με την ώρα της ημέρας ή την ημέρα της εβδομάδας. Μάλιστα, συνολικά οι απώλειες πακέτων δεν είναι ανεξάρτητα κατανομημένες αλλά αντίθετα τείνουν να εμφανίζονται σε εκρήξεις. Μια τέτοια κατάσταση μπορεί να είναι πολύ συχνή σε μια ασύρματη WLAN τοπολογία όπου η συμφόρηση μεταξύ των κόμβων μπορεί να είναι δυναμικά μεταβαλλόμενη ανάλογα με το χρόνο. Στο πείραμα, χωρίς να προκαλεί έκπληξη, μεγαλύτεροι ρυθμοί απώλειας παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια ωρών αιχμής και μικρότεροι ρυθμοί απώλειας στη μέση της νύχτας. Όπως και στον ρυθμό απώλειας πακέτων, ο ρυθμός λήψης πακέτων εκτός σειράς άλλαξε ανάλογα με την ώρα της ημέρας. Στη μέση της νύχτας, δεν υπήρχαν σχεδόν καθόλου πακέτα εκτός σειράς. Επιπλέον, δεν παρατηρήθηκε απευθείας συσχέτιση μεταξύ ρυθμού απώλειας πακέτων και ρυθμού λήψης πακέτων εκτός σειράς. Και τα δύο έτειναν να είναι 0 ταυτόχρονα, αλλά δεν είχαν τοπικά ακρότατα τις ίδιες στιγμές.
- Η συμφόρηση του δικτύου επηρεάζεται όχι μόνο από περιορισμούς χωρητικότητας ρυθμού μετάδοσης, αλλά επίσης και από περιορισμούς πρόσβασης. Ένας κόμβος περιορισμένης πρόσβασης είναι ένας κόμβος του οποίου η επίδοση είναι περισσότερο ευαίσθητη στον αριθμό πακέτων που μπορεί να χειριστεί απ' ότι τον αριθμό bits. Εξαιτίας του μεγάλου ρυθμού μετάδοσης πακέτων, μια ουρά δρομολογητή στη διαδρομή μπορεί να απέκτησε περιορισμό πρόσβασης και να αναγκάστηκε να αγνοήσει πακέτα. Σίγουρα μια τέτοια κατάσταση επηρεάζεται από την τοπολογία του δικτύου που χρησιμοποιήθηκε, αφού εξαρτάται άμεσα από την ποσότητα των ενδιάμεσων κόμβων που περνούν τα πακέτα προκειμένου να φτάσουν στον προορισμό τους και άρα από την αυξανόμενη πιθανότητα κάποιος κόμβος να γίνει περιορισμένης πρόσβασης.
- Εξαιτίας αλλαγών στις διαδρομές δρομολόγησης αλλά και στην τοπολογία του δικτύου (όταν φυσικά πρόκειται για ασύρματο ad hoc δίκτυο), τα πακέτα UDP

μπορεί να φτάσουν με διαφορετική σειρά από εκείνη με την οποία στάλθηκαν. Πακέτα που φτάνουν εκτός σειράς μπορούν να ελαττώσουν την ποιότητα του μεταδιδόμενου βίντεο, εάν δεν παρέχονται τα μέσα αναδιάταξης των πακέτων πριν την αποκωδικοποίηση. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας ενδιάμεσος χώρος αποθήκευσης στον αποκωδικοποιητή για να δώσει χρόνο για καθυστερημένες αφίξεις πακέτων. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος επιβαρύνει το βίντεο με καθυστέρηση, κάτι το οποίο αποτελεί πρόβλημα για κάποιες εφαρμογές. Η επιλογή του μεγέθους της ενδιάμεσης μνήμης αποθήκευσης έχει μεγάλο αντίκτυπο στην ποιότητα του ληφθέντος βίντεο. Αν επιλεγεί μικρό μέγεθος ενδιάμεσης μνήμης, τότε ένα καθυστερημένο πακέτο ισοδυναμεί με χαμένο πακέτο. Στα πειράματα παρατηρήθηκε ότι η πλειοψηφία των πακέτων που λαμβάνονταν εκτός σειράς είχαν καθυστέρηση ενός πακέτου. Έτσι, μία ενδιάμεση μνήμη μεγέθους 1 πακέτου θα μπορούσε να μειώσει τον αριθμό των καθυστερημένων πακέτων από 10,0% των μεταδιδόμενων πακέτων σε 4,7%. Αντίθετα, μια ενδιάμεση μνήμη μεγέθους 5 πακέτων θα μπορούσε να τον μειώσει μόνο κατά 0,32%.

Από τις παραπάνω παρατηρήσεις μπορούμε να καταλήξουμε σε μερικά χρήσιμα συμπεράσματα για την τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε και το πώς αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί στην περίπτωση της ασύρματης μετάδοσης:

- Καταρχήν, μια παρεμφερής τοπολογία με διάφορους κόμβους διασκορπισμένους σε μια μικρή σχετικά περιοχή (περίπτωση ασύρματου LAN) ή σε μεγαλύτερη (ασύρματο MAN) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την περίπτωση ασύρματης μετάδοσης MPEG video – ροών. Το 802.11 πρωτόκολλο ασύρματης δικτύωσης παρέχει δυνατότητες μετάδοσης βίντεο αφού μπορεί να υποστηρίξει μεταδόσεις της τάξης των 2 Mbps (στα πειράματα του [2] χρησιμοποιήθηκαν ρυθμοί μετάδοσης των 384 Kbps και 1 Mbps αντίστοιχα).
- Ακριβώς επειδή η συμπίεση MPEG video περιλαμβάνει έντονη χρονική και χωρική εξάρτηση, το αντίκτυπο από απώλειες πακέτων μπορεί να μεταφραστεί σε υψηλό ρυθμό σφαλμάτων πλαισίων (στα πειράματα ρυθμοί απώλειας πακέτων της τάξης του 3% μεταφραζόταν σε ρυθμούς σφαλμάτων πλαισίων της τάξης του 30%). Αυτό υποδηλώνει την *αναγκαιότητα χρήσης τεχνικών συγκάλυψης σφαλμάτων και/ή τεχνικών ανθεκτικότητας σφαλμάτων στον αποκωδικοποιητή κατά τη μετάδοση MPEG video.*
- Εξαιτίας της πιθανότητας εμφάνισης συμφόρησης λόγω περιορισμού πρόσβασης ορισμένων ασύρματων κόμβων, ο μεγάλος ρυθμός μετάδοσης μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα έναν αυξανόμενο ρυθμό απώλειας πακέτων. Με βάση την διαπίστωση αυτή, *θα ήταν χρήσιμο σε ένα πραγματικό σύστημα να παρέχει τα μέσα για να καταστέλλεται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ανάλογα με την παρουσία δικτυακής συμφόρησης, όπως γίνεται στο SCP (Streaming Control Protocol), ή χρησιμοποιώντας πληροφορίες που είναι διαθέσιμες στο Real Time Control Protocol.*
- Ο ρυθμός απώλειας πακέτων είναι άμεσα συνυφασμένος με το μέγεθος των μεταδιδόμενων πακέτων αλλά και με το ρυθμό μετάδοσης και το δικτυακό φόρτο. Έτσι, πακέτα τα οποία έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από το MTU (μονάδα μετάδοσης Ethernet) και τα οποία πρέπει να «σπάσουν» σε επιμέρους κομμάτια, έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να χαθούν. Ωστόσο, *μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης εγγυάται ότι μικρότερα πακέτα τείνουν να χάνονται πιο εύκολα από ότι μεγαλύτερα*

πακέτα μεγέθους το πολύ ίσο με MTU. Επιπλέον, ο δικτυακός φόρτος, π.χ. όταν υπάρχει αυξανόμενη χρήση του ασύρματου μέσου μετάδοσης, αυξάνει την πιθανότητα απωλειών.

- Τέλος, σε οποιαδήποτε ασύρματη τοπολογία είναι επιβεβλημένη η επαναδιάταξη των πακέτων που φτάνουν εκτός σειράς. Αυτό, με τη σειρά του, απαιτεί την *ενδιάμεση αποθήκευση των πακέτων πριν την αποκωδικοποίηση με χρήση ενδιάμεσης μνήμης στους κόμβους*. Το μέγεθος της μνήμης αυτής εξαρτάται άμεσα από την καθυστέρηση των πακέτων που χαλάνε τη σειρά. Ωστόσο σε γενικές γραμμές, η καθυστέρηση αυτή αναμένεται να είναι μικρή οπότε και η ενδιάμεση μνήμη θα πρέπει να είναι μικρού μεγέθους.

4.5.2 Ποιότητα υπηρεσιών (QoS) και διαχείριση εύρους ζώνης στα WLANs

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα QoS στο επίπεδο σύνδεσης είναι το *πώς θα ελέγχονται οι ακυρώσεις μεταβιβάσης ελέγχου (hand – offs) εξαιτίας της έλλειψης διαθέσιμου εύρους ζώνης στο καινούριο κελί*, καθώς ένας καινούργιος χρήστης εισέρχεται σε αυτό. Ο χρήστης θα πρέπει να μπορεί να συνεχίζει τη συνεδρία του που είναι σε εξέλιξη. Επιπλέον, η αύξηση του αριθμού των χρηστών στα δίκτυα οδηγεί σε πιο συχνές μεταβιβάσεις ελέγχου σαν αποτέλεσμα της κυρίαρχης τάσης να μικραίνει το μέγεθος των κελιών.

Στο [3] μελετώνται 2 παράμετροι QoS σε επίπεδο σύνδεσης: 1) η πιθανότητα P_{CB} να μπλοκαριστούν νέες αιτήσεις σύνδεσης και 2) η πιθανότητα P_{HD} να ακυρώνονται οι μεταβιβάσεις ελέγχου. *Ιδανικά θα θέλαμε να μην έχουμε καθόλου ακυρώσεις μεταβιβάσης ελέγχου έτσι ώστε οι εν εξελίξει συνδέσεις να διατηρούνται για όσο θέλει ο χρήστης*, όπως άλλωστε συμβαίνει και σε ένα ενσύρματο δίκτυο το οποίο εγγυάται την παρουσία του QoS.

Παρόλα αυτά, *αυτό απαιτεί από το ασύρματο δίκτυο να δεσμεύει κάποιο εύρος ζώνης σε όλα τα κελιά από τα οποία μπορεί να διέλθει ένας κινητός κόμβος*. Κάτι τέτοιο δεν είναι πιθανό στις περισσότερες περιπτώσεις, επειδή η κατεύθυνση της κίνησης δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων. Επιπλέον, αυτή η κινητή δέσμευση ανά σύνδεση θα υπολειπургεί σημαντικά και, συνεπώς, θα εξαντλήσει το εύρος ζώνης το οποίο, με τη σειρά του, θα προκαλέσει υψηλή P_{CB} .

Κάθε κελί μπορεί, αντίθετα, να δεσμεύσει *θραύσματα εύρους ζώνης των εν εξελίξει συνδέσεων στα εραπτόμενα κελιά*, και αυτό το συνολικά δεσμευμένο εύρος ζώνης (των πολλαπλών εν εξελίξει συνδέσεων) μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά για μεταβιβάσεις ελέγχου και όχι για νέες αιτήσεις συνδέσεων. *Το ερώτημα τότε είναι το πόσο εύρος ζώνης θα πρέπει να δεσμευτεί σε κάθε κελί για μεταβιβάσεις ελέγχου;*

Μοντέλο Συστήματος – Παρουσίαση της προσέγγισης

Ο αλγόριθμος δεσμεύει κάποιο εύρος ζώνης σε κάθε κελί για πιθανές μεταβιβάσεις ελέγχου από τα εραπτόμενα κελιά. Αυτό το δεσμευμένο εύρος ζώνης θα χρησιμοποιείται μόνο γι' αυτό το σκοπό και όχι για καινούριες αιτήσεις σύνδεσης στο τρέχον κελί. Σε αυτή την περίπτωση, μια καινούρια αίτηση σύνδεσης σε ένα κελί απαιτεί ένα πολύ απλό έλεγχο εισόδου:

$$\sum_i b_i + b_{new} \leq C - B_r,$$

όπου:

C: είναι η χωρητικότητα της ασύρματης σύνδεσης,

B_r: είναι το δοσμένο δεσμευμένο εύρος ζώνης (π.χ. το απαιτούμενο εύρος ζώνης προς δέσμευση για μεταβιβάσεις ελέγχου),

b_i: είναι το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται από μια υπάρχουσα σύνδεση *i*,

b_{new}: είναι το εύρος ζώνης που απαιτείται από την καινούρια αίτηση σύνδεσης.

Με την άφιξη, λοιπόν, μιας καινούριας αίτησης σύνδεσης, το B_r ανανεώνεται προνοητικά και προσαρμοστικά σύμφωνα με τον αλγόριθμο – πριν πραγματοποιήσει τον έλεγχο εισόδου της αίτησης – ανάλογα με την κατάσταση κίνησης στα εφαπτόμενα κελιά. Παρατηρούμε ότι το B_r είναι ο στόχος και όχι το πραγματικό εύρος ζώνης, καθώς ένα κελί μπορεί να μην έχει τη δυνατότητα να δεσμεύσει αυτό το εύρος ζώνης. Για

παράδειγμα, για ένα κελί μπορεί να ισχύει $\sum_i b_i + B_r > C$. Αυτό μπορεί να συμβεί

επειδή ένας σταθμός βάσης μπορεί να ελέγχει την είσοδο μόνο νέων αιτήσεων σύνδεσης και όχι τις συνδέσεις που παραδίδονται από εφαπτόμενα κελιά.

Σχολιασμός της προσέγγισης – εφαρμογές που μπορεί να αξιοποιηθεί

Στο 4^ο κεφάλαιο του [3] παρουσιάζεται ένας προνοητικός και προσαρμοστικός αλγόριθμος για δέσμευση εύρους ζώνης και ελέγχου εισόδου ο οποίος κρατάει την πιθανότητα ακύρωσης μεταβίβασης ελέγχου κάτω από μια δοσμένη πιθανότητα **P_{HD,target}**. Για τον αλγόριθμο μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

- Η λογική του στηρίζεται στο ότι από τη στιγμή που είναι πρακτικά αδύνατο να εξαλείψουμε εξ' ολοκλήρου τις ακυρώσεις μεταβιβάσεων ελέγχου, το καλύτερο που μπορούμε να κάνουμε είναι να παρέχουμε ένα είδος πιθανοτικής επιβεβαίωσης *QoS* κρατώντας το *P_{HD}* κάτω από μια δοσμένη τιμή. Η προσέγγιση αυτή είναι:
 - **προνοητική** καθώς εκτιμάει τις κατευθύνσεις και τους χρόνους των μεταβιβάσεων ελέγχου των εν εξελίξει συνδέσεων σε εφαπτόμενα κελιά.
 - **προσαρμοστική** επειδή ρυθμίζει δυναμικά την ποσότητα του δεσμευμένου εύρους ζώνης ανάλογα με τα εκτιμώμενα αποτελέσματα και τις ακυρώσεις μεταβίβασης ελέγχου που παρατηρούνται. Η πληροφορία σχετικά με την κατεύθυνση/διαδρομή των κινούμενων κόμβων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί.
- Υποθέτουμε ότι κάθε σύνδεση απαιτεί μια συγκεκριμένη ποσότητα εύρους ζώνης για να επιβιώσει. Σε αυτήν την περίπτωση, η απόπειρα για μεταβίβαση ελέγχου θα μπορούσε να αποτύχει εξαιτίας ανεπαρκούς εύρους ζώνης στο νέο κελί και τότε θα συμβεί μια ακύρωση μεταβίβασης ελέγχου. Με την έννοια αυτή, η παρούσα προσέγγιση είναι ακατάλληλη:
 - για **delay-insensitive** εφαρμογές, οι οποίες θα μπορούσαν να ανεχτούν μεγάλες καθυστερήσεις στις μεταβιβάσεις ελέγχου στην περίπτωση ανεπαρκούς εύρους ζώνης στο νέο κελί τη στιγμή της μεταβίβασης ελέγχου.

- ο για **sort hand-off** των συστημάτων CDMA, στα οποία ένας κινητός κόμβος μπορεί να επικοινωνεί μέσω δύο εφαιπτόμενων σταθμών βάσης ταυτόχρονα για μικρό χρονικό διάστημα μέχρι την πραγματική μεταβίβαση ελέγχου. Οπότε η δέσμευση εύρους ζώνης για μεταβιβάσεις ελέγχου της παρούσας προσέγγισης αφορά κυρίως εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Ωστόσο θα μπορούσε να υιοθετηθεί επίσης και για *delay-sensitive* μη-πραγματικού χρόνου κίνηση.

Συμπεράσματα

Από την παραπάνω προσέγγιση μπορούμε να καταλήξουμε σε μερικά χρήσιμα συμπεράσματα για το τι σημαίνει για την τοπολογία ενός ασύρματου LAN η αποδοτική διαχείριση του εύρους ζώνης και η εγγύηση υψηλής QoS:

- Καταρχήν, η προσέγγιση που παρουσιάζεται στο [3] μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προνοητική, προσαρμοστική δέσμευση εύρους ζώνης και έλεγχο εισόδου όταν ένας χρήστης – κόμβος του ασύρματου δικτύου εισχωρήσει σε νέο κελί. Η προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν πληροφορίες μονοπατιού, δηλαδή όταν δεν είναι γνωστή η εκ των προτέρων τοπολογία των ασύρματων κόμβων, όσο και στην αντίθετη περίπτωση.
- Στην 1^η περίπτωση, δηλαδή όταν ο σταθμός βάσης ή ένας ή/και περισσότεροι ασύρματοι κόμβοι, δεν διαθέτουν πληροφορίες όσον αφορά τα μονοπάτια κίνησης των υπολοίπων κόμβων (που είναι και η γενικότερη περίπτωση), η προσέγγιση βασίζεται στην εκτιμώμενη κινητικότητα κατά τη διάρκεια του χρονικού παραθύρου $[t_0, t_0 + T_{est}]$, όπου t_0 είναι η τρέχουσα χρονική στιγμή.
 - ο Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί τις συναρτήσεις εκτίμησης μεταβίβασης ελέγχου με δύο τρόπους: ο ένας είναι να προβλέψει το επόμενο κελί στο οποίο ο κινητός κόμβος θα μεταβεί, και ο άλλος είναι να εκτιμήσει τον χρόνο παραμονής του κόμβου στο τρέχον κελί.
- Στη 2^η περίπτωση, δηλαδή όταν παρέχονται πληροφορίες διαδρομής, η παραπάνω προσέγγιση διαφοροποιείται προκειμένου να αξιοποιήσει την πληροφορία διαδρομής των κόμβων, αν αυτή είναι διαθέσιμη. Αυτή η ιδιαίτερη περίπτωση μπορεί να συμβεί, για παράδειγμα, όταν ένας κινητός χρήστης οδηγεί ένα αυτοκίνητο με σύστημα GPS το οποίο καθοδηγεί τον χρήστη σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία από την τρέχουσα τοποθεσία που βρίσκεται. Τότε το σύστημα πλοήγησης (GPS) επικοινωνεί με τον σταθμό βάσης του τρέχοντος κελιού για να ενημερώσει το επόμενο κελί στο οποίο υποτίθεται ότι ο χρήστης θα μεταβεί.
 - ο Με διαθέσιμη την πληροφορία διαδρομής, ο σταθμός βάσης γνωρίζει ήδη το επόμενο κελί και, συνεπώς, η συνάρτηση εκτίμησης μεταβίβασης ελέγχου χρησιμοποιείται αποκλειστικά για να εκτιμήσει τον χρόνο παραμονής του κόμβου στο τρέχον κελί και όχι να προβλέψει το επόμενο κελί στο οποίο ο κινητός κόμβος θα μεταβεί (υποθέτουμε πάντα ότι ο οδηγός ακολουθεί πιστά τις οδηγίες του GPS).
- Σε καθεμιά από τις παραπάνω 2 περιπτώσεις, στόχος είναι η διατήρηση ενός υψηλού επιπέδου του παρεχόμενου QoS, αφού μιλάμε για εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπου είναι αρκετά μεγάλη η πιθανότητα μεταβίβασης των κινητών κόμβων από το ένα κελί στο άλλο (είτε η τοπολογία του WLAN είναι σταθερή και γνωστή εκ των προτέρων είτε ad – hoc). Ο αλγόριθμος και για τις 2 περιπτώσεις εγγυάται ότι σε

ασύρματα 802.11 δίκτυα μπορεί να επιτευχθεί αποδοτική διαχείριση των hand – offs και να διατηρείται παράλληλα υψηλή η παρεχόμενη QoS, ακόμη κι όταν ο βαθμός κινητικότητας των κόμβων ή ο αριθμός των κελιών είναι αυξημένος.

4.5.3 Κίνηση δεδομένων φωνής και διαχείριση του handover στο 802.11b

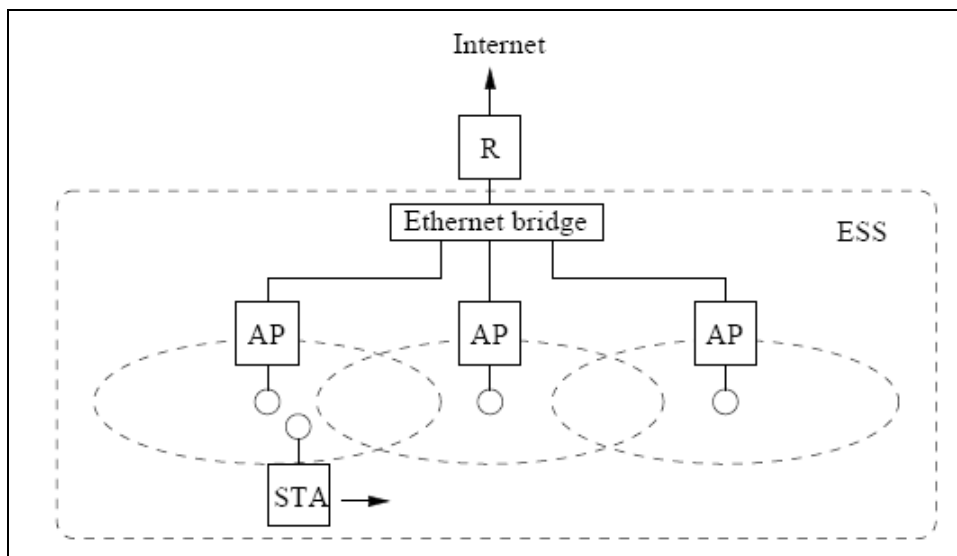
Τα WLAN έχουν μέχρι σήμερα χρησιμοποιηθεί κυρίως για συνηθισμένες διαδικτυακές υπηρεσίες όπως για περιήγηση ιστού, μεταφορά αρχείων και ηλεκτρονικό ταχυδρομείο. Παρόλα αυτά, όταν η χρήση της τηλεφωνίας μέσω IP (Voice over IP – VoIP), αποτελέσει μια προσιτή σε όλους και αρκετά διαδεδομένη τεχνολογία, τα ασύρματα δίκτυα θα χρησιμοποιούνται επίσης και ως ασύρματα τηλεφωνικά συστήματα.

Επιπλέον, το να υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η υπάρχουσα υποδομή WLAN ως κινητό δίκτυο όπου ένας ασύρματος σταθμός μπορεί να πραγματοποιήσει μεταβιβάσεις ελέγχου μεταξύ διαφορετικών σημείων πρόσβασης, με λίγη ή καθόλου υποβάθμιση της επίδοσης κατά τη διάρκεια μιας εν εξελίξει συνομιλίας, θα αποτελέσει ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό.

Πειραματική διαδικασία χρονικής εκτίμησης του handover

Στο [8] γίνεται μια διεξοδική μελέτη πάνω στο θέμα του handover που αφορά κόμβους (STAs) που ανταλλάσσουν φωνητικά μηνύματα. Τα δεδομένα που παρουσιάζονται αφορούν αποκλειστικά μεταβιβάσεις ελέγχου εντός του ίδιου LAN, όπου τα σημεία πρόσβασης (APs) είναι ρυθμισμένα να ανήκουν στο ίδιο σύνολο εκτεταμένων υπηρεσιών (ESS).

Η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε με βάση την τοπολογία της παρακάτω εικόνας.



Εικόνα 57: Η διαδικασία του handover στο 802.11

Εδώ τα APs ανήκουν στο ίδιο ESS. Καθώς ο σταθμός (STA) κινείται προς τα όρια της περιοχής κάλυψης του αριστερού AP (AP1), παρατηρεί την πτώση της ισχύος του σήματος μέσω των πλαισίων Beacon που στέλνει περιοδικά το AP1 και αρχίζει να

ψάχνει (με passive ή active scanning) για νέο AP με δυνατότερο σήμα. Το 802.11 καθορίζει ότι ένα STA θα πρέπει να είναι συνδεδεμένο μόνο με ένα AP κάθε φορά. Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το STA δεν είναι ικανό να ανταλλάξει δεδομένα ούτε με το παλιό ούτε με το νέο AP που πρόκειται να συνδεθεί, ονομάζεται **καθυστέρηση handover (handover latency/delay)**. Επομένως, κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής ενός handover υπάρχει η πιθανότητα να διακοπεί η επικοινωνία.

Η διεξαγωγή του handover γίνεται με βάση τα ακόλουθα βήματα:

1. Για να βρεί το STA υποψήφια APs για να συνδεθεί, ξεκινά τη **φάση αναζήτησης (search phase)**, δηλαδή αρχίζει να σαρώνει τα διαφορετικά κανάλια συχνοτήτων. Στην παραπάνω εικόνα, ο STA κατά τη διεξαγωγή του handover, θα λάβει πλαίσια (Beacon ή Probe Response, ανάλογα με το είδος του scanning) από το AP2 (μεσαίο) και το AP3 (δεξιό).
2. Υποθέτοντας ότι το σήμα από το AP3 είναι δυνατότερο, ο STA θα ξεκινήσει τη διαδικασία του Reassociation με το AP3. Πιο συγκεκριμένα, ο STA ξεκινά την επόμενη φάση του handover, γνωστή ως **φάση εκτέλεσης (execution phase)**. Δηλαδή στέλνει στο AP3 ένα πλαίσιο Reassociation Request. Η μόνη διαφορά του πλαισίου αυτού από το πλαίσιο Association Request είναι ότι περιέχει τη διεύθυνση του προηγούμενου AP (AP1).
3. Το AP3 απαντάει με πλαίσιο Reassociation Response.
4. Αν η διαδικασία ολοκληρωθεί χωρίς πρόβλημα, το AP3 πρέπει να επικοινωνήσει με το AP1 και να του γνωστοποιήσει ότι ο STA ανήκει πλέον στο δικό του BSS.
5. Τελικά μετά το Reassociation, το AP1 στέλνει όσα αποθηκευμένα πλαίσια έχει και προορίζονται για το STA στο AP3 και τερματίζει το association με το STA. Πλέον όλα τα πλαίσια από και προς το STA θα επεξεργάζονται από το AP3.

Η επικοινωνία μεταξύ APs γίνεται μέσω ενός πρωτοκόλλου IAPP (Inter Access Point Protocol), γνωστό και σαν πρότυπο IEEE 802.11f. Η επικοινωνία αυτή γίνεται μέσω του ενσύρματου δικτύου (Ethernet) στο οποίο είναι συνδεδεμένα τα APs. Σημειώνεται πάντως πως δεν είναι ευθύνη του STA να ειδοποιήσει το παλιό AP για το handover.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, η *καθυστέρηση handover μπορεί να οριστεί ως το άθροισμα της χρονικής διάρκειας της φάσης αναζήτησης και της φάσης εκτέλεσης*. Έτσι για την καταμέτρησή της μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλοι δείκτες (hooks) εντός του WLAN driver του STA, οι οποίοι θα μαρκάρουν το χρόνο από τη στιγμή που το STA θα αποφασίσει να ξεκινήσει τη διαδικασία του handover μέχρι τη στιγμή όπου θα λάβει ένα Reassociation Response.

Για τις ανάγκες του πειράματος παράχθηκαν πακέτα UDP με φορτίο 172 byte κάθε 20ms προκειμένου να εξομοιωθεί μια ροή φωνής με κωδικοποίηση διαμόρφωσης παλμού (PCM) των 64 Kbps σε πακέτα των 160 byte συν μια επικεφαλίδα RTP των 12 byte. Αυτά τα πακέτα UDP μεταφέρονταν εντός πακέτων IPv6 αν και, πέρα από τη διαφορά στο μέγεθος των επικεφαλίδων, οι μετρήσεις θα πρέπει να είναι επίσης έγκυρες και για πακέτα IPv4.

Εδώ είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι αν και τα πειράματα διεξήχθησαν στα πλαίσια του ενός STA που περιφέρεται εντός ενός ESS, αυτά μπορούν να επεκταθούν και στην περίπτωση όπου το STA περιφέρεται και μεταξύ APs που διασυνδέονται σε διαφορετικά LANs. Σε αυτή την περίπτωση του *cross – LAN handover*, το STA θα

πρέπει να αλλάξει IP για να εισέλθει στο νέο LAN και έτσι είναι απαραίτητο να υπάρχει ένας έξτρα μηχανισμός που θα συνδέει APs με διαφορετικά ESSIDs (δηλαδή APs που ανήκουν σε διαφορετικά LANs).

Σχολιασμός πειραματικών μετρήσεων

Με βάση την τοπολογία της εικόνας 57 ([8]) πάρθηκαν μετρήσεις για το φαινόμενο του handover για τις περιπτώσεις που αφορούσαν 1) την αποστολή ροών δεδομένων φωνής προς τον κινητό σταθμό (**downstream**), 2) την λήψη ροών δεδομένων φωνής στα APs (**upstream**), 3) διαφορετικές αρχιτεκτονικές των WLAN καρτών στους κινητούς σταθμούς (D-Link και Lucent STAs), 4) την ανταγωνιζόμενη κίνηση (competing traffic) μεταξύ 2 STAs για την ίδια τοπολογία της εικόνας 46 και για τις περιπτώσεις upstream και downstream δεδομένων.

Χαρακτηρίζοντας τις μετρήσεις καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- *Η φάση της αναζήτησης έχει την κυριότερη επίδραση συνολικά στο φαινόμενο του handover* (είναι αρκετά μεγαλύτερη σε διάρκεια συγκρινόμενη με τη φάση της εκτέλεσης).
- *Η διάρκεια της φάσης αναζήτησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την χρησιμοποιούμενη WLAN κάρτα.* Για παράδειγμα, στην μία περίπτωση από τις 2 (Lucent) παρατηρήθηκε ότι το STA λάμβανε κάποια πακέτα από το παλιό AP πριν τελειώσει η φάση αναζήτησης.
- *Κατά τη διάρκεια της upstream κίνησης (STA -> AP) η ροή δεδομένων αντιμετωπίζει μια καθυστέρηση κατά τη διάδοσή της (delay spike).* Μια τέτοια κατάσταση είναι παρόμοια με την περίπτωση των **υπερφορτωμένων δρομολογητών (congested routers)** όπου τα πακέτα που μεταδίδονται αργότερα θα φτάσουν στον προορισμό τους μαζί με εκείνα που μεταδόθηκαν νωρίτερα, δημιουργώντας έναν «συρμό» πακέτων (packet train or packet burst). Στην περίπτωση της κίνησης δεδομένων φωνής κάτι τέτοιο συμβαίνει συχνά αφού τα πακέτα προς μετάδοση αποθηκεύονται από τον STA για όσο διαρκεί το handover.
- *Η καθυστέρηση των πακέτων δεν ακολουθούσε ομοιόμορφη κατανομή.* Αντιθέτως, το 1^ο πακέτο ήταν αυτό με τη μεγαλύτερη καθυστέρηση και η καθυστέρηση των υπολοίπων μειωνόταν γραμμικά με το πέρασμα του χρόνου.
- *Η κυριότερη διαφορά μεταξύ της upstream και downstream κίνησης ήταν ότι τα upstream πακέτα γενικώς **καθυστερούν** ενώ τα downstream πακέτα γενικώς **χάνονται**.*
- *Κατά την περίπτωση της ανταγωνιζόμενης κίνησης επηρεαζόταν τόσο η συμπεριφορά όσο και η απόδοση του handover.* Πιο συγκεκριμένα, η διάρκεια των φάσεων αναζήτησης και εκτέλεσης ήταν μεγαλύτερες πράγμα που συνεπάγεται μεγαλύτερες καθυστερήσεις ή μεγαλύτερο ρυθμό απώλειας πακέτων.

Συμπεράσματα

Από το σχολιασμό των παραπάνω πειραματικών μετρήσεων, μπορούμε να καταλήξουμε σε μερικά χρήσιμα συμπεράσματα για την τοπολογία ενός WLAN όταν πρόκειται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου που είναι ευαίσθητες στο θέμα του handover, όπως είναι η κίνηση δεδομένων φωνής:

- Τα σημεία πρόσβασης (APs) θα πρέπει να είναι τοποθετημένα με μεγάλη πυκνότητα έτσι ώστε η φάση αναζήτησης (που διαρκεί και περισσότερο κατά τη διεξαγωγή του handover) να μειώνεται χρονικά όσο το δυνατό περισσότερο.
- Οι ασύρματοι σταθμοί θα πρέπει να είναι ρυθμισμένοι να εκμεταλεύονται αυτό το γεγονός. Έτσι θα επιτρέπεται σε έναν ασύρματο σταθμό να εκκινήσει μια μεταβίβαση ελέγχου πριν χαθεί η συνδεσιμότητα με το προηγούμενο σημείο πρόσβασης.
- Για ασύρματα δίκτυα που απασχολούν έναν μικρό αριθμό από APs τα οποία μπορούν να συνδεθούν σε ένα ESS, τα παραδοσιακά **Ethernet hubs** είναι αρκετά.
- Ωστόσο, τα hubs μεταδίδουν τα εισερχόμενα πακέτα σε όλα τα υπόλοιπα ports, πράγμα που μπορεί να γίνει μεγάλο πρόβλημα αν το δίκτυο αυξάνεται ως προς τα APs που εξυπηρετεί, τους χρήστες ανά AP και την κίνηση ανά χρήστη. Κάτι τέτοιο θα οδηγήσει σίγουρα σε **καταστάσεις συμφόρησης (bottlenecks)** στο ενσύρματο δίκτυο στο οποίο συνδέονται τα APs (AP backbone).
- Νεότεροι τύποι **έξυπνων hubs** είναι ικανοί να μαθαίνουν σε ποιο port πρέπει να προωθηθεί ποιο πακέτο κάθε φορά. Ωστόσο κι αυτά πάσχουν από την αδυναμία διαχείρισης πολλαπλών ροών δεδομένων που έρχονται ή φεύγουν από διαφορετικά ζευγάρια ports.
- Αν χρησιμοποιηθούν **γέφυρες (bridges)** αντί για hubs για τη σύνδεση των διαφόρων APs, αυτές θα διαχωρίζουν τα ξεχωριστά LAN segments σε ξεχωριστά collision domains. Επιπλέον, οι γέφυρες έχουν τη δυνατότητα να μαθαίνουν το πού βρίσκονται οι διαφορετικές MAC διευθύνσεις έτσι ώστε τα πακέτα να μεταδίδονται μόνο στα ports εκείνα που αντιστοιχούν στους παραλήπτες. Έτσι, αυτές είναι απαραίτητες για το χτίσιμο μιας WLAN τοπολογίας η οποία θα υποστηρίζει εφαρμογές τέτοιου είδους.
- Τέλος, στην περίπτωση του *cross – LAN handover* είναι επιβεβλημένη η ενσύρματη δικτύωση των διαφορετικών APs σε ένα AP backbone ώστε να μπορούν να υλοποιηθούν μηχανισμοί απόδοσης διαφορετικών ESSIDs σε APs που ανήκουν σε διαφορετικά WLANs.

5. ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

5.1 Τεχνικές Deployment σε εφαρμογές WSN – δικτύων κινητής τηλεφωνίας

Incremental self-deployment algorithm

Ο self – deployment αλγόριθμος που παρουσιάζεται στο [4] μπορεί να αξιοποιηθεί σε μια σειρά από απαιτητικές καταστάσεις όπου είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός ad-hoc mobile δικτύου σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και το οποίο να παρουσιάζει βέλτιστη απόδοση μεταξύ των κόμβων του, ελάχιστο κόστος ανάπτυξης των κόμβων σε πόρους και υπολογιστική ισχύ και όσο το δυνατόν ευρύτερη κάλυψη περιοχής. Τέτοιου είδους εφαρμογές μπορεί να ποικίλλουν από αστικά περιβάλλοντα πολεμικών μαχών μέχρι επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης, όπου η επείγουσα καταγραφή κρίσιμων περιβαλλοντικών παραγόντων είναι πρωτεύουσας σημασίας.

Θεωρούμε, για παράδειγμα, το περιβάλλον ενός εργοστασίου όπου έχει προκληθεί μια επικίνδυνη διαρροή υλικού (π.χ. ραδιενέργεια ή φωτιά ή χημικά απόβλητα). Σε ένα τέτοιο περιβάλλον θα θέλαμε, προκειμένου π.χ. να καταγράψουμε τους χώρους του εργοστασίου που έχουν μολυνθεί, να «τοποθετήσουμε» μια ομάδα αισθητήρων – κόμβων στον χώρο που μας ενδιαφέρει μέσω ενός παραθύρου ή μιας πόρτας. Στην περίπτωση αυτή, οι κόμβοι μπορεί να είναι εφοδιασμένοι με χημικούς αισθητήρες οι οποίοι τους επιτρέπουν να ανιχνεύουν το επικίνδυνο υλικό. Προκειμένου όμως να έχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή περιοχή κάλυψης σε όσο το δυνατόν μικρότερο χρονικό διάστημα, οι κόμβοι θα πρέπει να αναπτυχθούν σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας το οποίο θα μεγιστοποιεί, μέσω του αλγορίθμου φυσικά, την περιοχή κάλυψης.

Τότε, τα δεδομένα που θα συλλέγονται από τους κόμβους θα μεταφέρονται με ασφάλεια προς ένα κεντρικό κόμβο – σταθμό βάσης μέσω μεταπήδησης (multihopping) και ο οποίος θα βρίσκεται εκτός του μολυσμένου κτιρίου ή χώρου εντός του κτιρίου. Έτσι, μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα θα σχηματιστεί σε πραγματικό χρόνο ένας χάρτης που θα δείχνει ακριβώς τις περιοχές που έχουν μολυνθεί και το πόσο έχει διεισδύσει το επικίνδυνο υλικό μέσα στους χώρους του εργοστασίου.

Μέσω του παραδείγματος αυτού βλέπουμε ότι οι εφαρμογές του παραπάνω αλγορίθμου μπορεί να είναι ανεξάντλητες σε περιβάλλοντα φυσικών καταστροφών, και όχι μόνο. Σε τέτοια περιβάλλοντα δεν είναι καθόλου εύκολο να εγκατασταθούν άμεσα ανθρώπινες υποδομές ενώ τεχνολογίες όπως το GPS (για την ακριβή εντόπιση του προβλήματος) αποτυγχάνουν λόγω του φαινομένου των πολλαπλών μονοπατιών (multipath effect).

Mobile sensor deployment using potential fields

Η προσέγγιση των δυναμικών πεδίων που περιγράφεται στο [5] απαιτείται να λαμβάνει υπόψη μια σειρά από εξωτερικούς και εσωτερικούς παράγοντες όπως η ποσότητα των κόμβων, το μέγεθος του περιβάλλοντος και οι αρχικές συνθήκες (εξωτερικοί παράγοντες) και η μάζα των κόμβων, ο συντελεστής τριβής, κλπ.

(εσωτερικοί παράγοντες). Εντούτοις μπορεί να χρησιμοποιηθεί άνετα και με ικανοποιητικά αποτελέσματα για να επιλύσει το πρόβλημα της ανάπτυξης ενός κινητού δικτύου αισθητήρων.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της προσέγγισης είναι ότι η εφαρμογή της δεν απαιτεί κάποιο είδος κεντρικοποιημένου ελέγχου, διατήρησης μιας μόνιμης τοπολογίας του περιβάλλοντος και επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Επιπλέον αποδεικνύεται εύκολα ότι η προσέγγιση συγκλίνει πάντα σε μια σταθερή κατάσταση (στατική ισορροπία) ακόμη κι αν το περιβάλλον μεταβάλλεται με το χρόνο.

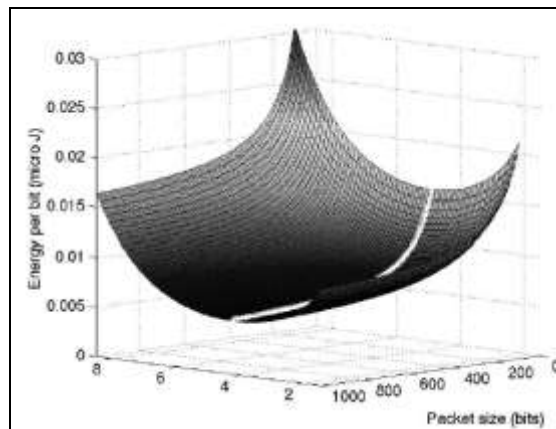
Με την έννοια αυτή αποτελεί ιδανική λύση για καταστάσεις όπου οι επικοινωνίες είναι αδύνατες ή η εγκατάσταση των όποιων φυσικών υποδομών (όπως ένας σταθερός server ή μια σειρά από σταθμούς βάσης για την ενδοεπικοινωνία των κόμβων) είναι απαγορευτική για διάφορους λόγους (π.χ. λόγω του μικρού χρόνου για την συλλογή κρίσιμων περιβαλλοντικών πληροφοριών ή λόγω οικονομικού κόστους). Επιπλέον, είναι ιδανική για περιπτώσεις όπου είναι σίγουρο ότι το περιβάλλον συνεχώς μεταβάλλεται, όπως για παράδειγμα οι πόρτες που ανοιγοκλείνουν στο πείραμα του νοσοκομείου.

Τέλος, είναι ενδιαφέρουσα η εφαρμογή της προσέγγισης σε προβλήματα στα οποία είναι σημαντική η συνδεσιμότητα του δικτύου. Τέτοια προβλήματα αφορούν περιπτώσεις όπου το δίκτυο που αναπτύσσεται θα πρέπει να είναι συνέχεια πλήρως συνεκτικό, δηλαδή να υπάρχει πάντα μονοπάτι που συνδέει οποιοδήποτε ζευγάρι κόμβων (πρόβλημα line-of-sight connectivity). Και, μάλιστα, όταν κάτι τέτοιο πρέπει να γίνει χωρίς να υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των κόμβων.

Energy Aware Wireless Sensor Networks

Σύμφωνα με το [6], η διαχείριση ισχύος για τους αυτοτελείς κόμβους μειώνει την κατανάλωση ενέργειας. Σημαντική, ωστόσο, είναι και η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων να διεξάγεται με έναν ενεργειακά αποδοτικό τρόπο. Εκτός από την αρχιτεκτονική υλικού, σημαντικό ρόλο στην κατανάλωση ενέργειας διαδραματίζει και η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στις ασύρματες συνδέσεις μεταξύ των κόμβων αισθητήρων.

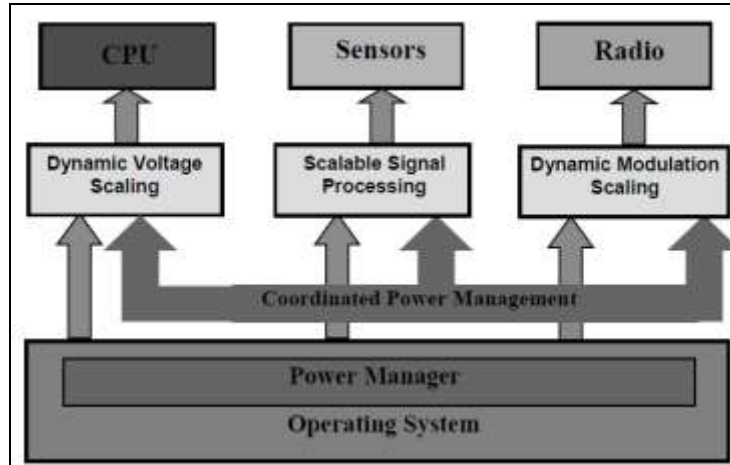
Η επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συνολική ενέργεια έναντι της αξιοπιστίας και των λαθών που υπάρχουν έμφυτα σε μια ασύρματη σύνδεση επικοινωνίας. Η επόμενη εικόνα παρουσιάζει την ενέργεια για επικοινωνία ανά δυαδικό ψηφίο ως συνάρτηση του μεγέθους του πακέτου και της διαμόρφωσης επιπέδου M:



Εικόνα 58: Ενέργεια συναρτήσει του μεγέθους των πακέτων και της διαμόρφωσης

Τα δίκτυα αισθητήρων περιλαμβάνουν διάφορα επίπεδα κόμβων και υπολογιστικές – επικοινωνιακές ανταλλαγές που μπορούν να ερευνηθούν για διαχείριση ενέργειας. Το υπολογιστικό και το επικοινωνιακό υποσύστημα μπορούν να εκμεταλλευτούν την έμφυτη σύμπραξή τους έτσι ώστε να πραγματοποιούν συντονισμένη διαχείριση ενέργειας που καταλήγει σε μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Η επόμενη εικόνα παρουσιάζει ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας που είναι ενσωματωμένο στο OS και πραγματοποιεί συντονισμένη διαχείριση ενέργειας των συστημάτων υπολογισμού, επικοινωνίας και αισθητήρων.



Εικόνα 59: Σύστημα διαχείρισης ενέργειας

Οι περιορισμοί στην αξιοπιστία πρέπει να ληφθούν, επίσης, υπόψη καθώς συνδέονται με την απώλεια πακέτων και την συμπίεση των δεδομένων. Συνήθως οι αποφάσεις που σχετίζονται με την αξιοπιστία λαμβάνονται στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων, το οποίο είναι υπεύθυνο για την ανίχνευση και τη διόρθωση λαθών. Έχουν προταθεί διάφορα σχήματα διόρθωσης λαθών ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας διατηρώντας ωστόσο τις BER (bit error rate) προδιαγραφές του χρήστη.

Σύμφωνα με το [6], η ενσωμάτωση της αναγνώρισης ενέργειας σε αυτοτελείς κόμβους και ζεύγη κόμβων σε επικοινωνία δεν επιλύει το πρόβλημα της ενέργειας στα δίκτυα αισθητήρων. Ολόκληρο το δίκτυο θα πρέπει να αναγνωρίζει την ενέργεια. Στο υψηλότερο επίπεδο του δικτύου αισθητήρων εμφανίζεται το θέμα της μετάδοσης των δεδομένων από τον πομπό στο δέκτη.

Ένας τρόπος αύξησης της διάρκειας ζωής του δικτύου είναι η ομοιόμορφη μετάδοση αυτών των δεδομένων σε όλο το δίκτυο. Η κατανομή των δεδομένων μέσω κατάλληλης δρομολόγησης είναι, επίσης, σημαντική. Σε τυπικά σενάρια ανάπτυξης κόμβων, ένα πυκνό δίκτυο είναι απαραίτητο για να διασφαλίσει μια επαρκή κάλυψη τόσο στους αισθητήρες όσο και στη λειτουργία της δρομολόγησης, ενώ παράλληλα βελτιώνει την ανεκτικότητα του δικτύου σε σφάλματα.

Η κατανομή των δεδομένων στους κόμβους πραγματοποιείται με τρόπο ενεργητικά αποδοτικό με τη χρησιμοποίηση «έξυπνων» πρωτοκόλλων δρομολόγησης και τη σωστή διαχείριση της τοπολογίας. Επιπρόσθετες βελτιστοποιήσεις είναι πιθανές μειώνοντας το μέγεθος των πακέτων που προωθούνται.

Genetic Algorithm approach

Σύμφωνα με το [7], το πεδίο εφαρμογής των γενετικών αλγορίθμων (GA) ποικίλλει και αφορά κυρίως προβλήματα που έχουν να κάνουν με έλεγχο και ικανοποιησιμότητα μοντέλων (model SAT problems). Το πλεονέκτημα των GA είναι ότι ακολουθούν μια διαδικασία που είναι τελείως αυτοματοποιημένη και η οποία αποφεύγει τοπικά μέγιστα (local maxima). Κάθε GA αποτελείται από 3 διαφορετικά συστατικά στοιχεία: επανασυνδυασμός, μεταλλαγή και αξιολόγηση κατάστασης (fitness evaluation). Στον γενετικό αλγόριθμο που παρουσιάζουμε, η συνάρτηση της αξιολόγησης (fitness function) λαμβάνει υπ' όψιν τις μετρικές ισχύος των κόμβων οι οποίες και αποτελούν τον θεμελιώδη περιορισμό για δίκτυα αισθητήρων.

Το πρόβλημα της ανάπτυξης των κόμβων (deployment) σε ένα κινητό δίκτυο αισθητήρων ανάγεται στο πρόβλημα της κάλυψης μιας ευρείας περιοχής. Στο πρόβλημα αυτό κύριος στόχος είναι να επιτευχθεί μια στατική τακτοποίηση των κόμβων τέτοια ώστε να μεγιστοποιείται η συνολική επιφάνεια που μπορεί να ανιχνευθεί από αυτούς. Πολλές προσεγγίσεις επίλυσης του προβλήματος βασίζονται σε δυναμικές τεχνικές πεδίου στις οποίες οι κόμβοι «κατευθύνονται» στο περιβάλλον με βάση τη χαρτογράφηση των περιοχών που επιτυγχάνουν οι deployed κόμβοι.

Ο γενετικός αλγόριθμος που παρουσιάζεται επιτυγχάνει μεν μια παρόμοια λογική στη διάδοση των κόμβων και στην αποφυγή των εμποδίων του περιβάλλοντος, ωστόσο δεν υποφέρει από το πρόβλημα των τοπικών μεγίστων, από το οποίο υποφέρουν μια σειρά από ήδη υπάρχοντες deployment αλγόριθμοι.

Επιπλέον, ο γενετικός αλγόριθμος εστιάζει στα δύο κυρίαρχα προβλήματα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Το πρώτο είναι ότι το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να αναπτυχθούν τέτοιου είδους δίκτυα είναι δυναμικό. Δηλαδή η θέση διαφόρων κινητών οντοτήτων εντός του περιβάλλοντος καθώς και τα γεωγραφικά του χαρακτηριστικά μπορεί να αλλάζουν ανάλογα με το χρόνο, όπως και με άλλους φυσικούς παράγοντες. Επομένως, μια εκ των προτέρων ανάθεση των θέσεων των κόμβων εντός του δικτύου που είναι βασισμένη στην αναζήτηση σε έναν στατικό χάρτη μπορεί να είναι τελείως ανακριβής και αναποτελεσματική.

Το δεύτερο πρόβλημα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι ότι οι κόμβοι μπορεί να είναι αρκετά ευαίσθητοι όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, ειδικά αν σκεφτούμε ότι τέτοιου είδους δίκτυα βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα που πρέπει να λειτουργούν σε μόνιμη 24ωρη βάση (π.χ. ένα σύστημα παρακολούθησης με κινητές κάμερες). Το πρόβλημα επιτείνεται με το είδος και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων που θα πρέπει να εφοδιάζουν τους κόμβους (π.χ. ελάχιστα αποδεκτά παροχής ενέργειας για απρόσκοπτη λειτουργία).

Αντιμετωπίζοντας τα παραπάνω προβλήματα, ο GA-based online deployment αλγόριθμος που παρουσιάζεται στο [7]:

- Αλληλεπιδρά με τη δυναμικότητα του περιβάλλοντος και λαμβάνει υπόψη τα μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά του.
- Αποφασίζει τη στρατηγική ανάπτυξης των κόμβων με βάση την καταναλισκόμενη ισχύ κάθε κόμβου παρακολουθώντας την κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης.
- Εισάγει διαδικασίες τυχαιότητας σε διαφορετικές φάσεις της εκτέλεσής του προκειμένου η ανάπτυξη να συγκλίνει σε ένα στατικό μέγιστο της κάλυψης.

5.2 Κανόνες χρήσης τεχνικών deployment σε δίκτυα αισθητήρων – δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται ανάλυση των τεχνικών deployment κόμβων που αναπτύχθηκαν προηγουμένως για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, ως προς τις παραμέτρους που λαμβάνουν υπόψη. Επιπλέον, διερευνάται το ερώτημα του κατά πόσο είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν 2 ή περισσότερες τεχνικές στην ίδια εφαρμογή και από ποιους παράγοντες εξαρτάται η επιλογή αυτή.

Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι, γενικά, είναι αδύνατο να επιτευχθούν όλοι οι στόχοι σε ένα σύστημα με δίκτυα αισθητήρων. Οι περισσότεροι σχεδιασμοί συστημάτων με WSN εξαρτώνται σημαντικά από την εφαρμογή που υλοποιούν και δίνουν διαφορετική βαρύτητα στον κάθε στόχο. Κατά συνέπεια, τα πρωτόκολλα αντίστοιχα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής και να γίνεται μια κατάλληλη επιλογή των διαφόρων παραμέτρων που αφορούν το σχεδιασμό σύμφωνα με τη βαρύτητα που δίνεται σε κάθε στόχο.

Κατανεμημένα Δίκτυα Αισθητήρων και Εικονικές Δυνάμεις

Όπως έχει ειπωθεί και στην παράγραφο 2.5.1, ένα κατανεμημένο δίκτυο αισθητήρων (DNS) μπορεί να αξιοποιηθεί σε ένα πλήθος εφαρμογών που αφορούν ανίχνευση στόχου με συνεργασία και εντοπισμό των θέσεων των αισθητήρων. Η αποτελεσματικότητά του καθορίζεται από το **βαθμό κάλυψης** μιας περιοχής, το **κόστος της επικοινωνίας** μεταξύ των αναπτυσσόμενων κόμβων και την **αποδοτική διαχείριση των πόρων** τους. Αυτοί οι παράγοντες αποτελούν και τις παραμέτρους που λαμβάνει υπόψη ο αλγόριθμος εικονικής δύναμης (VFA) που εφαρμόζεται ως τεχνική deployment.

Πράγματι, για έναν δεδομένο αριθμό αισθητήρων, ο αλγόριθμος VFA **μεγιστοποιεί την κάλυψη** του πεδίου των αισθητήρων με βάση έναν έξυπνο συνδυασμό ελκτικών και απωστικών δυνάμεων. Επιπλέον, όταν ένας αισθητήρας αναγνωρίσει το αντικείμενο – στόχο μεταδίδει το γεγονός στην κεφαλή της ομάδας. **Ο VFA αλγόριθμος διασφαλίζει ότι η πληροφορία που θα μεταδοθεί προς την κεφαλή είναι περιορισμένη**: για να περιοριστεί το ποσό της πληροφορίας που χάνεται και να διατηρηθεί το εύρος μετάδοσης, οι αισθητήρες αναφέρουν μόνο την παρουσία του στόχου και δεν μεταδίδουν πληροφορία σχετικά με την ισχύ του σήματος, την αξιοπιστία της ανίχνευσης, κλπ.

Συμπερασματικά, ο VFA αλγόριθμος δίνει έμφαση στις παρακάτω παραμέτρους:

- **Μέγιστη κάλυψη περιοχής,**
- **Ποιότητα με περιορισμένους πόρους,**
- Η χρήση περιορισμένων πόρων συνεπάγεται και **δυνατότητες περιορισμού στο υλικό** που θα χρησιμοποιηθεί στους αισθητήρες, **στην κατανάλωση ενέργειας** και **στο κόστος παραγωγής** τους.

Ωστόσο, ο VFA αλγόριθμος για να λειτουργήσει αποδοτικά απαιτεί και μια σειρά προϋποθέσεων που αφορούν την εφαρμοζόμενη αρχιτεκτονική του αναπτυσσόμενου δικτύου αισθητήρων. Οι προϋποθέσεις αυτές αφορούν:

- Την ομαδοποίηση των αισθητήρων σε ομάδες καθεμιά από τις οποίες διαθέτει μια συγκεκριμένη κεφαλή.

- Κάθε αισθητήρας πρέπει να επικοινωνεί με την κεφαλή της ομάδας του για να μεταδώσει τυχόν νέες τοποθεσίες που πρέπει να αναπτυχθούν νέοι κόμβοι.
- Η κεφαλή της ομάδας εκτελεί τον VFA αλγόριθμο και μετακινεί τους αισθητήρες στις επιθυμητές τοποθεσίες.
- Κάθε αισθητήρας συμπεριφέρεται ως πηγή δύναμης για όλους τους υπόλοιπους αισθητήρες. Αυτή η δύναμη μπορεί να είναι είτε θετική (ελκτική) είτε αρνητική (απωστική).
- Μέσω των παραπάνω εφαρμοζόμενων δυνάμεων, ο VFA αλγόριθμος πρέπει να διαβεβαιώσει ότι τελικά θα επιτευχθεί μια ομοιόμορφη κατανομή τοποθέτησης όλων των κόμβων.

Τεχνικές ανίχνευσης στόχου

Στην παράγραφο 2.5.2 αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνικές εντοπισμού και ανίχνευσης στόχων. Η αποτελεσματικότητα των τεχνικών αυτών βασίζεται στην αποδοτική παρατήρηση φυσικών φαινομένων, περιβαλλοντικών γεγονότων, κλπ. Για να γίνει αυτή η παρατήρηση σωστά θα πρέπει να καλύπτονται οι παρακάτω παράγοντες:

- Η αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ των κόμβων μέσω της ορθής επικοινωνίας εντός ενός συνόλου πολλαπλών αισθητήρων,
- Ο εντοπισμός όλων των κόμβων αισθητήρων μέσω της ύπαρξης αναγνωριστικών κόμβων (beacon ή anchor nodes).
- Ο ακριβής υπολογισμός των θέσεων των στόχων ανάλογα με τις θέσεις των αισθητήρων,
- Η εφαρμογή κατάλληλων αλγορίθμων και πρωτοκόλλων δικτύου που επιτρέπουν την ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στους κόμβους.

Σε γενικές γραμμές, η συνεργασία των κόμβων για τον εντοπισμό των στόχων εντός του δικτύου υπονοεί την ομαδοποίηση των κόμβων (clustering), τη multi-hop μετάδοση δεδομένων και τη συγκέντρωση της υπολογιστικής ισχύος ανά ομάδα κόμβων. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι μια κύρια παράμετρος που ικανοποιούν οι τεχνικές ανίχνευσης είναι η **δυνατότητα κλιμάκωσης** μέσω των παραπάνω μηχανισμών. Ωστόσο, καθεμιά από τις παραπάνω τεχνικές παρουσιάζει διαφορετικές προϋποθέσεις και διαφορετικά χαρακτηριστικά κατά την εκτέλεσή της.

Με την έννοια αυτή δίνουν έμφαση σε διαφορετικές παραμέτρους κάθε φορά. Πιο συγκεκριμένα:

- Η trilateration και η multilateration μέθοδος απαιτούν την **τυχαία αλλά ομοιόμορφη κατανομή των κόμβων** για να εφαρμοστούν. Επιπλέον, απαιτούν την **ύπαρξη αναγνωριστικών κόμβων σε γνωστές θέσεις** και οι οποίοι εκπέμπουν κατάλληλα σήματα (μέσω υπερήχων) έτσι ώστε οι υπόλοιπες συσκευές να μπορούν να καθορίσουν τη θέση τους βασιζόμενες στα σήματα αυτά.
- Η APIT απαιτεί ένα μέρος των συσκευών αισθητήρων να είναι εξοπλισμένο με υψηλής ισχύος πομπούς και πληροφορία τοποθεσίας που λαμβάνεται μέσω GPS ή κάποιου άλλου μηχανισμού. Επομένως, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές στις οποίες είναι κρίσιμη η παράμετρος της **χαμηλής αποθηκεύσιμης ενέργειας** στους κόμβους, η **κατανάλωση ισχύος** και το **χαμηλό κόστος παραγωγής**.
- Ο coarse grained εντοπισμός παρουσιάζει **χαμηλή ακρίβεια** στην εύρεση της θέσης τυχαία κατανεμημένων κόμβων η οποία εξαρτάται από το **εύρος μετάδοσης** των

σταθμών βάσης. Επιπλέον, για τους αναγνωριστικούς κόμβους χρησιμοποιεί **τοπολογία mesh** και θέτει τους υπόλοιπους με **τυχαίο τρόπο** και ακολουθώντας την **κανονική κατανομή**.

- Οι hop-counting τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποδοτική διαχείριση **αραιών δικτύων** όπου η πυκνότητα των κόμβων είναι μικρή. Ωστόσο είναι **ακατάλληλες για εφαρμογές** στις οποίες η προσαρμοστικότητα **σε δυναμικό περιβάλλον** που μπορεί να μεταβάλλεται χρονικά είναι καίριας σημασίας.
- Η μέθοδος εντοπισμού μέσω συνεργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές εντοπισμού **κινούμενων αντικειμένων**. Ωστόσο για την εφαρμογή της θα πρέπει κάθε αισθητήρας να μπορεί να καθορίζει αν ένα αντικείμενο είναι μέσα στο μέγιστο εύρος αντίχτυπής του.
- Τέλος, ο καταναμημένος αλγόριθμος DPT βασίζεται στην **ομαδοποίηση των κόμβων** σε κόμβους που βρίσκονται στα όρια, σε μια δοθείσα απόσταση από τα όρια και εκτός ορίων. Έτσι, ο DPT μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές στις οποίες είναι σημαντική η παράμετρος της **κλιμάκωσης**.

Αυτό-διαμορφούμενα δίκτυα

Στην παράγραφο 2.5.3 μελετήσαμε μια τεχνική μείωσης της κατανάλωσης ισχύος στους κόμβους – αισθητήρες ενός WSN. Η χρήση διαφόρων μικροεπεξεργαστών και μικροελεγκτών εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης ισχύος σε συνδυασμό με τη χρήση της δυναμικής διαχείρισης ισχύος (DPM) και της δυναμικής διαβάθμισης τάσης (DVS), μπορεί να μειώσει την συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου και να συμβάλλει στην αύξηση της διάρκειας ζωής του.

Είναι γεγονός ότι από πλευράς υλικού, όλοι οι κόμβοι θα πρέπει να τροφοδοτούνται από μια πηγή ενέργειας (π.χ. μπαταρία, μίνι φωτοβολταϊκή διάταξη, κλπ.). Γι' αυτό θα πρέπει να λειτουργούν με αυστηρά οικονομικό ενεργειακό προϋπολογισμό. Επιπλέον, πρέπει να έχουν διάρκεια ζωής από μερικούς μήνες έως χρόνια από τη στιγμή που η αντικατάσταση της μπαταρίας δεν είναι εφικτή για δίκτυα με χιλιάδες ενσωματωμένους κόμβους.

Με την έννοια αυτή, το χρησιμοποιούμενο σχήμα DPM – DVS μπορεί να φανεί πολύτιμη τεχνική σε ασύρματα δίκτυα στα οποία πρέπει να καλύπτονται μια σειρά από παράμετροι όπως:

- **Μικρές και φτηνές συσκευές** κόμβων αισθητήρων,
- **Περιορισμοί στο υλικό** με επίτευξη χαμηλής αποθηκεύσιμης ενέργειας στους αισθητήρες,
- **Χαμηλό κόστος παραγωγής και συντήρησης** του δικτύου,
- **Χαμηλή κατανάλωση ισχύος,**
- **Αύξηση του χρόνου ζωής** του δικτύου,
- **Δυνατότητες αυτό – ρύθμισης και αυτό – διαμόρφωσης** των δικτύων.

Γενετικός Αλγόριθμος

Ο αλγόριθμος που περιγράφεται στην 2.5.4 επιτυγχάνει ένα πολύ ικανοποιητικό επίπεδο **κάλυψης** σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα και, μάλιστα, επιβάλλοντας στο περιβάλλον τοπικά μέγιστα (π.χ. μικρά διανοίγματα όπως πόρτες και παράθυρα, εντός

ενός μεγάλου χώρου). Επιπλέον, έχει πολύ **μικρή απώλεια πακέτων** ενώ οι κόμβοι καταναλώνουν πολύ **μικρά ποσά ενέργειας**.

Ωστόσο, αυξάνοντας τη διαδικασία της μεταλλαγής (mutation) μπορεί να αυξάνεται η περιοχή κάλυψης αλλά μεγαλώνει η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων. Επιπλέον, ο αλγόριθμος **ομαδοποιεί τους κόμβους** σε έναν εξυπηρετητή (server) και μια συστοιχία από ομάδες κόμβων (clusters). Τέλος, η **τυχειότητα στην ανάθεση των σταθμών βάσης** φαίνεται να αυξάνει τη συχνότητα της αλλαγής της δικτυακής ιεραρχίας, η οποία σημαίνει και **αύξηση του ποσοστού της επικοινωνίας** μεταξύ των κόμβων, ωστόσο οδήγησε στην επίτευξη του γενικού βέλτιστου (δηλ. μέγιστης κάλυψης) σε μικρότερο χρονικό διάστημα.

Self – incremental deployment Αλγόριθμος

Ο self – incremental αλγόριθμος που παρουσιάζεται στην παράγραφο 3.2.1 μπορεί να αξιοποιήσει την κινητικότητα των κόμβων – αισθητήρων για να αποκτήσει το δίκτυο ικανότητες **αυτόματης ανάπτυξης (self – deploy)** και **αυτό – διόρθωσης**. Με την εφαρμογή του το ασύρματο δίκτυο των κατανεμημένων κινητών κόμβων διαθέτει ικανότητες «αίσθησης» μιας φυσικής ποσότητας, επεξεργασίας, επικοινωνίας και κινητικότητας.

Στόχος του αλγορίθμου είναι η **μέγιστη κάλυψη** μιας περιοχής και κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται μέσω της αξιοποίησης της αυξητικότητάς του, δηλαδή του γεγονότος ότι ένας κόμβος αναπτύσσεται κάθε φορά και ο κάθε κόμβος που αναπτύσσεται χρησιμοποιεί τα δεδομένα που έχουν μέχρι εκείνη τη στιγμή συγκεντρωθεί από τους ήδη ανεπτυγμένους κόμβους.

Ωστόσο, ο αλγόριθμος για να λειτουργήσει αποδοτικά απαιτεί την κάλυψη ορισμένων προϋποθέσεων όπως:

- Για κάθε κόμβο πρέπει να ισχύει ο **περιορισμός της ορατότητας**, δηλαδή κάθε κόμβος θα πρέπει να «βλέπει» τουλάχιστον άλλον έναν κόμβο.
- Το περιβάλλον πρέπει να είναι **στατικό**, δηλαδή κατά την ανάπτυξη του το δίκτυο διατηρεί σταθερή τοπολογία.
- Όλοι οι κόμβοι του δικτύου πρέπει να είναι σε θέση να **επικοινωνήσουν** με έναν απομακρυσμένο σταθμό βάσης (remote station).
- Οι κόμβοι μπορούν να αυτοπροσδιορίζουν την τοποθεσία τους μετρώντας μόνο τις μεταξύ τους αποστάσεις (εντοπισμός μέσω ομάδων). Για να εφαρμοστεί η λογική αυτή θα πρέπει **κάθε κόμβος να «βλέπει» τουλάχιστον άλλον έναν** κάθε φορά.

Δυναμικά Πεδία

Η τεχνική που βασίζεται στη θεωρία των δυναμικών πεδίων (παράγραφος 3.2.2) κάνει τις ίδιες υποθέσεις και θεωρήσεις με αυτές που γίνονται για τον self – incremental αλγόριθμο. Ωστόσο διαφέρει από αυτόν στο ότι μεταχειρίζεται τους κόμβους ως εικονικά σωματίδια που υπόκεινται σε «εικονικές δυνάμεις». Αυτές εξασφαλίζουν ότι οι κόμβοι:

- Θα διαδωθούν αρκετά γρήγορα ώστε να μεγιστοποιηθεί η περιοχή κάλυψης του δικτύου.

- Μετακινούνται μόνο όταν αυτό είναι απαραίτητο, αποταμιεύοντας έτσι ένα μεγάλο κομμάτι ενέργειας.

Εναλλακτική χρήση τεχνικών σε εφαρμογές

Έχουμε ήδη δει ότι για να σχεδιαστεί τόσο ένα WSN όσο και ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας με τη μεγαλύτερη δυνατή επίτευξη όλων των στόχων και των απαιτήσεων της εκάστοτε εφαρμογής, θα πρέπει να ικανοποιήσει όλες εκείνες τις παραμέτρους που λαμβάνει υπόψη. Με την έννοια αυτή ο σχεδιασμός, δηλαδή η εξεύρεση της καταλληλότερης τεχνικής deployment, γίνεται βασισμένος στις ιδιαιτερότητες κάθε εφαρμογής. Ωστόσο, αν λάβουμε υπόψη κάποιες (και όχι όλες) βασικές παραμέτρους ανά εφαρμογή, από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι υπάρχουν διάφορες τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά για την ίδια εφαρμογή.

Παρακάτω αναφέρουμε κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα επιλογής 2 τεχνικών για την ίδια εφαρμογή στα οποία καταδεικνύεται από τι εξαρτάται η επιλογή αυτή:

- Ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με το σχήμα DPM – DVS για επίτευξη ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας, αξιόπιστης επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων και χαμηλού κόστους παραγωγής, διαχείρισης και συντήρησης του δικτύου.
- Μια τεχνική ανίχνευσης στόχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά του γενετικού αλγορίθμου όταν το κυρίαρχο ζητούμενο είναι η κλιμάκωση του δικτύου.
- Ο VFA αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά του γενετικού για τη βέλτιστη κάλυψη μιας περιοχής όταν πρέπει να διατηρηθεί χαμηλή η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων και η υψηλή η παρεχόμενη ποιότητα με περιορισμένους πόρους.
- Αν για την ανάπτυξη ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας είναι σημαντικός ο παράγοντας της ευρύτητας της περιοχής κάλυψης στον ελάχιστο δυνατό χρόνο και με το ελάχιστο δυνατό κόστος ανάπτυξης των κόμβων, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάλλιστα τόσο ο self – incremental αλγόριθμος όσο και η τεχνική δυναμικών πεδίων.

5.3 Εφαρμογές WSN και WLANs στο σπίτι, το γραφείο, την βιομηχανία

Τα πολλά πλεονεκτήματα του 802.11 το καθιστούν ιδανικό για εγκατάσταση είτε σαν ένα αυτόνομο δίκτυο είτε σαν ένα δίκτυο που επεκτείνει τις δυνατότητες μιας ενσύρματης δικτυακής εγκατάστασης. Το χαμηλό κόστος των συσκευών και η χαμηλή τους κατανάλωση (δύο σχεδιαστικοί στόχοι της ομάδας 802.11), κάνουν ιδανική την χρήση του στην βιομηχανία.

Συχνά μια βιομηχανική εγκατάσταση χρειάζεται την συνεχή παρακολούθηση ενός συνόλου από συσκευές που ελέγχουν την εύρυθμη λειτουργία της και επικοινωνούν με έναν κεντρικό υπολογιστή που συλλέγει τις πληροφορίες. Ένα peer – to – peer δίκτυο αισθητήρων μπορεί να εγκατασταθεί για την παρακολούθηση συγκεκριμένων εργασιών. Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί εύκολα να γίνει «έξυπνο». Οι αισθητήρες μπορούν να βρίσκουν εναλλακτικές διαδρομές για να επικοινωνούν με τον κεντρικό εξυπηρετητή, δίνοντας 100% uptime στο σύστημα. Ωστόσο η τεχνική deployment που θα εφαρμοστεί για τους κόμβους θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την επίτευξη ελάχιστης κατανάλωσης

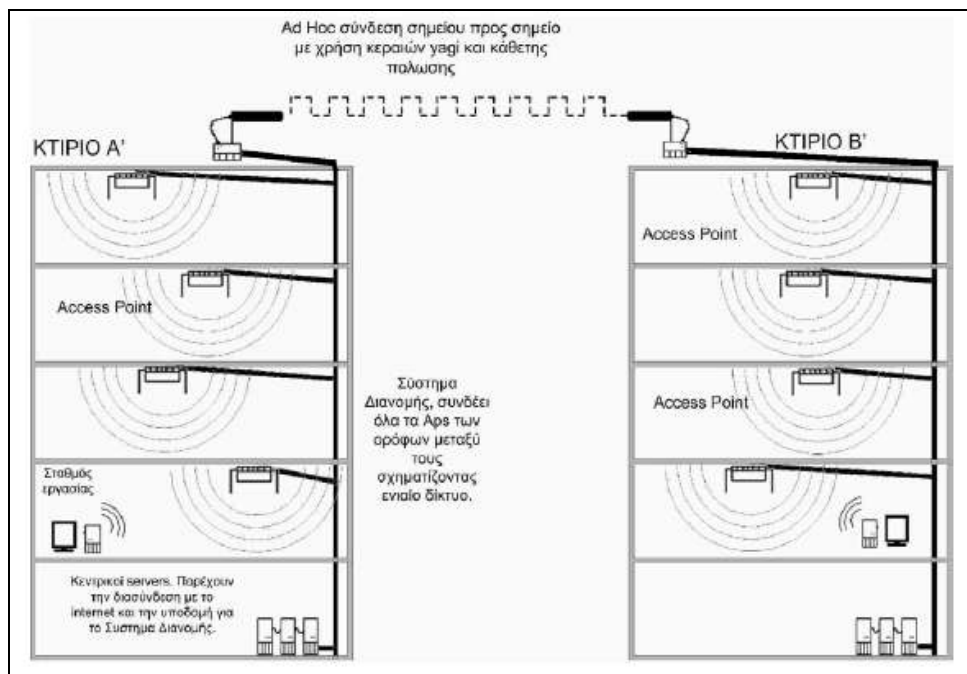
ενέργειας, αξιόπιστης επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων και χαμηλού κόστους παραγωγής, διαχείρισης και συντήρησης του δικτύου. Στην περίπτωση της βιομηχανικής εγκατάστασης θα μπορούσε να εφαρμοστεί με επιτυχία ένας συνδυασμός του γενετικού αλγορίθμου που παρουσιάσαμε σε συνδυασμό με το DPM – DVS σχήμα για χαμηλή κατανάλωση ισχύος.

Επιπλέον, οι αισθητήρες μπορούν λόγω της υψηλής διαμεταγωγής του πρωτοκόλλου επικοινωνίας (802.15.4) να διακινούν μεγάλους όγκους δεδομένων σε real time, πράγμα που εγγυάται την παρακολούθηση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Βέβαια, η ασύρματη επικοινωνία είναι από μόνη της το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας καθώς δεν χρειάζονται άλλες καλωδιώσεις στον ήδη επιβαρημένο χώρο της εγκατάστασης.

Στο γραφείο, το wifi γίνεται συνώνυμο της ευελιξίας. Οι εργαζόμενοι μπορούν ελεύθερα να κινούνται με φορητούς υπολογιστές στους εργασιακούς τους χώρους, χωρίς να χάνουν ούτε λεπτό την σύνδεσή τους στο εταιρικό δίκτυο και το διαδίκτυο. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η παραγωγικότητά τους καθώς μπορούν να συνεργάζονται ευκολότερα και να έχουν συνεχή πρόσβαση σε κρίσιμες πληροφορίες. Πολλά τοπικά δίκτυα σε κάθε κτίριο μπορούν εύκολα να συνενωθούν με ασύρματους συνδέσμους μεγάλων αποστάσεων, αποδοτικά και κυρίως οικονομικά. Δεν πρέπει, βεβαίως, να ξεχνάμε τους κινδύνους ασφάλειας που παρουσιάζονται.

Στο σπίτι, μια wifi συσκευή μπορεί να δώσει την δυνατότητα για περιήγηση στο διαδίκτυο, παρακολούθηση video και εσωτερική βιντεοδιάσκεψη σε οποιοδήποτε σημείο του σπιτιού. Φυσικά το στήσιμο ενός τοπικού δικτύου μπορεί να γίνει χωρίς τον βραχνά των καλωδίων, hubs και λοιπών δικτυακών συσκευών που δύσκολα χωρούν σε ένα σπίτι. Όλη η υποδομή αντικαθιστάται από μόνο ένα ή περισσότερα κεντρικά Access Points.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το παράδειγμα της ασύρματης δικτυακής εγκατάστασης μιας εταιρίας.



Εικόνα 60: Το ασύρματο δίκτυο μιας εταιρίας

Όπως παρατηρούμε από την παραπάνω εικόνα, σε κάθε όροφο του τετραώροφου κτιριακού της συγκροτήματος παρέχεται σύνδεση στο εταιρικό LAN στους υπαλλήλους, καθώς και διασύνδεση με το Internet. Access Points στημένα σε κάθε όροφο, συνδεδεμένα στον ενσύρματο «κορμό» του εταιρικού δικτύου, δίνουν αυτή τη δυνατότητα στους υπαλλήλους. Με τον τρόπο αυτό, οι εργαζόμενοι μπορούν είτε να εργάζονται στους σταθμούς εργασίας τους είτε να κινούνται με φορητούς υπολογιστές ανά τους ορόφους χωρίς να χάνουν την σύνδεση με το δίκτυο.

Ένα προφανές πρόβλημα είναι ότι η επιχείρηση έχει κτίρια και στις δύο μεριές μιας λεωφόρου. Το εμπόδιο αυτό ξεπερνιέται εγκαθιστώντας μια ad hoc σύνδεση μεταξύ των δύο κτιρίων, χρησιμοποιώντας μια συσκευή – σταθμό σε κάθε ταράτσα, εφοδιασμένη με κατευθυντικές yaγi κεραιές μικρού σχετικά κέρδους, μιας και η απόσταση που πρέπει να καλυφθεί είναι μικρή.

Η χρήση αυτού του τύπου κεραιάς (ιδιαίτερα κατευθυντικής εκπομπής) γίνεται για δύο σημαντικούς λόγους:

- Χρειαζόμαστε ένα απόλυτα κατευθυντικό Link. Δεν θέλουμε να συνδεθούμε ή να παρέχουμε κάποια υπηρεσία σε κανέναν άλλον εκτός από το απέναντι κτίριο. Με αυτό το δεδομένο, οποιαδήποτε ποσότητα ενέργειας της εκπομπής μας που γίνεται σε χώρο εκτός της απέναντι κεραιάς θεωρείται σπατάλη, καθώς επιζητούμε την μέγιστη ποιότητα σύνδεσης που μπορούμε να έχουμε με μία δεδομένη ισχύ. Η ισχύς της κεραιάς πρέπει πάντα να κρατηθεί εντός νομικών ορίων.
- Κατευθυντική εκπομπή στην ελάχιστη δυνατή ισχύ σε αυτή την περίπτωση σημαίνει και αυξημένη ασφάλεια. Ένας υποθετικός εισβολέας, για να μπορέσει να εκμεταλλευτεί όλα τα μειονεκτήματα ασφαλείας του 802.11 πρέπει αρχικά να έχει πρόσβαση στην ίδια την μικροκυματική εκπομπή της κεραιάς. Σε ένα ιδανικά και απόλυτα κατευθυντικό link, κάποιος θα μπορούσε να υποκλέψει την πληροφορία που διακινείται στον αέρα μόνο αν ήταν πάνω στην νοητή ευθεία των δύο κεραιών. Εφόσον η πρόσβαση στις ταράτσες των κτιρίων είναι απαγορευμένη, είναι πολύ

μικρή η πιθανότητα να καταφέρει κάποιος την κακοπροαίρετη λήψη πακέτων χωρίς να αποθαρρυνθεί από την κακή ποιότητα σήματος που θα έχει από τον δρόμο (χωρίς ωστόσο κάτι τέτοιο να ισχύει πάντα).

Σε όλα τα Access Points μπορούμε να εφαρμόσουμε ρυθμίσεις ασφαλείας αναλόγως των απαιτήσεών μας. Συνίσταται η ενεργοποίηση του WEP, όσο ανασφαλές και αν είναι, καθώς αποτελεί ένα πρώτο «φράκτη» για οποιονδήποτε εισβολέα. Μπορούμε, επίσης, να κρατάμε βάση δεδομένων με τις επιτρεπόμενες hardware διευθύνσεις (MAC addresses) και να απαγορέψουμε όλες τις άλλες. Αυτό, βέβαια, απαιτεί την επίπονη δουλειά της συνεχούς ενημέρωσης μιας βάσης δεδομένων με τα επιτρεπόμενα MACs, και κάτι τέτοιο μπορεί να είναι απαγορευτικό σε ένα δυναμικό περιβάλλον.

Τέλος, για να αυξήσουμε ακόμη περισσότερο την ασφάλεια του εξωτερικού link μεταξύ των κτιρίων, μπορούμε να εφαρμόσουμε κάποια μέθοδο κρυπτογράφησης των δεδομένων σε υψηλότερο δικτυακό επίπεδο ακριβώς πριν και μετά την έξοδό τους από αυτό, όπως IPsec ή κάποιο είδος secure tunnel (π.χ. μέσω δημιουργίας ενός Virtual Private Network).

Συμπερασματικά, θα μπορούσαμε από τα παραπάνω να καταλήξουμε στο γεγονός ότι τόσο τα WSN όσο και τα WLANs έχουν αναβαθμίσει το σχεδιασμό των ασύρματων ηλεκτρονικών συστημάτων και έχουν προσφέρει μια ευρεία γκάμα νέων δικτυακών εφαρμογών. Ωστόσο έχουν εισάγει μια σειρά από νέες προκλήσεις που θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη οι σχεδιαστές των ασύρματων δικτύων όσον αφορά τα πρωτόκολλα επικοινωνίας και τις τεχνικές deployment που θα εφαρμοστούν. Τέτοιες προκλήσεις περιλαμβάνουν την ταυτόχρονη ικανοποίηση ενός μεγάλου αριθμού απαιτήσεων, συνήθως αντικρουόμενων μεταξύ τους, όπως περιορισμένη κατανάλωση ισχύος, χρήση αυξημένης επεξεργαστικής δύναμης, υψηλός χώρος αποθήκευσης, ανοχή σε σφάλματα κατά τη μετάδοση, επαρκές εύρος ζώνης και «έξυπνη» διαχείρισή του, δυνατότητα αυξανόμενης εξυπηρέτησης χρηστών – κόμβων, κλπ.

Ακόμη περισσότερο, θα μπορούσαμε να αποφανθούμε από την παραπάνω μελέτη ότι τα WSN βασισμένα στο πρωτόκολλο 802.15.4 και τα 802.11 WLAN θα μπορούσαν να συνυπάρξουν, κάνοντας εφικτή τη διασύνδεση ετερογενών ασύρματων δικτύων και προσφέροντας ακόμη περισσότερες δυνατότητες αλληλεπίδρασης μεταξύ δικτύων και τερματικών συσκευών.

Πράγματι, όπως έχουμε ήδη δει, το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 υποστηρίζει μέσω της peer-to-peer τοπολογίας, την cluster tree τοπολογία στην οποία οι περισσότερες συσκευές είναι FFD, καθεμία από τις οποίες μπορεί να λειτουργήσει ως coordinator, παρέχοντας υπηρεσίες συγχρονισμού σε άλλες συσκευές ή coordinators. Μόνο ένας από τους coordinators διαθέτει τη λειτουργία του PAN coordinator, που μπορεί να κατέχει περισσότερους υπολογιστικούς πόρους από οποιαδήποτε άλλη συσκευή στο PAN. Βέβαια αυτή η τοπολογία απαιτεί και τον αντίστοιχο clustering αλγόριθμο δρομολόγησης.

Αντίστοιχα, το πρωτόκολλο IEEE 802.11 υποστηρίζει την BSS τοπολογία (κυψελωτό δίκτυο) στην οποία όλα τα μέλη της κυψέλης (BSS) επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω Access Points (APs), κατά το μοντέλο client – server. Τα APs συνδέουν το BSS με ένα πιθανό ενσύρματο δίκτυο και έχουν τον κεντρικό έλεγχο της λειτουργίας του BSS.

Επιπλέον, στην ESS τοπολογία πολλά APs που συγκροτούν κυψέλες μπορούν να συνδέονται μέσω ενός συστήματος διανομής. Σε αυτήν την περίπτωση τα APs παίζουν το ρόλο γέφυρας για τους σταθμούς διαφορετικών BSSs και επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω του δικτύου κορμού. Έτσι, ένας σταθμός ενός BSS μπορεί να κινείται ελεύθερα αλλάζοντας BSSs χωρίς ούτε αυτός, ούτε και το δίκτυο να βλέπουν κάποια αλλαγή, ή να χρειάζονται νέες ρυθμίσεις.

Με βάση τα παραπάνω, μια τεχνική deployment για WSN που βασίζεται σε clustering τοπολογία (π.χ. τεχνικές ανίχνευσης στόχου, γενετικός αλγόριθμος) θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί την υπάρχουσα υποδομή μιας infrastructure BSS τοπολογίας ενός 802.11 WLAN. Μάλιστα, στο [13] αποδεικνύεται ότι ο αντίκτυπος ενός 802.15.4 δικτύου που αποτελείται από αρκετά clusters υψηλής διακίνησης δεδομένων πάνω σε ένα 802.11b σταθμό που επικοινωνεί με ένα WLAN AP, είναι σχεδόν μηδαμινός αν τηρούνται οι προϋποθέσεις ότι 1) ο 802.11b σταθμός δεν είναι πολύ κοντά τοποθετημένος στο 802.15.4 cluster (π.χ. έχει μια απόσταση ασφαλείας της τάξης κάποιων μέτρων) και 2) τα κανάλια επικοινωνίας επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται οι επικαλύψεις στο εύρος ζώνης.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με θέματα τεχνικών deployment (ανάπτυξης κόμβων) σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (WSN), Δίκτυα Κινητής τηλεφωνίας και Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (802.11 WLANs). Παρακάτω κάνουμε μια σύντομη αναφορά στα συμπεράσματα που μας οδήγησε η προηγηθείσα μελέτη.

Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από ένα πολύ μεγάλο πλήθος συσκευών που τοποθετούνται σε μια μεγάλη περιοχή ενδιαφέροντος και αυτό-οργανώνονται σε ένα ασύρματο δίκτυο προκειμένου να μετρήσουν/παρακολουθήσουν κάποια συγκεκριμένη παράμετρο (π.χ. περιβαλλοντική) και να αναφέρουν τις μετρήσεις. Οι συσκευές είναι μικρού μεγέθους, αυτόνομες και εξοπλισμένες με αισθητήρες, επεξεργαστή και δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας. Τα WSN είναι δυναμικά μεταβαλλόμενα δίκτυα και η εξάντληση των ενεργειακών πόρων τους μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την παύση της λειτουργίας κάποιων κόμβων.

Σε κάθε περίπτωση, ο επιτυχής σχεδιασμός ενός WSN βασίζεται σε μια σειρά από ζητήματα που αφορούν τον τρόπο ανάπτυξης των κόμβων προκειμένου να επιτευχθεί καλή συνδεσιμότητα, μέγιστη κάλυψη, χαμηλό κόστος και υψηλής ποιότητας ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Ωστόσο, εφόσον είναι αδύνατο να επιτευχθούν όλοι οι στόχοι σε μια εφαρμογή που βασίζεται σε WSN, ο σχεδιασμός του, δηλαδή η εξεύρεση της καταλληλότερης τεχνικής deployment, γίνεται όλο και πιο συγκεκριμένος σε μια εφαρμογή (application – specific).

Παρόλα αυτά, υπάρχουν συγκεκριμένες τεχνικές deployment οι οποίες λαμβάνουν υπόψη ένα υποσύνολο παραμέτρων, οπότε αυτές καθίστανται αυτομάτως εναλλακτικές επιλογές για χρήση ανά εφαρμογή.

Στην 1^η περίπτωση τεχνικής που μελετήθηκε, ένας αλγόριθμος εικονικών δυνάμεων χρησιμοποιείται για τη μεγιστοποίηση της κάλυψης του πεδίου των αισθητήρων με βάση έναν έξυπνο συνδυασμό ελκτικών και απωστικών δυνάμεων. Ο αλγόριθμος επιτυγχάνει επαρκή ποιότητα στο δίκτυο διασφαλίζοντας ότι η πληροφορία που μεταδίδεται προς τον κεντρικό κόμβο (κεφαλή) είναι περιορισμένη. Έτσι μπορεί να αξιοποιηθεί σε εφαρμογές που είναι ευαίσθητες στο χρόνο κάλυψης, το κόστος παραγωγής και διαχείρισης του δικτύου και στη συνολική καταναλισκόμενη ενέργειά του.

Πιο συγκεκριμένα, ο VFA αλγόριθμος θα μπορούσε να αποτελέσει μια κατάλληλη τεχνική σε εφαρμογές στις οποίες παίζει κρίσιμο ρόλο τόσο ο **χρόνος** (π.χ. στην ανίχνευση και παρακολούθηση καταστροφών σε εχθρικά περιβάλλοντα) όσο και το **κόστος στησίματος** του ασύρματου δικτύου (π.χ. σε στρατιωτικές εφαρμογές, στη γεωργία, στη διαχείριση εγκαταστάσεων, κλπ.). Ωστόσο θα πρέπει να καλύπτονται και οι αντίστοιχες προϋποθέσεις (που είδαμε στην παράγραφο 5.2) με ότι αυτό συνεπάγεται σε **υπολογιστική ισχύ** (για τις κεφαλές) και σε **δυνατότητα ορθής λειτουργίας και απρόσκοπτης επικοινωνίας** (π.χ. τι θα γίνει αν σταματήσει να λειτουργεί μια κεφαλή).

Στη 2^η περίπτωση μελετήθηκαν τεχνικές ανίχνευσης και εντοπισμού στόχων στις οποίες κυρίαρχο ρόλο παίζει η αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ των αισθητήρων. Σε

γενικές γραμμές, οι δυνατότητες ομαδοποίησης των κόμβων και η multi-hop μετάδοση των δεδομένων που προσφέρουν οι τεχνικές αυτές, μπορούν να διευκολύνουν την ευέλικτη κλιμάκωση του δικτύου. Ωστόσο ανά περίπτωση μπορεί να καλύπτονται κι άλλες παράμετροι που είναι καίριας σημασίας σε WSN. Μερικές από αυτές είναι η επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής των κόμβων κατά το πέρας εκτέλεσης μιας τεχνικής, η αποδοτική διαχείριση αραιών δικτύων και η δυνατότητα εντοπισμού κινούμενων αντικειμένων.

Σαν γενικό συμπέρασμα μπορούμε να πούμε ότι οι παραπάνω τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν, ανά περίπτωση, σε όλες τις εφαρμογές ιχνηλάτησης – ανίχνευσης όπου:

- Είναι η δυνατή η ομαδοποίηση των κόμβων,
- Δίνεται η δυνατότητα ορισμού αναγνωριστικών κόμβων εντός του δικτύου,
- Οι κόμβοι παρατάσσονται έτσι ώστε να ανιχνεύουν **σήματα ραδιοσυχνότητας (RF signals)** ως μηνύματα από άλλους κόμβους (ή από τον κόμβο που ιχνηλατείται),
- Είναι κρίσιμη η αξιοποίηση της πυκνότητας του δικτύου με αντίστοιχη δυνατότητα κλιμάκωσης όπου αυτό είναι απαραίτητο,
- Δεν είναι μεγάλο πρόβλημα η κατανάλωση ισχύος και η χαμηλή αποθηκευτική ενέργεια.

Η 3^η προσέγγιση δίνει έμφαση στην επίτευξη χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας μέσω κατάλληλων περιορισμών στους μικροεπεξεργαστές των αισθητήρων (υλικό), στο λειτουργικό τους σύστημα (λογισμικό) και στη δυναμική διαχείριση ισχύος και τάσης. Η προσέγγιση αυτή καθίσταται μια ιδιαίτερα αποδοτική λύση για περιπτώσεις ανάπτυξης μικρών και φτηνών αισθητήρων οι οποίοι πρέπει να έχουν περιορισμό στο υλικό και στην ενέργεια που καταναλώνουν. Με την έννοια αυτή μπορεί να αυξηθεί ο χρόνος ζωής ενός WSN ενώ η πιθανή αυτό – ρύθμισή του δεν κοστίζει σε ισχύ.

Η παραπάνω τεχνική εγγυάται ότι η διάρκεια ζωής ενός δικτύου μπορεί να μεγιστοποιηθεί μόνο λαμβάνοντας υπόψη την ενέργεια σε κάθε στάδιο σχεδιασμού και λειτουργίας του. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να γίνονται δυναμικές ανταλλαγές μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας, της απόδοσης του συστήματος και της λειτουργικής αξιοπιστίας. Με την έννοια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος αστικών και στρατιωτικών εφαρμογών για τη συλλογή, την επεξεργασία και τη διάδοση σύνθετων περιβαλλοντικών δεδομένων.

Στην 4^η περίπτωση μελετήθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος που επιτυγχάνει ένα πολύ ικανοποιητικό επίπεδο κάλυψης μιας περιοχής σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα και, μάλιστα, επιβάλλοντας στο περιβάλλον τοπικά μέγιστα. Η εκτέλεση του αλγορίθμου εγγυάται τη μικρή απώλεια πακέτων και άρα την αξιόπιστη επικοινωνία εντός του δικτύου ενώ το μεγάλο του πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε περιβάλλοντα τα οποία είναι δυναμικά και χρονικά μεταβαλλόμενα.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, ο γενετικός αλγόριθμος θα μπορούσε να αποτελέσει μια κατάλληλη τεχνική σε εφαρμογές όπου:

- Είναι σημαντική η **ανοχή σε σφάλματα** και η **αξιόπιστη επικοινωνία** εντός του δικτύου, αφού παρουσιάζει μικρή απώλεια πακέτων.
- Οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν είναι ακραίες και η τοπολογία του δικτύου πρέπει να είναι **προσαρμοστική** όσον αφορά την μεταβαλλόμενη κατάσταση των συνδέσεων και της ροής δεδομένων κατά τη διάρκεια του χρόνου.

- Η **κατανάλωση ενέργειας** παίζει κρίσιμο ρόλο στη διάρκεια ζωής του δικτύου.
- Μπορεί να επιτραπεί **μεγαλύτερη επικοινωνία** μεταξύ των κόμβων (άρα να θυσιαστεί περισσότερη ενέργεια) προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη κάλυψη.
- Μέσω της ομαδοποίησης κόμβων παρέχεται η **δυνατότητα κλιμάκωσης**.

Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας

Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από ένα σύνολο κινητών κόμβων οι οποίοι σχηματίζουν μια δυναμική τυχαία τοπολογία. Οι κόμβοι δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούν κάποια σταθερή υλική υποδομή ενώ η μεταξύ τους επικοινωνία διεξάγεται είτε μέσω ενός κεντρικού κόμβου είτε διαδοχικά από κόμβο σε κόμβο (multihop δίκτυα), που είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση.

Στα multihop κινητά δίκτυα, κάθε κόμβος είναι υπεύθυνος όχι μόνο για την προώθηση των δικών του πακέτων αλλά και για την προώθηση, ως ενδιάμεσος κόμβος, και πακέτων που έχουν την αφετηρία τους σε άλλους κόμβους (π.χ. ο κάθε κόμβος στέλνει τα πακέτα στον πιο κοντινό προς αυτόν κόμβο που βρίσκεται προς την κατεύθυνση του προορισμού, αυτός τα προωθεί στην συνέχεια σε έναν κατάλληλο γείτονά του, κ.ο.κ., μέχρι να φτάσουν τα πακέτα στον προορισμό τους).

Οι εκτεταμένες περιοχές μετακίνησης απαιτούν από το δίκτυο να ενημερώνεται για τη νέα θέση του χρήστη. Επιπλέον, ο συνδυασμός της δικτύωσης και της κινητικότητας δημιουργούν νέες εφαρμογές και υπηρεσίες, όπως συνεργατικό λογισμικό για αυτοσχέδιες συναντήσεις, ηλεκτρονικούς πίνακες ανακοινώσεων που προσαρμόζουν τα περιεχόμενά τους ανάλογα με τα άτομα που είναι παρόντα, λογισμικό πλοήγησης για την καθοδήγηση χρηστών σε άγνωστα μέρη ή ταξίδια, κλπ.

Έτσι, το διαθέσιμο εύρος ζώνης στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλό προκειμένου να υποστηριχθούν εφαρμογές που απαιτούν εντατική μεταφορά δεδομένων και αυτός είναι ο λόγος που αναζητούνται νέες λύσεις για αύξηση της χωρητικότητας. Επιπλέον, η αυξημένη πυκνότητα των χρηστών μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη πολυπλοκότητα πρόσβασης και η διατήρηση του χαμηλού κόστους με την προσθήκη νέων κόμβων δεν αποτελεί αμελητέο πρόβλημα. Επομένως, παίζει κρίσιμο ρόλο η τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί για το deployment των κινητών κόμβων του δικτύου.

Στην 1^η τεχνική, ένας self – incremental αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το πρόβλημα της μέγιστης κάλυψης μιας περιοχής μέσω ανάπτυξης ενός δικτύου που μπορεί να αυτό – αναπτύσσεται και να αυτό – διορθώνεται. Η λύση αυτή είναι ιδανική για περιπτώσεις όπου το κινητό δίκτυο πρέπει να γίνει deployed σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και με το ελάχιστο δυνατό κόστος ανάπτυξης των κόμβων, όπως π.χ. σε μια στρατιωτική επιχείρηση ή σε μια φυσική καταστροφή. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να «σαρώσει» προβληματικές περιοχές, όπως περιοχές με πολλά φυσικά εμπόδια, όπου απαιτείται εξίσου βέλτιστη απόδοση.

Πιο συγκεκριμένα, ο self – incremental αλγόριθμος θα μπορούσε να αποτελέσει μια κατάλληλη τεχνική σε εφαρμογές όπου:

- Είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός **ad-hoc mobile δικτύου** σε πολύ **μικρό χρονικό διάστημα** και το οποίο να παρουσιάζει **βέλτιστη απόδοση** μεταξύ των κόμβων του, **ελάχιστο κόστος ανάπτυξης** των κόμβων σε πόρους και υπολογιστική ισχύ και όσο

το δυνατόν **ευρύτερη κάλυψη περιοχής**. Τέτοιου είδους εφαρμογές μπορεί να ποικίλλουν από αστικά περιβάλλοντα πολεμικών μαχών μέχρι επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης, όπου η επείγουσα καταγραφή κρίσιμων περιβαλλοντικών παραγόντων είναι πρωτεύουσας σημασίας.

- Ο **ελάχιστος χρόνος κάλυψης** μιας περιοχής σε συνδυασμό με την **ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας** είναι κρίσιμης σημασίας για την επιτυχία τους.
- Είναι **προβληματική η περιοχή** που εκτελούνται και το περιβάλλον είναι άγνωστο και άρα αδύνατο να μοντελοποιηθεί ποσοτικά ή/και ποιοτικά.
- Είναι κρίσιμη η **τοπική επεξεργασία και η συνάθροιση δεδομένων** τόσο μέσω ενός κεντρικού κόμβου (π.χ. βάσης) όσο και μέσω διαδοχικών κόμβων μέσω μεταπήδησης (hopping) (multihop δίκτυα).

Ωστόσο, για την ορθή εκτέλεση του αλγορίθμου θα πρέπει το φυσικό περιβάλλον της εφαρμογής να παραμένει σταθερό, όσον αφορά τα τοπολογικά του χαρακτηριστικά, και να επιτρέπει την απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Μόνο έτσι μπορεί να αξιοποιηθεί η ικανότητα **αυτό – διόρθωσης** του δικτύου.

Στη 2^η τεχνική, οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να στοιχιστούν στις θέσεις τους μέσω της θεωρίας των δυναμικών πεδίων. Οι «εικονικές δυνάμεις» που κατευθύνουν τους κόμβους εξασφαλίζουν τη γρήγορη μετάδοσή τους ενώ εφαρμόζονται μόνο όταν αυτό είναι απαραίτητο, εξοικονομώντας ενέργεια. Μια τέτοια λύση είναι ιδιαίτερα ελκυστική όταν απαιτείται κλιμάκωση χωρίς όμως να υπάρχει εγγύηση για την απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Πράγματι, σε ένα εχθρικό μεταβαλλόμενο χρονικά περιβάλλον όπου τόσο οι κόμβοι όσο και ο κεντρικός έλεγχος (π.χ. σταθμός βάσης) μπορεί να είναι εν δυνάμει ευάλωτοι, τα δυναμικά πεδία λύνουν το πρόβλημα της κάλυψης χωρίς την απαίτηση της όποιας φυσικής υποδομής, τοπολογίας ή μοντελοποίησης του περιβάλλοντος.

Με την έννοια αυτή, η παρούσα τεχνική θα μπορούσε να επιλεγεί σε μια σειρά εφαρμογών όπου:

- Είναι **δύσκολες έως αδύνατες οι επικοινωνίες** μεταξύ των κόμβων ή η εγκατάσταση των όποιων φυσικών υποδομών είναι απαγορευτική για διάφορους λόγους,
- Απαιτείται **κλιμάκωση** όσον αφορά την ποσότητα των κόμβων και το εύρος της περιοχής κάλυψης,
- Δεν απαιτείται η εκ των προτέρων μοντελοποίηση του περιβάλλοντος, ούτε δεδομένα συντεταγμένων και άλλες πληροφορίες για την ενδο-επικοινωνία των κόμβων,
- Δεν απαιτείται **κεντρικοποιημένος έλεγχος**,
- Το περιβάλλον είναι **δυναμικό με μεταβαλλόμενη τοπολογία** (η προσέγγιση συγκλίνει πάντα σε μια σταθερή κατάσταση),
- Είναι απαραίτητο να διατηρείται η **πλήρης συνεκτικότητα** του δικτύου, δηλαδή να υπάρχει πάντα μονοπάτι που συνδέει οποιοδήποτε ζευγάρι κόμβων.

Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα

Στα δίκτυα αυτά ένα τερματικό (π.χ. κάποιος προσωπικός υπολογιστής ή οποιαδήποτε άλλη συσκευή που χρησιμοποιεί την τεχνολογία WLAN) επικοινωνεί με άλλα τερματικά χωρίς τη χρήση καλωδίων. Τα WLAN παρέχουν όλα τα προνόμια των ενσύρματων τοπικών δικτύων, είναι όμως πολύ πιο ευέλικτα, δεν θέτουν περιορισμούς

στην επικοινωνία βάσει γεωγραφικής θέσης και είναι αποδεσμευμένα από δυσκίνητο και ακριβό εξοπλισμό. Η ακτίνα δράσης τους μπορεί να είναι από κάποιες δεκάδες μέχρι και κάποιες εκατοντάδες μέτρα και, με την έννοια αυτή, επιτρέπουν τη διασύνδεση ενός κτιρίου ή μίας πανεπιστημιούπολης.

Ένα από τα πιο διαδεδομένα πρότυπα για το σχεδιασμό WLANs είναι το IEEE 802.11 το οποίο καλύπτει τα δύο κατώτερα στρώματα του μοντέλου OSI (PHY, MAC). Σήμερα υπάρχουν διάφορα υπο – πρότυπά του (π.χ. 802.11b) τα οποία αυξάνουν την ταχύτητα μετάδοσης και βελτιώνουν αρκετά από τα χαρακτηριστικά του. Τέτοια είναι η ασφάλεια, όπου με διάφορες συνεχώς αναπτυσσόμενες προδιαγραφές και μεθόδους γίνεται η κρυπτογράφηση των δεδομένων, και η διευθυνσιοδότηση, όπου η χρήση διάφορων «έξυπνων» πρωτοκόλλων λύνει το πρόβλημα της δυναμικής τοπολογίας και της ορθής δρομολόγησης των πακέτων εντός ενός ασύρματου δικτύου.

Τα χαρακτηριστικά των τοπολογιών των WLANs είναι υπεύθυνα για την υποστήριξη ή μη μιας σειράς από εφαρμογές πραγματικού χρόνου που είναι αρκετά ευαίσθητες σε θέματα παροχής υψηλού επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών (QoS) (π.χ. μετάδοση video, VoIP). Το 802.11 λαμβάνει υπόψη και διευθετεί μια σειρά ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των τοπολογιών των WLANs. Τέτοια είναι:

- Η δυναμική τοπολογία αφού οι κόμβοι είναι ελεύθεροι να κινηθούν αυθαίρετα και να εισέρχονται και να εξέρχονται από το δίκτυο κατά βούληση,
- Ο μη κεντροποιημένος έλεγχος που εξασφαλίζει ότι το δίκτυο δεν θα καταρρεύσει αν κάποιος συγκεκριμένος κόμβος βγει εκτός της ακτίνας επικοινωνίας των υπολοίπων,
- Η προσαρμοστικότητα στις δικτυακές μεταβολές, αφού αν κάποιος κόμβος εγκαταλείψει το δίκτυο ή μετακινηθεί τότε οι επηρεαζόμενοι κόμβοι θα πρέπει απλά να αναζητήσουν νέες διαδρομές για τους προορισμούς,
- Το περιορισμένο κόστος διαχείρισης,
- Το χαμηλό εύρος ζώνης του δικτύου που μπορεί να οδηγήσει σε σχετικά χαμηλές χωρητικότητες των συνδέσεων και άρα σε συμφόρηση, η οποία αποτελεί τον κανόνα και όχι την εξαίρεση για τα δίκτυα αυτά,
- Η χαμηλή ασφάλεια των επικοινωνιών, αφού κάθε WLAN καθίσταται πιο επιρρεπές σε απειλές όπως η αυξημένη πιθανότητα υποκλοπής και απάτης, οι επιθέσεις άρνησης υπηρεσιών (Denial of Service Attacks), κλπ.
- Η ανάγκη για κλιμάκωση, εφόσον για τις ανάγκες μιας εφαρμογής μπορεί να απαιτηθεί να συνδεθεί ένας σχετικά μεγάλος αριθμός τερματικών και συσκευών δρομολόγησης σε WLAN.

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά των τοπολογιών, μελετήθηκε 1) η επίδραση που ασκεί η τοπολογία του WLAN στην απόδοση μιας ιδιαίτερα απαιτητικής διαδικτυακής εφαρμογής, της αποστολής και λήψης MPEG streamed video, 2) ο ρόλος που παίζει ο βαθμός κινητικότητας των κόμβων σε ένα WLAN προκειμένου να γίνει αποδοτική διαχείριση του διαθέσιμου εύρους ζώνης για την εξυπηρέτηση των handoffs (αλλαγών καναλιού) και για επίτευξη ιδανικότερης ποιότητας υπηρεσιών (QoS), 3) η περίπτωση της μεταφοράς φωνητικών μηνυμάτων και το κατά πόσο αυτή επηρεάζεται από τα φαινόμενα του handover (αλλαγής Access Point από έναν κινητό σταθμό).

Στην 1^η περίπτωση έγινε φανερό ότι το 802.11 πρωτόκολλο ασύρματης δικτύωσης μπορεί να παρέχει δυνατότητες ασύρματης μετάδοσης MPEG video – ροών σε μια

παρεμφερή τοπολογία όπου διάφοροι κόμβοι είναι διασκορπισμένοι σε μια μικρή σχετικά περιοχή (περίπτωση ασύρματου LAN) ή σε μεγαλύτερη (ασύρματο MAN). Ωστόσο, εξαιτίας της πιθανότητας εμφάνισης συμφόρησης λόγω περιορισμού πρόσβασης ή αδυναμίας υψηλού ρυθμού μετάδοσης ορισμένων ασύρματων κόμβων, ο μεγάλος ρυθμός μετάδοσης μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα έναν αυξανόμενο ρυθμό απώλειας πακέτων.

Οπότε προτείνονται: 1) η χρήση ενός μηχανισμού «καταστολής» του υψηλού ρυθμού μετάδοσης ανάλογα με την παρουσία δικτυακής συμφόρησης, 2) αυξομείωση στο μέγεθος των πακέτων ανάλογα με το ρυθμό μετάδοσης (μικρό μέγεθος για χαμηλό ρυθμό και μεγαλύτερο για υψηλότερο ρυθμό), 3) χρήση ενδιάμεσης μνήμης αποθήκευσης στους κόμβους για μετρίασμό της καθυστέρησης των πακέτων και αυτών που φτάνουν εκτός σειράς.

Η 2^η προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποδοτική διαχείριση του εύρους ζώνης και την εγγύηση υψηλής QoS εντός ενός WLAN για περιπτώσεις εφαρμογών πραγματικού χρόνου όπου είναι αρκετά μεγάλη η πιθανότητα μεταβίβασης των κινητών κόμβων από το ένα κελί στο άλλο. Συγκεκριμένα, η προσέγγιση κάνει μια προνοητική, προσαρμοστική δέσμευση εύρους ζώνης και έλεγχο εισόδου όταν ένας χρήστης – κόμβος του ασύρματου δικτύου εισχωρήσει σε νέο κελί. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στην περίπτωση όπου δεν είναι γνωστή η εκ των προτέρων τοπολογία των ασύρματων κόμβων, όσο και στην αντίθετη περίπτωση.

Στην ανάλυση της προσέγγισης αποδεικνύεται ότι τόσο όταν η τοπολογία είναι άγνωστη (π.χ. διατήρηση της επικοινωνίας κατά την πλοήγηση σε αχαρτογράφητη περιοχή) όσο και όταν αυτή είναι γνωστή (π.χ. πλοήγηση οδηγού μέσω GPS), η λύση που προτείνεται εγγυάται ότι σε ασύρματα 802.11 δίκτυα μπορεί να επιτευχθεί αποδοτική διαχείριση των hand – offs και διατήρηση υψηλού QoS, ακόμη κι όταν ο βαθμός κινητικότητας των κόμβων ή ο αριθμός των κελιών είναι αυξημένος.

Στην 3^η περίπτωση μελετήθηκε η τοπολογία ενός WLAN όταν πρόκειται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου που είναι ευαίσθητες στο θέμα του handover, όπως είναι η κίνηση δεδομένων φωνής. Τα κυριότερα συμπεράσματα της ανάλυσης ήταν: 1) τα σημεία πρόσβασης (APs) θα πρέπει να είναι τοποθετημένα με μεγάλη πυκνότητα έτσι ώστε η φάση αναζήτησης να διαρκεί μικρότερο χρόνο, 2) οι ασύρματοι σταθμοί πρέπει να εκμεταλλεύονται αυτό το γεγονός με τρόπο ώστε να εκκινούν μια μεταβίβαση ελέγχου πριν χαθεί η συνδεσιμότητα με το προηγούμενο σημείο πρόσβασης, 3) για τη διασύνδεση ενός μικρού αριθμού από APs τα παραδοσιακά Ethernet hubs είναι αρκετά, 4) όταν πρόκειται για διασύνδεση πολλαπλών ESS τα hubs θα πρέπει να αποφεύγονται και να χρησιμοποιούνται γέφυρες (bridges) οι οποίες διαχωρίζουν τα ξεχωριστά LAN segments σε ξεχωριστά collision domains, 5) επιβάλλεται η ενσύρματη δικτύωση διαφορετικών APs στην περίπτωση του cross – LAN handover.

Ανακεφαλαιώνοντας, για καθεμιά από τις 3 παραπάνω περιπτώσεις δικτύων έγινε μια διεξοδική μελέτη για τις ασύρματες τοπολογίες και το πώς αυτές επηρεάζουν τις δικτυακές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, έγινε ανάλυση συγκεκριμένων τεχνικών ανάπτυξης κόμβων σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προκειμένου να επιτυγχάνεται μέγιστη κάλυψη, υψηλή συνδεσιμότητα, χαμηλό κόστος και υψηλής ποιότητας ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν συγκεκριμένοι αλγόριθμοι για κινητά δίκτυα με τους οποίους επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη

εκμετάλλευση του χώρου στον οποίο αυτά αναπτύσσονται. Τέλος, μελετήθηκαν συγκεκριμένες τεχνικές τοποθέτησης δικτυακών συσκευών σε WLANs, καθώς και τα χαρακτηριστικά των εφαρμογών εκείνων που τις καθορίζουν, προκειμένου οι συσκευές να εξυπηρετούν την αυξανόμενη δικτυακή κίνηση.

Και για τις 3 περιπτώσεις μελετήθηκαν συγκεκριμένες δικτυακές τοπολογίες ενώ καταγράφηκαν και τα χαρακτηριστικά των εφαρμογών που επί της ουσίας καθορίζουν το ποια τεχνική είναι κατάλληλη για ποια εφαρμογή. Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά, καταλήχθηκαν συγκεκριμένοι κανόνες χρήσης των αλγορίθμων ανάλογα με την περίπτωση του δικτύου και της εφαρμογής.

Τέλος, μελετήθηκε και η περίπτωση της συνύπαρξης ενός 802.15.4 WSN με ένα 802.11 WLAN. Στην περίπτωση αυτή καταλήχθηκε ότι μια τεχνική deployment βασισμένη σε clusters (π.χ. τεχνικές ανίχνευσης στόχου, γενετικός αλγόριθμος) μπορεί να λειτουργήσει εντός μιας κυψελωτής BSS ή ESS τοπολογίας ενός 802.11 WLAN αρκεί να τηρούνται 2 συγκεκριμένες παράμετροι: 1) οι 802.11b σταθμοί να κρατούν κάποια απόσταση από τους κόμβους του cluster και 2) τα κανάλια επικοινωνίας να περιλαμβάνουν διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων για αποφυγή επικαλύψεων του προσφερόμενου εύρους ζώνης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Analysis of Experiences in WSN Deployment.
- [2]. Boyce J. M., Gaglianello R. D., Packet Loss Effects on MPEG Video Sent Over the Public Internet, *Bell Laboratories, Lucent Technologies*.
- [3]. Choi S., QOS GUARANTEES IN WIRELESS/MOBILE NETWORKS.
- [4]. Howard A., Mataric M., Sukhatme G., An Incremental Self-Deployment Algorithm for Mobile Sensor Networks, *Autonomous Robots, Special Issue on Intelligent Embedded Systems, 13(2), Sept 2002, pp. 113—126*.
- [5]. Howard A., Mataric M., Sukhatme G., Mobile Sensor Network Deployment using Potential Fields: A Distributed, Scalable solution to the Area Coverage Problem, *Proceedings of the 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems(DARS02), Fukuoka, Japan, June 25-27, 2002*.
- [6]. Raghunathan V., Schurgers C., Park S., Srivastava M., Energy Aware Wireless Sensor Networks, *Department of Electrical Engineering, University of California, Los Angeles*.
- [7]. Suen Y., A Genetic-Algorithm Based Mobile Sensor Network Deployment Algorithm, *Department of electrical and Computer Engineering, The University of Texas at Austin*.
- [8]. Vatn J., An experimental study of IEEE 802.11b handover performance and its effect on voice traffic, *KTH, Royal Institute of Technology, Kista, Sweden*.
- [9]. Zou Y., Chakrabarty K., Sensor Deployment and Target Localization in Distributed Sensor Networks, *Duke University*.
- [10]. <http://www.sensorsmag.com/networking-communications/wireless-sensor-network-topologies-778>
- [11]. http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network
- [12]. Salhieh A., Weinmann J., Kochhal M., Schwiebert L., Power Efficient Topologies for Wireless Sensor Networks, *Dept. of Electrical and Computer Engineering, Detroit, Wayne State University*.
- [13]. Howitt I., Gutierrez J., IEEE 802.15.4 low rate-wireless personal area network coexistence issues. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'03), vol. 3, pp. 1481- 1486, 16-20 Mar. 2003*.