



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών

Τομέας Επικοινωνιών Ηλεκτρονικής και Συστημάτων
Πληροφορικής

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΡΟΚΛΗΣΗΣ
ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ
ΑΠΟ ΣΥΝΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΣΤΗ ΖΩΝΗ 2.4 GHz ΚΑΙ
ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΩΚΡΑΤΗΣ Ν. ΜΠΑΡΜΠΟΥΝΑΚΗΣ

Επιβλέπων : Νικόλαος Μήτρου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2010



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών

Τομέας Επικοινωνιών Ηλεκτρονικής και Συστημάτων
Πληροφορικής

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΡΟΚΛΗΣΗΣ
ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ
ΑΠΟ ΣΥΝΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΣΤΗ ΖΩΝΗ 2.4 GHz ΚΑΙ
ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΩΚΡΑΤΗΣ Ν. ΜΠΑΡΜΠΟΥΝΑΚΗΣ

Επιβλέπων : Νικόλαος Μήτρου, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16^η Ιουλίου 2010.

.....
Νικόλαος Μήτρου

Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Μιχαήλ Θεολόγου

Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Συμεών Παπαβασιλείου

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2010

.....

Σωκράτης Ν. Μπαρμπουνάκης

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

Copyright © Σωκράτης Ν. Μπαρμπουνάκης

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Νικόλαο Μήτρου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Σταμάτιο Αρκουλή για την πολύτιμη βοήθειά του, την επίβλεψη και την καθοδήγησή του καθόλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους κυρίους Αναστάσιο Ζαφειρόπουλο και Δημήτριο Σπανό για τη συμβολή τους στην διεξαγωγή των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	11
Abstract	13
Κεφάλαιο 1 ^ο : Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	15
1.1 Γενικά.....	15
1.1.1 Υλικό (Hardware).....	17
1.1.1 Μικροεπεξεργαστής	17
1.1.2 Πομποδέκτης.....	18
1.1.3 Εξωτερική μνήμη	18
1.1.4 Αισθητήρες.....	18
1.1.5 Πηγή ενέργειας.....	19
1.1.2 Λογισμικό.....	19
1.1.2.1 Λειτουργικά συστήματα.....	20
1.1.2.2 Αλγόριθμοι	21
1.1.2.3 Προγράμματα Προσομοίωσης	22
1.1.2.4 Οπτικοποίηση δεδομένων	22
1.1.2.5 Συγχώνευση πληροφορίας.....	23
1.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων Έκτακτης Ανάγκης.....	23
1.2.1 Ανταπόκριση σε πιθανή φωτιά.....	24
1.2.2 Παρακολούθηση σεισμών	25
1.2.3 Επείγουσες καταστάσεις ιατρικής περίθαλψης	26
Κεφάλαιο 2 ^ο : Γνωστικά Δίκτυα Επικοινωνιών (Cognitive Radio)	29
2.1 Γενικά.....	29
2.1.1 Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων	29
2.1.2 Το πρόβλημα – Η υποχρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος	31
2.1.3 Η προτεινόμενη λύση - Γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών.....	32
2.1.3.1 Ορισμός.....	34
2.1.3.2 Χαρακτηριστικά του Cognitive Radio	34
2.1.3.3 Δυναμική προσαρμογή συχνότητας	36
2.2 Διαμοιρασμός Φάσματος / Διαμοιραζόμενοι άξονες	36
2.2.1 Διαμοιρασμός Φάσματος	37
2.2.2 Διαμοιραζόμενοι άξονες.....	39
2.3 Ανίχνευση Φάσματος (Spectrum Sensing).....	40

2.3.1 Τεχνικές επεξεργασίας σήματος για τη λειτουργία της Ανίχνευσης Φάσματος	42
2.3.2 Συνδυαστική Ανίχνευση Φάσματος	44
Κεφάλαιο 3 ^ο : Γνωστικά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	47
3.1 Το υπερφορτωμένο ραδιοφάσμα των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων – Το πρόβλημα της συνύπαρξης	47
3.2 Υπάρχουσες προσεγγίσεις για την επίλυση του προβλήματος της συνύπαρξης	50
3.3 Γνωστικά Δίκτυα Αισθητήρων - Cognitive Radio Sensor Networks (CRSNs)	53
3.3.1 Η αρχιτεκτονική των CRSNs	55
3.3.2 Πιθανές περιοχές εφαρμογής.....	58
Κεφάλαιο 4 ^ο : Αντιμετώπιση του προβλήματος συνύπαρξης στην πράξη σήμερα.....	61
4.1 Περιορισμοί και ανοιχτά θέματα των υπαρχουσών προσεγγίσεων στον χώρο της αντιμετώπισης του προβλήματος συνύπαρξης.....	61
4.2 Αντιμετώπιση του προβλήματος συνύπαρξης στην πράξη σήμερα	61
Κεφάλαιο 5 ^ο : Η προτεινόμενη στην [17] προσέγγιση.....	65
5.1 Εισαγωγή/Κίνητρο-Σκοπός	65
5.2 Ο πυρήνας της ιδέας.....	66
5.3 Η χρήση του Packet Error Rate (PER) ως ένδειξη ποιότητας της επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων.....	67
5.4 Η σημασία του υπολογισμού του PER για κάθε κόμβο του δικτύου	68
5.5 Ιεράρχηση καναλιών	68
5.5.1 Γενική περιγραφή.....	68
5.5.2 Αναλυτική περιγραφή της ιεράρχησης των καναλιών – Η ουρά προτεραιότητας ChPrio.....	69
5.6 Κύριος αλγόριθμος.....	71
Κεφάλαιο 6 ^ο : Μια πρώτη υλοποίηση της προταθείσας στη [17] λειτουργικότητας	77
6.1 Εισαγωγή.....	77
6.2 Περιβάλλον ανάπτυξης.....	77
6.3 Αναλυτική περιγραφή της υλοποίησης	78
6.3.1 Η μέθοδος TestRadio του ISHMP[27].....	78
6.3.2 Η υλοποίηση που εδώ πραγματοποιήθηκε.....	79
Κεφάλαιο 7 ^ο : Μετρήσεις	81
7.1 Μεμονωμένες μετρήσεις για την επαλήθευση του προβλήματος συνύπαρξης.....	81
7.1.1 Γενικά – Περιγραφή τοπολογίας.....	82
7.1.2 Περιγραφή εξοπλισμού	83
7.1.3 Λεπτομέρειες μετρήσεων – Αποτελέσματα	86
7.1.3.1 Wi-Fi Interference	86

7.1.3.2 Bluetooth Interference	89
7.1.3.3 2nd WSN Interference	91
7.1.3.4 Συνολικές παρατηρήσεις	93
7.2 Σενάριο αξιολόγησης του αλγορίθμου	94
7.2.1 Εισαγωγή - Γενικά.....	94
7.2.2 Περιγραφή τοπολογίας - εξοπλισμού	95
7.2.3 Περιγραφή εκτέλεσης πειράματος	96
Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις.....	101
Βιβλιογραφία.....	102

Περίληψη

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων αποτελούν ήδη εδώ και κάποια χρόνια πραγματικότητα στο χώρο των ασύρματων επικοινωνιών. Οι μεγάλες δυνατότητες που διαθέτουν αλλά ταυτόχρονα και οι διάφοροι περιορισμοί που προκύπτουν όσον αφορά τη αποδοτική χρήση και αξιοποίησή τους, τα καθιστά ως ένα πεδίο το οποίο, όσα μεγάλα βήματα κι αν έχουν γίνει ήδη, δείχνει ανεξερεύνητο μέχρι σήμερα. Οι όλο και αυξανόμενες δυνατότητες εφαρμογής τους σε διάφορες πτυχές της ανθρώπινης δραστηριότητας -από το σπίτι μέχρι τη βιομηχανία, τις υπηρεσίες υγείας και την καταγραφή φυσικών φαινομένων- καθιστά δεδομένη την ταχύτατη ανάπτυξη και εισχώρησή τους στην καθημερινότητά του αύριο.

Αυτό, ωστόσο, έχει και ως άμεσο επακόλουθο την ανάγκη για συνεργασία μεταξύ των διαφορετικών δικτύων, καθώς και την αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος συχνοτήτων το οποίο απασχολούν. Το πρόβλημα συνύπαρξης γίνεται ακόμα εντονότερο αν μιλήσουμε για έκτακτες καταστάσεις, όπως για παράδειγμα, κάποια περιβαλλοντική καταστροφή, κατά τις οποίες η κάθε ενέργεια που θα πρέπει να παρθεί οφείλει να είναι εκτός από αποτελεσματική, και άμεση χρονικά.

Εισάγεται έτσι, σε συνδυασμό με την τεχνολογία των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων, και ο όρος των Γνωστικών Ασύρματων Δικτύων Επικοινωνιών. Μια τεχνολογία που επιτρέπει στα συνυπάρχοντα δίκτυα αισθητήρων να αντιλαμβάνονται το περιβάλλον γύρω τους, να αξιολογούν την εκάστοτε χρησιμοποίηση του φάσματος και να δρουν με στόχο την αποδοτική αξιοποίησή του από όσο το δυνατόν περισσότερους διαφορετικούς ενδιαφερόμενους. Η χρησιμότητά τους γίνεται ακόμα εμφανέστερη σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης όπου δεν υπάρχει δυνατότητα για αναλυτική φασματική ανάλυση και οργανωμένη απόδοση συχνοτήτων σε κάθε ανταγωνιστικό ασύρματο δίκτυο.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια πρώτη εισαγωγή και αναφέρονται κάποιες γενικές πληροφορίες γύρω από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, την τεχνολογία των αισθητήρων, το hardware αλλά και το λογισμικό που χρησιμοποιούν. Επιπλέον, αναφέρονται παραδείγματα καταστάσεων έκτακτης ανάγκης κατά τις οποίες η αποδοτική συνύπαρξη διαφορετικών δικτύων αισθητήρων θα είναι επιβεβλημένη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι έννοιες των γνωστικών δικτύων επικοινωνιών, της δυναμικής πρόσβασης φάσματος καθώς και αναλύεται το δεδομένο πρόβλημα της υποχρησιμοποίησης και μη αποδοτικής αξιοποίησης του φάσματος. Τέλος, αναφέρονται κάποιες βασικές τεχνικές ανίχνευσης φάσματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο, εισάγεται η έννοια των Γνωστικών Δικτύων Αισθητήρων. Γίνεται λόγος για το υπερφορτωμένο ραδιοφάσμα και το πρόβλημα της συνύπαρξης. Περιγράφονται επίσης διαφορετικές αρχιτεκτονικές γνωστικών δικτύων αισθητήρων καθώς και παραδείγματα πιθανών εφαρμογών των συγκεκριμένων δικτύων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται η σημερινή κατάσταση όσον αφορά το πρόβλημα της συνύπαρξης διαφορετικών ασύρματων δικτύων σε μια γεωγραφική περιοχή, το πώς αντιμετωπίζεται σήμερα, καθώς και οι περιορισμοί και τα ανοιχτά θέματα που υπάρχουν σχετικά με το πρόβλημα της συνύπαρξης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθεται η κεντρική ιδέα μιας ήδη υπάρχουσας προσέγγισης σχετικά με το μετριασμό των παρεμβολών ανάμεσα σε κάποια συνυπάρχοντα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, καθώς και το κίνητρο που ώθησε σε μια τέτοια διαφορετική προσέγγιση σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες. Περιγράφεται η σημασία της χρήσης του Packet Error Rate (PER) ως ένδειξη της ποιότητας επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων ενός δικτύου, καθώς και αναλύεται ο κύριος αλγόριθμος της συγκεκριμένης προσέγγισης.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια πρώτη υλοποίηση της προαναφερθείσας προσέγγισης, περιγράφεται το περιβάλλον εργασίας καθώς επίσης και ο μηχανισμός της υλοποίησης.

Το έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις μετρήσεις και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν. Επιπλέον, παρουσιάζεται ένα σενάριο αξιολόγησης του αλγορίθμου που αναλύθηκε στο πέμπτο κεφάλαιο.

Λέξεις κλειδιά: ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών, γνωστικά δίκτυα αισθητήρων, ανάλυση φάσματος, δυναμική πρόσβαση φάσματος, πρόβλημα συνύπαρξης, μετρήσεις, σενάριο αξιολόγησης αλγορίθμου

Abstract

Wireless sensor networks have already been for some years a reality in the field of wireless communications. The great capabilities they have but also the various restrictions that are imposed, as far as their efficient use and deployment is concerned, make them seem, no matter how many steps have been made until now, an unexplored field. The ever-growing application potentials in various aspects of human activity –from home to industry, health services and natural phenomena monitoring- make their rapid development and penetration into the everyday life of tomorrow more than likely.

However, the above has as a direct consequence the need for cooperation between different networks, as well as their efficient use of spectrum they utilize. The coexistence problem becomes even more important, if we talk about emergency situations, like for example, an environmental disaster, in which any action that would have to be taken, should be not only effective and accurate, but immediate as well.

It is introduced, therefore, in combination with the wireless sensor networks, the technology of Cognitive Radio. A technology that allows coexisting (sensor) networks sense the environment around them, assess the current spectrum usage and act aiming to the most efficient exploitation of it by as many different networks as possible. Their usefulness becomes even more evident in emergency situations where there is no opportunity for detailed spectral analysis and regulated frequency distribution for all the competitive wireless networks.

In the first chapter, an introduction and some general information about wireless sensor networks, the sensors' hardware and software takes place. Furthermore, some examples of emergency situations are listed, where the efficient coexistence of different sensor networks will be essential.

The second chapter presents the concepts of Cognitive Radio and Dynamic Spectrum Access. Moreover, the given problem of spectrum underutilization and its inefficient use is analyzed. Finally, some basic spectrum sensing techniques are listed.

The third chapter introduces the idea of Cognitive radio-aided Wireless Sensor Networks. In addition, the coexistence problem as well as the congested spectrum are discussed. Furthermore, different cognitive wireless sensor networks architectures are described, as well as examples of possible applications of such networks.

The fourth chapter describes the current situation regarding the problem of coexistence of different wireless networks in a geographical area, how it is being faced today, as well as the limitations and open topics that exist as far as the problem of coexistence is concerned.

The fifth chapter presents the idea of an existing approach trying to mitigate the interference between coexisting wireless sensor networks, as well as the reasons behind such a different approach from the existing ones. The importance of Packet Error Rate (PER) as an indication of the communication between nodes is being described. The main algorithm of the specific approach is also discussed.

In the sixth chapter, an initial implementation of that approach is presented. The development environment as well as the implementation mechanism are also described.

The seventh chapter contains the measurements and conclusions that were carried out. Moreover, an evaluation scenario of the algorithm described in chapter five is analyzed.

Key words: wireless sensor networks, cognitive radio, cognitive radio sensor networks, spectrum sensing, dynamic spectrum access, coexistence problem, measurements, scenario evaluation algorithm

Κεφάλαιο 1^ο : Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSNs)

1.1 Γενικά

Οι πρόσφατες εξελίξεις στο χώρο των ασύρματων επικοινωνιών, των ψηφιακών συστημάτων καθώς και της μικροηλεκτρονικής τεχνολογίας έχει καταστήσει εφικτή την ανάπτυξη αισθητήρων, συσκευών χαμηλού κόστους, οι οποίες είναι σε θέση να επιτελέσουν πολλές διαφορετικές και χρήσιμες λειτουργίες. Οι αισθητήρες είναι συσκευές μικρού μεγέθους, λειτουργούν σε χαμηλή ισχύ και επικοινωνούν μεταξύ τους σε σχετικά μικρές αποστάσεις. Τα βασικά μέρη (components) ενός ασύρματου αισθητήρα επιτελούν λειτουργίες όπως η ανίχνευση («αίσθηση») συγκεκριμένων δεδομένων (θερμοκρασία, κίνηση, ήχο, πίεση κτλ), η συλλογή τους, η επεξεργασία τους και η αποστολή – προώθησή τους σε επόμενους κόμβους αισθητήρες ή στον τελικό προορισμό συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων. Μια τυπική συσκευή αισθητήρα αποτελείται συνήθως από έναν πομποδέκτη, απαραίτητο για την ασύρματη επικοινωνία, έναν μικροελεγκτή, μια εξωτερική μνήμη, τους διάφορους αισθητήρες (για κάθε μια λειτουργία που απαιτείται) καθώς και μια πηγή ενέργειας, η οποία είναι συνήθως μια μπαταρία. Το μικρό μέγεθος των συγκεκριμένων διατάξεων επιβάλλει - όπως είναι λογικό- περιορισμούς στις ενεργειακές δυνατότητές τους καθώς και στην επεξεργαστική ισχύ και τη μνήμη.

Ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων αποτελείται συνήθως από ένα μεγάλο αριθμό αισθητήρων-κόμβων, οι οποίοι τοποθετούνται σε διάφορες θέσεις είτε μέσα σε ένα συγκεκριμένο χώρο παρατήρησης ενός φαινομένου, ή κοντά σε αυτόν. Ένα βασικό πλεονέκτημά των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (ΑΔΑ) είναι ότι οι θέσεις των κόμβων δε χρειάζεται να είναι προκαθορισμένες ή υπολογισμένες με κάποια συγκεκριμένη ακρίβεια. Αυτό δίνει τη δυνατότητα τοποθέτησης τους σε δύσβατες περιοχές (π.χ. μια χαράδρα, ένα δάσος κτλ) ή σε περιοχές που εξαιτίας των συνθηκών που επικρατούν δεν είναι δυνατή η ανθρώπινη παρουσία (π.χ. φωτιά). Αυτό όπως είναι λογικό, ωστόσο, έχει ως άμεσο επακόλουθο και την ανάγκη ανάπτυξης μηχανισμών «αυτό-οργάνωσης» των κόμβων αισθητήρων μέσα από τα πρωτόκολλα και τους αλγορίθμους που χρησιμοποιούν. Ένα επίσης πολύ βασικό χαρακτηριστικό των ΑΔΑ είναι η συνεργασία που επιτελείται μεταξύ των κόμβων του για την αποδοτική συλλογή, επεξεργασία και προώθηση των δεδομένων. Αντί να αποστέλλουν ολόκληρη την πληροφορία την οποία συλλέγουν, την επεξεργάζονται, εξάγουν τα αποτελέσματα που ενδιαφέρουν το υπόλοιπο δίκτυο και τα προωθούν στους κατάλληλους κόμβους, οι οποίοι συνεχίζουν αντίστοιχα το έργο αυτό.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά που περιγράφονται εξασφαλίζουν μια μεγάλη γκάμα εφαρμογών για τα δίκτυα αισθητήρων. Τομείς όπως η υγεία, ο στρατός, η ασφάλεια, το περιβάλλον είναι μερικοί μόνο από αυτούς στους οποίους τα ΑΔΑ μπορούν να συνεισφέρουν βοήθεια που πριν μερικά χρόνια φάνταζε αδύνατη. Για παράδειγμα, η κατάσταση της υγείας ενός ασθενή μπορεί να παρατηρείται και να ελέγχεται εξ αποστάσεως από έναν γιατρό. Ενώ ταυτόχρονα αυτό είναι πολύ πιο βολικό για τον ασθενή, είναι εξίσου ευκολότερο για τον γιατρό να παρακολουθεί με περισσότερη ακρίβεια και να κατανοεί την κατάσταση του ασθενή. Αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα επίσης να ανιχνεύσουν ξένους χημικούς

παράγοντες στον νερό ή στον αέρα. Μπορούν να συμβάλλουν στον καθορισμό του τύπου, της πυκνότητας καθώς και το πού βρίσκεται ο ρύπος. Στην ουσία, μακροπρόθεσμος στόχος είναι τα δίκτυα αισθητήρων να παρέχουν στον τελικό χρήστη την καλύτερη κατανόηση τους περιβάλλοντός του. Οραματιζόμαστε ότι, στο μέλλον, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα αποτελέσουν αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας, περισσότερο απ'ότι αποτελούν σήμερα οι προσωπικοί υπολογιστές.

Υλοποίηση αυτών και άλλων εφαρμογών δικτύων αισθητήρων απαιτούν τεχνικές ad-hoc ασύρματης δικτύωσης. Αν και πολλά πρωτόκολλα και αλγόριθμοι έχουν προταθεί για τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα ad hoc, δεν είναι κατάλληλοι για τα μοναδικά χαρακτηριστικά και τις ανάγκες εφαρμογής των δικτύων αισθητήρων. Για να φανεί αυτό το σημείο, οι διαφορές μεταξύ των δικτύων αισθητήρων και των ad hoc δικτύων περιγράφονται παρακάτω:

- Ο αριθμός των κόμβων αισθητήρων σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τους κόμβους σε ένα δίκτυο ad hoc.
- Τα ΑΔΑ είναι πυκνά εγκατεστημένα.
- Τα ΑΔΑ είναι επιρρεπή σε βλάβες και σφάλματα.
- Η τοπολογία ενός δικτύου αισθητήρων αλλάζει πολύ συχνά.
- Οι κόμβοι αισθητήρων βασίζονται περισσότερο σε broadcast εκπομπή δεδομένων, ενώ οι κόμβοι ενός ad-hoc δικτύου περισσότερο σε point-to-point επικοινωνίες.
- Οι κόμβοι ενός ΑΔΑ αντιμετωπίζουν πολλούς περιορισμούς στην ισχύ τους, την υπολογιστική τους ικανότητα καθώς και τη μνήμη τους.

Δεδομένου ότι μεγάλος αριθμός κόμβων αισθητήρων είναι πυκνά αναπτυγμένοι σε μια περιοχή, γειτονικοί κόμβοι μπορεί να είναι πολύ κοντά ο ένας στον άλλο. Ως εκ τούτου, η επικοινωνία πολλαπλών αλμάτων (multi-hop communication) σε δίκτυα αισθητήρων αναμένεται να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από ότι η παραδοσιακή επικοινωνία ενός άλματος (single hop communication) . Επιπλέον, το επίπεδο ισχύος μετάδοσης μπορεί να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, πράγμα που είναι ιδιαίτερα επιθυμητό σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (π.χ. μουσικών επιχειρήσεων). Η επικοινωνία πολλών βημάτων (multi-hop communication) μπορεί επίσης να ξεπεράσει αποτελεσματικά τις επιπτώσεις του φαινομένου του “signal propagation” που παρατηρείται στις ασύρματες επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων.

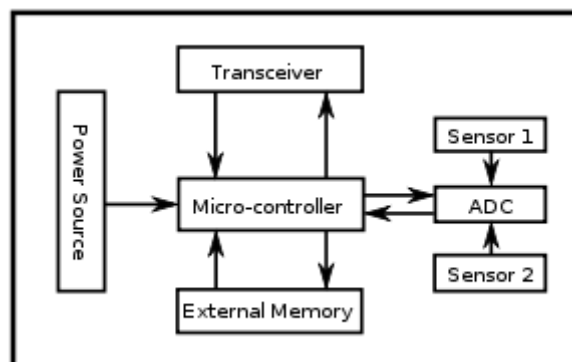
Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα για τους αισθητήρες είναι η απαίτηση για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Οι κόμβοι-αισθητήρες διαθέτουν γενικώς περιορισμένες, μη αντικαταστήσιμες, πηγές ισχύος. Ως εκ τούτου, ενώ στόχος των παραδοσιακών δικτύων είναι να επιτευχθεί υψηλή ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών (QoS), τα πρωτόκολλα δικτύων αισθητήρων πρέπει να επικεντρωθούν κυρίως στην κατάλληλη χρήση και αξιοποίηση της ισχύος. Οφείλουν να δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέγει να παρατείνει το χρόνο ζωής ενός αισθητήρα με κόστος τη μείωση της απόδοσης του ή την αύξηση του χρόνου μετάδοσης.

Επιγραμματικά, τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι:

- Η περιορισμένη ισχύς λειτουργίας εξαιτίας των ενεργειακών περιορισμών της συσκευής.
- Η ανθεκτικότητά τους σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Η φορητότητα (mobility) των κόμβων-αισθητήρων.
- Η δυνατότητά τους να χειρίζονται πιθανά failures του δικτύου.
- Η δυναμική τοπολογία του δικτύου.
- Ο μεγάλος αριθμός των κόμβων που συνήθως εγκαθίστανται και αποτελούν το δίκτυο.
- Συχνές αποτυχημένες προσπάθειες επικοινωνίας (communication failures).

1.1.1 Υλικό (Hardware)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα βασικά μέρη ενός αισθητήρα είναι ένας μικροεπεξεργαστής, μια εξωτερική μνήμη, ενός πομποδέκτης, ένας αριθμός αισθητήρων, καθώς και μια πηγή ενέργειας η οποία συνήθως είναι μια μπαταρία.



Εικόνα 1. Τα βασικά μέρη της συσκευής του αισθητήρα

1.1.1.1 Μικροεπεξεργαστής

Ο μικροεπεξεργαστής επιτελεί καθήκοντα όπως η εκτέλεση των διάφορων διεργασιών, η επεξεργασία των δεδομένων καθώς και ο συντονισμός και έλεγχος της λειτουργικότητας των υπόλοιπων μερών του αισθητήρα. Η επιλογή του μικροελεγκτή για τις συγκεκριμένες λειτουργίες είναι η βέλτιστη μεταξύ άλλων εξαιτίας της δυνατότητάς του να συνεργάζεται με άλλες συσκευές, είναι προγραμματίσιμος και οι ενεργειακές του απαιτήσεις είναι σχετικά μικρές σε αντίθεση με τους κοινούς μικροεπεξεργαστές ευρείας χρήσης. Οι μικροελεγκτές

αυτοί που χρησιμοποιούν οι αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα επιπλέον να τεθούν σε «κατάσταση ύπνου» και μονάχα ένα μέρος του μικροελεγκτή να είναι ενεργό, πράγμα που βελτιώνει περαιτέρω την ενεργειακή του απόδοση.

1.1.1.2 Πομποδέκτης (Transceiver)

Οι κόμβοι-αισθητήρες ενός ΑΔΑ κάνουν χρήση της μπάντας ISM (Industrial, Scientific and Medical radio band) η οποία προσφέρει ελεύθερη πρόσβαση, τεράστιο εύρος φάσματος και παγκόσμια διαθεσιμότητα. Η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων γενικά μπορεί να πραγματοποιείται μέσω ραδιοσυχνοτήτων, οπτικής επικοινωνίας (laser) και υπερύθρων. Το laser απαιτεί λιγότερη ενέργεια, ωστόσο είναι απαραίτητη η οπτική επαφή μεταξύ των κόμβων καθώς επίσης είναι και ευαίσθητο στις μεταβλητές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Οι υπέρυθρες όπως το laser, δεν απαιτούν κεραία ωστόσο έχει περιορισμένες δυνατότητες εκπομπής. Επομένως, η καταλληλότερη μέθοδος ασύρματης επικοινωνίας για ένα δίκτυο αισθητήρων είναι η RF (radio frequency) επικοινωνία. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούν συνήθως συχνότητες μεταξύ των 433 MHz και 2.4 GHz. Ο εκπομπός και ο δέκτης είναι συνήθως ενοποιημένοι σε μία συσκευή, γνωστή ως πομποδέκτης (transceiver). Οι διακριτές καταστάσεις λειτουργίας ενός πομποδέκτη είναι η εκπομπή, η λήψη, η ανενεργή κατάσταση (idle) και η κατάσταση ύπνου (sleep state). Οι σύγχρονοι πομποδέκτες έχουν ενσωματωμένες «μηχανές κατάστασης» που επιτελούν τη λειτουργία της εναλλαγής των καταστάσεων αυτόματα. Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι η ενέργεια που καταναλώνεται στην κατάσταση Idle είναι αντίστοιχη αυτής που καταναλώνεται στην κατάσταση λήψης. Επομένως, είναι προτιμότερο να απενεργοποιείται εντελώς ένας πομποδέκτης (shut down) όταν δεν αποστέλλει ή λαμβάνει κάποιο πακέτο, αντί να βρίσκεται σε Idle κατάσταση. Επιπλέον, ένα αξιοσημείωτο ποσό ενέργειας καταναλώνεται κατά τη μετάβαση από την «κατάσταση ύπνου» σε κατάσταση εκπομπής για την μετάδοση ενός πακέτου.

1.1.1.3 Εξωτερική μνήμη

Από ενεργειακής άποψης, τα καταλληλότερα είδη μνήμης είναι η on-chip μνήμη του μικροεπεξεργαστή και μνήμες Flash. Μνήμες RAM off-chip είναι σπάνιες και δε χρησιμοποιούνται γενικά. Οι μνήμες Flash χρησιμοποιούνται εξαιτίας του μικρού κόστους τους και της χωρητικότητάς τους. Οι απαιτήσεις σε μνήμη γενικά εξαρτώνται από τις εκάστοτε εφαρμογές που απαιτούνται. Δύο είδη μνημών που έχουν να κάνουν με τη χρήση για την οποία προορίζονται είναι α) η μνήμη του χρήστη (User memory) για την αποθήκευση πληροφορίας σχετικά με εφαρμογές ή προσωπικές πληροφορίες και β) η μνήμη προγράμματος (Program memory) που χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό της συσκευής.

1.1.1.4 Αισθητήρες

Πρόκειται για διατάξεις οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να παράγουν μια μετρήσιμη καταγραφή μιας αλλαγής μιας φυσικής κατάστασης όπως η θερμοκρασία και η πίεση. Το συνεχές σήμα που ανιχνεύουν (sense) και καταγράφουν οι αισθητήρες ψηφιοποιείται από ένα μετατροπέα Αναλογικού σήματος σε Ψηφιακό (ADC – Analog to Digital Converter), και αποστέλλεται στους μικροελεγκτές για περαιτέρω επεξεργασία. Χαρακτηριστικά των αισθητήρων είναι το μικρό μέγεθος, η πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας, το να λειτουργούν σε υψηλές ογκομετρικές πυκνότητες, να είναι αυτόνομοι και να προσαρμόζονται στο περιβάλλον τους. Οι αισθητήρες κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Παθητικοί, ομοιοκατευθυντικοί: Ανιχνεύουν τα δεδομένα δίχως να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον με ενεργό probing. Είναι ενεργειακά αυτόνομοι, π.χ. ενέργεια απαιτείται μόνο για να ενισχύσουν το αναλογικό τους σήμα. Δεν υπάρχει η έννοια της κατεύθυνσης σε αυτή την περίπτωση αισθητήρων.
- Παθητικοί, στενής δέσμης: Είναι παθητικοί όπως και η προηγούμενη κατηγορία ωστόσο έχουν μια πολύ καλά καθορισμένη έννοια της κατεύθυνσης στις μετρήσεις τους. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα τέτοιου είδους αισθητήρα είναι η κάμερα.
- Ενεργοί αισθητήρες: Αυτή η κατηγορία αισθητήρων ανιχνεύουν «ενεργά» το περιβάλλον, όπως για παράδειγμα ένας βυθομετρικός ή Radar αισθητήρας κάποιου τύπου «σεισμικού» αισθητήρα, οι οποίοι παράγουν κρουστικά κύματα μέσω μικρών εκρήξεων.

1.1.1.5 Πηγή ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας στον αισθητήρα αφορά το “Sensing”, την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και την επεξεργασία των δεδομένων. Το μεγαλύτερο μέρος την ενέργειας καταναλώνεται κατά την επικοινωνία (εκπομπή, λήψη κτλ) μεταξύ των αισθητήρων. Η ενέργεια που απαιτείται για το sensing και την επεξεργασία των δεδομένων είναι αρκετά μικρότερη. Αυτό φαίνεται καλύτερα, αν αναλογιστεί κανείς ότι για τη μεταφορά 1 Kb σε απόσταση 100m απαιτείται ενέργεια ίση περίπου με την εκτέλεση 3 εκατομμυρίων εντολών από έναν επεξεργαστή που εκτελεί 100 εκατομμύρια εντολές/δευτερόλεπτο. Η ενέργεια αποθηκεύεται είτε σε μπαταρίες ή σε πυκνωτές. Η μπαταρίες είναι η κύρια πηγή ενέργειας για τους αισθητήρες. Γενικά, χρησιμοποιούνται δύο ειδών μπαταρίες, οι επαναφορτιζόμενες και οι μη-επαναφορτιζόμενες. Κατατάσσονται επίσης σύμφωνα με το ηλεκτροχημικό υλικό που χρησιμοποιούν όπως NiCd (νικελίου-καδμίου), NiZn (νικελίου-ψευδαργύρου), Nimh (νικελίου – υδριδίου μετάλλου) και Lithium –Ion. Ήδη έχουν ξεκινήσει να κατασκευάζονται αισθητήρες οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να ανανεώσουν την ενέργειά τους μέσω του ήλιου, της θερμοκρασίας ή της δόνησης. Οι δύο βασικότερες μέθοδοι για την εξοικονόμηση ενέργειας είναι η DPM (Dynamic Power Management - Δυναμική Διαχείριση Ενέργειας) και η DVS (Dynamic Voltage Scaling – Δυναμική Διαβάθμιση Τάσης). Η DPM φροντίζει να απενεργοποιεί μέρη του μικροεπεξεργαστή τα οποία δεν απαιτείται να βρίσκονται σε λειτουργία, ενώ η DVS μεταβάλλει τα επίπεδα ισχύος ανάλογα με το –μη ντετερμινιστικό- φόρτο εργασίας. Μεταβάλλοντας την τάση σε συνδυασμό με την συχνότητα, είναι δυνατόν να αποκομίσει κανείς τετραγωνική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης.

1.1.2 Λογισμικό (Software)

Όπως ήδη έχει επαναληφθεί, ένα από τα κρισιμότερα ζητήματα που αφορούν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η σωστή διαχείριση της –περιορισμένης- ενέργειας που μπορούν να αποθηκεύσουν οι κόμβοι. Επιπλέον, κόμβοι τοποθετούνται πολύ συχνά σε περιβάλλοντα

απόμακρα και «εχθρικά» στα οποία οι κόμβοι-αισθητήρες θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να δράσουν ευέλικτα και αυτόνομα. Για το λόγο αυτό, η ανάγκη ανάπτυξης κατάλληλων αλγορίθμων και πρωτοκόλλων που θα διασφαλίζουν τα παρακάτω είναι επιτακτική :

- Μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής των κόμβων.
- Ευρωστία του δικτύου
- Ανοχή στα λάθη και τις αποτυχημένες προσπάθειες εκπομπής-λήψης.
- Αυτορύθμιση

Μερικά από τα πιο επίκαιρα τρέχοντα θέματα έρευνας που αφορούν το λογισμικό των ασύρματων αισθητήρων είναι η ασφάλεια, η κινητικότητα των κόμβων μέσα στο δίκτυο, καθώς και το λεγόμενο “middleware” δηλαδή τα ενδιάμεσα επίπεδα ανάμεσα στο software και το hardware.

1.1.2.1 Λειτουργικά συστήματα

Τα λειτουργικά συστήματα που χρησιμοποιούν τα ΑΔΑ είναι γενικά λιγότερο πολύπλοκα από τα λειτουργικά συστήματα ευρείας χρήσης εξαιτίας και των περιορισμένων απαιτήσεων και στόχων που έχουν τα συγκεκριμένα ήδη δικτύων αλλά και των περιορισμένων πόρων που μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Για παράδειγμα, οι εφαρμογές των ΑΔΑ δεν είναι συνήθως διαδραστικές όπως εκείνες ενός προσωπικού υπολογιστή. Εξαιτίας αυτού, το λειτουργικό σύστημα δε χρειάζεται να διαθέτει υποστήριξη για interfaces χρήστη. Επιπλέον, οι περιορισμένοι πόροι όσον αφορά τη μνήμη καθώς και το υλικό χαρτογράφησης μνήμης (memory mapping hardware) κάνουν μηχανισμούς όπως η εικονική μνήμη (virtual memory) να θεωρούνται είτε αχρείαστοι, είτε αδύνατο να υλοποιηθούν.

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων χρησιμοποιούν hardware όχι διαφορετικό από τα παραδοσιακά ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems), είναι επομένως δυνατό να χρησιμοποιηθούν ενσωματωμένα λειτουργικά συστήματα όπως το eCos ή το uC/OS για δίκτυα αισθητήρων. Ωστόσο, τέτοια λειτουργικά είναι συχνά σχεδιασμένα με ιδιότητες πραγματικού χρόνου (real-time properties). Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ενσωματωμένα συστήματα, ωστόσο, τα λειτουργικά συστήματα που στοχεύουν σε δίκτυα αισθητήρων, συχνά δε διαθέτουν real-time υποστήριξη.

Ίσως το πρώτο λειτουργικό σύστημα που σχεδιάστηκε ειδικά για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων είναι το TinyOS. Σε αντίθεση με τα περισσότερα λειτουργικά συστήματα, το TinyOS βασίζεται σε ένα μοντέλο προγραμματισμού το οποίο βασίζεται σε γεγονότα-events, αντί για το συνηθέστερο μοντέλο των πολλαπλών νημάτων (Multithreading). Τα προγράμματα του TinyOS υλοποιούνται με τη χρήση event-handlers και tasks. Όταν συμβαίνει ένα εξωτερικό event, όπως ένα εισερχόμενο πακέτο δεδομένων ή μια ανάγνωση ενός αισθητήρα, το TinyOS καλεί τον κατάλληλο event handler για να χειριστεί το συγκεκριμένο συμβάν. Οι event handlers μπορούν να τοποθετήσουν στην ουρά εκτέλεσης διάφορα tasks τα οποία ελέγχονται από τον πυρήνα του TinyOS και προγραμματίζονται να εκτελεστούν κάποια στιγμή που ακολουθεί. Το σύστημα του TinyOS καθώς και οι εφαρμογές του είναι γραμμένα σε μια ειδική προγραμματιστική γλώσσα, την nesC, που είναι μια

επέκταση της γνωστής C. Η NesC είναι σχεδιασμένη για να καθορίζει τους «όρους ανταγωνισμού» μεταξύ των event handlers και των tasks.

Υπάρχουν, επιπλέον, λειτουργικά συστήματα που επιτρέπουν τον προγραμματισμό σε C. Παραδείγματα τέτοιων λειτουργικών συστημάτων είναι τα Contiki, MANTIS, BTnut, SOS και Nano-RK. Το Contiki [39] είναι σχεδιασμένο για να υποστηρίζει loading modules πάνω σε ένα δίκτυο και υποστηρίζει τη φόρτωση ELF (Executable and Linkable Format) αρχείων κατά το χρόνο εκτέλεσης (run-time ELF file loading). Ο πυρήνας του Contiki καθοδηγείται από events, όπως και το TinyOS, αλλά το σύστημα υποστηρίζει τη μέθοδο του Multithreading ανά εφαρμογή. Επιπλέον, το Contiki περιλαμβάνει τα λεγόμενα Protothreads τα οποία παρέχουν μέθοδο προγραμματισμού παρόμοια με αυτή των νημάτων, αλλά με πολύ μικρότερο κόστος σε μνήμη. Σε αντίθεση με το Contiki, οι πυρήνες των MANTIS[40] και Nano-RK [41] βασίζονται στη μέθοδο του «preemptive multithreading». Με τη μέθοδο αυτή, οι εφαρμογές δε χρειάζεται να δίνουν προτεραιότητα του μικροεπεξεργαστή σε άλλες διαδικασίες (processes). Αντιθέτως, ο πυρήνας διαιρεί το χρόνο ανάμεσα στις ενεργές διαδικασίες και αποφασίζει ποια διαδικασία που μπορεί να τρέξει εκείνη τη στιγμή, διευκολύνει το τρέξιμο του προγράμματος. Το Nano-RK είναι ένας “real-time resource” πυρήνας ο οποίος επιτρέπει λεπτομερή έλεγχο του τρόπου με τον οποίο τα διάφορα tasks αποκτούν πρόσβαση στον επεξεργαστή, το δίκτυο, και τους αισθητήρες. Όπως το TinyOS και το Contiki, έτσι και το SOS[42] είναι ένα λειτουργικό σύστημα που βασίζεται σε γεγονότα. Το κυριότερό του χαρακτηριστικό είναι η υποστήριξη των modules που μπορούν να φορτωθούν. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα είναι «κατασκευασμένο» από μικρότερο modules. Για να υποστηρίξει την εγγενή αυτή δυναμική στο module interface του, το SOS επίσης επικεντρώνεται στην υποστήριξη της Δυναμικής Διαχείρισης Μνήμης. Το λειτουργικό BTnut[43] βασίζεται στο συνεργαζόμενο multithreading και τον απλό κώδικα C, και συνοδεύεται από ένα developer kit καθώς κι ένα tutorial. Το LiteOS[44] είναι ένα πρόσφατα ανεπτυγμένο λειτουργικό σύστημα για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων το οποίο προσφέρει λειτουργικότητα παρόμοια με αυτή του UNIX και υποστήριξη για προγραμματισμό σε γλώσσα C.

1.1.2.2 Αλγόριθμοι

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (ΑΔΑ) αποτελούνται συνήθως από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων, επομένως, οι αλγόριθμοι για τα δίκτυα αυτά είναι κατανομημένοι. Στα ΑΔΑ ο κρίσιμότερος ίσως πόρος είναι η ενέργεια, και κάποιες από τις περισσότερο «ενεργοβόρες» δραστηριότητες η μετάδοση δεδομένων και η κατάσταση αναμονής (idle listening). Για το λόγο αυτό, η έρευνα που αφορά τους αλγορίθμους στα ΑΔΑ επικεντρώνεται κυρίως στη μελέτη και στο σχεδιασμό αλγορίθμων που λαμβάνουν υπόψιν τους την ενεργειακή κατανάλωση. Χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως η συσσώρευση δεδομένων για να μειώνεται ο αριθμός των διαφορετικών αποστολών, η αλλαγή της ισχύος μετάδοσης των κόμβων – αισθητήρων ή η απενεργοποίηση ενός αριθμού κόμβων – διατηρώντας, ωστόσο, την συνδεσιμότητά τους και την κάλυψη τους.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που πρέπει να ληφθεί υπόψιν, είναι ότι εξαιτίας της μικρής εμβέλειας της ασύρματης κάλυψης και την πολυωνυμική αύξηση του ενεργειακού κόστους μιας μετάδοσης σε συνάρτηση της απόστασης μετάδοσης, είναι αρκετά απίθανο όλοι οι

κόμβοι που ανήκουν σε ένα δίκτυο να έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνήσουν απευθείας με τον κεντρικό κόμβο (Base Station), επομένως, η μετάδοση των δεδομένων γίνεται συνήθως μέσω πολλαπλών αλμάτων (multi-hop transmission), από τον ένα κόμβο στον άλλο και με τελικό προορισμό τον κεντρικό.

Η αλγοριθμική προσέγγιση της σχεδίασης, προσομοίωσης και ανάλυσης των ΑΔΑ διαφοροποιείται από την προσέγγιση πρωτοκόλλου, από την άποψη ότι τα ιδανικά μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι πιο αφηρημένα, πιο γενικά και ευκολότερα να αναλυθούν. Ωστόσο, είναι μερικές φορές λιγότερο ρεαλιστικά από τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση πρωτοκόλλων, μιας και η αλγοριθμική προσέγγιση συχνά αμελεί ζητήματα που έχουν να κάνουν με το συγχρονισμό, το overhead του πρωτοκόλλου, τη φάση έναρξης της δρομολόγησης και μερικές φορές την κατανομημένη υλοποίηση των αλγορίθμων.

1.1.2.3 Προγράμματα Προσομοίωσης

Υπάρχουν πλατφόρμες προσομοίωσης δικτύου ειδικά σχεδιασμένες για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων, όπως το TOSSIM που είναι μέρος του TinyOS και το COOJA που είναι μέρος του Contiki. Τα παραδοσιακά προγράμματα προσομοίωσης δικτύου όπως το ns-2 έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης. Μπορεί επίσης να γίνει χρήση του προγράμματος J-Sim, μιας πλατφόρμας ανεξάρτητης, η οποία διαθέτει framework για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επιπλέον, υπάρχει ένας προσομοιωτής ο οποίος εστιάζει στην εκτίμηση των πρωτοκόλλων ελέγχου τοπολογίας στα ΑΔΑ, ο οποίος ονομάζεται Atarraya.

Προσομοιώτες που βασίζονται στην αρχιτεκτονική του προσομοιωτή OMNet++[45] και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα ΑΔΑ είναι το Mobility Framework[46] και το Castalia[47]. Βασισμένο στο Matlab, είναι το προγράμματα προσομοίωσης Prowler (Probabilistic Wireless Network Simulator)[48]. Το JProwler επίσης είναι η έκδοση του Prowler γραμμένη σε Java. Επιπλέον, υπάρχει το QualNetNetwork Simulator[49], ενώ γραμμένο σε γλώσσα C# με το Visual Studio 2008 είναι το WSNSim[50]. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα προσομοίωσης είναι κυρίως για τη μελέτη και δοκιμή πρωτοκόλλων δρομολόγησης και συστάδων (clusters). Χρησιμοποιεί, επίσης, τον αλγόριθμο t-SNIPER[51] ο οποίος κάνει χρήση ενός κοινωνικο-οικονομικού μοντέλου δρομολόγησης. Τέλος, το πρόγραμμα προσομοίωσης Netlogo μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των ΑΔΑ.

1.1.2.4 Οπτικοποίηση Δεδομένων

Τα δεδομένα τα οποία συγκεντρώνονται από τους κόμβους-αισθητήρες ενός ΑΔΑ, συνήθως αποθηκεύονται στη μορφή αριθμητικών δεδομένων σε ένα κεντρικό σταθμό. Επιπροσθέτως, το γνωστό ως OGC (Open Geospatial Consortium)[52] καθορίζει τα στάνταρτς για διεπαφές διαλειτουργικότητας (interoperability interfaces) και κωδικοποιήσεις μεταδεδομένων τα οποία προσφέρουν συσσώρευση σε πραγματικό χρόνο δεδομένων από ετερογενείς ιστούς αισθητήρων στο Διαδίκτυο, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο σε οποιονδήποτε να καταγράφει ή να ελέγχει τους αισθητήρες ενός δικτύου μέσω ενός Web Browser. Υπάρχουν

διάφορες τεχνικές για να ανακτηθούν δεδομένα από τους κόμβους, κάποια από τα πρωτόκολλα βασίζονται σε μηχανισμούς flooding, ενώ άλλα αποδίδουν τα δεδομένα στους κόμβους εφαρμόζοντας την ιδέα του DHT.

1.1.2.5 Συγχώνευση Πληροφορίας (Information/Data Fusion)

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η συγχώνευση πληροφορίας –γνωστή και ως συγχώνευση δεδομένων- , αναπτύχθηκε με σκοπό την επεξεργασία των δεδομένων των αισθητήρων, μέσω του φιλτραρίσματος, της συσσώρευσης και της εξαγωγής συμπερασμάτων για τα συγκεντρωμένα δεδομένα. Η συγχώνευση πληροφορίας έχει να κάνει με το συνδυασμό πολλαπλών πηγών για την απόκτηση βελτιωμένης πληροφορίας: φθηνότερα, περισσότερο ποιοτικά και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Στο πλαίσιο των ΑΔΑ, απλές τεχνικές συνάθροισης δεδομένων έχουν αναπτυχθεί όπως το μέγιστο, το ελάχιστο, ο μέσος όρος, με σκοπό τη μείωση της συνολικής κίνησης δεδομένων για την εξοικονόμηση ενέργειας.

1.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων Έκτακτης Ανάγκης (Emergency WSNs)

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ένα βασικό χαρακτηριστικό των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων είναι ότι οι θέσεις των κόμβων του δικτύου δε χρειάζεται να είναι προκαθορισμένες ή υπολογισμένες με κάποια συγκεκριμένη ακρίβεια. Η αυτονομία τους, το μικρό τους μέγεθος, η ανθεκτικότητά τους, η δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους και με ένα κεντρικό κόμβο-βάση, καθώς και τα δυνατότητες που διαθέτουν όσον αφορά την καταγραφή διαφόρων δεδομένων, περιβαλλοντικών συνθηκών κτλ και προώθησής τους, δίνει τη δυνατότητα τοποθέτησης τους σε περιοχές και καταστάσεις που ο άνθρωπος έχει αντικειμενική δυσχέρεια να παρακολουθήσει και να δράσει ανάλογα.

Μια κατηγορία εφαρμογών που παρουσιάζει μοναδικές απαιτήσεις και ιδιαίτερες προκλήσεις για το σχεδιασμό των WSN, αφορά την ανταπόκριση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και επικίνδυνα περιστατικά. Ο σκοπός αυτών των εφαρμογών δεν είναι μόνο η έγκαιρη διάγνωση ενός γεγονότος έκτακτης ανάγκης, όπως μία πυρκαγιά σε ένα δάσος, η διαρροή ενός τοξικού υλικού ή ακόμα και ένα περιστατικό υγείας σε ένα σπίτι αλλά επίσης η καλύτερη «ενορχήστρωση» μιας άμεσης ανταπόκρισης σε ένα φαινόμενο που παρακολουθείται. Τέτοιου είδους ανταποκρίσεις συνήθως αφορούν ενέργειες οι οποίες αντιμετωπίζουν και καταστέλλουν το εκάστοτε φαινόμενο και μπορούν να περιλαμβάνουν επίσης ενέργειες διάσωσης ατόμων που διατρέχουν κίνδυνο.

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω ήδη, ένας από τους πρωταρχικούς στόχους των σύγχρονων ΑΔΑ είναι να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής τους. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες χαρακτηρίζονται από σοβαρούς περιορισμούς της ενέργειας λόγω της περιορισμένης διάρκειας ζωής της μπαταρίας, καθώς και η αναπλήρωση των πόρων είναι τόσο ακριβή όσο και δύσκολη - αν όχι αδύνατη - είναι προφανές ότι η κατανάλωση ενέργειας θα πρέπει να γίνεται πάντα κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Προς την κατεύθυνση αυτή, έχουν προταθεί πολλές προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, σε επείγουσες καταστάσεις, η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης δε θα πρέπει να αποτελεί πρωταρχικό στόχο.

Τα ΑΔΑ τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης θα πρέπει να πληρούν ορισμένες πρόσθετες απαιτήσεις «μετά από αίτημα» (upon request), εκτός από τα τυπικές απαιτήσεις που οφείλουν να πληρούν όλα γενικώς τα ΑΔΑ. Για παράδειγμα, ένα ΑΔΑ έκτακτης ανάγκης θα έπρεπε να λειτουργεί σύμφωνα με ένα ευέλικτο σύστημα κατανομής πόρων όταν απαιτείται, σε αντίθεση με τα στατικά και προκαθορισμένα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας, τα οποία συνήθως χαρακτηρίζονται από δεδομένα επίπεδα κατανάλωσης και ισχύος και ειδικά ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης. Στην πραγματικότητα, αυτό σημαίνει ότι, από τη μία, η μακροζωία του δικτύου πρέπει να εξασφαλίζεται από τον αριθμό των μεταδόσεων και την ελαχιστοποίηση την κατανάλωσης, από την άλλη, σε περίπτωση ενός έκτακτου περιστατικού, τα συστήματα κατανάλωσης οφείλουν να μπουν σε δεύτερη μοίρα, και να εφαρμοστεί ένα πιο «άπληστο» σύστημα λειτουργίας, για να εξασφαλίσει καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας και συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων του δικτύου.

Μια άλλη πτυχή της ανάπτυξης ενός ΑΔΑ που συχνά παραβλέπεται, και μπορεί να αποδειχθεί ζωτικής σημασίας για εφαρμογές έκτακτης ανάγκης είναι η δυνατότητα να λειτουργήσει και να προσαρμόζεται δυναμικά, σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, όπου μπορεί ενδεχομένως να συνυπάρχει με άλλες συσκευές και ΑΔΑ που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων (δηλαδή, η χωρίς άδεια ζώνη ISM 2,4 GHz). Αυτό το πρόβλημα είναι ευρέως γνωστό ως Πρόβλημα Συνύπαρξης (Coexistence Problem), και έχει τόσο αναλυθεί θεωρητικά, όσο και ουσιαστικά προσδιοριστεί σε πραγματικές συνθήκες [15,21,22,30]. Σε αυτή την εργασία υποστηρίζεται ότι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να διαθέτει ένα ΑΔΑ έκτακτης ανάγκης είναι η δυνατότητα να ανακαλύπτει δυναμικά κανάλια συχνοτήτων λειτουργίας, τα οποία είναι σε θέση να παρέχουν αποδεκτή ποιότητα επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων ενός ΑΔΑ, ανεξάρτητα από το πόσο μεγάλη είναι η περιοχή κάλυψής του. Πρέπει να σημειωθεί ότι μια τέτοια απαίτηση είναι πολύ συνηθισμένη για τις πραγματικές αναπτύξεις ΑΔΑ του σήμερα, μιας και οι αισθητήρες του εμπορίου είναι επί του παρόντος εφοδιασμένοι με μία μόνο διεπαφή επικοινωνίας, μπορούν επομένως να λειτουργήσουν σε ένα μονάχα κανάλι συχνότητας με όλους τους υπόλοιπους κόμβους με τους οποίους αλληλεπιδρούν. Αν και σήμερα έχουν προταθεί μέθοδοι οι οποίοι αξιοποιούν τις multi-channel δυνατότητες των WSN κόμβων και άρα μπορεί όλο το δίκτυο να μη λειτουργεί στο ίδιο κανάλι ακόμα και αν όλοι οι κόμβοι που το αποτελούν διαθέτουν μόνο έναν transceiver, αυτές εισάγουν πολλούς περιορισμούς και δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν ευρέως, κυρίων λόγω των ιδιαίτερων απαιτήσεων τους σε hardware modules αλλά και των ειδικών υποθέσεων πάνω στις οποίες στηρίζονται (πχ. μηδενικό κόστος αλλαγής καναλιού λειτουργίας κλπ). Επιπλέον, η προαναφερθείσα διαδικασία της δυναμικής ανακάλυψης ενός κατάλληλου καναλιού λειτουργίας δεν αρκεί να εφαρμόζεται μονάχα στην αρχή της εγκατάστασης και έναρξης λειτουργίας του δικτύου, αλλά κάθε φορά που ένα νέο δίκτυο που λειτουργεί στην ίδια μπάνα συχνοτήτων, αναπτύσσεται στην ίδια γεωγραφική περιοχή.

1.2.1 Ανταπόκριση σε πιθανή φωτιά

Ένα από τα κυριότερα και πιο επίκαιρα περιβαλλοντικά περιστατικά έκτακτης ανάγκης, στα οποία τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων θα μπορούσαν να συμβάλουν σε μεγάλο βαθμό για την αντιμετώπισή τους είναι το ξέσπασμα μιας φωτιάς σε μια περιοχή στην οποία, υπό τις παρούσες συνθήκες απαιτούνται είτε λόγω του δύσβατου, είτε λόγω της

απόστασης από κατοικημένη περιοχή, αρκετά λεπτά μέχρι ο άνθρωπος να έρθει αντιμέτωπος με το περιστατικό και να καταφέρει να το αντιμετωπίσει αποτελεσματικά.

Γενικά, υπάρχουν πολλά ζητήματα που προκύπτουν σχετικά με την αυτόματη ανίχνευση της φωτιάς, τα σημαντικότερα από τα οποία είναι ο διαφορετικός συνδυασμός αισθητήρων που απαιτείται, καθώς και οι κατάλληλες τεχνικές για ταχεία και ανεκτική στο θόρυβο ανίχνευση (όχι στον θόρυβο επικοινωνίας αλλά στον θόρυβο ανίχνευσης φωτιάς).

Ένα σημαντικό θέμα για την ανίχνευση πυρκαγιάς είναι ο διαχωρισμός των πηγών την πυρκαγιάς από τις πηγές θορύβου. Οι ερευνητές επικεντρώνονται είτε στον καθορισμό του βέλτιστου συνδυασμού αισθητήρων που σε συνδυασμό με απλές τεχνικές ανίχνευσης μπορούν να αντιληφθούν και να αντιμετωπίσουν στη συνέχεια ένα ενδεχόμενο πυρκαγιάς, είτε στην ανάπτυξη περισσότερο σύνθετων τεχνικών ανίχνευσης που χρησιμοποιούν μόνο έναν ή στην καλύτερη περίπτωση μόνο ένα μικρό αριθμό διαφορετικών αισθητήρων.

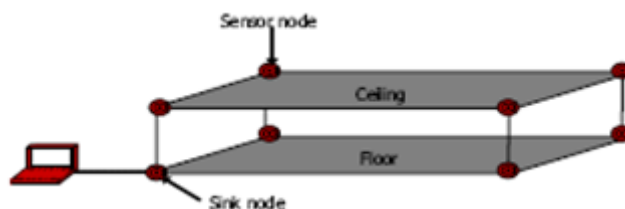
Καταλληλότεροι αισθητήρες, μετά από αντίστοιχες έρευνες επιστημόνων όπως ο Milke (1999), ο Thuillard (2000), οι Gottuk και Peatross (2002) που συμβάλλουν στο διαχωρισμό της ανίχνευσης της φωτιάς από άλλες πηγές θορύβου και μπορούν να έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι αισθητήρες θερμοκρασίας, αισθητήρες καπνού, αισθητήρες CO και CO₂, οπτικοί αισθητήρες, φωτοηλεκτρικοί αισθητήρες και ανιχνευτές ιόντων.

Πρέπει να αναφερθεί ότι αν και για τον εντοπισμό φωτιάς –ιδιαίτερα σε δασικές περιοχές- χρησιμοποιούνται ήδη πιο κλασσικές μέθοδοι όπως οι πύργοι- παρατηρητήρια, ωστόσο, είναι προφανές ότι ο ανθρώπινος παράγοντας και η πιθανή καθυστέρηση αντίληψης και αντίδρασης μπορεί να αποβεί μοιραία για την επέκταση του έκτακτου περιστατικού. Επιπλέον, σε πολλά δάση, χρησιμοποιείται η μέθοδος της παρακολούθησης μέσω δορυφόρου. Και σε αυτή την περίπτωση, όπως στην προηγούμενη, προβλήματα που μπορούν να προκληθούν από την χαμηλή χωρική και χρονική ανάλυση των δορυφορικών εικόνων, καθιστούν και αυτή τη μέθοδο αρκετά πιθανή να αποτύχει σε πολλές περιπτώσεις. Σε αντίθεση με τις παραπάνω, ήδη εφαρμοζόμενες επομένως μεθόδους, η πληροφορία που μπορεί να αντληθεί μέσω ενός εγκατεστημένου δικτύου αισθητήρων μπορεί να παράξει μια πληρέστερη παρακολούθηση δασικής περιοχής και με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια. Πρέπει να αναφερθεί επίσης, ότι σε πολλές περιπτώσεις, η δορυφορική παρακολούθηση μιας περιοχής είναι αδύνατη, επομένως, αυτό καθιστά ακόμα πιο σημαντική την ύπαρξη ενός ΑΔΑ εγκατεστημένο στην περιοχή. Είναι σημαντικός επίσης, ένας μεγάλος αριθμός αισθητήρων, με σκοπό την αύξηση της ακρίβειας ανίχνευσης και της μείωσης πιθανότητας ψευδούς σήματος συναγερμού (false alarm).

1.2.2 Παρακολούθηση Σεισμών

Η παρακολούθηση σεισμών είναι μια τεχνολογία που καταγράφει δονήσεις διαφόρων κατασκευών κατά τη διάρκεια των σεισμικών φαινομένων. Μια πυκνή εγκατάσταση αισθητήρων σε μια ευρεία περιοχή συμβάλλει στη βελτίωση της μηχανικής των σεισμών. Οι ερευνητές που ασχολούνται με το συγκεκριμένο θέμα, ενδιαφέρονται στο να καταγράψουν συνεχείς και συγχρονισμένες μετρήσεις επιτάχυνσης από αισθητήρες, εγκατεστημένους σε κατασκευές κτιρίων. Ένα σύστημα παρακολούθησης σεισμικών φαινομένων από ασύρματα

δίκτυα αισθητήρων συνήθως αποτελείται από ένα σχετικά μεγάλο αριθμό κόμβων-αισθητήρων κι ένα κεντρικό κόμβο – βάση. Ο κεντρικός κόμβος βρίσκεται σε συγχρονισμό με τους υπόλοιπους κόμβους. Κατά τη διάρκεια του φαινομένου, οι αισθητήρες αποστέλλουν τις μετρήσεις που καταγράφουν στη βάση, η οποία έπειτα έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί τα δεδομένα και να εξάγει με αυτόν τον τρόπο συμπεράσματα σχετικά με τα χαρακτηριστικά του σεισμού.



Εικόνα 2. Σύστημα παρακολούθησης σεισμού

1.2.3 Επείγουσες καταστάσεις ιατρικής περίθαλψης

Η τεχνολογία των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων έχει τη δυνατότητα να προσφέρει τα σημαντικά και ιδιαίτερα πλεονεκτήματα που διαθέτει και σε πολλές πτυχές της Ιατρικής, και συγκεκριμένα σε επείγουσες καταστάσεις ιατρικής περίθαλψης. Συσκευές αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καταγραφούν σε συνεχή, πραγματικό χρόνο ζωτικά σήματα από ένα μεγάλο αριθμό ασθενών, μεταβιβάζοντας τα δεδομένα σε φορητούς υπολογιστές τους οποίους θα χειρίζεται ειδικευμένο προσωπικό, τεχνικοί, ιατροί και νοσοκόμες.



Εικόνα 3. Η εφαρμογή των ΑΔΑ στην ιατρική περίθαλψη

Σήμερα, χρησιμοποιούνται ήδη η ασύρματη επικοινωνία σε συνδυασμό με συσκευές που καταγράφουν συγκεκριμένα φαινόμενα στην Ιατρική. Για παράδειγμα, είναι δυνατό να αποκτήσουμε μετρήσεις για τους παλμούς της καρδιάς, τον κορεσμό του οξυγόνου, το ποσοστό του CO₂ και βιοχημικές ενώσεις, περιλαμβανομένης και της γλυκόζης με μικρούς, μη επεμβατικούς αισθητήρες. Αναμένεται, ότι με την πάροδο του χρόνου, θα είναι διαθέσιμη μια όλο και αυξανόμενη γκάμα αισθητήρων με εξελιγμένες δυνατότητες. Εταιρίες όπως η Nonin και η Numed έχουν ήδη αναπτύξει ασύρματους αισθητήρες ζωτικών σημάτων που βασίζονται στην τεχνολογία του Bluetooth, ενώ η εταιρία Radianse έχει αναπτύξει ένα βασισμένο στις ραδιοσυχνότητες σύστημα εντοπισμού σημείων για χρήση σε νοσοκομεία. Άλλα ερευνητικά προγράμματα που ασχολούνται με το θέμα είναι το MobiHealth Project της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, το οποίο στοχεύει στο να παρέχει συνεχή παρακολούθηση των

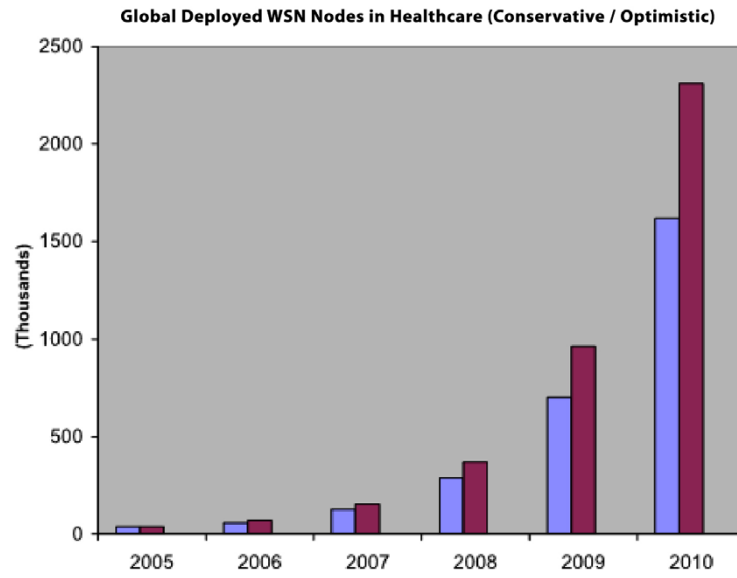
ασθενών έξω από το περιβάλλον του νοσοκομείου, αναπτύσσοντας την ιδέα του « 3G Δικτύου Σώματος». Οι εφαρμογές που μπορεί να προκύψουν από το εν λόγω εγχείρημα θα σώσουν ζωές, θα δημιουργήσουν πολύτιμα δεδομένα για την ιατρική έρευνα και θα μειώσουν αισθητά το κόστος των ιατρικών υπηρεσιών.

Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα που τίθεται, είναι η εξέλιξη ενός πιθανού συμβάντος πολλαπλών θυμάτων σε μια περιορισμένη γεωγραφική περιοχή, όπως για παράδειγμα ένα τρομοκρατικό χτύπημα. Με τα σημερινά δεδομένα, το πιθανότερο είναι πως το προσωπικό και ο εξοπλισμός ενός νοσοκομείου –ή περισσότερων- δε θα έχει τη δυνατότητα να ανταποκριθεί άμεσα και αποτελεσματικά για να προσφέρει επαρκείς υπηρεσίες. Το παραπάνω, δημιουργεί την ανάγκη δημιουργίας μια υποδομής η οποία θα βελτιστοποιεί την κατανομή και τη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων και θα αποφεύγεται με αυτόν τον τρόπο τυχόν κατάρρευση του συστήματος παροχής φροντίδας στους ασθενείς. Η λύση σε όλα τα παραπάνω προβλήματα που προκύπτουν, φαίνεται να μπορεί να δοθεί από τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να γεφυρώσουν το χάσμα ανάμεσα στην αυξημένη ζήτηση παροχής φροντίδας σε ένα έκτακτο γεγονός και τους περιορισμένους πόρους (προσωπικό, εξοπλισμός, χώρος και χρόνος παρακολούθησης κτλ) ενός νοσοκομείου.

Οι αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα εκτός από την καταγραφή διαφόρων μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, να αποθηκεύουν πληροφορίες ασθενών, όπως η ταυτότητά τους, το ιστορικό τους και οι θεραπείες που έχουν ακολουθήσει, ενισχύοντας έτσι και βελτιώνοντας τα ήδη υπάρχοντα συστήματα καταγραφής ιστορικού και τα χάρτινα διαγράμματα. Επιπλέον, στην περίπτωση ενός ατυχήματος με πολλαπλά θύματα, ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να συνδράμει καταλυτικά στην ανίχνευση και εντοπισμό των διασωθέντων καθώς και στην μετέπειτα θεραπεία τους, χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα σε πολλούς ασθενείς συσκευές – αισθητήρες. Η προσέγγιση αυτή έχει σαφή πλεονεκτήματα για την υγεία και τη φροντίδα του ασθενούς, ωστόσο προκύπτουν προβλήματα όσον αφορά την αξιοπιστία και την πολυπλοκότητα της εκάστοτε περίπτωσης.

Αν και έχουν υπάρξει πολλές εξελίξεις στον τομέα των βιοϊατρικών αισθητήρων, τις επικοινωνίες χαμηλής ισχύος και τα ενσωματωμένα συστήματα, ακόμα δεν υπάρχει μια ευέλικτη, ισχυρή επικοινωνιακή υποδομή για την ενσωμάτωση αυτών των συσκευών σε ένα σύστημα φροντίδας έκτακτης ανάγκης.

Μια νέα κίνηση προς αυτή την κατεύθυνση αποτελεί το CodeBlue project [7], μια ασύρματη υποδομή η οποία αναπτύσσεται και προορίζεται για την εγκατάσταση δικτύων αισθητήρων που αφορούν την επείγουσα ιατρική περίθαλψη, ενσωματώνοντας χαμηλής ισχύος, ανίχνευσης ζωτικών σημάτων, ασύρματους αισθητήρες, PDAs και PC-class συστήματα. Το CodeBlue θα ενισχύσει την ικανότητα των πρώτων διασωστών στην αξιολόγηση των ασθενών επί τόπου, θα εξασφαλίσει την απρόσκοπτη μεταφορά των απαραίτητων δεδομένων μεταξύ των ανθρώπων που θα παράσχουν φροντίδα και θα διευκολύνει την αποτελεσματική χρήση των νοσοκομειακών πόρων. Προορίζεται να εξελιχθεί σε ένα πολύ ευρύ δίκτυο χιλιάδων υποδικτύων και αισθητήρων, το οποίο θα έχει την ικανότητα να λειτουργεί υπό ασταθείς συνθήκες δικτύου. Η υποδομή αυτή θα στηρίζει αξιόπιστη, ad-hoc διανομή πληροφορίας, ένα ευέλικτο σύστημα ονοματοδοσίας και εντοπισμού, καθώς και ένα αποκεντρωμένο μοντέλο ασφάλειας.



Εικόνα 4. Εξέλιξη της χρήσης ΑΔΑ σε Ιατρικές Υπηρεσίες τα τελευταία χρόνια.

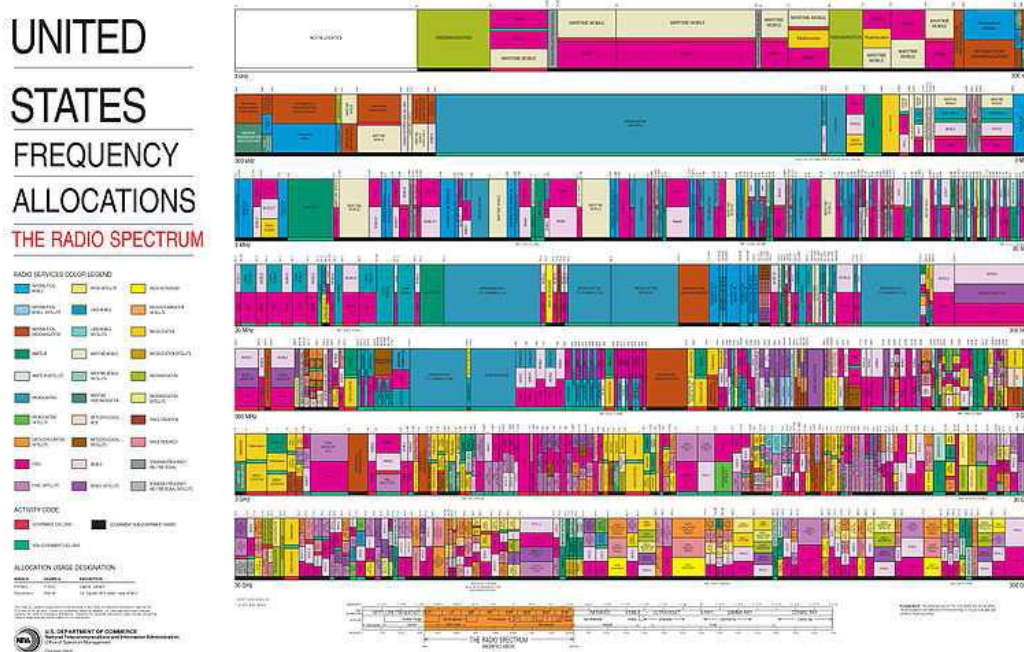
Κεφάλαιο 2^ο : Cognitive Radio - Dynamic Spectrum Access

2.1 Γενικά

2.1.1 Το φάσμα ραδιοσυχνότητων

Το φάσμα ραδιοσυχνότητων είναι ένας σημαντικότερος οικονομικός πόρος στις μέρες μας. Τα χαρακτηριστικά του είναι το εύρος ζώνης του, η καταλληλότητα για συγκεκριμένες μεταδόσεις και υπηρεσίες καθώς και οι παρεμβολές από τις οποίες υποφέρει. Ο ορισμός του ως πόρος έγκειται στη χρησιμοποίηση των συχνοτήτων του για μετάδοση και λήψη και γενικότερα εξυπηρέτηση συγκεκριμένων υπηρεσιών, τη γεωγραφική περιοχή κάλυψης, καθώς και το χρονικό διάστημα χρησιμοποίησής του.

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν το φάσμα ραδιοσυχνότητων και οι υπηρεσίες που προσφέρουν είναι πολλές και σημαντικές. Παραδείγματα τέτοιων τεχνολογιών είναι η κινητή τηλεφωνία, το GPS, δορυφορικές επικοινωνίες, αναλογική και ψηφιακή τηλεόραση και ραδιοφωνία Wi-Fi. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η διάθεση φασματικών πόρων για διάφορες τεχνολογίες στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής το έτος 2003.



Εικόνα 5. Ενδεικτικός φασματικός χάρτης των ΗΠΑ

Η διαχείριση λοιπόν του φασματικού πόρου είναι αναγκαία για την εύρυθμη και σωστή λειτουργία των υπηρεσιών που προσφέρονται. Μια σειρά οργάνων και ομάδων προτυποποίησης είναι υπεύθυνα για τη διαχείριση αυτή. Τέτοια όργανα είναι:

- Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU)
- Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI)

- Ευρωπαϊκή Διάσκεψη Αρχών Ταχυδρομείων και Τηλεπικοινωνιών (CEPT)
- Οι κατά τόπους ρυθμιστικές αρχές όπως η FCC στις ΗΠΑ, ΕΕΤΤ στην Ελλάδα

Πιο συγκεκριμένα, οι στόχοι των παραπάνω οργάνων είναι:

- Οικονομική αποδοτικότητα, δηλαδή μεγιστοποίηση της αξίας που παράγεται από τη χρήση του φάσματος
- Μεγιστοποίηση της χρήσης του φάσματος
- Αποτροπή των παρεμβολών
- Εφαρμογή προκαθορισμένης πολιτικής

Για την επίτευξη λοιπόν αυτών των στόχων, το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων έχει χωρισθεί στις εξής ζώνες:

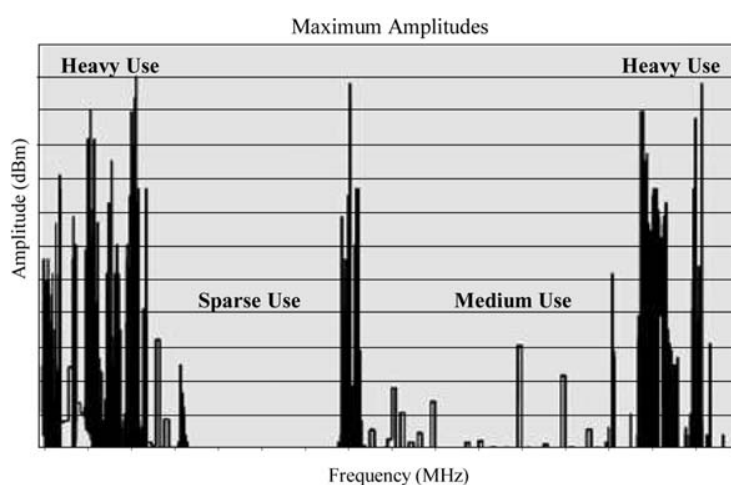
- Αδειοδοτημένες ζώνες για αποκλειστική χρήση για συγκεκριμένες υπηρεσίες
- Αδειοδοτημένες ζώνες για αποκλειστική χρήση
- Μη αδειοδοτημένες ζώνες με κοινή χρήση

Στη πρώτη κατηγορία ζωνών ανήκει ο παραδοσιακός τρόπος διάθεσης φάσματος, όπου οι φασματικές ζώνες χωρίζονται σε κανάλια, και αδειοδοτούνται σε χρήστες για συγκεκριμένες υπηρεσίες. Παράδειγμα αυτής της κατηγορίας αποτελεί η διάθεση φάσματος στην αναλογική τηλεόραση. Στην δεύτερη κατηγορία ο δικαιούχος χρήστης μπορεί να εκπέμψει κατ' επιλογήν οτιδήποτε επιθυμεί και να προσφέρει όποια υπηρεσία θέλει, με την προϋπόθεση ότι δεν θα παρεμβάλει στα γειτονικά κανάλια και δεν θα παρεμποδίζει τις υπηρεσίες που προσφέρονται από γείτονες προς αυτόν χρήστες. Στην τρίτη κατηγορία ανήκει το μη αδειοδοτημένο φάσμα, δηλαδή οι φασματικές ζώνες που είναι ελεύθερες για κάθε χρήστη. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το 802.11b ή Wi-Fi που λειτουργεί στα 2,4GHz.

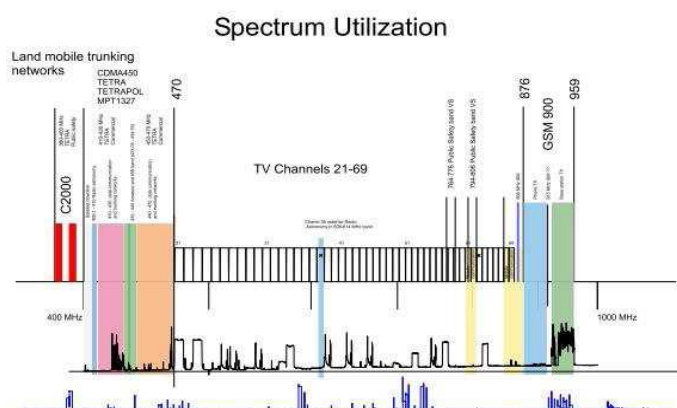
Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια, η αλματώδης ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών, η όλο και αυξανόμενη ανάγκη για επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης, εξαιτίας ασύρματων ευρυζωνικών συνδέσεων, αλλά και η «συμφόρηση» υπηρεσιών σε συγκεκριμένες φασματικές ζώνες έχει οδηγήσει στη αύξηση ζήτησης εύρους ζώνης αλλά και στον ανταγωνισμό μεταξύ δημόσιων, ιδιωτικών και στρατιωτικών φορέων για την κατοχή φάσματος. Δεδομένου όμως ότι το εύρος ζώνης είναι ένας πεπερασμένος πόρος το πρόβλημα που ανακύπτει είναι η διαφαινόμενη εξάντλησή του, καθώς και το πώς θα γίνει βέλτιστη εκμετάλλευσή του.

2.1.2 Το πρόβλημα – Η υποχρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος

Παρόλα αυτά μελέτες που έχουν γίνει στο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων από τα 400MHz έως τα 1000MHz όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες δείχνουν ότι αν και η φασματική αυτή περιοχή είναι αδειοδοτημένη η αξιοποίησή της δεν είναι η βέλτιστη δυνατή. Η μη βέλτιστη αξιοποίηση των φασματικών πόρων εισάγει την έννοια της φασματικής οπής. *Μια φασματική οπή είναι μία ζώνη συχνοτήτων διατεθειμένη στον κυρίαρχο-δικαιούχο χρήστη, αλλά για αρκετά μεγάλα χρονικά διαστήματα και σε συγκεκριμένες περιοχές αυτή παραμένει αχρησιμοποίητη.*



Εικόνα 6.Χρησιμοποίηση φάσματος



Εικόνα 7.Χρησιμοποίηση φάσματος (β)

Γίνεται επομένως φανερό ότι θα πρέπει να δημιουργηθούν νέοι μηχανισμοί διάθεσης των φασματικών πόρων όπως υπενουκίαση και κοινοχρησία των πόρων μεταξύ των χρηστών, δημιουργία δευτερογενών αγορών κλπ. Η αξιοποίηση λοιπόν του φάσματος μπορεί να

βελτιστοποιηθεί αν τέτοια φασματικά τμήματα χρησιμοποιηθούν από ένα δευτερεύοντα χρήστη, σε συγκεκριμένη χρονική διάρκεια και τοποθεσία. Στο αδειοδοτημένο φάσμα ο μηχανισμός που ενεργεί ονομάζεται «command and control», δηλαδή η χρησιμοποίηση μιας φασματικής περιοχής ανήκει αποκλειστικά σε ένα πάροχο που αποφασίζεται από την εκάστοτε ρυθμιστική αρχή της κάθε χώρας. Οι ρίζες του μηχανισμού αυτού ανήκουν στα πρώιμα στάδια των ασύρματων τηλεπικοινωνιών όπου οι τεχνικές για ελαχιστοποίηση της παρεμβολής δεν ήταν τόσο ανεπτυγμένες για την επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας υπηρεσίας. Αντίθετα το μη αδειοδοτημένο φάσμα είναι ελεύθερο για όλους τους χρήστες και ωθεί τον διαμοιρασμό των φασματικών πόρων για επίτευξη μεγαλύτερης φασματικής απόδοσης. Παρόλα αυτά ανάλογα με την υπηρεσία που διαθέτει ο κάθε πάροχος είναι επιθυμητός ο πρώτος ή ο δεύτερος μηχανισμός. Για παράδειγμα στη μετάδοση ενός ποδοσφαιρικού αγώνα με διαδραστικές υπηρεσίες η εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας πρέπει να είναι εξασφαλισμένη. Αντίθετα σε τελικούς χρήστες που επιθυμούν να έχουν ασύρματη πρόσβαση στο Internet μέσω κινητού τηλεφώνου για μερικά λεπτά, η εγγύηση της ποιότητας υπηρεσίας δεν είναι τόσο σημαντική όσο η ίδια η παροχή υπηρεσίας.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι υπάρχει μια δευτερεύουσα αγορά, όπου ενδιαφερόμενοι πάροχοι μπορούν να αποκτούν φασματικές ζώνες για κάποιο χρονικό διάστημα ώστε να προσφέρουν τις υπηρεσίες τους. Η αγορά αυτή υπάρχει σε πραγματικό χρόνο οπότε και ονομάζεται δευτερεύουσα αγορά πραγματικού χρόνου. Αν και αρχικά το χρονικό αυτό διάστημα εκτείνονταν στα χρονικά πλαίσια ενός έτους, η ύπαρξη μεγάλου αριθμού δευτερευόντων χρηστών αλλά και ο τρόπος σχεδίασης των πρωτόκολλων ανάθεσης συχνοτήτων, περιορίζουν το χρόνο μίσθωσης σε μερικά λεπτά ή ακόμα και δευτερόλεπτα.

Για την αποφυγή παρεμβολής μεταξύ μεταδόσεων δευτερευόντων χρηστών ή δευτερεύοντα χρήστη και κυρίαρχου έχουν προταθεί δύο τεχνολογίες. Η πρώτη είναι με χρήση του συστήματος GPS όπου τα δεδομένα θέσης του κάθε εκπομπού στέλνονται στο σταθμό βάσης του κυρίαρχου χρήστη και υπολογίζεται η παρεμβολή και λαμβάνεται η απόφαση για παραχώρηση ή όχι της φασματικής περιοχής. Η δεύτερη με χρήση της τεχνολογίας SDR όπου δίνεται η δυνατότητα για μεταπήδηση από την μία φασματική περιοχή σε μια άλλη για αποφυγή παρεμβολής. Όλα λοιπόν τα παραπάνω οδηγούν στην έννοια των γνωστικών δικτύων επικοινωνιών ή Cognitive Radios (CRs).

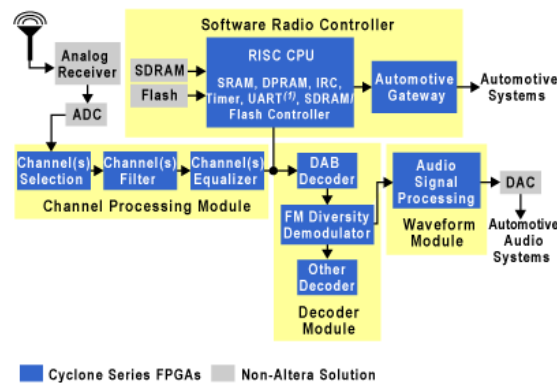
2.1.3 Η προτεινόμενη λύση - Γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών (Cognitive Radio Networks, CRNs)

Η ιδέα του Cognitive Radio Network στηρίζεται στις αρχές του Software-Defined Radio (SDR). Οι συσκευές που λειτουργούν με βάση το SDR αναζητούν και χρησιμοποιούν δυναμικά διαθέσιμες φασματικές ζώνες που καθορίζονται από λογισμικό. Το SDR βασίζεται ουσιαστικά σε ένα πομπό όπου οι παράμετροι λειτουργίας του δηλαδή συχνότητα λειτουργίας, ισχύ εκπομπής, διαμόρφωση, κωδικοποίηση, διάγραμμα ακτινοβολίας μπορούν να αλλάξουν προγραμματιστικά χωρίς την αλλαγή του hardware του πομπού.

Κατά την κλασική μέθοδο αποδιαμόρφωσης το λαμβανόμενο σήμα από την κεραία λήψης, αλλάζει συχνότητα με ένα ή δύο βήματα, από την RF περιοχή στη IF. Αυτό γίνεται διότι η αποδιαμόρφωση σε αυτήν την περιοχή συχνοτήτων είναι πιο σταθερή και πιο εύκολα υλοποιήσιμη. Επίσης το hardware του αποδιαμορφωτή (π.χ. για αποδιαμόρφωση,

αποκωδικοποίηση) είναι σταθερό, βάσει της υπηρεσίας που θέλει αυτός να εξυπηρετήσει και αποφασίζεται εξ αρχής κατά την σχεδίαση του.

Η ανάπτυξη της σχεδίασης υπολογιστών αλλά και της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, καθιστά δυνατή την αντικατάσταση του κλασικού αποδιαμορφωτή, από ένα ισοδύναμο σύστημα που δυναμικά υποστηρίζει πολλαπλά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Το αναλογικό σήμα δηματοληπτείται από έναν αναλογικό-σε-ψηφιακό μετατροπέα, και όλη η διαδικασία που απαιτείται για την λήψη του σήματος πληροφορίας πραγματοποιείται με χρήση υπολογιστή. Αυτή η νέα προσέγγιση είναι πολύ ευέλικτη και δίνει τεράστιες δυνατότητες στο σχεδιαστή ασύρματων δικτύων καθώς ανά πάσα στιγμή η διαμόρφωση, κωδικοποίηση κλπ μπορούν να αλλάζουν προγραμματιστικά.



Εικόνα 8. Σύστημα αποδιαμορφωτή SDR

Στην εικόνα 8 φαίνεται ένα σύστημα αποδιαμορφωτή SDR. Ο αποδιαμορφωτής αποτελείται από ένα σύστημα επεξεργασίας και επιλογής καναλιού και ένα σύστημα αποκωδικοποίησης. Το σύστημα επεξεργασίας και επιλογής καναλιού είναι υπεύθυνο για την ορθή επιλογή του καναλιού, καθώς επίσης στο σύστημα αυτό πραγματοποιείται φιλτράρισμα και αντιστάθμιση. Το σύστημα επεξεργασίας καναλιού χρειάζεται πολλές παραμέτρους λειτουργίας για κάθε διαφορετικό σετ επεξεργασίας καναλιού. Οι παράμετροι αυτοί προσδιορίζονται από το Software Radio Controller το οποίο περιλαμβάνει επεξεργαστή, μνήμες, ελεγκτές και αποτελεί το hardware πάνω στο οποίο στηρίζεται ο πυρήνας του SDR.

Η ιδέα του Cognitive Radio αποτελεί μια επέκταση του SDR, με κύρια χαρακτηριστικά:

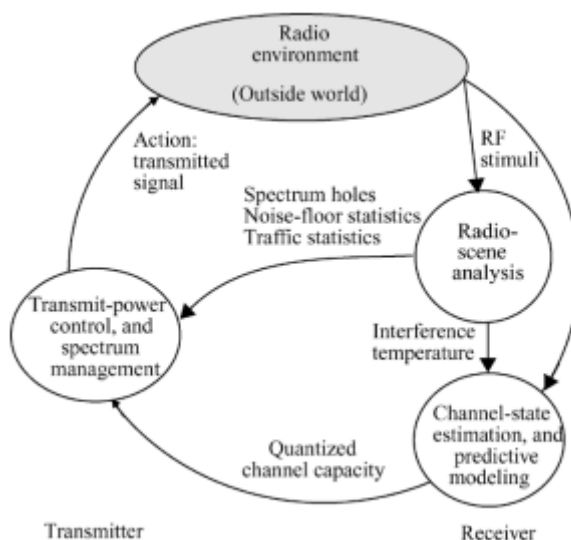
- Αντίληψη του περιβάλλοντος
- Ικανότητα αλλαγής της συμπεριφοράς του ανάλογα με το υπάρχον περιβάλλον
- Ικανότητα να «μαθαίνει» από προηγούμενες καταστάσεις
- Ικανότητα προσαρμογής σε καταστάσεις που ήταν άγνωστες κατά το σχεδιασμό του

2.1.3.1 Ορισμός

Το σύστημα γνωστικών επικοινωνιών λοιπόν, σύμφωνα με τον ορισμό που έδωσε ο Simon Haykin [25], είναι ένα έξυπνο ασύρματο σύστημα δικτύου το οποίο έχει γνώση για το περιβάλλον γύρω του, αντλεί πληροφορίες από αυτό και με μεθόδους εκμάθησης προσαρμόζει τις εσωτερικές του καταστάσεις στις RF μεταβολές κάνοντας αλλαγές σε συγκεκριμένες λειτουργικές παραμέτρους (όπως ισχύ μετάδοσης, συχνότητα των φερόντων, είδος διαμόρφωσης) σε πραγματικό χρόνο, με δύο κυρίως στόχους:

- Υψηλής αξιοπιστίας επικοινωνίες οποτεδήποτε και οπουδήποτε χρειαστεί
- Αποδοτική χρήση του φάσματος ραδιοεπικοινωνιών

Στην εικόνα 9 που ακολουθεί παρουσιάζεται γραφικά ο πομπός και ο δέκτης ενός συστήματος CR απεικονίζοντας τον παραπάνω ορισμό. Η αρμονική συνεργασία πομπού και δέκτη προϋποθέτει την ύπαρξη ενός καναλιού ανάδρασης μέσω του οποίου πληροφορίες για την μετάδοση και τα χαρακτηριστικά της, θα στέλνονται στον πομπό.



Εικόνα 9. Σύστημα CR

2.1.3.2 Χαρακτηριστικά του Cognitive Radio

Η αντίληψη του περιβάλλοντος προϋποθέτει την ύπαρξη ενός συστήματος ανίχνευσης των φασματικών οπών και υπολογισμού της παρεμβολής που θα προκαλέσει η έναρξη εκπομπής ενός CR καθώς και η παρεμβολή που θα δέχεται το ίδιο CR από άλλα ασύρματα δίκτυα. Το CR πρέπει να είναι σε θέση λοιπόν να αλλάζει τις παραμέτρους εκπομπής έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η εκπομπή βάσει μιας καθορισμένης ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Γι' αυτό το λόγο η επικοινωνία του πομπού και του δέκτη είναι απαραίτητη μέσω του καναλιού ανάδρασης. Επίσης το CR μπορεί όχι μόνο να προσαρμόζεται σε τυχόν αλλαγές του περιβάλλοντος, αλλά και να «μαθαίνει» από αυτές, να

τις εκμεταλλεύεται και να παίρνει μελλοντικές αποφάσεις ώστε να προσαρμόζεται σε καταστάσεις που ήταν άγνωστες όταν αυτό σχεδιάστηκε. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι αυτά που προσδίδουν και την ονομασία (cognitive-νοητικός) στο τύπο αυτό του δικτύου. Ένα παράδειγμα συσκευής που θα λειτουργεί με την ιδέα του CR είναι ένα multiband, multi-protocol κινητό τηλέφωνο, το οποίο από μόνο του θα μπορεί να επιλέγει δίκτυο, θα μπορεί να διαπραγματεύεται για τα χαρακτηριστικά σύνδεσης με το σταθμό βάσης κλπ.

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως η παραχώρηση των φασματικών πόρων μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους α)με αποκλειστική χρήση για συγκεκριμένες υπηρεσίες β)με αποκλειστική χρήση γ)με ελεύθερη κοινή χρήση. Κάθε συσκευή που ενσωματώνει την ιδέα του CR θα είναι σε θέση να λειτουργεί και στις τρεις παραπάνω κατηγορίες, προσφέροντας την κατάλληλη ποιότητα, για κάθε υπηρεσία που επιλέγει ο χρήστης κατά περίπτωση.

Με βάση τα παραπάνω λοιπόν, το φάσμα είτε ελεύθερο είτε αδειοδοτημένο, για την βέλτιστη αξιοποίηση του, θα πρέπει να διατίθεται στους υποψήφιους χρήστες του. Η διάθεση του φάσματος εναρμονισμένη όμως τώρα με την ιδέα του CR, μπορεί να γίνει είτε υποστρωματικά είτε επιστρωματικά.

Κατά την υποστρωματική θεώρηση μια φασματική περιοχή αδειοδοτείται στο κυρίαρχο-δικαιούχο χρήστη, ενώ η ίδια περιοχή παραχωρείται (κατόπιν αντιτίμου) σε έναν δευτερεύοντα χρήστη. Βασική προϋπόθεση για να γίνει υλοποιήσιμη η παραπάνω θεώρηση είναι η όσο το δυνατόν μικρότερη παρεμβολή, μεταξύ του κυρίαρχου-δικαιούχου χρήστη και του δευτερεύοντα. Η τεχνολογία που θα μπορούσε να εφαρμοστεί για την μείωση της παρεμβολής και είναι ιδανική για αυτή τη θεώρηση, είναι η τεχνολογία του UWB (Ultra-Wide Band). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την UWB το σήμα πληροφορίας του δευτερεύοντα χρήστη απλώνεται σε όλο σχεδόν το διαθέσιμο εύρος ζώνης και το προς μετάδοση σήμα είναι περίπου 25% μεγαλύτερο από την κεντρική συχνότητα εκπομπής, αλλά η πυκνότητα ισχύος του είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με το αντίστοιχο σήμα στενής ζώνης του κυρίαρχου-δικαιούχου χρήστη. Συνεπώς για τον κυρίαρχο-δικαιούχο χρήστη, τα σήματα των δευτερευόντων χρηστών μπορεί να θεωρηθούν σαν λευκός προσθετικός θόρυβος.

Κατά την επιστρωματική θεώρηση το εύρος ζώνης του δικαιούχου μοιράζεται:

- Στο δευτερεύοντα όταν ο πρώτος δεν το χρησιμοποιεί.
- Στο δευτερεύοντα κατόπιν διαπραγματεύσεων με τον κυρίαρχο (ύπαρξη περισσότερων του ενός υποψήφιοι δευτερεύοντες χρήστες).
- Σαν συνδυασμός των δύο παραπάνω.

Από τις παραπάνω δύο θεωρήσεις γίνεται φανερό ότι ενώ στην υποστρωματική ο δευτερεύον χρήστης μπορεί να εκπέμπει σε όλο το φάσμα συχνοτήτων του δικαιούχου αλλά με χαμηλή ισχύ, στη δεύτερη εκπέμπει με υψηλή ισχύ αλλά σε προκαθορισμένες συχνότητες και για προκαθορισμένο χρόνο. Η συχνότητα και ο χρόνος εκπομπής αποτελεί αντικείμενο διαπραγματεύσεων μεταξύ του δικαιούχου και του δευτερεύοντα χρήστη. Η δεύτερη θεώρηση επιτυγχάνει καλύτερα την κάλυψη των φασματικών οπών με την προϋπόθεση

βέβαια ότι δεν προκαλεί παρεμβολές στο δικαιούχο χρήστη. Τόσο η υποστρωματική όσο και επιστρωματική θεώρηση μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους για βελτιστοποίηση της διάθεσης του φασματικού πόρου στο χώρο και στο χρόνο.

2.1.3.3 Δυναμική Προσαρμογή Συχνότητας

Δεδομένου ότι το μοντέλο φόρτου του φάσματος δε διαθέτει μια σταθερή μορφή και μεταβάλλεται με το χρόνο, θα πρέπει να παρακολουθείται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης (runtime). Όταν η χρήση του φάσματος βρίσκεται σε μεγάλο βαθμό ανισοροπίας, ενεργοποιείται η δυναμική προσαρμογή συχνότητας, ανακατατάσσοντας τους κόμβους από πιο επιβαρυσμένες ζώνες συχνοτήτων σε λιγότερο επιβαρυσμένες [15].

Αν, έστω, το $fre(a)$ συμβολίζει τη συχνότητα του κόμβου a και το $Tra(a)$ αναπαριστά το «κυκλοφοριακό» φόρτο του a , το κυκλοφοριακό φόρτο για μια συχνότητα ($FTra_i$) καθώς και το φόρτο για ένα δίκτυο ($NTra_i$) μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$FTra_i = \sum_{fre(\alpha)=fre_i} Tra(\alpha), NTra_i = \sum_{\alpha \in net_i} Tra(\alpha)$$

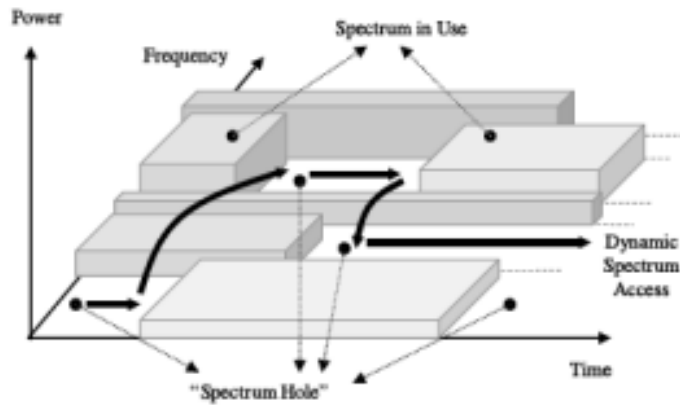
Επίσης, το επίπεδο ανισοροπίας του φάσματος μπορεί να υπολογιστεί από το λόγο:

$$ImbLevl = \frac{\max\{FTra_i\}}{\min\{FTra_i\}}$$

Όταν ένας κόμβος, για παράδειγμα ο κόμβος a στην προκειμένη περίπτωση αντιληφθεί ότι το επίπεδο ανισοροπίας $ImbLevl$ είναι μεγαλύτερο από ένα καθορισμένο κατώφλι, ενεργοποιεί τη διαδικασία της δυναμικής προσαρμογής συχνότητας, εωσότου το επίπεδο ανισοροπίας φτάσει σε μια αποδεκτή τιμή: ειδοποιώντας έναν κόμβο από το πιο απασχολημένο κανάλι να μεταφερθεί στο λιγότερο απασχολημένο.

2.2 Διαμοιρασμός Φάσματος / Διαμοιραζόμενοι άξονες

Όπως ήδη έχει αναφερθεί οι βασικοί μηχανισμοί των συστημάτων γνωστικών επικοινωνιών είναι η ανίχνευση των φασματικών οπών, η ικανότητα αλλαγής συμπεριφοράς ανάλογα με το περιβάλλον και η ικανότητα «μάθησης». Η ανίχνευση των φασματικών οπών και η εκπομπή των CR συστημάτων μέσα σε αυτές προϋποθέτει την ύπαρξη ενός συστήματος έξυπνου διαμοιρασμού του φασματικού πόρου, χωρικά και χρονικά. Προς την κατεύθυνση αυτή ο πόρος πρέπει να διαιρείται βάσει τριών άξόνων, τον άξονα της συχνότητας, τον άξονα της ισχύος και τον άξονα του χρόνου όπως φαίνεται στην εικόνα 10 που ακολουθεί.



Εικόνα 10. Απεικόνιση των φασματικών όπως πάνω στους 3 άξονες: συχνότητα, χρόνος και ισχύς.

2.2.1 Spectrum Sharing

Ας θεωρηθεί ένα πλήρως αντιπροσωπευτικό και ρεαλιστικό σενάριο σε κάποια αστική περιοχή, στο οποίο συμμετέχουν δίκτυα 802.11, συστήματα Bluetooth, “walkie-talkies” κτλ, συνυπάρχουν και λειτουργούν στην ίδια μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων (π.χ. ISM, UNII, κτλ). Τα συστήματα δεν έχουν –όπως είναι προφανές– κοινό στόχο και δεν συνεργάζονται μεταξύ τους. Υποθέτουμε ότι το φάσμα αποτελεί περιορισμένο πόρο, έτσι ώστε η αποδοτική του χρήση να μας απασχολεί. Μας ενδιαφέρει ο σχεδιασμός κανόνων κατανομής του ραδιοφάσματος και πρωτοκόλλων, που θα επιτρέπουν στα συστήματα να μοιράζονται το εύρος ζώνης κατά τρόπο που να είναι δίκαιος, αποδοτικός και συμβατός με τα κίνητρα των επιμέρους συστημάτων.

Η κατανομή ενός πόρου είναι αποδοτική, εάν δεν είναι δυνατόν να βελτιώσουμε την απόδοση ενός δεδομένου συστήματος δίχως να μειώσουμε την απόδοση ενός άλλου συστήματος. Συνήθως υπάρχουν πολλά σημεία αποδοτικής λειτουργίας, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μια διαφορετική μείωση της απόδοσης για διαφορετικά συστήματα. Η *δικαιοσύνη* σχετίζεται με τη σχετική απόδοση μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων. Μπορεί να επιτευχθεί με τη βελτιστοποίηση ενός προγράμματος συνολικής λειτουργίας που ασχολείται με την πιθανή κατανομή των πόρων. Διαφορετικά προγράμματα, αποσκοπούν σε διαφορετική μορφή δικαιοσύνης.

Οι ισχύοντες κανονισμοί παρέχουν μια «φασματική μάσκα» η οποία περιορίζει τη συνολική ισχύ και τη φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD) που μπορεί να χρησιμοποιήσει ένας πομποδέκτης. Είναι μια προσπάθεια για περιορισμό των παρεμβολών που δημιουργούνται από έναν πομπό στους δέκτες άλλων συστημάτων. Η προσέγγιση αυτή, ωστόσο, ενδέχεται να περιορίζει σημαντικά το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ενός συστήματος, όταν δεν υπάρχουν άλλα συστήματα τριγύρω. Επιπλέον, δε προσφέρει καμία εγγύηση απόδοσης, ούτε αποφεύγει περιπτώσεις «μη δικαιοσύνης». Αυτό συμβαίνει διότι ο ρυθμός ενός συστήματος περιορίζεται από τη συνολική λαμβανόμενη παρεμβολή. Περιορίζοντας την ισχύ εκπομπής ενός συστήματος δεν οδηγεί πάντα σε αποδεκτά επίπεδα παρεμβολών, όταν ο αριθμός των συστημάτων που προκαλούν παρεμβολές αυξάνεται ή η

απόσταση μεταξύ του δέκτη και του πομπού που προκαλεί παρεμβολές (interferer) είναι μικρή.

Για να επιτευχθεί αποδοτική κατανομή των πόρων σε διαφορετικές καταστάσεις, οι κανόνες της κατανομής φάσματος πρέπει να είναι ευέλικτοι. Οι κανονισμοί θα πρέπει να προσαρμόζονται σε κάθε διαφορετικό σενάριο, λαμβάνοντας υπόψιν τον αριθμό των συστημάτων που διαμοιράζονται το φάσμα μια δεδομένη στιγμή και τοποθεσία, και εξετάζοντας την εκάστοτε αλληλεπίδραση μεταξύ των συστημάτων. Ωστόσο, προσδίδοντας ευελιξία σε «εγωιστικά» συστήματα, μπορούν κάλλιστα να προκληθούν μη αποδοτικές και μη δίκαιες καταστάσεις. Τα παραδείγματα που ακολουθούν ισχυροποιούν το επιχείρημα αυτό:

1. Δύο συστήματα με παρόμοια επίπεδα ισχύος, που αντιμετωπίζει το ένα το άλλο ως θόρυβο, ως αποτέλεσμα της «άπληστης» συμπεριφοράς τους, μπορεί να εξαπλώσουν την ισχύ τους στο διαθέσιμο φάσμα. Από την σκοπιά τους ενός συστήματος, το να χρησιμοποιήσει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη απόδοση. Η εξάπλωση στο διαθέσιμο φάσμα μπορεί στην πραγματικότητα ακόμα και να έχει συνολικά καλύτερη απόδοση για όλα τα συστήματα, αν το επίπεδο θορύβου περιβάλλοντος (background noise level) για κάθε σύστημα (δίχως την παρεμβολή από το άλλο σύστημα) είναι υψηλό. Ωστόσο, αν ο θόρυβος περιβάλλοντος είναι μικρός, αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε τεράστιο βαθμό κατώτερης απόδοσης σε συνάρτηση με το καθεστώς υπό το οποίο τα δύο συστήματα «εξορθολογίζουν» τα σήματά τους.
2. Ένα σύστημα Bluetooth μπορεί να αναγκαστεί να επικοινωνεί με αμελητέο ρυθμό λόγω της παρεμβολής από ένα πολύ ισχυρότερο πομπό πρωτοκόλλου 802.11, ο οποίος εκπέμπει σε μέγιστη ισχύ για να βελτιστοποιήσει την ταχύτητα μετάδοσής του. Για παράδειγμα, αν η συσκευή Bluetooth είναι ένα ένα σετ ακουστικών συνδεδεμένο σε ένα 802.11 VoIP τηλέφωνο, αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μη αποδεκτή ποιότητα ομιλίας.

Το πρώτο παράδειγμα δείχνει ότι η κατανομή του ραδιοφάσματος μπορεί να είναι δίκαιη αλλά μη αποδοτική. Και τα δύο συστήματα έχουν παρόμοιους ρυθμούς μετάδοσης, αλλά αυτοί οι ρυθμοί μπορεί να είναι μικροί σε σχέση με την καλύτερη δυνατή απόδοση. Το δεύτερο παράδειγμα δείχνει πώς η ασυμμετρία μεταξύ των συστημάτων (σε αυτή την περίπτωση εξαιτίας διαφορετικής ικανότητας ισχύος) μπορεί να οδηγήσει σε μια μη δίκαιη κατάσταση. Φαίνεται ότι είναι σημαντικό για μια κατανομή του φάσματος, να είναι ταυτόχρονα δίκαιη και αποδοτική. Και στις δύο περιπτώσεις κάποιος θα μπορούσε να αποκτήσει μια και δίκαιη και αποδοτική κατανομή σχεδιάζοντας κατάλληλους κανονισμούς κατανομής (για παράδειγμα αποδίδοντας διαφορετικές ζώνες συχνότητες στα συστήματα). Ωστόσο, όπως δείχνουν τα παραπάνω παραδείγματα, κάποια «εγωιστικά» συστήματα μπορεί να μην έχουν κίνητρο να ακολουθήσουν αυτούς τους κανόνες.

2.2.2 Διαμοιραζόμενοι Άξονες

Άξονες Συχνότητας

Οι μηχανισμοί που στηρίζονται στον άξονα της συχνότητας, χωρίζουν το φασματικό πόρο σε κανάλια και έχουν ως στόχο το όσο το δυνατόν καλύτερο διαμοιρασμό των καναλιών αυτών για αποφυγή παρεμβολών μεταξύ χρηστών και την επίτευξη του στόχου αυτού με όσο το δυνατόν μικρότερο αριθμό καναλιών. Κοινός τόπος των συγκεκριμένων προσεγγίσεων αποτελεί η μοντελοποίηση του εκάστοτε προβλήματος σε ένα Γράφο Παρεμβολών (Interference Graph), δηλαδή ένα γράφημα του οποίου τις κορυφές αποτελούν οι κόμβοι-χρήστες του εκάστοτε δικτύου, ενώ τις ακμές και τα βάρη αποτελούν οι σχέσεις παρεμβολών και το αρνητικό κόστος που αυτές επιφέρουν, αντίστοιχα. Εν συνεχεία, στον προκύπτων γράφο εφαρμόζονται αλγόριθμοι δανεισμένοι από τη θεωρία γράφων. Απώτερο στόχο εδώ αποτελεί η βέλτιστη ανάθεση συχνοτήτων σε κόμβους, τόσο ώστε να μεγιστοποιηθεί ο βαθμός επαναχρησιμοποίησής τους, όσο και ώστε να μην ανατεθεί ποτέ η ίδια συχνότητα σε κόμβους των οποίων οι μεταδόσεις παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Συνήθως οι κόμβοι αυτοί είναι γειτονικοί. Ακόμα, βέβαια, και αν κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, επιλέγεται μια τέτοια ανάθεση η οποία θα επιφέρει τα ελάχιστα δυνατά προβλήματα στο δίκτυο έτσι ώστε, τόσο η αποδοτικότητά του, όσο και η ικανοποίηση των χρηστών του, να μεγιστοποιηθεί.

Άξονας Ισχύος

Κοινός τόπος των μηχανισμών που στηρίζονται στον άξονα της ισχύος αποτελεί ο έξυπνος υπολογισμός της ισχύος εκπομπής των εκάστοτε κόμβων, δεδομένου ότι λειτουργούν σε κοινό κανάλι συχνοτήτων. Η προφανής και αναμενόμενη επιλογή του κάθε κόμβου θα ήταν η εκπομπή με τη μέγιστη δυνατή (και επιτρεπτή) ισχύ, αδιαφορώντας για τις συνέπειες που κάτι τέτοιο θα επέφερε στο κοινωνικό σύνολο. Μια τέτοια επιλογή θα οδηγούσε, για παράδειγμα, έναν Σταθμό Βάσης στην κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης γεωγραφικής περιοχής, μιας και η ακτίνα κάλυψής του είναι ανάλογη της ισχύος εκπομπής του. Θα μπορούσε, δηλαδή, να εξυπηρετήσει έτσι περισσότερους χρήστες, χωρίς κανένα επιπλέον κόστος. Μια τέτοια όμως επιλογή θα προκαλούσε καταστροφικές παρεμβολές στο εσωτερικό του εκάστοτε δικτύου σε περίπτωση που ακολουθηθεί από όλους τους κόμβους που το απαρτίζουν. Η μόνη, λοιπόν, λύση εδώ είναι η μείωση της ισχύος εκπομπής κάθε κόμβου σε τέτοιο βαθμό, ώστε οριακά να μπορεί να καλύπτει τις ανάγκες επικοινωνίας του με τους υπολοίπους. Κάποιες φορές μάλιστα θα πρέπει να πραγματοποιούνται και υποχωρήσεις σχετικά με τις δυνατότητες επικοινωνίας ή την ποιότητα των απολαμβανόμενων υπηρεσιών, με σκοπό τη διασφάλιση της κοινωνικής ευημερίας και δικαιοσύνης.

Άξονας Χρόνου

Κοινός τόπος των συγκεκριμένων μηχανισμών αποτελεί η διαίρεση του χρόνου σε σταθερού ή μεταβλητού μήκους χρονικά διαστήματα, τις χρονοθυρίδες (timeslots), των οποίων η τάξη μεγέθους δύναται να διαφέρει έντονα από εργασία σε εργασία. Εν συνεχεία, ειδικοί μηχανισμοί επιφορτίζονται με το καθήκον της ανάθεσης αυτών σε κόμβους ώστε, να

διασφαλιστεί η κοινωνική δικαιοσύνη, να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα του δικτύου, να εξαλειφθούν οι παράλληλες μεταδόσεις – άρα και οι παρεμβολές, καθώς και να ικανοποιηθούν βέλτιστα οι ανάγκες των εκάστοτε χρηστών. Τέτοιου είδους πρωτόκολλα αποτρέπουν τον συνεχή ανταγωνισμό, άρα και τις συχνές συγκρούσεις, ενώ τον περιορίζουν μόνο στα διαστήματα ανάθεσης χρονοθυρίδων. Παράλληλα, συμβάλλουν στην αποφυγή προβλημάτων τα οποία ενδέχεται να προκληθούν, είτε λόγω ελλιπούς γνώσης της κατάστασης του εκάστοτε καναλιού, είτε λόγω της ύπαρξης Κρυφών Τερματικών, δεδομένου ότι οι μηχανισμοί ανάθεσης φέρουν καλύτερη και καθολικότερη γνώση αναφορικά με τις συγκεκριμένες παραμέτρους.

Συνδυασμός Αξόνων

Οι άξονες αυτοί μπορούν να συνδυαστούν ανά δύο δηλαδή, έλεγχος στον άξονα συχνότητα-ισχύς, έλεγχος στον άξονα συχνότητα-χρόνος και έλεγχος στον άξονα ισχύς-χρόνος. Οι μηχανισμοί ελέγχου στον άξονα συχνότητα-ισχύς προϋποθέτουν πριν την ανάθεση καναλιών στους κόμβους-χρήστες, η ισχύς εκπομπής του κάθε κόμβου-χρήστη να μειωθεί στο ελάχιστο αποδεκτό σημείο.

Αντίθετα οι μηχανισμοί ελέγχου στο επίπεδο συχνότητα-χρόνος προϋποθέτουν ότι τα κανάλια δεν θα έχουν μια στατική ανάθεση (που θα προέκυπτε μέσω ενός αλγορίθμου από τη θεωρία γράφων) αλλά θα αλλάζουν χρονικά έτσι ώστε σε περιπτώσεις που γειτονικοί κόμβοι έχουν το ίδιο κανάλι, να μην το χρησιμοποιούν την ίδια χρονική στιγμή.

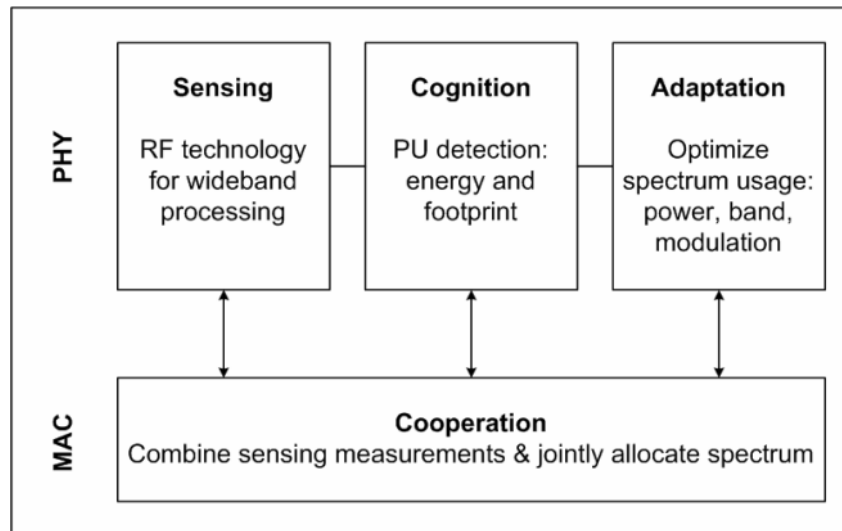
Τέλος, οι μηχανισμοί ελέγχου στο επίπεδο ισχύος-χρόνου, επιτρέπουν γειτονικοί κόμβοι να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι αλλά να χρονοπρογραμματίζουν της μεταδόσεις τους για αποφυγή παρεμβολών.

2.3 Ανίχνευση Φάσματος (Spectrum Sensing)

Τα ασύρματα δίκτυα σήμερα χαρακτηρίζονται από σπάταλη, στατική φασματική κατανομή, στατικές συναρτήσεις ραδιοφάσματος και μειωμένη δικτυακή συνεργασία. Μερικά συστήματα στις μη αδειοδοτημένες ζώνες φάσματος έχουν επιτύχει πολύ αποτελεσματική χρήση του ραδιοφάσματος, αλλά αντιμετωπίζονται με αυξανόμενες παρεμβολές οι οποίες περιορίζουν τη χωρητικότητα του δικτύου καθώς και την επεκτασιμότητά του. Τα γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών (Cognitive Radios) προσφέρουν την δυνατότητα χρήσης τεχνικών δυναμικής διαχείρισης οι οποίες συμβάλλουν στην πρόληψη παρεμβολών, προσαρμόζονται στην άμεση τοπική διάθεση ραδιοφάσματος δημιουργώντας χρονικές και τοπικές «εικονικά μη αδειοδοτημένες» ζώνες φάσματος, όπως πχ ζώνες οι οποίες μοιράζονται με πρωτεύοντες χρήστες.

Μοναδική στο Cognitive Radio λειτουργία είναι η απαίτηση να μπορεί το δίκτυο να αντιληφθεί το περιβάλλον του και να προσαρμοστεί σε αυτό, εφόσον δεν υπάρχουν πρωτογενή δικαιώματα και ήδη έκχωρημένες συχνότητες. Αυτή η νέα λειτουργία θα περιλαμβάνει το σχεδιασμό διαφόρων αναλογικών, ψηφιακών και δικτυακών τεχνικών επεξεργασίας, προκειμένου να ανταποκριθεί στις υψηλές απαιτήσεις της ευαισθησίας του ραδιοφάσματος και την κινητικότητα των συχνοτήτων ευρείας ζώνης.

Η έννοια του Spectrum Sensing προσεγγίζεται καλύτερα ως ένα διαστρωματικό πρόβλημα σχεδίασης. Η ευαισθησία του Cognitive Radio μπορεί να βελτιωθεί ενισχύοντας την ευαισθησία του λεγόμενου RF front-end, την εκμετάλλευση του κέρδους επεξεργασίας ψηφιακού σήματος για συγκεκριμένα σήματα πρωτογενών χρηστών, καθώς και τη συνεργασία του δικτύου, όπου οι χρήστες μοιράζονται μεταξύ τους τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα του που έχουν προκύψει από την Ανίχνευση Φάσματος του κάθε χρήστη ξεχωριστά.



Εικόνα 11. Διαστρωματικές λειτουργίες που σχετίζονται με την Ανίχνευση Φάσματος

Δεδομένου ότι τα Γνωστικά Δίκτυα Επικοινωνιών θεωρούνται χαμηλότερης προτεραιότητας ή δευτερεύοντες χρήστες του ραδιοφάσματος που κατανέμεται σε πρωτογενείς χρήστες, μια θεμελιώδης απαίτηση είναι η αποφυγή πρόκλησης παρεμβολών σε πρωτογενείς χρήστες στην περιοχή τους. Από την άλλη πλευρά, τα δίκτυα πρωτογενών χρηστών δεν έχουν απαίτηση να αλλάξουν τις υποδομές τους για το διαμοιρασμό φάσματος με δίκτυα γνωστικών επικοινωνιών.

Ως εκ τούτου, τα Cognitive Radios θα πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύουν ανεξάρτητα την παρουσία πρωτογενών χρηστών μέσα από την αδιάκοπη διαδικασία του Spectrum Sensing.

Διαφορετικές τάξεις πρωτογενών χρηστών απαιτούν διαφορετική ευαισθησία και ρυθμό ανίχνευσης. Για παράδειγμα, τα σήματα της τηλεόρασης είναι πολύ πιο εύκολο να ανιχνευθούν από τα σήματα του GPS, δεδομένου ότι η ευαισθησία των δεκτών τηλεόρασης είναι δεκάδες dBs χειρότερη από εκείνη ενός δέκτη GPS.

Σε γενικές γραμμές, η ευαισθησία των γνωστικών δικτύων επικοινωνιών (CRNs) θα πρέπει να έχει υψηλότερες επιδόσεις από αυτή του δέκτη ενός πρωτογενούς χρήστη, με μεγάλο περιθώριο, έτσι ώστε να αποτραπεί το πρόβλημα του «κρυφού τερματικού» (Hidden Terminal problem). Αυτό είναι και το βασικό ζήτημα, το οποίο κάνει την Ανίχνευση Φάσματος να παρουσιάζει τόσο ενδιαφέρον από ερευνητικής άποψης. Η ικανοποίηση της

ευαισθησίας για κάθε ένα ξεχωριστό πρωτογενή χρήστη με ένα ευρύ ραδιοφάσμα θα ήταν αρκετά δύσκολη, ωστόσο το πρόβλημα αποτελεί ακόμα περισσότερο πρόκληση εάν η απαίτηση ευαισθησίας αυξηθεί κατά 30-40 dB. Το περιθώριο αυτό απαιτείται διότι το Cognitive Radio δε διαθέτει άμεσο υπολογισμό ενός καναλιού μεταξύ του δέκτη και του εκπομπού ενός πρωτογενούς χρήστη και πρέπει να βασίσει την απόφασή του στην τοπική μέτρηση καναλιού προς ένα εκπομπό πρωτογενούς χρήστη. Αυτό το είδος ανίχνευσης αναφέρεται ως τοπικό Spectrum Sensing, και η χειρότερη περίπτωση κρυμμένου τερματικού θα συνέβαινε αν το Cognitive Radio ήταν επισκιασμένο, σε βαριά εξασθένηση πολλαπλών δρόμων (Multipath fading) ή στο εσωτερικό κτιρίων με υψηλές απώλειες διείσδυσης, ενώ στην κοντινή περιοχή υπάρχει πρωτογενής χρήστης ο οποίος βρίσκεται στην οριακή λήψη, λόγω των ευνοϊκότερων συνθηκών καναλιού του. Αν και η πιθανότητα ενός τέτοιου σεναρίου είναι μικρή, το Cognitive Radio δε θα έπρεπε να προκαλεί παρεμβολή σε έναν τέτοιου είδους πρωτογενή χρήστη.

Η υλοποίηση της λειτουργίας του αισθητήρα φάσματος απαιτεί επίσης υψηλό βαθμό ευελιξίας, δεδομένου ότι το φασματικό περιβάλλον παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα, εξαιτίας κυρίως των διαφορετικών τύπων πρωτογενών χρηστών, των απωλειών διάδοσης και της παρεμβολής. Η κύρια σχεδιαστική πρόκληση είναι να καθοριστεί RF και αναλογική αρχιτεκτονική με σωστή αντιστάθμιση μεταξύ της γραμμικότητας, το ρυθμό δειγματοληψίας, την ακρίβεια και τη δύναμη, έτσι ώστε οι τεχνικές επεξεργασίας ψηφιακού σήματος να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λειτουργία του Spectrum Sensing, τη γνωστική λειτουργία (Cognition) και της προσαρμογής. Το παραπάνω επίσης παρακινεί την έρευνα τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας, οι οποίες μπορούν να κάνουν πιο ελαστικές τις απαιτήσεις για αναλογική, ειδικότερα ευρυζωνική ενίσχυση, τη μίξη και τη αναλογική/ψηφιακή μετατροπή πάνω σε περισσότερο από ένα 1GHz εύρους φάσματος, και να βελτιώσουν τη συνολική ευαισθησία του συστήματος.

2.3.1 Τεχνικές επεξεργασίας σήματος για τη λειτουργία της Ανίχνευσης Φάσματος

Ένα βασικό πλεονέκτημα της χρήσης των CMOS τεχνολογίας είναι ότι η επεξεργασία ψηφιακού σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθηθούν τα αναλογικά κυκλώματα. Στην περίπτωση της Ανίχνευσης Φάσματος η ανάγκη για επεξεργασία σήματος είναι διττή: Βελτίωση της ευαισθησίας του RF front-end μέσω της επεξεργασίας του κέρδους, καθώς και η ταυτοποίηση του πρωτογενούς χρήστη η οποία βασίζεται στη γνώση των χαρακτηριστικών του σήματος. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται, οι βασικές τεχνικές επεξεργασίες σήματος που χρησιμοποιούνται:

A. Μέθοδος προσαρμοσμένου φίλτρου (Matched Filter)

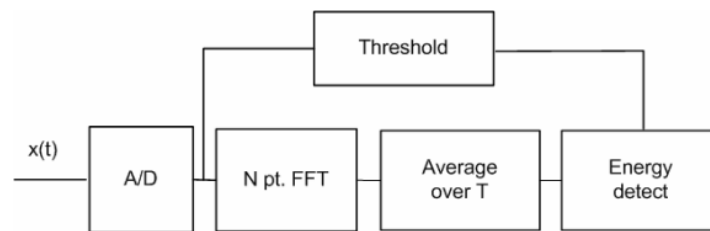
Η βέλτιστη μέθοδος για οποιαδήποτε ανίχνευση σήματος είναι εκείνη του προσαρμοσμένου φίλτρου, δεδομένου ότι μεγιστοποιεί το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Ωστόσο, ένα προσαρμοσμένο φίλτρο απαιτεί αποδιαμόρφωση ενός σήματος πρωτογενούς χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι το Cognitive Radio έχει *a priori* γνώση του σήματος πρωτογενούς χρήστη και στο φυσικό στρώμα και στο MAC, π.χ. τύπος και τάξη διαμόρφωσης, διαμόρφωση παλμού, μορφή πακέτων. Αυτές οι πληροφορίες αποθηκεύονται σε μνήμη CR, αλλά το κρίσιμο κομμάτι είναι ότι για την αποδιαμόρφωση απαιτείται συνοχή με το σήμα του πρωτογενούς χρήστη, μέσω συγχρονισμού του φορέα καθώς και χρονικού, ακόμα και

εξίσωση καναλιών. Αυτό είναι δυνατό, δεδομένου ότι οι περισσότεροι πρωτογενείς χρήστες έχουν «πιλότους», προοίμια, λέξεις συγχρονισμού ή κώδικες διασποράς, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνεπή ανίχνευση. Παραδείγματα: Το σήμα της τηλεόρασης έχει πιλότο στενού εύρους για τα φέροντα του ήχου και της εικόνας. Τα συστήματα CDMA έχουν αφοσιωμένους κώδικες διασποράς για πιλότους και κανάλια συγχρονισμού. Τα πακέτα OFDM έχουν προοίμια για την απόκτηση πακέτων.

Το κύριο πλεονέκτημα του προσαρμοσμένου φίλτρου είναι ότι λόγω της συνοχής, απαιτεί λιγότερο χρόνο για να επιτύχει υψηλό κέρδος επεξεργασίας αφού μόνο $1/\text{SNR}$ σε τάξη δείγματα χρειάζονται για να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος περιορισμός μιας δοσμένης πιθανότητας ανίχνευσης. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το Cognitive Radio απαιτεί ένα αφοσιωμένο δέκτη για κάθε τάξη πρωτογενούς χρήστη.

B. Ανιχνευτής Ενέργειας

Μια προσέγγιση για την απλούστευση της μεθόδου του προσαρμοσμένου φίλτρου είναι η εκτέλεση μη-συνεκτικής ανίχνευσης μέσω της ανίχνευσης ενέργειας. Αυτή η «υποβέλτιστη» τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στη ραδιομετρία. Ένας ανιχνευτής ενέργειας μπορεί να υλοποιηθεί παρόμοια με ένα αναλυτή φάσματος, υπολογίζοντας τη μέση τιμή συχνοτήτων (N σε αριθμό) ενός Ταχέως Μετασχηματισμού Fourier (FFT), όπως απεικονίζεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 12. Υλοποίηση ενός ανιχνευτή ενέργειας με χρήση του FFT

Το κέρδος επεξεργασίας είναι αναλογικό στο μέγεθος N του μετασχηματισμού FFT και της περιόδου παρατήρησης T . Αυξάνοντας τον αριθμό N βελτιώνεται η ανάλυση της συχνότητας το οποίο βοηθάει στην ανίχνευση σήματος στενού εύρους ζώνης. Επιπλέον, μεγαλύτερη περίοδος T μειώνει την ισχύ θορύβου, επομένως βελτιώνει το σηματοθορυβικό λόγο SNR. Ωστόσο, εξαιτίας της μη συνεκτικής επεξεργασίας, απαιτούνται σε τάξη $1/\text{SNR}^2$ δείγματα για να ικανοποιηθεί ο περιορισμός της πιθανότητας ανίχνευσης.

Υπάρχουν διάφορα μειονεκτήματα των ανιχνευτών ενέργειας που πιθανώς μειώνουν την απλότητά της υλοποίησής τους. Πρώτον, το κατώφλι που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ενός πρωτογενούς χρήστη είναι αρκετά ευάλωτο σε άγνωστα ή μεταβαλλόμενα επίπεδα θορύβου. Ακόμα και αν το κατώφλι οριστεί μετά από προσαρμογή, η παρουσία μιας οποιασδήποτε παρεμβολής μπορεί να προκαλέσει σύγχυση στον ανιχνευτή. Επιπλέον, σε περίπτωση επιλεκτικής εξασθένησης συχνοτήτων, δεν είναι ξεκάθαρο το πώς θα οριστεί το κατώφλι σε σχέση με τις σχισμές του καναλιού. Δεύτερον, ο ανιχνευτής ενέργειας δε διαφοροποιείται μεταξύ διαμορφωμένων σημάτων, θορύβου και παρεμβολής. Δεδομένου, ότι δεν έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει την παρεμβολή, δε μπορεί να επωφεληθεί από την

προσαρμοζόμενη επεξεργασία σήματος. Ακόμα, η πολιτική φάσματος για τη χρήση της ζώνης συχνοτήτων περιορίζεται μόνο στους πρωτογενείς χρήστες, επομένως ένας cognitive χρήστης θα έπρεπε να αντιμετωπίζει το θόρυβο και άλλους δευτερεύοντες χρήστες διαφορετικά. Τέλος, ένας ανιχνευτής ενέργειας δε λειτουργεί για τα λεγόμενα «Spread Spectrum» σήματα: σήματα άμεσων αλμάτων ακολουθίας και συχνοτήτων, για τα οποία πρέπει να επινοηθούν πιο εξελιγμένοι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος. Γενικά, η «ευρωστία» του ανιχνευτή θα ήταν εφικτή, μέσω ενός χαρακτηριστικού πρωτογενούς σήματος όπως ο τύπος της διαμόρφωσης, ο ρυθμός δεδομένων, ή κάποιο άλλο χαρακτηριστικό.

C. Ανίχνευση Κυκλοστατικού Χαρακτηριστικού (Cyclostationary Feature Detection)

Τα διαμορφωμένα σήματα είναι γενικά συνδεδεμένα με φέροντα ημιτονικής μορφής, παλμοσυρμούς (pulse trains), επαναλαμβανόμενη εξάπλωση, ακολουθίες διαπήδησης (hopping sequences), ή κυκλικά προθέματα που έχουν τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα σε ενσωματωμένη περιοδικότητα. Αν και τα δεδομένα είναι μια στατικά τυχαία διαδικασία, αυτά τα διαμορφωμένα σήματα χαρακτηρίζονται ως κυκλοστατικά, δεδομένου ότι τα στατιστικά τους, ο μέσος και η αυτοσυσχέτιση παρουσιάζουν περιοδικότητα. Η περιοδικότητά τους εισάγεται τυπικά σκοπίμως στη μορφή του σήματος, έτσι ώστε ο δέκτης να μπορεί να την εκμεταλλευτεί για: υπολογισμό παραμέτρων όπως η φάση του φέροντος, ο χρονισμός του παλμού, ή η διεύθυνση της άφιξης. Αυτό έπειτα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ενός τυχαίου σήματος με ένα συγκεκριμένο τύπο διαμόρφωσης στο background του θορύβου και άλλων διαμορφωμένων σημάτων.

Η κοινή ανάλυση των στατικά τυχαίων σημάτων βασίζεται στη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και στην πυκνότητα του φάσματος ισχύος. Από την άλλη, τα κυκλοστατικά σήματα παρουσιάζουν αυτοσυσχέτιση μεταξύ ευρέως διαχωρισμένων φασματικών στοιχείων εξαιτίας του φασματικού πλεονασμού που προκαλείται από την περιοδικότητά.

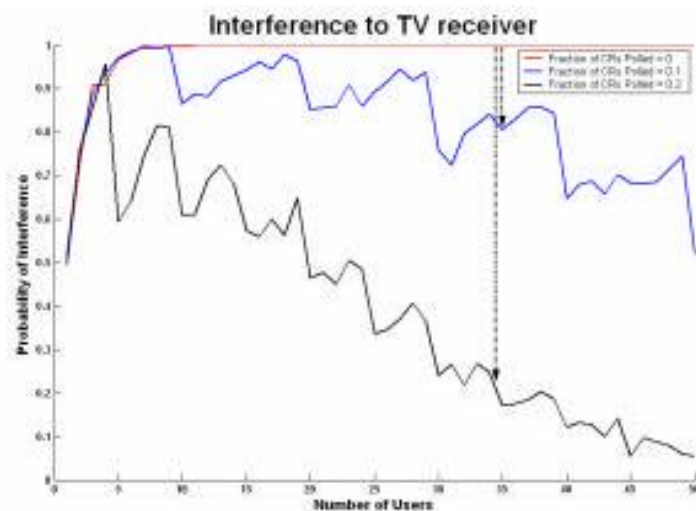
2.3.2 Συνδυαστική Ανίχνευση Φάσματος (Cooperative Spectrum Sensing)

Η απόδοση των τεχνικών που προαναφέρθηκαν περιορίζεται από την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος, η οποία μπορεί να ελαττωθεί σημαντικά εξαιτίας της εξασθένισης πολλαπλών διαδρομών (multipath fading) και του φαινομένου της επισκίασης (shadowing). Μετρήσεις της Digital TV έχουν δείξει τυπικές αποκλίσεις από 2.0 έως 4.0 στην κανονική λογαριθμική κλίμακα των συνεπειών της επισκίασης. Σε ένα τέτοιο σενάριο η συνδυαστική ανίχνευση φάσματος μπορεί να μετριάσει το πρόβλημα ανίχνευσης του πρωτογενούς χρήστη μειώνοντας την πιθανότητα παρεμβολής σε έναν πρωτογενή χρήστη. Στη συνδυαστική ανίχνευση φάσματος βασιζόμαστε στη μεταβλητότητα της ισχύος του σήματος σε διάφορες τοποθεσίες. Είναι αναμενόμενο, ότι ένα μεγάλο δίκτυο από γνωστικά δίκτυα με πληροφoρία ανίχνευσης ανταλασσόμενη μεταξύ των γειτονικών κόμβων, θα έχει καλύτερη πιθανότητα ανίχνευσης ενός πρωτογενούς χρήστη σε σύγκριση με μια μεμονωμένη ανίχνευση.

Υπάρχουν 3 βασικά ερωτήματα όσον αφορά τη Συνδυαστική Ανίχνευση Φάσματος:

1. Πόσο μπορούμε να ωφεληθούμε από τη συνδυαστικότητα;
2. Με ποιό τρόπο μπορούν τα Γνωστικά Δίκτυα Επικοινωνιών να συνεργαστούν;
3. Ποιό είναι το τίμημα που σχετίζεται με τη συνδυαστικότητα;

Στη σχετική τους εργασία *Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios*, οι Danijela Cabric, Shridhar Mubaraq Mishra και Robert W. Brodersen εξετάζουν τις απαντήσεις στα ερωτήματα αυτά. Μετά από μια σειρά δοκιμών και μετρήσεων πάνω σε ψηφιακούς τηλεοπτικούς δέκτες συμπεραίνουν τελικά, ότι η Συνδυαστική Ανίχνευση Φάσματος έχει αισθητά βελτιωμένα αποτελέσματα σε σύγκριση με την μεμονωμένη ανίχνευση όπως φαίνεται και στο σχετικό διάγραμμα:



Εικόνα 13. Πιθανότητα παρεμβολών σε δέκτη τηλεόρασης από ένα Γνωστικό Δίκτυο Επικοινωνιών με α) μεμονωμένη και β) συνδυαστική ανίχνευση φάσματος.

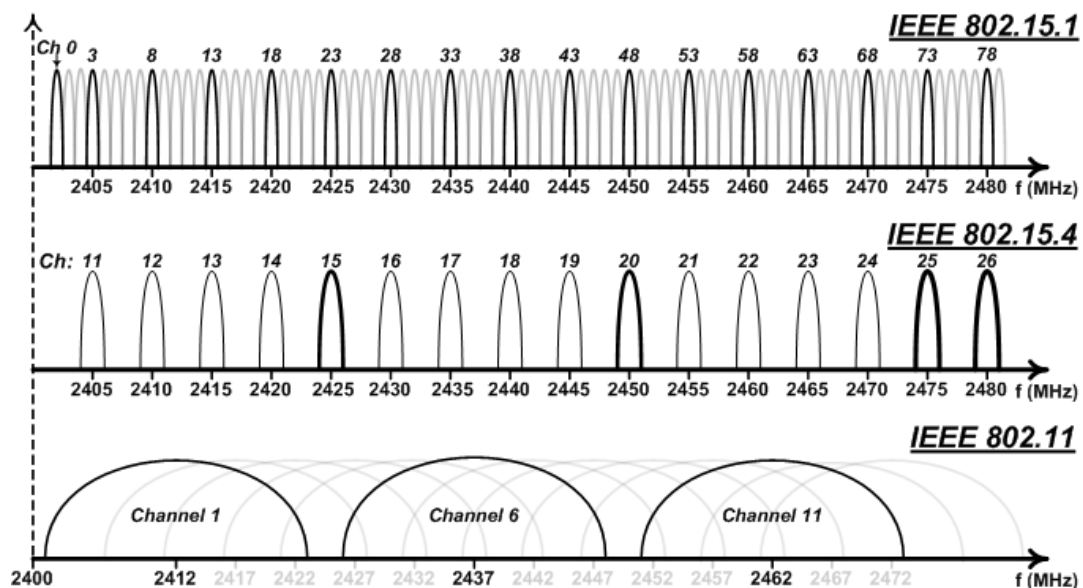
Κεφάλαιο 3^ο : Γνωστικά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων – Cognitive Wireless Sensor Networks

3.1 Το υπερφορτωμένο ραδιοφάσμα των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων – Το πρόβλημα της συνύπαρξης (Coexistence Problem)

Τα περισσότερα σύγχρονα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων λειτουργούν στη μη αδειοδοτημένη ζώνη φάσματος των 2.4 GHz, εφαρμόζοντας το IEEE 802.15.4 (ZigBee) πρότυπο. Ο κύριος λόγος επιλογής της συγκεκριμένης μπάντας είναι, εκτός του γεγονότος ότι δεν απαιτείται η λήψη άδειας από κάποια κυβερνητική αρχή για την χρήση της, το αρκετά μεγάλο εύρος ζώνης το οποίο δύναται να προσφέρει, κάτι που αυξάνει και τον αριθμό συσκευών οι οποίες μπορούν ταυτόχρονα να την χρησιμοποιούν σε μια περιοχή, καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μετάδοσης (propagation characteristics) της τα οποία δεν απαντώνται σε καμιά άλλη μη-αδειοδοτημένη ζώνη. Το IEEE 802.15.4 διαιρεί το φάσμα αυτό σε 16 κανάλια, καθένα από τα οποία διαθέτει εύρος 2 MHz και απόσταση μεταξύ των καναλιών 5 MHz. Όπως φαίνεται στην εικόνα 14 παρακάτω, στο μεσαίο διάγραμμα, αυτά τα κανάλια αριθμούνται από το 11 έως το 26, καλύπτοντας τη φασματική ζώνη που εκτείνεται από τα 2400 έως τα 2483.5 MHz, ενώ η συχνότητα του i -οστού καναλιού δίνεται από τη σχέση (σε MHz):

$$f_{ci} = 2405 + (i - 11) \cdot 5$$

Δύο ΑΔΑ εγκατεστημένα στην ίδια περιοχή πρέπει να λειτουργούν σε διαφορετικά, κατά προτίμηση μη επικαλυπτόμενα κανάλια, με σκοπό την αποφυγή ισχυρής διακαναλικής παρεμβολής. Δυστυχώς, το πρότυπο IEEE 802.15.4 δεν είναι το μοναδικό το οποίο απασχολεί τη ISM ζώνη των 2.4 GHz. Και το IEEE 802.11 καθώς και το 802.15.1 (Bluetooth) λειτουργούν στην ίδια μπάντα επίσης.



Εικόνα 14. Τα φασματικά διαγράμματα των IEEE 802.15.1, 802.15.4 and 802.11b/g [17]

Από τη μία, τα IEEE 802.11 b/g (WiFi) πρότυπα λειτουργούν σε ένα σύνολο 14 καναλιών διαθέσιμα στην ζώνη των 2.4 GHz, αριθμοδοτημένα 1 έως 14, κάθε ένα από τα οποία με εύρος ζώνης 22 MHz και διαχωρισμό καναλιού (απόσταση) 5 MHz. Αυτά τα κανάλια καλύπτουν ολόκληρη την ζώνη των 2.4 GHz, εκτεινόμενα από τα 2400 έως και τα 2495 MHz, ενώ η συχνότητα του i -οστού καναλιού δίνεται από τη σχέση (σε MHz):

$$f_{ci} = \begin{cases} 2412 + (i-1) \cdot 5, & 1 \leq i \leq 13 \\ 2484 & , i = 14 \end{cases}$$

Σύμφωνα με τα WLAN πρότυπα, τα γειτονικά κανάλια επικαλύπτονται και τα σήματα τα οποία αποστέλλονται από τα διάφορα κανάλια, παρεμβάλουν το ένα στο άλλο. Στην πραγματικότητα, το IEEE 802.11b πρότυπο προτείνει τη χρήση των μη επικαλυπτόμενων καναλιών 1,6 και 11 για την Β.Αμερική, και 1,7,13 για την Ευρώπη, αν και ο διαχωρισμός αυτός πρακτικά παραβλέπεται και τα κανάλια 1,6,11 είναι εκείνα τα οποία χρησιμοποιούνται περισσότερο παγκοσμίως.

Από την άλλη, το πρότυπο IEEE 802.15.1 (Bluetooth) καθορίζει 79 κανάλια στη ζώνη φάσματος των 2.4 GHz, κάθε ένα με εύρος 1 MHz και απόσταση μεταξύ των καναλιών επίσης 1 MHz. Η συχνότητα του i -οστού καναλιού δίνεται από τη σχέση (σε MHz):

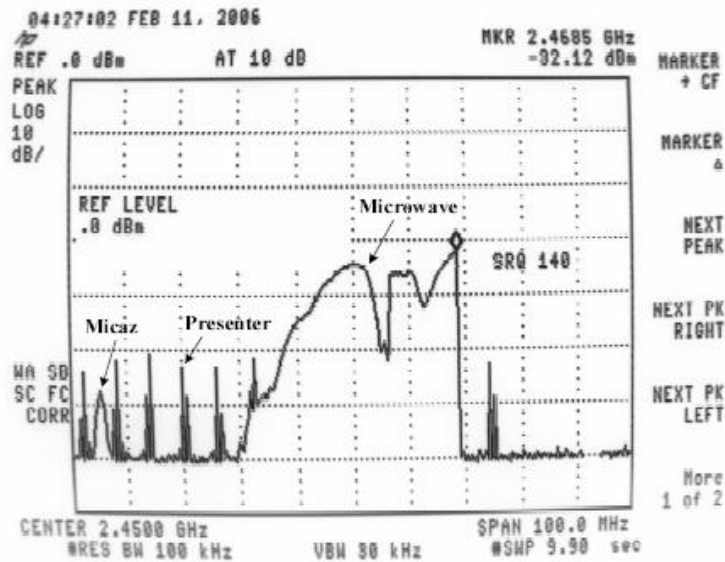
$$f_{ci} = 2402 + i$$

Πρέπει να σημειωθεί, ότι το κανάλι λειτουργίας του Bluetooth δεν είναι καθορισμένο (στατικό), αλλά σύμφωνα με τις υποδείξεις του IEEE 802.15.1 προτύπου, εφαρμόζεται το *frequency hopping*. Αυτό σημαίνει ότι οι συσκευές Bluetooth πραγματοποιούν άλματα συχνοτήτων με μια ψευδο-τυχαία ακολουθία μεταξύ των 79 διαθέσιμων καναλιών, περίπου 1600 φορές το δευτερόλεπτο, και συνεπώς κάθε μετάδοση πρακτικά απασχολεί κάθε στιγμή ολόκληρο το εύρος φάσματος, δεδομένου ότι μικρά τμήματα αυτού χρησιμοποιούνται περιοδικά για μικρά χρονικά διαστήματα.

Με τη σημερινή σταθερά αυξανόμενη χρησιμοποίηση των παραπάνω προτύπων, είναι πάρα πολύ πιθανό ότι στο άμεσο μέλλον, ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών ηλεκτρονικών συσκευών, οι οποίες λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, θα συνυπάρχει συχνά στην ίδια περιοχή. Αυτή τη στιγμή, το WiFi και τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων εξελίσσονται σε όλο και πιο δημοφιλή, κυρίως εξαιτίας της υψηλής αξίας υπηρεσιών ανά κόστος που προσφέρουν, ενώ το Bluetooth είναι ήδη πολύ κοινό στην καθημερινότητα. Ως εκ τούτου, το πρόβλημα της φασματικής συμφόρησης καθώς και της παρεμβολής μεταξύ διαφορετικών τύπων δικτύων όλο και διογκώνεται.

Αυτό που κάνει το πρόβλημα ακόμα χειρότερο, είναι ότι κάποιες από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες ηλεκτρικές συσκευές, όπως ο φούρνος μικροκυμάτων, μπορούν επίσης να δημιουργήσουν πολύ ισχυρή παρεμβολή. Για να αποκτήσει κανείς μια καλύτερη άποψη για το υπερφορτωμένο ραδιοφάσμα, οι Zhou, Stankovic και Son [75] πραγματοποίησαν κάποιες δοκιμές σχετικά με τη χρησιμοποίηση της μπάντας των 2.4 GHz, κάνοντας χρήση του HP 8593E Spectrum Analyzer. Για να εξετάσουν το μέγεθος του προβλήματος, χρησιμοποίησαν μία αντιπροσωπευτική ηλεκτρική συσκευή ευρείας χρήσης, ένα φούρνο

μικροκυμάτων Sharp Carousel. Επιπλέον, χρησιμοποίησαν στα πειράματά τους και μια πολύ τυπική (π.χ. για ένα γραφείο) ηλεκτρονική συσκευή, ένα ασύρματο (στη μπάντα των 2.4 GHz) Logitech PowerPoint Presenter. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 15. Αποτελέσματα μέσω του Spectrum Analyzer

Όπως φαίνεται στο σχήμα, η μικρή ημιτονοειδής καμπύλη ανάμεσα στα 2.4 και 2.41 GHz (στο αριστερό κάτω μέρος) δείχνει το επίπεδο ισχύος των σημάτων του δικτύου αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκε (Micaz) στο μετρώμενο περιβάλλον. Η μεγάλη καμπύλη που βρίσκεται ανάμεσα στα 2.43 και 2.47 GHz (στο μέσο του γραφήματος), αντικατοπτρίζει την παρεμβολή του φούρνου μικροκυμάτων. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του IEEE 802.15.4, το εύρος του 2450 MHz PHY ξεκινάει από τα 2.4 GHz και λήγει στα 2.4825 GHz, δηλαδή οι πρώτες 8 στήλες του γραφήματος. Είναι προφανές ότι η παρεμβολή που προκαλείται από ένα υφιστάμενο φούρνο μικροκυμάτων καλύπτει σχεδόν το μισό του φάσματος 2450 MHz PHY. Επιπλέον, μέσα στο υπόλοιπο μισό του εύρους συχνότητας, η παρεμβολή από τη Logitech συσκευή, εμφανίζεται συχνά, που πρόκειται για ομοιόμορφα κατανεμημένα παλμικά σήματα (περίπου -52 dBm). Η κύρια παρατήρηση είναι ότι το πρόβλημα του υπερφορτωμένου φάσματος υφίσταται και χρήζει αντιμετώπισης.

Μία λύση για αυτό το υπερφορτωμένο φάσμα είναι η θέσπιση περισσότερου μη αδειοδοτημένου φάσματος, πράγμα για το ωστόσο είναι υπεύθυνη η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των Η.Π.Α. και για το λόγο αυτό η λύση αυτή είναι πέρα από την ικανότητά μας. Μια άλλη λύση από ερευνητικής πλευράς, είναι να γίνει η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του ήδη υπάρχοντος μη αδειοδοτημένου φάσματος. Αν και μέχρι σήμερα υπάρχουν πολλές προτάσεις προς την κατεύθυνση αυτή, καμιά δεν έχει καταφέρει να δώσει μια οριστική και αποδοτική λύση η οποία να γίνεται καθολικά αποδεκτή από την βιομηχανία, τους κατασκευαστές και την ακαδημαϊκή κοινότητα.

3.2 Υπάρχουσες προσεγγίσεις για την επίλυση του προβλήματος της συνύπαρξης (Coexistence Problem)

Όπως αναφέρεται και αναλύεται στην εργασία [17], μέχρι σήμερα έχουν παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία πολλές προσεγγίσεις οι οποίες στοχεύουν στην επίλυση του προβλήματος της συνύπαρξης, υπό το πρίσμα της αποφυγής από την πλευρά των ΑΔΑ των παρεμβολών οι οποίες δημιουργούνται από άλλα δίκτυα τα οποία έχουν αναπτυχθεί στην ίδια γεωγραφική περιοχή και χρησιμοποιούν επικαλυπτόμενες συχνότητες. Ωστόσο, οι περισσότερες από αυτές τις προσεγγίσεις βασίζονται είτε σε μη ρεαλιστικές υποθέσεις, ή σε απαιτήσεις που τα σημερινά ΑΔΑ αδυνατούν να ικανοποιήσουν.

Κάποιες μέθοδοι βασίζονται αποκλειστικά στην ύπαρξη ειδικών συσκευών, οι οποίες είναι συχνά ακριβές και όχι ευρέως διαθέσιμες στα ΑΔΑ του εμπορίου. Για παράδειγμα, στα [53],[54] και [78], προτείνεται η χρησιμοποίηση κατευθυντικών κεραιών καθώς και κεραιών συστοιχίας, αντί για τις κοινές πολυκατευθυντικές, έτσι ώστε να μειωθεί η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται από κοντινούς παρεμβολείς. Στο [55], παρουσιάζεται ένας νέος σχεδιασμός WSN radio chipset, ο οποίος αντιμετωπίζει τη φύση του προβλήματος της συνύπαρξης. Το [56] βασίζεται στη χρησιμοποίηση υβριδικών κόμβων αισθητήρων στους οποίους τοποθετούνται πομποδέκτες 802.15.4 αλλά και 802.11. Στην πραγματικότητα, οι πομποδέκτες 802.11 χρησιμοποιούνται για τον ανταγωνισμό με το WiFi, ενώ οι πομποδέκτες 802.15.4 χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία με άλλους κόμβους. Όμοια, στο [57], ο ανταγωνισμός με το WiFi πραγματοποιείται μέσω μιας ειδικής εξωτερικής συσκευής. Τέλος, το πρωτόκολλο επιπέδου MAC που προτείνεται στο [79] απαιτεί την εγκατάσταση πομποδεκτών οι οποίοι είναι ικανοί να σκανάρουν ταχύτατα όλα τα 802.15.4 κανάλια και να λάβουν δεδομένα σε περίπτωση που ανιχνεύσουν δραστηριότητα σε κάποιο από αυτά. Τα δεδομένα αποστέλλονται μέσω κάποιου από τα διαθέσιμα κανάλια, δίχως κάποια προηγούμενη διαπραγμάτευση με τους μελλοντικούς παραλήπτες.

Στα [58][59][73] ειδικές, κεντρικές συσκευές, γνωστές ως Διακομηστές Φάσματος, χρησιμοποιούνται για την εξάλειψη των παρεμβολών μεταξύ ετερογενών δικτύων και την κατάλληλη αποδέσμευση φάσματος, διατηρώντας φασματικούς χάρτες μιας συγκεκριμένης περιοχής. Από την άλλη, στα πρωτόκολλα MAC [64][65] αυτή η διαπραγμάτευση πραγματοποιείται με ένα αποκεντροποιημένο τρόπο μέσω των «Κοινών Καναλιών Ελέγχου» (Common Control Channels – CCC) και χρησιμοποιώντας ειδικά διαμορφωμένα πακέτα ελέγχου (πχ CTS/RTS). Ωστόσο, θέματα συγχρονισμού, η δυσκολία στο να βρεθεί ένα συνολικά ποιοτικά αποδεκτό CCC το οποίο απαραίτητως υπερβαίνει ένα σημείο αποτυχίας και η συνεχής αλλαγή του πομποδέκτη σε αυτό το το CCC, επηρεάζουν την αποδοτικότητα και την εφαρμοσιμότητα της προσέγγισης αυτής.

Άλλες προσεγγίσεις, όπως οι [61][62][63][66][77][81][82], χειρίζονται την παρεμβολή ομαδοποιώντας τους κόμβους ενός ΑΔΑ σε clusters και αποδίδοντας σε κάθε cluster ένα ικανοποιητικό κανάλι επικοινωνίας, διαφορετικό από αυτό ολόκληρου του υπόλοιπου ΑΔΑ. Ειδικοί «συνοριακοί» κόμβοι τέτοιων ομάδων συνεχώς εναλλάσσονται μεταξύ του αρχικού και του καναλιού που πρόσφατα τους αποδόθηκε, για να διασφαλίσουν συνδεσιμότητα του συγκεκριμένου cluster με τους άλλους κόμβους του δικτύου. Η αλλαγή σε ένα νέο κανάλι συνήθως διαπραγματεύεται «on-the-fly», αν και στο [63] υπάρχει μια προκαθορισμένη ακολουθία καναλιών. Ωστόσο, οι προσεγγίσεις αυτές υποθέτουν ότι οι συνοριακοί κόμβοι είναι είτε εξοπλισμένοι με πολλαπλά interfaces, ή αλλάζουν κανάλια σε

βάση σχισμών χρόνου (time-slots) [66] ή πακέτων [61][62], μια απαίτηση η οποία αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας καθώς και την καθυστέρηση, δίχως να αναφέρουμε τα θέματα συγχρονισμού που προκύπτουν. Για να εξαλειφθούν σε ένα βαθμό αυτά τα προβλήματα, στο [77], η διαμορφωμένη ομάδα αποτελείται από κόμβους οι οποίοι επικοινωνούν περισσότερο στο συγκεκριμένο ΑΔΑ.

Η μέθοδος αλμάτων συχνότητας υψηλού επιπέδου (frequency hopping) παρέχουν ακόμα μια λύση για την αποφυγή παρεμβολών. Στο [70] κάθε κόμβος αλλάζει κανάλι, μαζί με τους γειτονικούς του κόμβους, σε βάση χρονοσχισμών, ακολουθώντας μια ακολουθία αλμάτων συχνότητας (ένα ψευδοτυχαίο συνδυασμό είτε όλων των 16 διαθέσιμων 802.15.4 καναλιών [70] ή των τεσσάρων καλύτερων, όσον αφορά την παρεμβολή [71]). Συνεπώς, για κάθε χρονοσχισμή επιλέγεται ένα διαφορετικό κανάλι για την επικοινωνία ενός ζεύγους κόμβων. Στο [80] τα παραγόμενα διαστήματα αποτελούνται από πολλαπλά «υπερπλαίσια» (superframes), με κάθε πλαίσιο να διατηρείται σε διαφορετικό κανάλι. Δεδομένου ότι κάθε συσκευή ακολουθεί μόνο ένα από αυτά, «αναπηδά» ανάμεσα στα αντίστοιχα κανάλια. Καθώς το χρονικό κόστος της εναλλαγής ανάμεσα σε δύο κανάλια δεν μπορεί να αγνοηθεί [76], η αποδοτικότητα των παραπάνω μεθόδων όσον αφορά των υπεισερχόμενων καθυστερήσεων καθώς και της κατανάλωσης πόρων που προκύπτει είναι αμφίβολη.

Εναλλακτικά, οι κόμβοι μπορούν να επιλέξουν τυχαία ένα κανάλι για να λειτουργήσουν σε κάθε χρονική περίοδο [68,69]. Δεδομένου ότι οι γειτονικοί κόμβοι θα έπρεπε να επιλέξουν κοινό κανάλι για να εγκαθιδρυθεί ένας σύνδεσμος επικοινωνίας, η καθυστέρηση που προκαλείται είναι υπερβολικά υψηλή και απρόβλεπτη. Μια μορφή βελτίωσης αυτών των τεχνικών παρέχεται μέσω της εφαρμογής ειδικών αλγόριθμων εκμάθησης και εξερεύνησης.

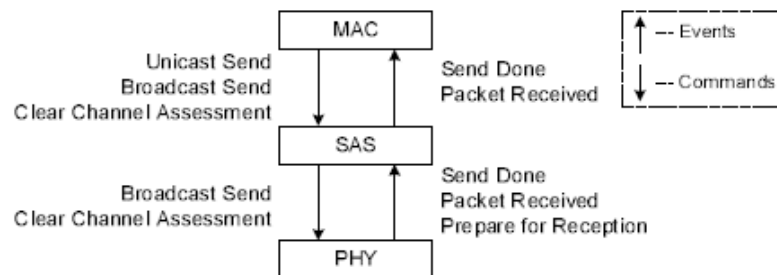
Τέλος, υπάρχουν προσεγγίσεις που βασίζονται στην ύπαρξη ειδικών ρυθμιστών οι οποίοι διαθέτουν συνολική γνώση του υποκείμενου ΑΔΑ. Στο [74] ο ρυθμιστής ανιχνεύει τα δίκτυα που προκαλούν παρεμβολές και εντοπίζει το πιο ποιοτικό κανάλι στο οποίο πρέπει να αλλάξουν οι κόμβοι, ενώ η ειδοποίηση των τελευταίων επιτυγχάνεται μέσω πλαισίων διαστημάτων. Στο [75] ο ρυθμιστής αποδίδει διακριτές συχνότητες σε κάθε ξεχωριστό κόμβο ανά χρονοσχισμή. Προφανώς, δεδομένου ότι σε γειτονικούς κόμβους μπορούν να αποδοθούν διαφορετικές συχνότητες, δεν μπορεί να υποστηριχθεί εκπομπή πακέτων broadcast. Προτείνεται και μια στατική αλλά και μια δυναμική μέθοδος, με τη δεύτερη να επαναποδίδει κόμβους από συμφορημένες συχνότητες σε λιγότερο συμφορημένες για να αποφευχθούν ανισορροπίες στα επίπεδα της αντιμετωπιζόμενης παρεμβολής. Τέλος, στο πρωτόκολλο TCMP [72] ο ρυθμιστής διαμοιράζει ολόκληρο το δίκτυο σε πολλαπλά υπο-δέντρα και αποδίδει διαφορετικά κανάλια σε κάθε υπο-δέντρο. Δυστυχώς, τέτοιου είδους ρυθμιστές είναι ιδανικοί, καθώς είναι ιδιαίτερα απίθανο αυτές οι τεχνικές να εφαρμοστούν σε ΑΔΑ τα οποία εγκαθίστανται σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές.

Μια άλλη λύση είναι η χρήση τεχνικών εξάπλωσης φάσματος. Για παράδειγμα, οι συσκευές MICAz υιοθετούν εξάπλωση φάσματος άμεσης ακολουθίας (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS), κατά την οποία το σήμα δεδομένων πολλαπλασιάζεται επί δύο από την ακολουθία PN (ψευδοθορύβου – pseudonoise), ενώ το σήμα της παρεμβολής πολλαπλασιάζεται μόνο επί ένα. Για να αξιολογηθεί η δύναμη της DSSS σε πραγματικές συνθήκες, οι Zhou, Stankovic και Son επίσης μέτρησαν το ποσοστό της επιτυχούς λήψης πακέτων, όταν ένα ζεύγος MICAz τοποθετούνται για λειτουργία κοντά στον φούρνο

μικροκυμάτων Sharp που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη περίπτωση. Οι δύο MICAz notes ρυθμίστηκαν να λειτουργούν στη συχνότητα των 2.45 GHz, η οποία σίγουρα καλύπτεται από την παρεμβολή του φούρνου μικροκυμάτων. Το αποτέλεσμα έδειξε ότι το ποσοστό επιτυχούς λήψης πακέτων κυμαίνεται από 46% έως 81% όταν ο φούρνος είναι σε λειτουργία, ωστόσο παραμένει 100% (0% απώλειες) όταν ο φούρνος είναι εκτός λειτουργίας. Αυτή η πειραματική παρατήρηση ότι η DSSS αντιμετωπίζει το πρόβλημα συνωστισμού του ραδιοφάσματος ως ένα βαθμό, αλλά απέχει πολύ ακόμα από ένα ικανοποιητικό βαθμό.

Οι ίδιοι διεξήγαγαν ακόμα ένα πείραμα, ρυθμίζοντας τους MICAz να λειτουργούν σε συχνότητα 2.42 GHz, στην οποία ο PowerPoint Presenter της Logitech παρουσιάζει ένα σχετικά ισχυρό σήμα παρεμβολής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παρουσία της συγκεκριμένης συσκευής δεν έχει σχεδόν καμία αρνητική συνέπεια στη λειτουργία των MICAz. Αυτό οφείλεται στο ότι η παρεμβολή της συσκευής αυτής δεν είναι αρκετά ισχυρή, και στο ότι η DSSS πολλαπλασιάζει το επιθυμητό σήμα επί δύο ενώ το σήμα θορύβου μόνο μία μέσω της ακολουθίας ψευδοθορύβου. Για να ληφθούν, ωστόσο, ακόμα πιο ευρεία και αναλυτικά αποτελέσματα χρειάζονται ακόμα περισσότερες δοκιμές και σχετικά πειράματα στο μέλλον.

Μια άλλη λύση από ερευνητικής πλευράς, είναι να γίνει η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του ήδη υπάρχοντος μη αδειοδοτημένου φάσματος, χρησιμοποιώντας το πλεονέκτημα της πολυμορφίας της συχνότητας. Η έως τότε έρευνα πάνω σε δίκτυα αισθητήρων που δεν είχε δώσει τη δέουσα σημασία στη μελλοντική «κρίση» του φάσματος και η έλλειψη σχεδιασμού είτε στο φυσικό επίπεδο είτε στο επίπεδο MAC ώθησε τους Zhou, Stankovic και Son λοιπόν να δημιουργήσουν μια νέα υπηρεσία διαχείρισης φάσματος με βασικό χαρακτηριστικό την αυτοπροσαρμογή, γνωστή ως SAS. Μια υπηρεσία η οποία λειτουργεί ανάμεσα στο φυσικό στρώμα και το στρώμα MAC. Αυτό φαίνεται σχηματικά και παρακάτω:



Εικόνα 16. Σχηματική αναπαράσταση της υπηρεσίας SAS

Η SAS δημιουργήθηκε με 3 βασικούς προσανατολισμούς:

- Την επίτευξη επικοινωνίας υψηλής απόδοσης μέσα σε ένα ενιαίο WSN
- Την επίτευξη λειτουργικότητας πολλαπλών συχνοτήτων ανάμεσα σε επικαλυπτόμενα, ωστόσο, συνεργαζόμενα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

- Την επίλυση του ζητήματος του υπερφορτωμένου ραδιοφάσματος που προκαλείται από οποιαδήποτε αιτία, όπως τυχαίες εκπομπές διαφόρων ηλεκτρικών συσκευών ή άλλων ασύρματων δικτύων στην περιοχή.

3.3 Γνωστικά Δίκτυα Αισθητήρων - Cognitive Radio Sensor Networks (CRSNs)

Η δυναμική πρόσβαση φάσματος (Dynamic Spectrum Access) αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη και «φασματικά αποδοτική» επικοινωνιακή προσέγγιση για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων περιορισμένων πόρων και μοιάζει να είναι η πλέον κατάλληλη λύση στο παραπάνω πρόβλημα της συνύπαρξης σε μια γεωγραφική περιοχή πολλών δικτύων τα οποία λειτουργούν σε κοινές ζώνες συχνοτήτων. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην καθοδηγούμενη από *events* επικοινωνιακή φύση των ΑΔΑ, η οποία γενικά εκδηλώνει κίνηση ριπών (bursty traffic) ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του γεγονότος. Επιπλέον, η δυναμική πρόσβαση φάσματος μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση της συνύπαρξης πολλαπλών επικαλυπτόμενων δικτύων αισθητήρων, και να εξαλείψει τις συγκρούσεις και την υπερβολική καθυστέρηση λόγω ανταγωνισμού, τα οποία προκαλούνται σε μια πυκνή συνύπαρξη επικαλυπτόμενων ΑΔΑ. Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας του Cognitive Radio (CR) στα δίκτυα αισθητήρων δημιουργεί ένα νέο πρότυπο δικτύωσης.

Μεταβάλλοντας δυναμικά τις παραμέτρους λειτουργίας του, το CR ανιχνεύει το φάσμα, καθορίζει τις κενές ζώνες, και κάνει χρήση αυτών των διαθέσιμων ζωνών με ένα ευκαιριακό τρόπο, βελτιώνοντας τη συνολική χρησιμοποίηση του φάσματος. Με αυτές τις ικανότητες το CR μπορεί να λειτουργήσει σε αδειοδοτημένες, καθώς και σε μη αδειοδοτημένες ζώνες. Στις αδειοδοτημένες ζώνες, οι ασύρματοι χρήστες που διαθέτουν μία συγκεκριμένη άδεια για να επικοινωνούν μέσω της διαθέσιμης ζώνης – οι πρωτεύοντες χρήστες- έχουν προτεραιότητα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην πρόσβαση του καναλιού. Οι χρήστες του Cognitive Radio –οι δευτερεύοντες χρήστες- όπως είναι λογικό, μπορούν να έχουν πρόσβαση στο κανάλι μόνο εάν δε προκαλούν παρεμβολές στους πρωτεύοντες χρήστες.

Τα παραπάνω ισχύουν γενικά και έχουν ήδη αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων όμως συγκεκριμένα, τα οποία παραδοσιακά θεωρείται ότι χρησιμοποιούν συγκεκριμένη ζώνη του φάσματος κάθε φορά, λειτουργούν δηλαδή στατικά, καθώς επίσης και το γεγονός ότι χρήζουν ιδιαίτερης αντιμετώπισης εξαιτίας των περιορισμένων πόρων τους, θεωρείται ότι μπορούν να εκμεταλλευτούν πολλές από τις δυνατότητες του Cognitive Radio. Ανάλογα με την εφαρμογή, ένα δίκτυο αισθητήρων που είναι εφοδιασμένοι με την τεχνολογία του CR, μπορεί να επωφεληθεί από τα πιθανά του πλεονεκτήματα:

- *Δυναμική πρόσβαση του ραδιοφάσματος*: Οι υπάρχουσες υλοποιήσεις ΑΔΑ υποθέτουν σταθερή κατανομή φάσματος σε πολύ «φορτωμένες» μη αδειοδοτημένες ζώνες που χρησιμοποιούνται και από άλλες συσκευές, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα:

Sensor node platforms	Radio chip	Operating bands	Overlapping wireless systems
Bean, BTnode, Mica2, MANTIS Nymph	Chipcon (TI Norway) CC1000	315, 433, 868, 915 MHz	Fixed, mobile, amateur, satellite, radiolocation, broadcasting, telemetry, ZigBee
IMote, MicaZ, SenseNode, XYZ, Sentilla Mini, TelosB	Chipcon (TI Norway) CC2420	2.4 GHz	Fixed, mobile, amateur radio as secondary, 802.11b/g/n, telemetry, Bluetooth, ZigBee
Mica, weC	RF Monolithics TR1000	916.3–916.7 MHz	Fixed, mobile, broadcasting, telemetry, ZigBee
ANT	Nordic nRF24AP1	2.4 GHz	Fixed, mobile, amateur radio as secondary, telemetry, 802.11b/g/n, Bluetooth, ZigBee
EyesIFX v. 1 and v. 2	Infineon TDA5250	868–870 MHz	Fixed, mobile, broadcasting, telemetry, ZigBee
Iris	Atmel AT86RF230	2.4 GHz	Fixed, mobile, amateur radio as secondary, telemetry, 802.11b/g/n, Bluetooth, ZigBee

Εικόνα 17. Ζώνες φάσματος λειτουργίας εμπορικών πομποδεκτών ΑΔΑ και επικαλυπτόμενων ασύρματων συστημάτων.

Παρ'όλα αυτά, η μίσθωση του ραδιοφάσματος για μια αδειοδοτημένη ζώνη ενισχύει το συνολικό κόστος ανάπτυξης του δικτύου. Ως εκ τούτου, για να είναι δυνατή η αποδοτική συνεργασία με άλλους τύπους χρηστών, η ευκαιριακή πρόσβαση φάσματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα ΑΔΑ.

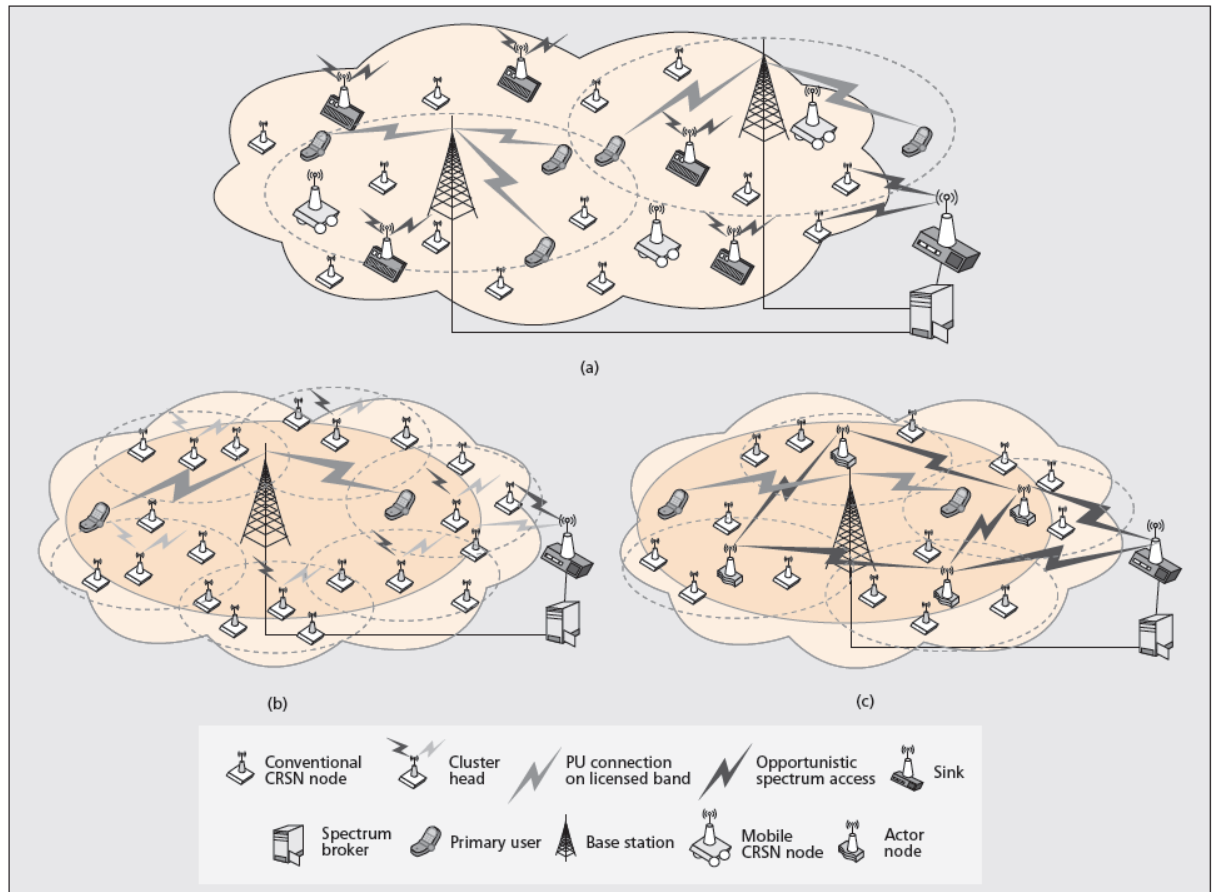
- *Ευκαιριακή χρήση καναλιού για κυκλοφορία ριπής:* Ένας μεγάλος αριθμός κόμβων – αισθητήρων που ανιχνεύουν ένα γεγονός (event) δημιουργούν κυκλοφοριακό φόρτο ριπής και προσπαθούν να αποκτήσουν το κανάλι για να στείλουν τις αναγνώσεις τους. Αυτό αυξάνει την πιθανότητα των συγκρούσεων και απωλειών πακέτων, το οποίο μειώνει τη συνολική αξιοπιστία της επικοινωνίας με υπερβολική κατανάλωση ενέργειας. Η ευκαιριακή πρόσβαση σε πολλαπλά, εναλλακτικά κανάλια μπορεί να ικανοποιήσει κατά μια έννοια αυτές τις πιθανές προκλήσεις.
- *Προσαρμοστικότητα για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης:* Η δυναμική φύση ενός ασύρματου καναλιού προκαλεί κατανάλωση ενέργειας εξαιτίας της απώλειας πακέτων και αναμεταδόσεων. Οι κόμβοι – αισθητήρες εξοπλισμένοι με την τεχνολογία του CR, μπορεί να είναι σε θέση να προσαρμοστούν σε μεταβαλλόμενες συνθήκες καναλιού, το οποίο θα βελτίωνε την αποδοτικότητα της μετάδοσης, και ως εκ τούτου, να συνέβαλε στη μείωση της ενέργειας που χρησιμοποιείται για εκπομπή και λήψη.
- *Επικαλυπτόμενες αναπτύξεις πολλαπλών ταυτόχρονων ΑΔΑ:* Η δυναμική διαχείριση φάσματος μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην αποτελεσματική συνύπαρξη χωρικά επικαλυπτόμενων δικτύων αισθητήρων ως προς τις επιδόσεις της επικοινωνίας και της χρησιμοποίησης πόρων.
- *Επικοινωνία υπό διαφορετικούς κανονισμούς φάσματος:* Μια ορισμένη ζώνη φάσματος που είναι διαθέσιμη σε μια συγκεκριμένη περιοχή ή χώρα μπορεί να μην είναι διαθέσιμη σε μια άλλη εξαιτίας διαφορετικών εσωτερικών κανονισμών όσον αφορά τη χρησιμοποίηση του φάσματος. Ασύρματοι κόμβοι εξοπλισμένοι με CR, μπορούν να ξεπεράσουν επομένως αυτό το πιθανό πρόβλημα.

Σε γενικές γραμμές, ένα Γνωστικό Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων (Cognitive Radio Sensor Network – CRSN) μπορεί να οριστεί ως ένα καταναμημένο δίκτυο ασύρματων γνωστικών κόμβων αισθητήρων, οι οποίοι ανιχνεύουν σήματα γεγονότων και συνεργαστικά ανακοινώνουν τις αναγνώσεις τους δυναμικά μέσω διαθέσιμου φάσματος μέσω πολλαπλών – αλμάτων με σκοπό τελικά να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής που εξυπηρετούν. Ωστόσο, η υλοποίηση ενός CRSN και τα πιθανά πλεονεκτήματα που περιγράφονται ανωτέρω, εξαρτώνται από την αντιμετώπιση προκλήσεων συμπεριλαμβανομένου των αντίστοιχων περιορισμών πόρων στους κόμβους, από πρόσθετες απαιτήσεις επικοινωνίας και επεξεργασίας που απαιτούνται από τα γνωστικά συστήματα επικοινωνιών, από το σχεδιασμό κόμβων-αισθητήρων χαμηλού κόστους και αποδοτικούς ενεργειακά, καθώς και ευκαιριακή επικοινωνία πολλαπλών αλμάτων πάνω από - αδειοδοτημένες και μη- ζώνες φάσματος σε πυκνές από εγκατεστημένα δίκτυα περιοχές.

Παρά τον εκτεταμένο όγκο των αποτελεσμάτων από την έρευνα πάνω στα Γνωστικά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και ad-hoc δικτύων [20], τα CRSN είναι ένα ανεξερεύνητο πεδίο με ένα ελάχιστο αριθμό μελετών. Στο [21], εισάγεται μια ενεργειακά αποδοτική και προσαρμοστική τεχνική διαμόρφωσης για CRSNs με σκοπό να επιτύχουν υψηλή απόδοση ισχύος προς την κατεύθυνση της μεγάλης διάρκειας ζωής των - περιορισμένων πόρων- δικτύων αισθητήρων. Στο [22], τα CRSNs αναλύονται στο πλαίσιο εφαρμογών όπως η υγειονομική περίθαλψη και η τηλεϊατρική, οι οποίες απαιτούν την έγκαιρη παράδοση κρίσιμων πληροφοριών. Η δυνατότητα της Δυναμικής Πρόσβασης Φάσματος σε δίκτυα αισθητήρων αναλύεται στο [23], με σκοπό την επίτευξη υψηλή αποδοτικότητα ισχύος σε εφάρμογες αισθητήρων.

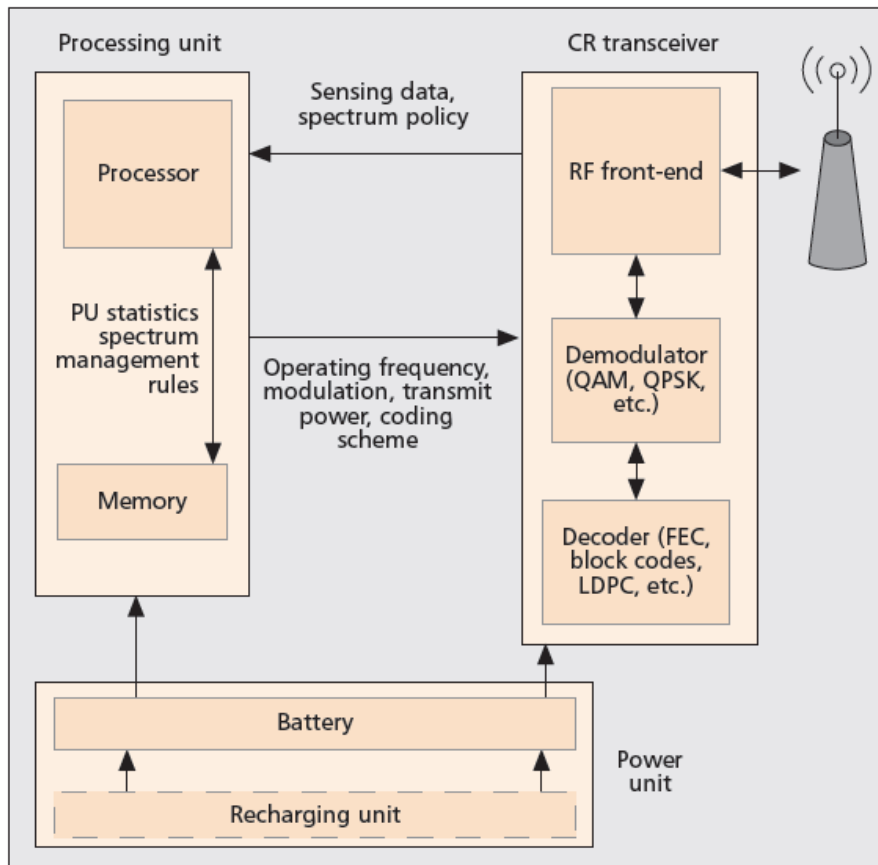
3.3.1 Η αρχιτεκτονική των CRSNs

Τυπικές αρχιτεκτονικές ενός Γνωστικού Δικτύου Αισθητήρων – CRSN απεικονίζονται στην εικόνα 18. Ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του φάσματος, ο κόμβος – αισθητήρας εκπέμπει τα δεδομένα που συλλέγει με ένα ευκαιριακό τρόπο στα επόμενα hops και τελικά στον κεντρικό κόμβο (sink node). Ο κεντρικός κόμβος – βάση μπορεί να είναι επίσης εξοπλισμένος με ικανότητες Cognitive Radio. Εκτός από τις αναγνώσεις γεγονότων, οι αισθητήρες μπορεί να ανταλλάξουν πρόσθετες πληροφορίες με τον κεντρικό κόμβο, όπως δεδομένα ελέγχου για σχηματισμό ομάδας, κατανομή του ραδιοφάσματος, καθώς και επιλογές δρομολόγησης λαμβάνοντας υπόψιν τη συγκεκριμένη κάθε φορά τοπολογία.



Εικόνα 18. α) Η αρχιτεκτονική ενός CRSN, β) πιθανές τοπολογίες δικτύου για CRSNs συστάδας (clustered), γ) ετερογενές ιεραρχικό CRSN

Η κύρια διαφορά ανάμεσα μεταξύ της δομής του υλικού (hardware) ενός κλασσικού αισθητήρα και ενός κόμβου CRSN, είναι ο πομποδέκτης με ικανότητες Cognitive Radio που διαθέτει ο κόμβος CRSN (εικόνα 19). Μια μονάδα Cognitive Radio επιτρέπει στους κόμβους – αισθητήρες να προσαρμόζουν τις παραμέτρους επικοινωνίας τους όπως η συχνότητα φέροντος, η ισχύς μετάδοσης και η διαμόρφωση. Οι CRSN κόμβοι κληρονομούν, επίσης, τους περιορισμούς των «συμβατικών» κόμβων αισθητήρων από την άποψη της ισχύος, της επικοινωνίας, της επεξεργασίας, καθώς και των πόρων μνήμης, το οποίο επίσης περιορίζει τα χαρακτηριστικά του Cognitive Radio.



Εικόνα 19. Η δομή υλικού ενός CRSN κόμβου

Ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής, τα CRSNs μπορεί να παρουσιάσουν διαφορετικές τοπολογίες δικτύου, που παρουσιάζονται παρακάτω:

- *Ad Hoc CRSN*: Σε ένα Ad Hoc CRSN δίκτυο, όπως αυτό του σχήματος 18α, οι κόμβοι στέλνουν τις αναγνώσεις τους στον κεντρικό κόμβο σε πολλαπλά βήματα και με ένα ad hoc τρόπο. Αυτή η τοπολογία επιβάλλει λιγότερο κόστος επικοινωνίας, όσον αφορά τα δεδομένα ελέγχου. Ωστόσο, εξαιτίας του προβλήματος του κρυφού τερματικού (hidden terminal problem), τα αποτελέσματα της ανίχνευσης φάσματος μπορεί να είναι ανακριβή.
- *Συστάδα CRSN (clustered CRSN)*: Είναι απαραίτητο να οριστεί ένα κοινό κανάλι για την ανταλλαγή των διαφόρων δεδομένων ελέγχου, όπως τα αποτελέσματα της ανίχνευσης φάσματος, τα δεδομένα της κατανομής φάσματος, την ανακάλυψη γειτόνων, καθώς και πληροφορίες συντήρησης. Αν και μπορεί να μην είναι τελικά δυνατό να βρεθεί ένα κοινό κανάλι για ολόκληρο το δίκτυο, είναι πολύ πιθανό για ένα μια ορισμένα τοποθεσία [23]. Ως εκ τούτου, μια αρχιτεκτονική βασισμένη σε clusters, όπως στο σχήμα 18β, είναι κατάλληλη επιλογή για αποδοτική δυναμική διαχείριση φάσματος με προσέγγιση τοπικά όμοιου καναλιού ελέγχου.

- *Ετερογενή και ιεραρχικά CRSN:* Η αρχιτεκτονική CRSN μπορεί να περιλαμβάνει ειδικούς κόμβους εξοπλισμένους με περισσότερες ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως «κόμβους ηθοποιούς» (actor nodes) οι οποίοι δρουν στο ανιχνευόμενο γεγονός στα λεγόμενα WSNs (Wireless Sensor and Actor Networks). Εδώ, οι actor nodes μπορεί να ασκούν πρόσθετα καθήκοντα όπως η τοπική διαπραγμάτευση φάσματος. Οι κόμβοι αυτοί μπορεί να έχουν πιθανώς μεγαλύτερα εύρη μετάδοσης και, ως εκ τούτου, να χρησιμοποιούνται ως relay κόμβοι. Αυτό αποτελεί μια ετερογενή και ιεραρχική τοπολογία συνήθεις κόμβους CRSN, relay κόμβους υψηλής ισχύος (όπως πχ Actor nodes γνωστικών επικοινωνιών) και τον κεντρικό κόμβο (sink). (βλ. σχήμα 18c).
- *Κινητά CRSNs:* Η κινητικότητα στα στοιχεία της αρχιτεκτονικής ενός CRSN, αποδίδει μια πιο δυναμική τοπολογία, ενισχύοντας τις υφιστάμενες προκλήσεις. Αυτό απαιτεί λύσεις δυναμικής διαχείρισης φάσματος με γνώση της δυνατότητας κίνησης, μέσω κόμβων CRSN περιορισμένων πόρων. Επιπλέον, τα γνωστικά πρωτόκολλα ραδιοεπικοινωνίας για τα CRSN, επίσης πρέπει να λαμβάνουν υπόψιν τους τη κινητικότητα.

Γενικά, τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός κόμβου που ανήκει σε ένα CRSN δίκτυο καθώς και η ποικιλομορφία των CRSN τοπολογιών που αναφέρθηκαν παραπάνω αποφέρουν πολλά ανοιχτά θέματα έρευνας:

- *Ανάπτυξη CRSN κόμβων:* Πρέπει να διερευνηθεί η ανάπτυξη ο σχεδιασμός του υλικού και του λογισμικού κόμβων – αισθητήρων γνωστικών δικτύων αποτελεσματικών, πρακτικών, και οικονομικά αποδοτικών.
- *Στρατηγικές ανάπτυξης κόμβων:* Πρέπει να αναλυθούν στρατηγικές δυναμικής ανάπτυξης κόμβων βασισμένης στο φάσμα, χρησιμοποίησης φάσματος, και κατανάλωσης ισχύος, σε τοπολογίες CRSN, με κατεύθυνση το σχεδιασμό πρακτικών, ενώ παράλληλα αποδοτικών, μηχανισμών ανάπτυξης.
- *Συσπείρωση γνώσης φάσματος (Spectrum-aware clustering):* Για εφαρμογές που απαιτούν τοπολογίες βασισμένες σε συστάδες (clusters) και ιεραρχικά CRSN δίκτυα, απαιτούνται σχεδιασμοί ομάδας με γνώση του φάσματος, και τεχνικών συντήρησης δικτύου.

3.3.2 Πιθανές περιοχές εφαρμογής

Εξαιτίας των πιθανών πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα CRSNs μπορεί να είναι μια υποσχόμενη λύση για κάποιες συγκεκριμένες εφαρμογές δικτύων αισθητήρων, που αναλύονται παρακάτω:

- *Εφαρμογές ανίχνευσης εσωτερικών χώρων:* Οι εφαρμογές εσωτερικών χώρων (όπως πχ η τηλεϊατρική, η παρακολούθηση σπιτιών, δίκτυα έκτακτων περιστατικών, αυτοματοποίηση εργοστασίων) γενικά απαιτούν την ανάπτυξη πολλών κόμβων – αισθητήρων μέσα σε μια περιορισμένη γεωγραφική περιοχή. Οι κόμβοι αυτοί χρησιμοποιούν μη αδειοδοτημένες ζώνες φάσματος, όπως βιομηχανικές, επιστημονικές, και ιατρικές (ISM) ζώνες, στις οποίες παρατηρείται υπερβολική

συμφόρηση [15]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές προκλήσεις ως προς την επίτευξη αξιόπιστης επικοινωνίας εξαιτίας της απώλειας πακέτων, συγκρούσεων, και της καθυστέρησης ανταγωνισμού (contention delay). Για το λόγο αυτό, η ευκαιριακή πρόσβαση φάσματος που διαθέτουν τα CRSNs, μπορεί να συμβάλλει στην άμβλυνση των προκλήσεων αυτών, με την έννοια ότι η κρίσιμη πληροφορία που απαιτεί αξιόπιστη επικοινωνία πραγματικού χρόνου μπορεί να εκμεταλλευτεί τα πιθανά πλεονεκτήματα της δυναμικής διαχείρισης φάσματος, ακόμα και σε συμφορημένα περιβάλλοντα.

- *Εφαρμογές Πολυμέσων:* Η αξιόπιστη και έγκαιρη παράδοση χαρακτηριστικών από events σε μορφή πολυμεσικής πληροφορίας, από κόμβους – αισθητήρες περιορισμένων πόρων, κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες καναλιού είναι ένας εξαιρετικά φιλόδοξος στόχος εξαιτίας των εγγενών υψηλών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης των πολυμέσων. Τα CRSNs μπορεί να παρέχουν στους κόμβους – αισθητήρες την ελευθερία να αλλάζουν δυναμικά τα κανάλια επικοινωνίας τους σύμφωνα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και των απαιτήσεων κάθε εφαρμογής όσον αφορά το εύρος ζώνης, τους ρυθμούς εσφαλμένων πακέτων, και την καθυστέρηση ανταγωνισμού. Για παράδειγμα, καθώς το πακέτο ταξιδεύει μέσω πολλαπλών αλμάτων, κάθε εμπλεκόμενος κόμβος μπορεί να χρησιμοποιήσει υψηλότερες συχνότητες και το μέγιστο δυνατό ρυθμό για την παροχή του απαιτούμενου εύρους ζώνης.
- *Ετερογενείς εφαρμογές ανίχνευσης πολλαπλών τάξεων:* Κάποιες εφαρμογές μπορεί να απαιτούν πολλαπλά δίκτυα αισθητήρων με διακριτούς στόχους ανίχνευσης να συνυπάρχουν σε μια κοινή περιοχή [24]. Τα δεδομένα που συλλέγονται από αυτά τα δίκτυα μπορεί να συγχωνευθούν για να στηρίξουν μια συγκεντρωτική απόφαση. Παρόμοια, σε ένα απλό δίκτυο αισθητήρων, οι κόμβοι – αισθητήρες μπορεί να χρησιμοποιηθούν στην ίδια περιοχή για να πάρουν δείγμα ενός σήματος ενός event σε περισσότερες από μια διαστάσεις, συμπεριλαμβανομένου μονοδιάστατες μετρήσεις (πχ θερμότητα, υγρασία, κίνηση κτλ) καθώς και οπτικοακουστικές αναγνώσεις του στόχου υπό παρακολούθηση. Με τη βοήθεια της δυναμικής διαχείρισης φάσματος, τα ετερογενή δίκτυα αισθητήρων πολλαπλών τάξεων μπορεί να επικαλύπτονται με την ελάχιστη παρεμβολή μεταξύ τους. Επιπλέον, μέσω του συντονισμού και της από κοινού διαχείρισης του φάσματος μεταξύ αυτών των πολλαπλών CRSNs, οι ατομικές τους επιδόσεις, καθώς και η συνολική χρησιμοποίηση φάσματος μπορούν να βελτιωθούν.
- *Εφαρμογές παρακολούθησης πραγματικού χρόνου:* Οι εφαρμογές παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, όπως η ανίχνευση ενός στόχου και η παρακολούθησή του, απαιτούν ελάχιστη καθυστέρηση πρόσβασης καναλιού και επικοινωνίας. Στα παραδοσιακά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων αυτός ο στόχος μπορεί να μην επιτυγχάνεται πάντα εξαιτίας του υπερφορτωμένου φάσματος. Επιπλέον, μπορεί να υπάρξει επιπρόσθετη καθυστέρηση, σε περίπτωση επαναδρομολόγησης εξαιτίας μιας αποτυχημένης σύνδεσης η οποία προκλήθηκε από κακές συνθήκες καναλιού. Στα CRSNs, οι κόμβοι – αισθητήρες μπορεί να έχουν πρόσβαση ευκαιριακά στο διαθέσιμο κανάλι για να διατηρήσουν ταυτόχρονα ελάχιστη πρόσβαση και ελάχιστη από άκρη σε άκρη καθυστέρηση, για αποδοτικές εφαρμογές παρακολούθησης σε

πραγματικό χρόνο. Με την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων κατανομής φάσματος και δρομολόγησης, οι επιδόσεις των συγκεκριμένων εφαρμογών μπορούν να βελτιωθούν ακόμα περισσότερο.

Κεφάλαιο 4^ο : Αντιμετώπιση του προβλήματος συνύπαρξης στην πράξη σήμερα

4.1 Περιορισμοί και ανοιχτά θέματα των υπάρχουσών προσεγγίσεων στον χώρο της αντιμετώπισης του προβλήματος συνύπαρξης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, με την όλο και αυξανόμενη χρήση Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων στην ανθρώπινη καθημερινότητα, αλλά και άλλων ασύρματων τεχνολογιών που λειτουργούν στο ίδιο φάσμα με τα ΑΔΑ, η ανάγκη για μια πολύ ευέλικτη καθώς και αξιόπιστη συμπεριφορά από μέρους των δικτύων αυτών γίνεται όλο και πιο επιτακτική.

Αν και υποσχόμενες, η μεγάλη πλειοψηφία των προσεγγίσεων στις μέρες μας που αφορούν τόσο τις συμβατικές προτάσεις (βλέπε Ενότητα 4.2) όσο και την ερευνητική περιοχή των Cognitive WSNs (βλέπε Ενότητα 4.3) βασίζονται σε μη ρεαλιστικές υποθέσεις και απαιτήσεις, τις οποίες τα σημερινά Δίκτυα Αισθητήρων δεν πληρούν. Για παράδειγμα, στην παράγραφο 4.2 παρουσιάζονται προσεγγίσεις οι οποίες βασίζουν την αποτελεσματικότητα τους στην ύπαρξη πολλαπλών πομποδεκτών στον ίδιο κόμβο-αισθητήρα (για το διαμοιρασμό φάσματος στη διάσταση της συχνότητας), ή στην ύπαρξη ενός ορθού μηχανισμού συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο. Επί του παρόντος, ωστόσο, οι κατασκευαστές ακολουθούν την επιλογή του ενός μόνο wireless interface για κάθε κόμβο, ενώ όσον αφορά το θέμα συγχρονισμού, παραμένει ακόμα πρόβλημα που πρέπει να λυθεί στην κλίμακα των πραγματικών δικτύων. Επιπρόσθετα, άλλες προσεγγίσεις στηρίζονται στην χρήση ειδικού υλικού ή απαιτούν την τροποποίηση του υπάρχοντος ώστε να τους προσδώσουν νέες δυνατότητες κτλ. Προφανώς κάτι τέτοιο είναι ακριβό και δυσκίνητο, ενώ απαιτεί και πολύ χρόνο και τεχνογνωσία για την πραγματοποίησή του.

Τέλος, οι ενεργειακοί περιορισμοί, η έλλειψη πόρων μνήμης, η περιορισμένη επεξεργαστική ισχύς, το μικρό μέγεθος των αισθητήρων –επομένως και το μεγάλο κόστος που απαιτεί η ανάπτυξη μιας νέας λειτουργίας – αποτελούν μερικά αντικειμενικά εμπόδια στην ανάπτυξη της τεχνολογίας του Cognitive Radio στα ΑΔΑ (η οποία παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο 3.3). Για το λόγο αυτό, πρέπει να βρεθούν κάποιες απλές μέθοδοι αντίληψης του περιβάλλοντος ενός κόμβου, ανίχνευσης του φάσματος στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει και κατάλληλη προσαρμογή, σε συνεργασία πάντα με τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου του.

4.2 Αντιμετώπιση του προβλήματος συνύπαρξης στην πράξη σήμερα

Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται και αναλύεται στην εργασία [17], παρά το εύρος των προσεγγίσεων παραπάνω, καμία από αυτές δεν έχει υιοθετηθεί στην πραγματικότητα των ΑΔΑ, κυρίως λόγω των υπερβολικών τους απαιτήσεων, των περιορισμών των τρέχουσων τεχνολογικών επιτευγμάτων, καθώς και των απλουστευμένων υποθέσεών τους (πχ μηδενικό

κόστος αλλαγής καναλιού). Αντίθετα, οι λύσεις στον πραγματικό κόσμο σήμερα επικεντρώνονται στον εντοπισμό ενός ποιοτικού καναλιού για να λειτουργήσουν αμέσως, πριν την εγκατάστασή του δικτύου [83]. Οι αποφάσεις αυτές υποστηρίζονται συχνότερα από έρευνες σε τοποθεσίες, οι οποίες διεξάγονται στις περιοχές ανάπτυξης των δικτύων, με σκοπό την εκτίμηση των επιπτώσεων της μορφολογίας της περιοχής, της τοποθεσίας των κόμβων, των χαρακτηριστικών των πομποδεκτών καθώς και των παρεμβολών από γειτονικά δίκτυα σχετικά με το υπό εξέταση ΑΔΑ. Αν και ο πιο κοινός τρόπος για τη διεξαγωγή τέτοιων πειραμάτων είναι η χρήση Αναλυτών Φάσματος, το κόστος τους καθώς και ο όγκος τους, τους καθιστά ακατάλληλους για την υποστήριξη εξωτερικών αναπτύξεων δικτύων σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και σκληρά περιβάλλοντα. Εναλλακτικά, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν φορητές εμπορικές [84], ή επι παραγγελία [85] συσκευές σάρωσης καναλιών για την ταχεία αξιολόγηση των 16 καναλιών που καθορίζονται από το πρότυπο 802.15.4 και τη ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz, και να μετρήσουν ακόμα και το Packet Error Rate που μπορεί να αντιμετωπίζει μια σύνδεση που πρόκειται να εγκατασταθεί σε μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή. Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις, η διεξαγωγή πλήρων ερευνών-δοκιμών σε μια τοποθεσία πριν την εγκατάσταση και ανάπτυξη ενός ΑΔΑ είναι εκτός από δαπανηρή, χρονοβόρα και σπάταλη σε πόρους δικτύου, ή ακόμα και οικονομικά και πρακτικά ανέφικτη σε μεγάλες, απόμακρες και εχθρικές γεωγραφικές περιοχές. Αυτή η πρόταση επαληθεύεται ακόμα περισσότερο σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης όπου ο χρόνος είναι μια κρίσιμη παράμετρος και η τοποθεσία είναι πολύ πιθανό να είναι δύσκολα προσβάσιμη.

Επιπλέον, όπως αναφέρεται και στην εργασία [17], σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, είναι επίσης εξαιρετικά πιθανό κάποια προηγούμενος ποιοτικός αποδεκτά κανάλια ξαφνικά να ξεκινήσουν να υποφέρουν από υπερβολικές εξωτερικές παρεμβολές οι οποίες προκαλούνται από νέα γεωγραφικά επικαλυπτόμενα δίκτυα τα οποία λειτουργούν στις ίδιες περιοχές συχνότητας. Ως εκ τούτου, το εκ των προτέρων επιλεγμένο κανάλι μπορεί να μην είναι πια ικανοποιητικό και η συνδεσιμότητα του υποκείμενου ΑΔΑ μπορεί να απειληθεί. Σε τέτοιες περιπτώσεις, πρέπει να επιλεγεί ένα καλύτερο κανάλι συχνότητας. Αυτή η ανάγκη έχει ήδη εξεταστεί σε πιο πρόσφατες εκδόσεις κάποιων δημοφιλών τυποποιημένων πρωτοκόλλων όπως το Zigbee PRO, το οποίο έχει υιοθετήσει το χαρακτηριστικό “Frequency Agility” (ευελιξία συχνότητας), ενώ μέχρι στιγμής το ZigBee στηριζόταν στο χαμηλό του Duty Cycle και σε αλγόριθμους αποφυγής συγκρούσεων για να ελαχιστοποιήσει την απώλεια δεδομένων που προκαλούνται από τέτοιου είδους προβλήματα. Ωστόσο, αυτή η ευελιξία στη συχνότητα ισχύει μόνο όσον αφορά τον προσδιορισμό, σε αφηρημένη μορφή, ενός προτύπου API και μηνύματα για να δοθεί εντολή σε μια συσκευή να αλλάξει κανάλι, ενώ η πλήρης υλοποίηση δεν παρέχεται ακόμη. Έτσι, πολλά σημαντικά ζητήματα είναι ακόμη ανοιχτά, με το πιο σημαντικό να ορισθεί μια μέθοδος για την ταχεία και αποδοτική ανίχνευση ποιοτικά αποδεκτών καναλιών σε περιοχές ανάπτυξης ΑΔΑ. Όσον αφορά το τελευταίο ζήτημα, μέχρι σήμερα έχει προταθεί ένας πολύ μικρός αριθμός προσεγγίσεων. Και στις δύο [86] και [87], προτείνονται διανεμημένες “agent-based” αρχιτεκτονικές, με κάθε πράκτορα-agent να αποτελεί ένα ειδικό hardwired module σε κάθε κόμβο ΑΔΑ, ενώ στη δεύτερη από τις προσεγγίσεις, σχηματίζεται ένα ολόκληρο επιπλέον Bluetooth δίκτυο κορμού για τη συλλογή των απαιτούμενων μετρήσεων από το υπό εξέταση ΑΔΑ. Στο [73], χρησιμοποιούνται κινητές συσκευές καταγραφής (USRP/GNURadio). Στο [88], παρουσιάζεται ένα ΑΔΑ το οποίο διατίθεται στο εμπόριο, το οποίο φέρει ενσωματωμένη λειτουργικότητα καταγραφής και μέτρησης φάσματος. Ωστόσο, δεδομένου ότι όλες αυτές οι προσεγγίσεις απαιτούν τη

χρησιμοποίηση επιπλέον υλικού για την ανίχνευση ενός ποιοτικού 802.15.4 καναλιού, είναι αναπόφευκτο όχι μόνο για το κόστος, αλλά και για τα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας να αυξηθούν, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μειωμένη αποδοτικότητα. Τέλος, στο [89], προτείνεται μια διαδικασία εκτίμησης καναλιού, για την αξιολόγηση της ποιότητας όλων των 802.15.4 καναλιών, πάνω από ένα συγκεκριμένο «μονοπάτι» και μόνο, ένας περιορισμός ο οποίος καθιστά την προσέγγιση αυτή ανέφικτη να εντοπίσει ένα συνολικά ποιοτικά αποδεκτό κανάλι για ολόκληρο το ΑΔΑ στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει.

Κεφάλαιο 5^ο : Η προτεινόμενη στην [17] προσέγγιση

5.1 Εισαγωγή/Κίνητρο-Σκοπός

Το βασικό ζητούμενο που θα πρέπει να απασχολήσει τους ερευνητές τα επόμενα χρόνια είναι το πώς θα γίνει εφικτό, σε μια έκτακτη περίπτωση που θα υπάρξει η ανάγκη να βρεθούν στην ίδια γεωγραφική περιοχή πάνω από ένα ασύρματα δίκτυα τα οποία λειτουργούν σε επικαλυπτόμενες συχνότητες, να αντληφθεί το κάθε δίκτυο το περιβάλλον του και να δράσει ανάλογα, με απώτερο στόχο τη διατήρηση της δυνατής επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων του καθώς και την παραχώρηση προτεραιότητας συγκεκριμένων συχνοτήτων σε δίκτυα που το έχουν περισσότερο ανάγκη.

Για παράδειγμα, έστω ότι υπάρχει εγκατεστημένο ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων σε μια δασική περιοχή, το οποίο γενικά καταγράφει κάποιες μετρήσεις σχετικά με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν (θερμοκρασία, άνεμος, υγρασία κτλ) καθώς και παρακολουθεί συνεχώς προσπαθώντας να εντοπίσει ένα πιθανό ξέσπασμα πυρκαγιάς. Σε μια τέτοια επομένως έκτακτη περίπτωση που ξεσπά μια φωτιά, είναι πολύ πιθανό το ήδη εγκατεστημένο δίκτυο να μη διαθέτει όλα τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την παροχή όλων των απαραίτητων πληροφοριών για την άμεση δράση των διάφορων εμπλεκόμενων, τον εντοπισμό και διάσωση ανθρώπων στην περιοχή κτλ. Θα χρειαστεί πιθανότατα, λοιπόν, ή άμεση εγκατάσταση ενός δεύτερου –ή και περισσότερων- ασύρματων δικτύων που θα πρέπει να δράσουν άμεσα και να συνδράμουν στη διάσωση ανθρώπων που πιθανώς βρίσκονται σε κίνδυνο, στον εντοπισμό ζώων κτλ ή στην κατάσβεση της πυρκαγιάς. Ωστόσο, είναι προφανές ότι λόγω της ιδιαιτερότητας μιας τέτοιας περίπτωσης, δεν υπάρχει αρκετός χρόνος για ανάλυση του φάσματος στην περιοχή (με χρήση πχ ενός Spectrum Analyzer), και της επιλογής του κατάλληλου καναλιού στο οποίο το νεοεισερχόμενο στην περιοχή δίκτυο θα λειτουργεί βέλτιστα και δίχως να προκαλεί ή να δέχεται παρεμβολές από τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα. Η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα, με μεγάλο κόστος, ενώ απαιτεί και ιδιαίτερη προσπάθεια για να δώσει έγκυρα αποτελέσματα.

Το ίδιο ισχύει και για τα ήδη εγκατεστημένα δίκτυα. Σε μια έκτακτη περίπτωση όπου σε μια περιοχή όπου λειτουργούν ήδη ένα ή περισσότερα ΑΔΑ και χρειαστεί να εισέλθουν νέα έκτακτα ΑΔΑ για μια συγκεκριμένη λειτουργία, θα πρέπει να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία των ήδη υπαρχόντων ΑΔΑ. Το φάσμα θα κορεσθεί από τα νεοεισερχόμενα δίκτυα, και θα χρειαστεί να βρει ένα καλύτερο κανάλι για να λειτουργήσει. Αυτό είναι επίσης δύσκολο, χρονικά κρίσιμο κτλ.

Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να υπάρχει μια απλούστερη μέθοδος, ένα εργαλείο, το οποίο θα διαθέτουν οι κόμβοι του κάθε δικτύου (και του ήδη υπάρχοντος και του νεο-εισερχόμενου σε μια γεωγραφική περιοχή δικτύου), και με το οποίο θα έχουν τη δυνατότητα με ένα απλό έλεγχο να ανακαλύπτουν το βέλτιστο κανάλι για το δικτύό τους, που θα τους εξασφαλίζει την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων-αισθητήρων και του Gateway και θα έχει την ελάχιστη δυνατή παρεμβολή με τα «ανταγωνιστικά» δίκτυα.

5.2 Ο πυρήνας της ιδέας

Στην [17], προτείνεται μια μέθοδος για το μετριασμό των παρεμβολών που προκαλούνται σε ένα ΑΔΑ είτε από γειτονικά WiFi, Bluetooth και WSN δίκτυα τα οποία λειτουργούν σε επικαλυπτόμενα εύρη συχνοτήτων είτε από άλλους, εξωτερικούς παράγοντες. Η συγκεκριμένη προσέγγιση, διαφέρει σημαντικά από το έργο που παρουσιάζεται στην ενότητα 5.2 καθώς δε βασίζεται σε υπεραπλουστευμένες υποθέσεις ή σε χρήση ειδικού και εξεζητημένου υλικού. Αντίθετα, έχει στενή ομοιότητα με εκείνες τις προσεγγίσεις οι οποίες επιδιώκουν τον εντοπισμό ενός καναλιού το οποίο εγγυάται επαρκή συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων ενός ΑΔΑ. Όπως προαναφέρθηκε, τέτοιες προσεγγίσεις βασίζονται σε έρευνες – πειράματα που πραγματοποιήθηκαν «χειροκίνητα», παρακολουθώντας αρχιτεκτονικές που αποτελούνται από ειδικούς φορείς ενωματομένους (hardwired) στα διαχειριζόμενα ΑΔΑ ή ανεξάρτητους κινητούς φορείς.

Η μέθοδος που περιγράφεται στην [17] χρησιμοποιεί αντί αυτού, τους ίδιους τους κόμβους του ΑΔΑ, για την παρακολούθηση την περιοχή ανάπτυξης – είτε κατά την εκκίνηση ή οποτεδήποτε είναι αναγκαίο – και για την ανίχνευση το πιο επαρκές κανάλι για να ικανοποιήσει τις ανάγκες επικοινωνίας. Δεδομένου ότι δε χρειάζεται τροποποίηση του firmware και δεν απαιτείται κάποιο ειδικό hardware, η λύση αυτή θα μπορούσε να εφαρμοστεί σχεδόν σε οποιοδήποτε ΑΔΑ του εμπορίου (αν και επί του παρόντος υποστηρίζονται μόνο ΑΔΑ τα οποία χρησιμοποιούν το λειτουργικό σύστημα TinyOS). Για το σκοπό αυτό, σχεδιάστηκε ένα εργαλείο το οποίο παρέχει σε μια κεντρική οντότητα (πιθανότατα μια πύλη-gateway ενός ΑΔΑ), η οποία επικοινωνεί με κόμβους – αισθητήρες στους οποίους είναι εγκατεστημένοι φορείς λογισμικού, πληροφορίες που αφορούν την ποσότητα των παρεμβολών που αντιμετωπίζει κάθε ένας κόμβος από αυτούς σε κάθε διαθέσιμο κανάλι συχνότητας. Η διαδικασία αυτή τυπικά αναφέρεται ως «Ανίχνευση Φάσματος» (Spectrum Sensing) στα πλαίσια της τεχνολογίας του Cognitive Radio.

Στην [17], λοιπόν, προτείνεται μια λύση ρεαλιστικής κατάστασης, η οποία σε περίπτωση ενός έκτακτου συμβάντος, θα διατηρήσει την πλήρη συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων το οποίο βρίσκεται στην ίδια γεωγραφική περιοχή με άλλα, νεοεισερχόμενα δίκτυα αισθητήρων, WiFi ή Bluetooth δίκτυα τα οποία αποτελούν πηγή παρεμβολών. Επιπλέον, σε περίπτωση που ένα νεοεισερχόμενο στην περιοχή ΑΔΑ απαιτείται να στηρίξει μια έκτακτη κατάσταση όπως η ανίχνευση μιας φωτιάς ή διάσωση ανθρώπων, είναι πάντα πιθανό να υπάρχουν και άλλα –ήδη εγκατεστημένα– δίκτυα στην ίδια περιοχή (περιλαμβανομένου δίκτυα 802.11b/g ή συσκευές Bluetooth), ωστόσο είναι προφανές ότι δεν υπάρχει χρόνος να δημιουργηθεί ο αντίστοιχος λεγόμενος «φασματικός χάρτης δραστηριότητας».

Οι χάρτες αυτοί παρουσιάζουν τις συχνότητες οι οποίες δεν είναι σε χρήση μια συγκεκριμένη στιγμή σε μια περιοχή, και απαιτούν ακριβό εξοπλισμό (όπως Αναλυτές Φάσματος) καθώς και σημαντική προσπάθεια για να διαξαχθούν επιτυχώς και να δώσουν έγκυρα αποτελέσματα. Επομένως, θα πρέπει να υπάρχει μια απλή μέθοδος για τα ήδη εγκατεστημένα αλλά και για τα νεοεισερχόμενα δίκτυα, για να ανακαλύπτουν ένα κανάλι συχνότητας το οποίο θα εγγυείται αποδεκτή ποιότητα επικοινωνίας μεταξύ όλων των κόμβων.

5.3 Η χρήση του Packet Error Rate (PER) ως ένδειξη ποιότητας της επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων

Για την αξιολόγηση του επιπέδου των παρεμβολών στις οποίες υπόκειται ο κάθε σύνδεσμος (link) ενώ λειτουργεί σε συγκεκριμένο κανάλι, επιλέγεται το ποσοστό εσφαλμένων πακέτων που λαμβάνει κάθε φορά (Packet Error Rate - PER), αντί για το – εξίσου δημοφιλές- RSSI (Received Signal Strength Indicator) ή το LQI (Link Quality Indicator). Το ζητούμενο PER για ένα συγκεκριμένο link το οποίο λαμβάνει εισερχόμενη κίνηση από το δίκτυο (έναν άλλο κόμβο – αποστολέα), υπολογίζεται απλά ως ο λόγος των πακέτων που ελήφθησαν από τον πρώτο, προς το σύνολο των πακέτων που απεστάλησαν από το δεύτερο. Η παρουσία ενός παρεμβολέα (interferer) στην εμβέλεια ενός αισθητήρα – δέκτη αυξάνει τον παρατηρούμενο σηματοθορυβικό λόγο (SNR), με αποτέλεσμα μεγαλύτερο αριθμό σφαλμάτων πακέτων κατά τη διάρκεια της αποδιαμόρφωσης του σήματος.

Δεδομένου ότι στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων ο ρυθμός μετάδοσης δεν είναι τόσο υψηλός, συνήθως τα δεδομένα δεν αποστέλλονται με κώδικες FEC (Forward Error Correcting) ώστε να αποφεύγεται ο πλεονασμός (redundancy) και να διατηρούνται οι διάφορες λειτουργίες από τους κόμβους του δικτύου όσο το δυνατόν απλούστερες. Ως εκ τούτου, τα δεδομένα αποστέλλονται μη προστατευμένα και μόνο αν το πακέτο ληφθεί ορθά το δίκτυο θα είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσει την πληροφορία, ειδιάλλως, είναι απαραίτητη η αναμετάδοση του πακέτου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ως μέτρηση της απόδοσης της επικοινωνίας του δικτύου το PER.

Αντίθετα, το RSSI λαμβάνει υπόψιν του τη λαμβανόμενη ισχύ σήματος και συνήθως χρησιμοποιείται από εφαρμογές ανώτερων στρωμάτων για να αξιολογήσει την ποιότητα επικοινωνίας (και να δράσει ανάλογα). Ωστόσο, το RSSI δεν αποτελεί πάντα έγκυρο κριτήριο για την αξιολόγηση της ποιότητας σύνδεσης, ειδικά στην περίπτωση περιβάλλοντος με παρεμβολές, μιας και η παράμετρος λαμβάνει υπόψιν την ισχύ σήματος και, ως εκ τούτου, η παρεμβολή προσμετράται μαζί με λαμβανόμενο (επιθυμητό) σήμα.

Και το RSSI όπως και το LQI υποστηρίζονται από σχεδόν όλα τα σύγχρονα radio chips τα οποία βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.15.4, όπως για παράδειγμα το CC2420 [90]. Ωστόσο, υπάρχουσες έρευνες [16][91] έχουν δείξει ότι οι δείκτες αυτοί δε μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστοι για την ποιότητα της σύνδεσης σε ένα ΑΔΑ. Η συσχέτιση μεταξύ RSSI και PER καθώς και LQI και PER είναι αρκετά μικρή, με συντελεστές συσχέτισης του Pearson 0,433 και 0,731 αντίστοιχα [92]. Προκειμένου να γίνει αυτή η συσχέτιση, επιβάλλεται η ανταλλαγή πολλών πακέτων εξαιτίας της μεγάλης διακύμανσης ανάμεσα στις αναγνώσεις RSSI/LQI διαφορετικών πακέτων, η οποία εισάγεται από φαινόμενα fading καθώς και τον περιβάλλοντα θόρυβο [93].

Ως εκ τούτου, το PER μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της παρεμβολής, όταν – προφανώς- όλα τα άλλα μεγέθη που επηρεάζουν την ποιότητα της σύνδεσης (απόσταση, ισχύς μετάδοσης, ωφέλιμο φορτίο πακέτου κτλ) παραμένουν σταθερά.

Η ποιότητα ενός σύνδεσμου (link) ΑΔΑ του προτύπου IEEE 802.15.4 χαρακτηρίζεται, επομένως, κυρίως από το Packet Error Rate (PER), η τιμή του οποίου δίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$PER = \frac{Lost_packets + Received_with_CRC_error_packets}{Sent_packets}$$

Το πρώτο μέρος της εξίσωσης αναφέρεται στα χαμένα πακέτα, ενώ το δεύτερο αναφέρεται στα πακέτα τα οποία απορρίπτονται κατά τη διάρκεια του «κυκλικού ελέγχου πλεονασμού» (Cyclic Redundancy Check – CRC), ο οποίος εφαρμόζεται σε κάθε πακέτο στο ZigBee. Έτσι, η παράμετρος PER σε ένα σύνδεσμο παρέχει στατιστικές σχετικά με το λόγο των συνολικών πακέτων που λαμβάνονται επιτυχώς προς τα συνολικά πακέτα τα οποία αποστέλλονται. Ωστόσο, η διαδικασία εκτίμησης του PER επιβάλλει επιβαρύνσεις (overhead) στους δικτυακούς και τους υπολογιστικούς πόρους ενός ΑΔΑ, λόγω της ανάγκης για ανταλλαγή μεγάλου ποσού πακέτων.

5.4 Η σημασία του υπολογισμού του PER για κάθε κόμβο του δικτύου

Θα μπορούσε κάποιος να υποστηρίξει ότι, δεδομένου ότι ο προορισμός της ροής δεδομένων σε ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων είναι συνήθως ο Gateway και οι κόμβοι-αισθητήρες δρουν απλώς ως δημιουργοί της κίνησης δεδομένων, το μέγεθος της παρεμβολής στους κόμβους – αισθητήρες δεν έχει καμία σύνδεση με τον αριθμό των σφαλμάτων πακέτων στους δέκτες του (δεδομένου ότι ο σηματοθορυβικός λόγος επηρεάζει μόνο τη διαδικασία λήψης/αποδιαμόρφωσης).

Ωστόσο, κάποιος θα έπρεπε να λάβει υπόψιν ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν εξετάζεται το τετριμμένο και μη-ανταποκρινόμενο σε πραγματικές συνθήκες, σενάριο ενός άλματος, όπου δηλαδή όλοι οι κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα τους απευθείας στον Gateway. Αντίθετα, θεωρείται ένα δίκτυο το οποίο ακολουθεί τη θεμελιώδη αρχή της επικοινωνίας πολλαπλών αλμάτων (multi-hop communication) στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, στην περίπτωση κατά την οποία κάθε κόμβος – αισθητήρας μπορεί να λειτουργήσει ως ο συνδετικός κρίκος κατά τη μεταφορά δεδομένων από έναν αισθητήρα στον Gateway.

Με άλλα λόγια, κάθε κόμβος – αισθητήρας μπορεί να δράσει σα δέκτης δεδομένων τα οποία χρειάζεται να αναμεταδοθούν στον επόμενο κόμβο στο «επικοινωνιακό μονοπάτι» που οδηγεί στον κεντρικό κόμβο (gateway). Αν παρατηρηθεί υψηλή τιμή του PER σε κάθε τέτοιο ενδιάμεσο κόμβο όταν δρα σαν παραλήπτης, τότε η συνολική ποιότητα σύνδεσης θα πρέπει προφανώς να είναι κακή. Ως εκ τούτου, για να διασφαλιστούν αξιόπιστες μεταδόσεις μεταξύ των κόμβων ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων, τα επίπεδα των παρεμβολών σε όλους τους κόμβους (ή σε όλα τα link) του δικτύου θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν, ή ισοδύναμα θα πρέπει να επιτευχθεί το χαμηλότερο δυνατό PER.

5.5 Ιεράρχηση καναλιών

5.5.1 Γενική περιγραφή

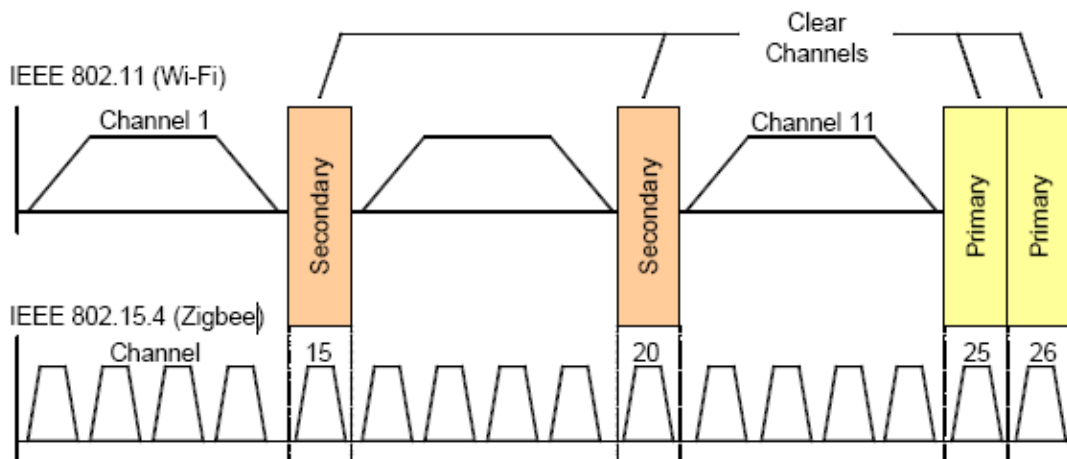
Το πρόβλημα εντοπισμού ενός ενιαίου καναλιού λειτουργίας για το σύνολο των κόμβων ενός δικτύου είναι πρόκληση, λαμβάνοντας υπόψιν ότι τα ΑΔΑ πολλές φορές εγκαθίστανται σε μεγάλες περιοχές, όπου και άλλα δίκτυα μπορεί να βρίσκονται στην

εμβέλεια τους, ειδικά σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Έτσι, για να επιλεγθεί το κατάλληλο κανάλι, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των επιπέδων παρεμβολής σε ολόκληρο το εύρος του δικτύου.

Η λογική της προσέγγισης που ακολουθείται στην [17], είναι να μετρηθεί το μέγεθος της παρεμβολής σε κάθε link του ασύρματου δικτύου για ένα συγκεκριμένο κανάλι του προτύπου IEEE 802.15.4, μετατρέποντας τους κόμβους σε «Ανιχνευτές Φάσματος». Προς αυτή την κατεύθυνση, υπολογίζεται η τιμή του PER για αντίστοιχες εκπομπές, όπου τα υπό εξέταση link φιλοξενούν ειδικά εγχυμένη ροή. Αυτός ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται εωςότου εντοπιστεί ένα καθολικά αποδεκτό κανάλι.

5.5.2 Αναλυτική περιγραφή της ιεράρχησης των καναλιών – Η ουρά προτεραιότητας ChPrio

Είναι κρίσιμης σημασίας, ωστόσο, για την αποδοτικότητα και την ταχύτητα της μεθόδου που περιγράφεται, η σειρά με την οποία θα σαρωθούν τα διαθέσιμα κανάλια του προτύπου 802.15.4. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε μια ουρά προτεραιότητας των 16 καναλιών, κατά φθίνουσα σειρά σύμφωνα με την πιθανότητά τους να είναι κανάλια δίχως παρεμβολές. Η ουρά προτεραιότητας αυτή από εδώ και στο εξής θα αναφερόται *ChPrio*. Η επιλογή αυτή μειώνει και τον αριθμό των καναλιών που εξετάζονται πριν βρεθεί ένα κατάλληλο (με άλλα λόγια μειώνεται ο χρόνος ανίχνευσης του επιθυμητού καναλιού), καθώς επίσης και την επιβάρυνση (overhead) του δικτύου που προκαλείται από τη συγκεκριμένη διαδικασία. Αυτή η ακολουθία των καναλιών καθορίζεται από τη δομή επικάλυψης των φασματικών χαρτών των προτύπων IEEE 802.15.4 και 802.11 όπως φαίνεται στην εικόνα 20: (Ο φασματικός χάρτης του IEEE 802.15.1 δε λαμβάνεται υπόψιν καθώς –όπως έχει ήδη αναφερθεί–, μια συσκευή Bluetooth δεν καταλαμβάνει μονάχα ένα μέρος της φασματικής ζώνης των 2.4 GHz αλλά ολόκληρο το φάσμα).



Εικόνα 20. Η επικάλυψη των φασματικών χαρτών των προτύπων IEEE 802.11 και IEEE 802.15.4.

Με τα παραπάνω δεδομένα, επομένως, είναι λογικό να θεωρηθούν τα κανάλια 25 και 26 τα πιο πιθανά να είναι απαλλαγμένα από παρεμβολές, δεδομένου ότι δεν επικαλύπτονται από κανένα κανάλι του προτύπου 802.11, και συνήθως αναφέρονται ως «πρωτεύοντα»

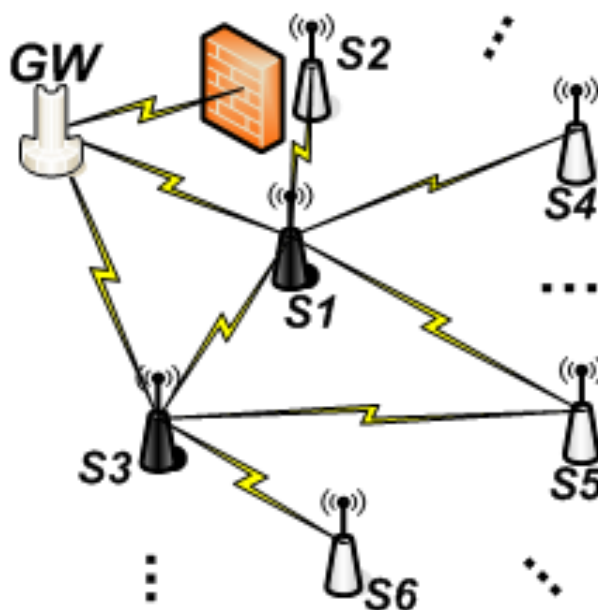
κανάλια (primary channels). Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι αν και η χρήση των καναλιών 12 έως 14 από εμπορικές συσκευές γενικά απαγορεύεται, υπάρχει πάντα η πιθανότητα για ένα ΑΔΑ να υποστεί προβλήματα παρεμβολών ακόμα και σε αυτές τις συχνότητες, σε περίπτωση για παράδειγμα που κάποιο άλλο ΑΔΑ που βρίσκεται στην εμβέλεια του πρώτου, λειτουργεί στα κανάλια 25 ή 26. Παρόμοια, τα κανάλια 15 και 20 του προτύπου IEEE 802.15.4 –που είναι γνωστά επίσης και ως «δευτερεύοντα» (secondary)- αντιστοιχούν σε εύρη συχνοτήτων που δεν επικαλύπτονται από τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα κανάλια του IEEE 802.11: 1, 6 και 11. Και πάλι, αν και το πρότυπο 802.11 προτείνει τη χρήση των καναλιών 1,6 και 11 για όλες τις σύγχρονες ηλεκτρονικές συσκευές, δεν υπάρχει κάποιος κανόνας ή νόμος που να εμποδίζει μια συσκευή από το να καταλάβει ένα κανάλι του προτύπου 802.11. Ως εκ τούτου, η πιθανότητα για αυτά τα δύο κανάλια να αντιμετωπίσουν πρόβλημα παρεμβολών είναι μικρή, ωστόσο όχι αμελητέα.

Τα κανάλια που ακολουθούν στη σειρά προτεραιότητας είναι τα 11, 16, 21, 14, 19 και 24, με τη σειρά που αναγράφονται. Μπορεί να παρατηρηθεί από μια απλή ανάγνωση του παραπάνω σχήματος πως αυτά τα κανάλια βρίσκονται στις ουρές των συνηθέστερων καναλιών του προτύπου 802.11 1, 6 και 11. Καθώς έχει αποδειχθεί ότι πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον μια απόσταση της τάξης των 7 MHz ανάμεσα στις συχνότητες στις οποίες λειτουργούν τα δίκτυα 802.11 και 802.15.4 για να επιτευχθεί μια ικανοποιητική απόδοση [18], αναμένεται ότι τα κανάλια του προτύπου 802.15.4 που βρίσκονται κοντά στις ουρές ενός WiFi καναλιού υπόκεινται σε μικρότερα προβλήματα παρεμβολών από τα κανάλια που βρίσκονται γύρω από τις κεντρικές συχνότητες ενός καναλιού WiFi. Ως εκ τούτου, στα πρώτα έχει ανατεθεί μεγαλύτερη προτεραιότητα σάρωσης απ'ότι στα τελευταία. Όσον αφορά τη σχετική σειρά των 6 αυτών καναλιών στις ουρές, πρέπει να σημειωθεί ότι η σειρά τους δεν έχει ανατεθεί αυστηρά, καθώς δε μπορεί να είναι γνωστό εκ των προτέρων ποιο από όλα έχει τη μεγαλύτερη πιθανότητα να είναι απαλλαγμένο σε μεγαλύτερο βαθμό από παρεμβολές. Ωστόσο, μια λογική υπόθεση θα ήταν να σαρωθούν πρώτα τα 3 κανάλια ουρών που δεν περιέχονται στο ίδιο 802.11 κανάλι, ακολουθούμενα από τα υπόλοιπα 3.

Η ακολουθία σάρωσης ολοκληρώνεται με τα εναπομείναντα κανάλια 12, 13, 17, 18, 22 και 23 του IEEE 802.15.4, δίχως κάποια συγκεκριμένη εσωτερική προτεραιότητα. Τα κανάλια αυτά είναι τα λιγότερο πιθανά να παρουσιάζουν αποδεκτή ποιότητα επικοινωνίας, καθώς τα εύρη συχνοτήτων τους περιέχουν τις κεντρικές συχνότητες των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων WiFi καναλιών 1, 6 και 11.

5.6 Κύριος Αλγόριθμος

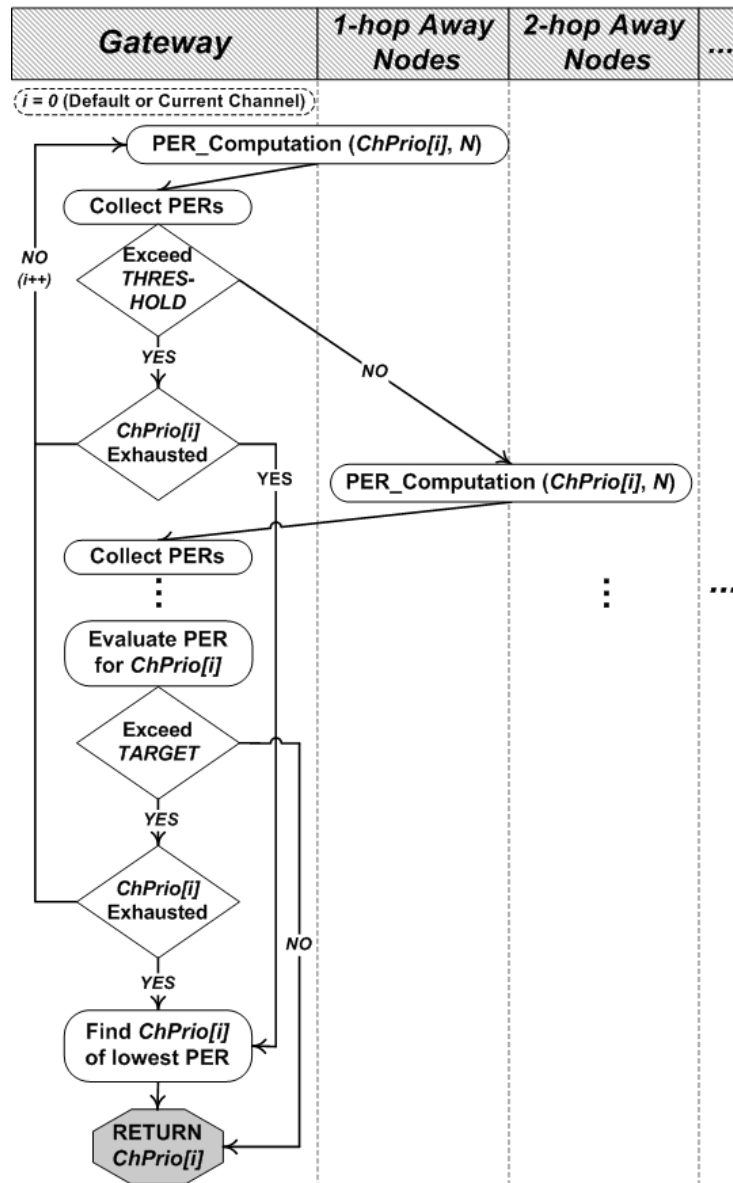
Στην [17], για να γίνει δυνατή η καλύτερη και ευληπτότερη περιγραφή της προτεινόμενης μεθόδου, θεωρήθηκε μια απλή τοπολογία δικτύου, όπως αυτή που απεικονίζεται στην εικόνα 21. Οι κόμβοι (με ονόματα S1 έως και S6), έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν με ένα Gateway (συμβολίζεται με GW) είτε απευθείας, είτε έμμεσα, μέσω μονοπατιών πολλαπλών αλμάτων. Για παράδειγμα, οι κόμβοι S1 και S3 μπορούν να στέλνουν δεδομένα απευθείας στον Gateway, καθώς είναι μέσα στην εμβέλεια εκπομπής-λήψης του, καθώς και δεν υπάρχουν εμπόδια (όπως στην περίπτωση του κόμβου S2) που να δημιουργούν κάποιο πρόβλημα επικοινωνίας. Οι υπόλοιποι κόμβοι βρίσκονται μέσα στην εμβέλεια είτε του S1, είτε του S3 και ως εκ τούτου, ανταλλάσσουν πληροφορίες με τον Gateway μέσω μονοπατιών 2 αλμάτων. Η παρακάτω εικόνα (21) θα χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς, κατά την επεξήγηση των λεπτομερειών της προαναφερθείσας προσέγγισης. Η εικόνα 22 αναπαριστά γενικά τη μορφή της βασικής αλγοριθμικής διαδικασίας, σημειώνοντας και το εργαλείο που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, όπου εξαιτίας έλλειψης χώρου δεν είχε συμπεριληφθεί στο σχήμα η εξέταση των κόμβων που απέχουν περισσότερο από 2 άλματα από τον Gateway.



Εικόνα 21. Ένα απλό παράδειγμα τοπολογίας δικτύου 6 κόμβων και ενός Gateway

Η εκτέλεση του αλγορίθμου ξεκινάει όταν ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων εγκαθίσταται αρχικά σε μια περιοχή, ή όταν ένα ήδη εγκατεστημένο δίκτυο αντιμετωπίσει σημαντικές παρεμβολές από άλλα δίκτυα και συνεπώς απαιτηθεί να αλλάξει το κανάλι λειτουργίας του για να επιτύχει ικανοποιητικές επιδόσεις. Αυτό σημαίνει ότι το κανάλι προτύπου 802.15.4 που πρέπει να ληφθεί υπόψιν αρχικά, είναι είτε το κανάλι στο οποίο λειτουργεί το ΑΔΑ το οποίο εγκαθίσταται, είτε το τρέχον κανάλι λειτουργίας του ήδη εγκατεστημένου ΑΔΑ, αντίστοιχα, ανεξάρτητα από την πραγματική του θέση στην ουρά

προτεραιότητας ChPrio. Το κανάλι αυτό ονοματοδοτείται λοιπόν ChPrio[0], σύμφωνα με τη σημειογραφία του σχήματος του αλγορίθμου, ενώ το ChPrio[i], με $1 \leq i \leq 15$ αναφέρεται στα υπόλοιπα στοιχεία της ουράς προτεραιότητας, εξαιρώντας το προαναφερθέν κανάλι λειτουργίας.

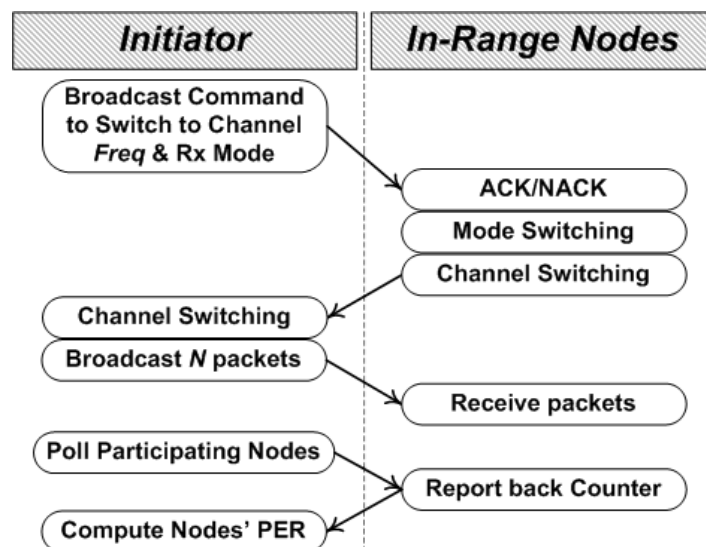


Εικόνα 22.Ο κύριος αλγόριθμος [17]

Το πρώτο βήμα του αλγορίθμου είναι να υπολογιστεί το PER για τα link του Gateway με κάθε κόμβο που είναι τοποθετημένος ένα βήμα (hop) μακριά από αυτόν, ή ισοδύναμα, για κάθε κόμβο ο οποίος βρίσκεται στην εμβέλεια μετάδοσης του Gateway (δηλαδή οι κόμβοι S1 και S3 σύμφωνα με το παράδειγμα της απλής τοπολογίας παραπάνω). Αυτός ο υπολογισμός πραγματοποιείται με τη χρήση της συνάρτησης *PER_Computation*, η οποία πρόκειται, για μία τροποποιημένη, προσαρμοσμένη στις ανάγκες της συγκεκριμένης

μελέτης, εκδοχής της μεθόδου TestRadio [19]. Η PER_Computation λαμβάνει ως ορίσματα το κανάλι συχνότητας που επιθυμούμε να ελέγξουμε για το μέγεθος της παρεμβολής, καθώς και τον αριθμό των πακέτων που θα σταλούν κατά τη διαδικασία. Κάθε κλήση αυτής, περιλαμβάνει δύο σύνολα κόμβων: εκείνον που καλεί τη συνάρτηση, ο οποίος ονομάζεται *Initiator*, και τους κόμβους οι οποίοι μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας με τον Initiator, τους *In-Range* κόμβους. Σχετικά με τους τελευταίους, είναι αυτοί οι κόμβοι με τους οποίους σχηματίζονται τα link των οποίων το PER επιζητούμε.

Το διάγραμμα ροής για τη συνάρτηση PER_Computation απεικονίζεται στην εικόνα 23 που ακολουθεί. Σύμφωνα με το διάγραμμα, ο Initiator στέλνει μηνύματα εντολών στους In-Range κόμβους, προστάζοντάς τους να αλλάξουν (channel switch) στο κατάλληλο κανάλι, καθώς και να θέσουν την Ασύρματη Διεπαφή τους (Wireless Interface) σε κατάσταση λήψης (Rx mode). Κάθε ένας από αυτούς τους κόμβους ανταποκρίνεται είτε με ένα αναγνωριστικό μήνυμα (acknowledgement) το οποίο υποδεικνύει τη συμμετοχή του στη διαδικασία, ή με ένα αρνητικό acknowledgement, σε περίπτωση που το Ποσοστό Εσφαλμένων Πακέτων του (PER) έχει ήδη υπολογιστεί για αυτό το κανάλι για το συγκεκριμένο link. Έπειτα, ο Initiator αλλάζει το κανάλι λειτουργίας του και αυτός στο υπό εξέταση κανάλι, και εκπέμπει (broadcast) έναν αριθμό πακέτων (καθορίζεται ο αριθμός από το όρισμα της PER_Computation). Ο Initiator θα πρέπει να αλλάξει και αυτός στο επιθυμητό προς αξιολόγηση κανάλι γιατί αλλιώς δεν θα μπορούσε να επικοινωνήσει με τους In-Range κόμβους, ενώ αλλάζει τελευταίος κανάλι γιατί αλλιώς δεν θα μπορούσε να ενορχηστρώσει την αλλαγή καναλιών των επιθυμητών κόμβων αφού μόλις άλλαξε κανάλι θα έχανε κάθε επαφή με αυτούς. Ο In-Range κόμβοι με τη σειρά τους οι οποίοι έχουν δεσμευτεί να συμμετάσχουν στη διαδικασία αυτή οφείλουν να αποστείλουν πίσω τον αριθμό των συγκεκριμένων πακέτων που έλαβαν επιτυχώς. Η πληροφορία αυτή είναι επαρκής για τον Initiator να υπολογίσει τις τιμές του PER από το οποίο υποφέρουν τα links που τον συνδέουν με κάθε In-Range κόμβο.



Εικόνα 23. Το διάγραμμα ροής της PER_Computation

Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία ξεκινάει με την κλήση της συνάρτησης *PER_Computation* για την τρέχουσα συχνότητα, από τη μεριά του Gateway, που είναι ο πρώτος κόμβος που παίζει το ρόλο του Initiator. Για το παράδειγμα της παραπάνω τοπολογίας του σχήματος, οι κόμβοι S1 και S3 δρουν ως In-Range κόμβοι. Ο Initiator (ο Gateway στην προκειμένη περίπτωση) συλλέγει τις τιμές του PER για τα link που τον συνδέουν με όλους τους In-Range κόμβους και τις συγκρίνει με ένα PER κατωφλίου (*THRESHOLD*), πάνω από το οποίο η ποιότητα της επικοινωνίας θεωρείται μη αποδεκτή.

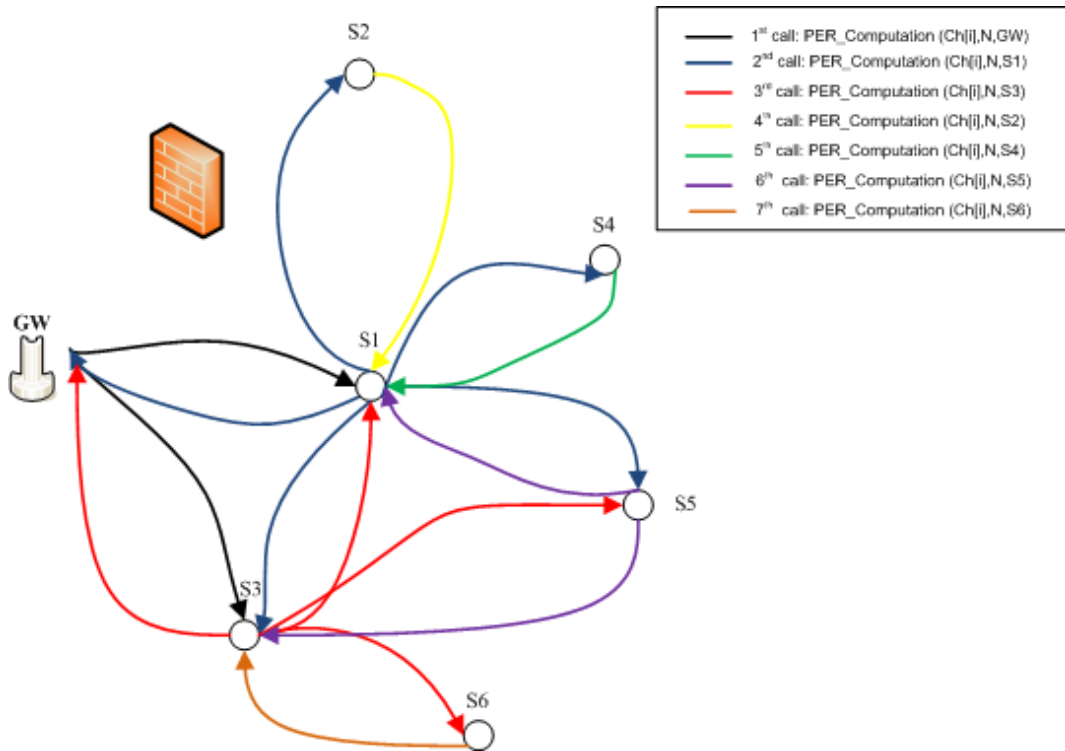
Αν υπάρχει έστω και ένας κόμβος με μη αποδεκτή τιμή PER, το συγκεκριμένο κανάλι απορρίπτεται και εξετάζεται το επόμενο –σύμφωνα με την ChPrio- κανάλι. Θα πρέπει να μην ξεχνάει κανείς ότι, ο στόχος της διαδικασίας αυτής είναι να βρεθεί ένα κανάλι λειτουργίας το οποίο επιτρέπει επαρκή συνδεσιμότητα των κόμβων ενός ΑΔΑ έκτακτης ανάγκης και, ως εκ τούτου, μια μεγάλη τιμή PER έστω και για ένα μόνο link αυτού, ενδέχεται να καθιστά το υπό εξέταση κανάλι ακατάλληλο για το σκοπό του. Σε μια τέτοια περίπτωση, δεν υπάρχει λόγος στο να επεκταθεί ο υπολογισμός του PER σε κόμβους οι οποίοι βρίσκονται πέρα από αυτό το βήμα, αφού αυτό θα σήμαινε σπατάλη πολλών σημαντικών πόρων του δικτύου (εξαιτίας του μεγάλου αριθμού πακέτων μέσα στο δίκτυο για το συγχρονισμό και τον υπολογισμό του PER).

Αντιθέτως, αν όλα τα link με τους In-Range κόμβους παρουσιάσουν αποδεκτές τιμές PER, ο αλγόριθμος συνεχίζεται με τον υπολογισμό του PER για τα link με τους υπόλοιπους κόμβους με παρόμοιο τρόπο (υπενθυμίζεται ότι οι κόμβοι που βρίσκονται πάνω από 2 hops μακριά από τον Gateway δεν απεικονίζονται στο διάγραμμα του αλγορίθμου). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει ξεκάθαρο το γεγονός ότι το παραπάνω κατώφλι δεν δύναται να ποσοτικοποιήσει απόλυτα την ποιότητα-στόχο της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων του υποκείμενου WSN, αν και το χαρακτηριστικό αυτό θα αναλυθεί περαιτέρω σε επόμενες παραγράφους της ίδιας ενότητας. Σε σχέση με το παράδειγμα της τοπολογίας που παρουσιάστηκε παραπάνω, στο δεύτερο βήμα, οι κόμβοι S1 και S3 θα δράσουν ως οι Initiators της *PER_Computation* και οι κόμβοι S1, S2, S3, S4, S5 και S6, θα δράσουν ως οι In-Range κόμβοι. Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί, ωστόσο, ότι και οι κόμβοι S1 και S3 βρίσκονται σε εμβέλεια (in range) μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι θα λάβουν μηνύματα εντολών ο ένας από τον άλλο για να δεσμευτούν στη διαδικασία του υπολογισμού του PER.

Πρέπει να παρατηρηθεί ωστόσο, ότι οι κόμβοι S1 και S3 είναι In-Range επίσης, ενοώντας ότι θα χρειαστεί να ενεργήσουν ως Initiators και In-Range κόμβοι, και το PER για το link τους θα υπολογιστεί και για τις κατευθύνσεις του συνδέσμου. Επιπλέον, οι S1 και S3 μπορεί να έχουν κοινούς In-Range κόμβους, όπως ο S5 στο παράδειγμά μας. Σε μια τέτοια περίπτωση, είναι πιθανό ότι ο S1 και ο S3 θα εκκινήσουν μια διαδικασία εκτίμησης PER με τον S5 ταυτόχρονα και, κατά συνέπεια, θα παρεμβάλουν ο ένας με τον άλλο. Αυτή απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στην ακολουθία των κλήσεων της *PER_Computation*, καθώς ο υπολογισμός του PER και για τις δυο κατευθύνσεις του (S1,S3) link δε μπορεί να διεξαχθεί ταυτόχρονα (σύμφωνα με τη συγκεκριμένη συνάρτηση, κανένας κόμβος δε μπορεί να δράσει ταυτόχρονα ως Initiator και In-Range κόμβος την ίδια στιγμή).

Ο Initiator κατέχει μια λίστα προτεραιότητας όλων των In-Range κόμβων του οι οποίοι έχουν δεσμευτεί στην διαδικασία υπολογισμού του PER. Όταν ο Initiator ειδοποιηθεί από τον Gateway προκειμένου να ενημερώσει τους κόμβους του επόμενου άλματος να εκκινήσουν εκείνοι τη διαδικασία *PER_Computation*, τους ενημερώνει απλά ακολουθιακά

έτσι ώστε ένας κόμβος να δράσει ως Initiator μόνο όταν οι προηγούμενοι κόμβοι στην λίστα προτεραιότητας έχουν υπολογίσει τις κατάλληλες τιμές PER και έχουν ολοκληρώσει τις εργασίες τους. Πρέπει να σημειωθεί ότι η σειρά των κόμβων στη λίστα προτεραιότητας των γονέων τους δεν είναι σημαντική, ως εκ τούτου, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, μπορεί να υποθεθεί ότι ο S1 θα δράσει καταρχήν ως Initiator και θα υπολογίσει τις τιμές του PER για link (S1,S2), (S1,S4), (S1,S5) και (S1,S3) κι έπειτα, ο S3 θα εκκινήσει τη διαδικασία και θα υπολογίσει τις τιμές PER για τα εναπομείναντα links (S3,S1) και (S3,S6). Η ακολουθία των κλήσεων της λειτουργίας PER_Computation για το παράδειγμα της απλής τοπολογίας που παρουσιάστηκε παραπάνω φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 24. Η ακολουθία των κλήσεων της λειτουργίας PER_Computation

Από τη στιγμή που οι τιμές του PER για όλα τα link του υποκείμενου WSN έχουν υπολογιστεί για ένα συγκεκριμένο κανάλι, αυτές αποστέλλονται πίσω στον Gateway. Εκεί συγκρίνονται με μια σταθερή τιμή PER – «στόχο» (συμβολίζεται στο διάγραμμα ως TARGET), η οποία αντιπροσωπεύει την απαιτούμενη ποιότητα επικοινωνίας. Αν όλες οι υπολογισμένες τιμές είναι μικρότερες από αυτό την τιμή «στόχο», τότε το τρέχον κανάλι επιλέγεται ως κατάλληλο για τη δεδομένη τοπολογία και η εκτέλεση του αλγορίθμου σταματάει.

Η παύση της περαιτέρω εξέτασης καναλιών είναι λογική, αφού δεδομένου ότι έχει βρεθεί το κανάλι εκείνο το οποίο θα μπορούσε επιτυχώς να καλύψει τις ανάγκες επικοινωνίας τους υποκείμενου WSN, δεν θα είχε νόημα να συνεχίσει η χρονοβόρα και ενεργοβόρα εξέταση και άλλων καναλιών. Έτσι, εξοικονομούνται σημαντικοί πόροι και αποφεύγεται η χωρίς λόγο κατασπατάληση των αποθεμάτων ενέργειας των κόμβων του προς μελέτη WSN.

Σε περίπτωση, τώρα, όπου έστω και μια από τις υπολογισμένες τιμές είναι μεγαλύτερη από αυτή την τιμή «στόχο», τότε η ίδια διαδικασία εκτελείται για το επόμενο κανάλι στην ουρά προτεραιότητας ChPrio μέχρις ότου βρεθεί εκείνο το κανάλι όπου όλα τα link του εξεταζόμενου δικτύου θα θεωρούνται ποιοτικά και ικανά να καλύπτουν τις ανάγκες του υποκείμενου WSN. Στην ακραία δε περίπτωση που όλα τα κανάλια του 802.15.4 προτύπου της ChPrio ελεγχθούν, ωστόσο κανένα δεν ικανοποιεί τη συνθήκη του PER «στόχου», επιλέγεται το κανάλι με το μικρότερο μέσο όρο PER μεταξύ των link όλων των κόμβων του δικτύου.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να παρατηρηθεί το γεγονός ότι τα κανάλια από τα οποία θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη επιλογή θα είναι αυτά για τα οποία το σύνολο των link του υποκείμενου προς μελέτη WSN δεν ξεπερνούν το THRESHOLD PER (ειδάλλως, θα είχε απορριφθεί πρώτα η εξέταση τους και δεν θα είχε συλλέγει το σύνολο των μετρήσεων που αφορούν τα link ολόκληρου του WSN), αλλά και δεν είναι μικρότερες και από το TARGET PER (ειδάλλως το πρώτο από αυτά τα κανάλια το οποίο θα είχε βρεθεί θα είχε επιλεγεί ως καταλληλότερο και θα είχε επιλεγεί αφού πρώτα θα σταμάταγε η εκτέλεση του αλγορίθμου).

Προφανώς, διάφορες εναλλακτικές τακτικές επιλογής καναλιού μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτό το σημείο προς την συγκεκριμένη κατεύθυνση: Για παράδειγμα, κάποιος θα μπορούσε να επιζητήσει το κανάλι όπου ελαχιστοποιείται το μέγιστο PER που χαρακτηρίζει τα σχηματιζόμενο link μεταξύ των κόμβων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι και η τιμή του PER κατωφλίου (THRESHOLD) και το PER στόχος (TARGET) θεωρούνται σταθερές τιμές και θα πρέπει να έχουν καθοριστεί εκ των προτέρων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής όσον αφορά της ποιότητας σύνδεσης και την ποσοστιαία συνδεσιμότητα των κόμβων.

Κεφάλαιο 6^ο : Μια πρώτη υλοποίηση της προταθείσας στη [17] λειτουργικότητας

6.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το πρώτο βήμα του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε είναι να υπολογιστεί το PER για κάθε link με κάθε κόμβο που είναι τοποθετημένος ένα βήμα (hop) μακριά από τον Gateway. Αυτός ο υπολογισμός πραγματοποιείται με τη χρήση της συνάρτησης *PER_Computation*. Όπως δείχνει και η εικόνα 22, η *PER_Computation* λαμβάνει ως ορίσματα το κανάλι συχνότητας που επιθυμούμε να ελέγξουμε για το μέγεθος της παρεμβολής, καθώς και τον αριθμό των πακέτων που θα σταλούν κατά τη διαδικασία.

6.2. Περιβάλλον Ανάπτυξης

Το υποκείμενο πρόγραμμα υλοποιήθηκε στα πλαίσια του περιβάλλοντος του λειτουργικού συστήματος TinyOS-1.x, το οποίο χρησιμοποιούν οι κόμβοι – αισθητήρες Imote2 [32] που χρησιμοποιήσαμε στο σύστημά μας.

Ο υπολογιστής στον οποίο αναπτύχθηκε το συγκεκριμένο εργαλείο διέθετε το λειτουργικό σύστημα Microsoft WindowsXP, για το λόγο αυτό χρειάστηκε να εγκαταστήσουμε το πρόγραμμα Cygwin, το οποίο προσομοιώνει περιβάλλον UNIX (Linux) – το οποίο απαιτεί το TinyOS τόσο για τον προγραμματισμό εφαρμογών όσο και για την παροχή των αντίστοιχων αποτελεσμάτων εξόδου - μέσα σε περιβάλλον Windows.

Αφού, λοιπόν, εγκαταστάθηκαν όλα τα απαραίτητα packages για την εγκατάσταση του Cygwin, καθώς και ρυθμίστηκαν όλες οι επιμέρους λεπτομέρειες (μεταβλητές περιβάλλοντος, μεταβλητές συστήματος, κτλ), συνεχίσαμε με την εγκατάσταση του πηγαίου κώδικα του TinyOS-1.x και τη διαμόρφωση του αντίστοιχου δέντρου αρχείων. Αφού μεταφορτώθηκε η νεότερη έκδοση του κώδικα από τα αντίστοιχα repositories, ο κώδικας έγινε compile ώστε να προκύψει το τελικό εκτελέσιμο το οποίο θα είναι πλήρως συμβατό με το φιλοξενόν σύστημα.

Επειτα πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση του NesC Compiler. Η NesC είναι η γλώσσα η οποία χρησιμοποιούν οι εφαρμογές του TinyOS, και πρόκειται για μια παραλαγή της κλασικής C, η οποία όμως αναπτύχθηκε αποκλειστικά για τη χρήση σε εφαρμογές δικτύων αισθητήρων.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε ότι το TinyOS είναι ένα δωρεάν και open source λειτουργικό σύστημα – πλατφόρμα, βασισμένη σε οντότητες, που στοχεύει στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Πρόκειται για ένα ενσωματωμένο λειτουργικό σύστημα γραμμένο σε γλώσσα nesC, ως ένα σύνολο συνεργαζόμενων διεργασιών και διαδικασιών (tasks and processes). Προορίζεται για να χρησιμοποιηθεί και στο πρόγραμμα Smartdust [26]. Το TinyOS ξεκίνησε ως μια συνεργασία του πανεπιστημίου της Καλιφόρνια και του Berkeley με την Intel Research και την εταιρία Crossbow Technology (η οποία κατασκευάζει και τους Imote2) και από τότε έχει εξελιχθεί σε μια παγκόσμια κοινοπραξία, την TinyOS Alliance.

Τέλος, εγκαταστάθηκε το πακέτο εργαλείων Wasabi της Intel, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να προκύψουν τα binary images από τις εφαρμογές του Imote2 σε

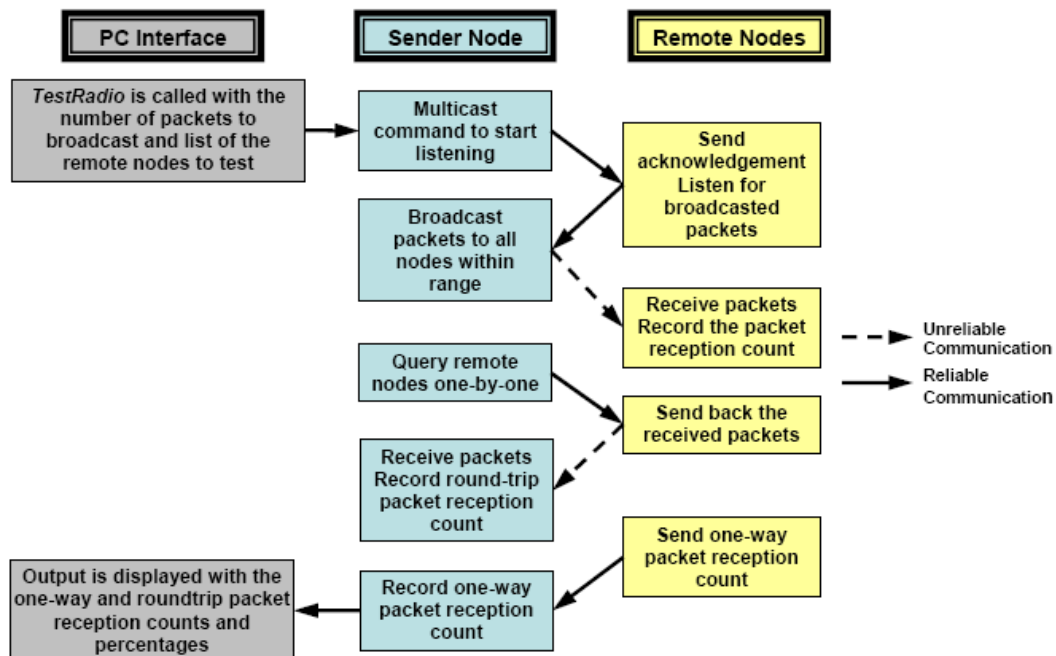
γλώσσα C που δημιουργούνται από το NesC compiler. Η φόρτωση του δημιουργημένου πρωτογράμματος πραγματοποιείται μέσω της χρήσης μια θύρας USB και του build-in module λογισμικού iMoteUSBLoader.exe.

6.3 Αναλυτική περιγραφή της υλοποίησης

Το υλοποιούμενο module κώδικα στηρίχθηκε πρωτίστως στον σχεδιασμό της μεθόδου PER_Computation η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 22 πιο πάνω. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε ότι ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης μεθόδου στηρίζεται κυρίως στην μέθοδο TestRadio η οποία έχει αναπτυχθεί από το *Illinois Structural Health Monitoring Project (ISHMP)* [27]. Θα ήταν, λοιπόν, αρκετά χρήσιμο να παρουσιαστεί - σχετικά περιληπτικά- το πρόγραμμα TestRadio και η λειτουργικότητά του, πράγμα το οποίο θα βοηθήσει και στην μετέπειτα περιγραφή και κατανόηση της δικής μας υλοποίησης.

6.3.1 Η μέθοδος TestRadio του ISHMP[27]

Ο κύριος σκοπός ύπαρξης της εφαρμογής αυτής είναι ο έλεγχος της ποιότητας επικοινωνίας που υπάρχει μεταξύ ενός συγκεκριμένου κόμβου, και των υπόλοιπων που βρίσκονται στην εμβέλεια εκπομπής του. Η αξιολόγηση της ποιότητας επικοινωνίας γίνεται μέσω της καταγραφής του ποσοστού απώλειας πακέτων (PER) που χαρακτηρίζει την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ δυο κόμβων ενός δικτύου. Ο βασικός μηχανισμός της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι απλός, παρουσιάζεται παρακάτω σχηματικά, και σημειώνονται έπειτα τα βασικότερα σημεία της όλης διαδικασίας:



Εικόνα 25. Ο loopback μηχανισμός της μεθόδου TestRadio [27]

- Μέσω ενός «PC interface» », δηλαδή ενός υπολογιστή ο οποίος είναι συνδεδεμένος μέσω καλωδίου USB ή μέσω σειριακού καλωδίου με ένα “Sender Node”, καλείται η εφαρμογή TestRadio για τον συγκεκριμένο κόμβο του δικτύου. Η κλήση της εφαρμογής έχει ως ορίσματα το πλήθος των πακέτων που θα εκπέμψει ο κόμβος καθώς και τις ταυτότητες ID των επιθυμητών παραλήπτων.
- Ο κόμβος “Sender Node” αποστέλλει μέσω multicast επικοινωνίας μια εντολή σε όλους υποψήφιους παραλήπτες για να τεθούν σε mode listening, έτσι ώστε να δεχθούν μελλοντικά, απεσταλμένα από τον πρώτο πακέτα.
- Οι κόμβοι που λαμβάνουν το προαναφερθέν multicast πακέτο (ή αλλιώς οι Remote Nodes) τίθενται σε κατάσταση λήψης, καθώς επίσης αποστέλλουν ένα acknowledgement στον αρχικό κόμβο – αποστολέα.
- Ο “Sender Node” κόμβος - αποστολέας εκπέμπει (broadcast) τόσα dummy πακέτα (δηλαδή πακέτα δίχως χρήσιμα δεδομένα) όσα ορίστηκαν κατά την κλήση της TestRadio.
- Ο κάθε ένας από τους υπόλοιπους κόμβους, “Remote Nodes” λαμβάνει ένα μέρος (ή το σύνολο) των broadcast προαναφερθέντων πακέτων και καταγράφει τον αριθμό των ορθώς λαμβανόμενων.
- Έπειτα ο “Sender Node” ζητά από τον κάθε έναν κόμβο διαδοχικά να του αποστείλει πίσω όσα πακέτα έλαβε, κι εκείνος με τη σειρά του καταγράφει το πόσα πακέτα του επιστράφηκαν από τον κάθε τέτοιο κόμβο.
- Τέλος, κάθε ένας από τους “Remote Nodes” αποστέλλει πίσω και τον αριθμό των πακέτων που εκείνος κατέγραψε κατά την πρότερη λήψη των πακέτων.
- Αφού ολοκληρωθεί η όλη διαδικασία, το πρόγραμμα τυπώνει τον αριθμό των πακέτων που έλαβε ο κάθε ένας από τους κόμβους - παραλήπτες “Remote Nodes” και το αντίστοιχο ποσοστό επιτυχίας που προκύπτει, καθώς και τον αριθμό των πακέτων που επιστράφηκαν στον αρχικό κόμβο “Sender Node” (και αντίστοιχα το ποσοστό επιτυχίας).

6.3.2 Η υλοποίηση που εδώ πραγματοποιήθηκε

Όπως περιγράφηκε παραπάνω και στην ανάλυση του αλγορίθμου (Ενότητα 6.6), η όλη διαδικασία ξεκινάει όταν ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων εγκαθίσταται αρχικά σε μια περιοχή, ή όταν ένα ήδη εγκατεστημένο δίκτυο αντιμετωπίσει σημαντικές παρεμβολές από άλλα δίκτυα και συνεπώς απαιτηθεί να αλλάξει το κανάλι λειτουργίας του για να επιτύχει ικανοποιητικές επιδόσεις. Σε κάθε περίπτωση, ο Initiator μέσω της PER_Computation θα στείλει μια εντολή στους In-Range κόμβους για να τεθούν σε κατάσταση λήψης (listening mode). Το κανάλι που θα χρησιμοποιηθεί για αυτή την αρχική μετάδοση θα είναι είτε το default, σε περιπτώσεις ενός νεο-εγκαταστημένου δικτύου, ή το τρέχον κανάλι πάνω από το οποίο λειτουργεί ένα ήδη υπάρχον σε μια γεωγραφική περιοχή WSN. Στη συνέχεια, οι In-

Range κόμβοι οι οποίοι παραλαμβάνουν την συγκεκριμένη εντολή, υλοποιούν τις αντίστοιχες λαμβανόμενες συστάσεις και κατόπιν απαντούν πίσω στον Initiator με ένα θετικό acknowledgement για να τον ενημερώσουν σχετικά με την επιτυχή έκβαση της όλης διαδικασίας. Έπειτα, ο Initiator κάνει broadcast εκπομπή των dummy πακέτων που ορίστηκαν στην κλήση της PER_Computation, έτσι ώστε να υπολογιστεί το PER που χαρακτηρίζει την υποκείμενη επικοινωνία. Οι In-Range κόμβοι, με την σειρά τους, τα λαμβάνουν και καταγράφουν τον ακριβή αριθμό των όσων κατάφεραν να λάβουν ορθά και χωρίς καταστροφικά λάθη.

Στη συνέχεια, όπως ειπώθηκε νωρίτερα στην περιγραφή του αλγορίθμου, σκοπός είναι ο Initiator να υπολογίσει όλες τις τιμές PER που κατέγραψε και οι οποίες χαρακτηρίζουν την ποιότητα επικοινωνίας με κάθε ένα In-Range κόμβο. Επομένως, είναι εύλογο να σκεφτεί κανείς ότι η διαδικασία αποστολής των πακέτων που έλαβαν οι In-Range κόμβοι πίσω στον Initiator - όπως γίνεται στην περίπτωση της μεθόδου TestRadio - είναι εκτός από περιττή για το συγκεκριμένο μηχανισμό, χρονοβόρα, καθώς επίσης και στερεί πολύτιμους πόρους όπως η ενέργεια των κόμβων-αισθητήρων και η απόδοση του δικτύου. Ως εκ τούτου, μετά τη λήψη των πακέτων που απέστειλε ο Initiator και την καταγραφή του αριθμού αυτών από τους In-Range κόμβους, αρκεί για να υπολογιστεί από τον πρώτο το PER που χαρακτηρίζει την μεταξύ τους επικοινωνία η απλή ενημέρωση από τους τελευταίους σχετικά με τις τιμές του αριθμού των πακέτων τα οποία έλαβαν επιτυχώς, σε αντίθεση για παράδειγμα με τον τρόπο υπολογισμού του από την μέθοδο TestRadio.

Ο Initiator, λοιπόν, μετά το πέρας της προαναφερθείσας διαδικασίας είναι σε θέση να υπολογίσει την τιμή PER η οποία χαρακτηρίζει το εκάστοτε link, και κατ' επέκταση δύναται να ελέγχει το PER του κάθε link με κάθε ένα από τους επιμέρους κόμβους έτσι ώστε να εντοπίσει αν κάποια από τις τιμές αυτές PER υπερβαίνει το κατώφλι που έχει προκαθοριστεί από την εφαρμογή. Αν δεν είναι όλες οι τιμές PER αποδεκτές, αλλά έστω και για ένα link έχει καταγραφεί τιμή η οποία υπερβαίνει την τιμή κατωφλίου THRESHOLD PER, τότε ο Initiator δίνει εντολή στους In-Range κόμβους να αλλάξουν στο επόμενο κανάλι λειτουργίας – σύμφωνα με την ουρά προτεραιότητας ChPrio- κι έπειτα αλλάζει και ο ίδιος. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται εφόσον βρεθεί ένα κοινό αποδεκτό κανάλι ή εξαντληθούν όλα τα διαθέσιμα κανάλια. Για να χαρακτηριστεί ένα κανάλι κοινά αποδεκτό, θα πρέπει το σύνολο των τιμών PER οι οποίες αντιστοιχούν στα link του υποκείμενου WSN για το συγκεκριμένο κανάλι να μην υπερβαίνουν όχι μόνο την τιμή του κατωφλίου THRESHOLD, αλλά και αυτή του κατωφλίου TARGET PER. Στην περίπτωση όπου η δεύτερη συνθήκη ποτέ δεν ικανοποιηθεί κατά την διάρκεια του ελέγχου και των 16 καναλιών της ChPrio, τότε απλά επιλέγεται το κανάλι από τα υπόλοιπα για τα οποία τουλάχιστον η πρώτη συνθήκη έχει ικανοποιηθεί και το οποίο συγκεντρώνει τη μικρότερη μέση τιμή PER. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να επιλεγεί το κανάλι με την ελάχιστη τιμή μέγιστου –μεταξύ όλων των κόμβων- PER.

Κεφάλαιο 7^ο : Μετρήσεις

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αναλυτικά οι μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες πραγματικού περιβάλλοντος με σκοπό τόσο την πειραματική απόδειξη και επιβεβαίωση της ύπαρξης του Προβλήματος Συνύπαρξης Ετερογενών Δικτύων σε μια αλληλεπικαλυπτώμενη γεωγραφική περιοχή τα οποία λειτουργούν στην 2,4GHz μη-αδειοδοτημένη ISM ζώνη συχνοτήτων, όσο και την παρουσίαση της εύστοχης λειτουργίας της προτεινόμενης στην εργασία [17] προσέγγισης.

Στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μεμονωμένων μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για την πειραματική αξιολόγηση και επαλήθευση του – δεδομένου ως ένα βαθμό - προβλήματος συνύπαρξης (όσον αφορά το μέγεθος της παρεμβολής που προκαλείται και το πρόβλημα στην επικοινωνία) ενός δικτύου 802.15.4 σε κοινή περιοχή με άλλα δίκτυα των προτύπων IEEE 802.11, 802.15.1 ή και 802.15.4. Στο δεύτερο δε μέρος εφαρμόστηκε ένα πιο σύνθετο σενάριο έκτακτης κατάστασης (πχ ανίχνευσης φωτιάς), αρκετά αντιπροσωπευτικό και επαρκές, έτσι ώστε να εξεταστεί η ισχύς και η αποδοτικότητα του αλγορίθμου που περιγράφηκε στην ενότητα 6.6 , κύριο σκοπό του οποίου αποτελεί η εύρεση ενός καθολικά ποιοτικού καναλιού το οποίο θα δύναται να εξασφαλίσει την εύρυθμη λειτουργία του υποκείμενου WSN δικτύου ακόμα και σε περιπτώσεις μιας πιθανής έκτακτης ανάγκης.

7.1 Μεμονωμένες μετρήσεις για την επαλήθευση του προβλήματος συνύπαρξης (Coexistence Problem)

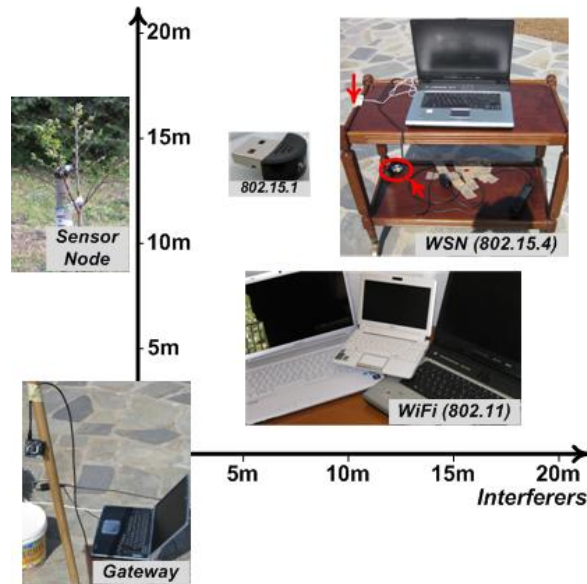
Οι θεωρητικές βάσεις όσο αφορά τις επιδόσεις των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (ΑΔΑ) που βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 υπό τις παρεμβολές δικτύων που βασίζονται στα πρότυπα IEEE 802.11 (WiFi) και 802.15.1 (Bluetooth) έχουν ήδη τεθεί σε προηγούμενες μελέτες [28,29]. Επιπλέον, πολλές πειραματικές μελέτες [18,30,31] έχουν εξετάσει τα προβλήματα συνύπαρξης με τα ίδια δίκτυα. Ωστόσο, εξ όσων μας είναι γνωστό, το να χρησιμοποιηθεί το Packet Error Rate (PER) ως ο κύριος δείκτης απόδοσης της λειτουργίας ΑΔΑ πραγματικών συνθηκών, όταν συνυπάρχουν με δίκτυα που βασίζονται στα πρότυπα IEEE 802.11 και 802.15.1 δεν έχει ακόμα μελετηθεί εκτενώς. Εκτός από αυτό, υπάρχει σχετικά λίγη βιβλιογραφία διαθέσιμη σχετικά με τα επίπεδα των παρεμβολών που δημιουργεί ένα ΑΔΑ βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.15.4 σε ένα όμοιο του, το οποίο λειτουργεί στο ίδιο κανάλι και στην ίδια γεωγραφική περιοχή.

Στη συγκεκριμένη ενότητα, παρουσιάζονται συγκεκριμένα αποτελέσματα μετρήσεων, τα οποία αποδεικνύουν την ύπαρξη παρεμβολών που προκαλούνται σε ένα ΑΔΑ του προτύπου IEEE 802.15.4, από άλλα 802.15.4, 802.11 καθώς και 802.15.1. Τα αποτελέσματα αυτά είναι απαραίτητα, για να δοθεί έπειτα έμφαση στην ανάγκη για τη χρήση του προτεινόμενου στην [17] εργαλείου ανίχνευσης φάσματος σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε, καθώς επίσης και στο να ισχυροποιηθεί το σενάριο έκτακτης κατάστασης που εφαρμόστηκε και αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

7.1.1 Γενικά – Περιγραφή τοπολογίας

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν αρχικά βασίστηκαν σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων το οποίο αποτελούνταν από δύο WSN κόμβους, έναν Gateway συνδεδεμένο με ένα PC Interface και ακόμα έναν κόμβο – αισθητήρα στο ρόλο του απομακρυσμένου κόμβου. Σχετικά με κάποιες λεπτομέρειες οι οποίες αφορούσαν το συγκεκριμένο δίκτυο είναι αρχικά ότι το εύρος εκπομπής και των δύο κόμβων που το αποτελούσαν ήταν 30 μέτρα χρησιμοποιώντας την build-in κεραία των συσκευών. Σε όλα τα πειράματα που διεξήχθησαν και ο Gateway και ο Κόμβος – Αισθητήρας κάνουν χρήση της τεχνικής Channel Assessment (CCA) mode 1 [33], και ως εκ τούτου, το χρησιμοποιούμενο κανάλι θεωρείται απασχολημένο εάν κάποια αυθαίρετη πηγή παρεμβολών προκαλέσει RSSI μεγαλύτερο ή ίσο των -77 dBm. Επιπλέον, και ο Gateway και ο απομακρυσμένος Κόμβος – Αισθητήρας τοποθετήθηκαν σε ύψος 1 μέτρο πάνω από το έδαφος, δεδομένου του ότι η ποιότητα επικοινωνίας έχει αποδειχθεί [16] ότι εξαρτάται έντονα από τον συγκεκριμένο παράγοντα. Τέλος, τα επίπεδα παρεμβολής που μετρήθηκαν εξαιτίας της συνύπαρξης των δικτύων IEEE 802.11, 802.15.1 και 802.15.4 με το αρχικό μας δίκτυο, εξάγονται μετακινώντας τα 3 διαφορετικά δίκτυα – παρεμβολείς σε διάφορες αποστάσεις από τον απομακρυσμένο μας κόμβο. Η τοπολογία του testbed παρουσιάζεται στην εικόνα 26 που ακολουθεί. Στον κατακόρυφο άξονα είναι τοποθετημένο το υπό εξέταση δίκτυο στο οποίο θέλουμε να μετρήσουμε την ποιότητα επικοινωνίας μεταξύ απομακρυσμένου κόμβου και Gateway. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται το εκάστοτε δίκτυο (ΑΔΑ, WiFi ή Bluetooth) το οποίο προκαλούσε τις παρεμβολές από διάφορες αποστάσεις.

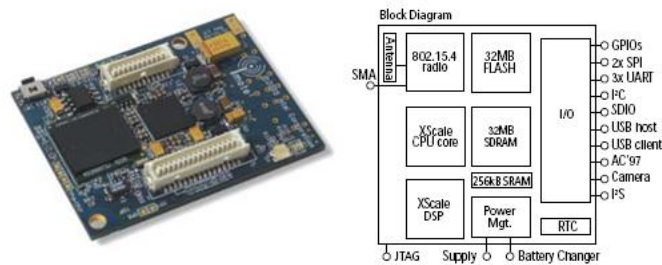
Οι παρεμβολές προκαλούνται από την ανταλλαγή αρχείων μεταξύ των κόμβων που αποτελούν το εκάστοτε δίκτυο-παρεμβολέα. Στην περίπτωση του IEEE 802.11 και του 802.15.1, δυο ασύρματες κάρτες PCI και δυο Bluetooth dongles, αντίστοιχα αντάλασσαν συνεχώς δεδομένα, ενώ στην περίπτωση των δύο συνυπαρχόντων ΑΔΑ 802.15.4, το δίκτυο-παρεμβολέας πραγματοποιούσε συνεχή ανταλλαγή πακέτων της τάξης των 80 bytes. Όλα τα δίκτυα – παρεμβολείς εκπέμπουν με μέγιστη ισχύ, όπως φαίνεται στον πίνακα της επόμενης υποενότητας στην οποία αναλύεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε. Συγκεκριμένα, το ΑΔΑ των Imote2 μετέδιδε με ισχύ 0 dBm, το δίκτυο Wifi 20 dBm, ενώ τα Bluetooth dongles με ισχύ 4 dBm (Bluetooth Class 2). Τέλος, ο υπολογισμός του PER κάθε φορά στον απομακρυσμένο κόμβο – αισθητήρα της τοπολογίας που μελετήσαμε, προκύπτει με τη χρήση της συνάρτησης PER_Computation με ορίσματα $Freq = 22$ (για τη εξέταση του καναλιού 22 του IEEE 802.15.4) και $N=100$ (ο αριθμός των πακέτων που αποστέλλονται κάθε φορά, ενώ ο Gateway είχε το ρόλο του Initiator.



Εικόνα 26. Η τοπολογία του testbed

7.1.2 Περιγραφή εξοπλισμού

Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που μελετήσαμε ως προς την παρεμβολή την οποία δέχεται – καθώς και το δεύτερο που χρησιμοποιήσαμε για την πρόκληση παρεμβολών- , αποτελούνταν από 2 Imote2 κόμβους – αισθητήρες της εταιρίας Crossbow Technology. Ο Imote2(IPR 2400) είναι μια προηγμένη πλατφόρμα κόμβου – αισθητήρα που είναι κατασκευασμένη γύρω από τον χαμηλής κατανάλωσης επεξεργαστή PXA2712 XScale και διαθέτει σύστημα Radio 802.15.4 το CC2420 με ενσωματωμένη κεραία 2.4 GHz. Ο Imote2 είναι μια «σπονδυλωτά» στοιβαζόμενη πλατφόρμα, πάνω στην οποία μπορεί κανείς να επεκταθεί με διάφορα boards επέκτασης, έτσι ώστε τελικά να διαμορφώσει το συγκεκριμένο σύστημα που επιθυμεί για κάποια εφαρμογή. Μέσω των υποδοχών επέκτασης, τα boards των αισθητήρων μπορούν να παρέχουν ειδικές αναλογικές ή ψηφιακές διεπαφές. Ένα battery board είναι παρέχει την απαραίτητη ενέργεια στον Imote2, ωστόσο μπορεί να τον τροφοδοτήσει κανείς και μέσω διεπαφής USB.



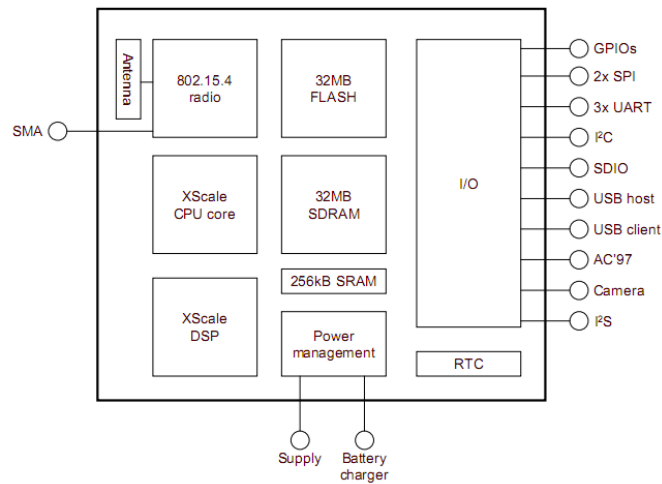
Εικόνα 27

Στον πίνακα και τις εικόνες που ακολουθούν [32] φαίνονται αναλυτικά βασικά χαρακτηριστικά του Imote2:

Processor/Radio Board	IPR2400	Remarks
CPU		
Processor	Intel PXA271	
SRAM Memory	256 kB	
SDRAM Memory	32MB	
FLASH Memory	32MB	
POWER CONSUMPTION		
Current Draw in Deep Sleep Mode	390 μ A	
Current Draw in Active Mode	31 mA	13MHz, radio off
Current Draw in Active Mode	44 mA	13MHz, radio Tx/Rx
Current Draw in Active Mode	66 mA	104MHz, radio Tx/Rx
Radio		
Transceiver	TI CC2420	
Frequency Band (ISM)	2400.0 – 2483.5 MHz	
Data Rate	250 kb/s	
Tx Power	-24 – 0 dBm	
Rx Sensitivity	-94 dBm	
Range (line of sight)	~30 m	With integrated antenna
I/O		
USB Client (mini-B), USB Host		
UART 3x, GPIOs, I ² C, SDIO, SPI 2x, I ² S, AC97, Camera		
Power		
Battery Board	3x AAA	
USB Voltage	5.0 V	
Battery Voltage	3.2 – 4.5 V	
Li-Ion Battery Charger		
Mechanical		
Dimensions Imote2 Board	36mm x 48mm x 9mm	
Weight	12g	

Εικόνα 28

Block diagram



Εικόνα 29 Block diagram

Absolute maximum ratings

Supply voltage	V_{batt}	5.5	V
Charger input voltage	V_{chg}	10	V
Input voltage	V_{in}	$V_{CC,IO} \pm 0.3$	V
Storage temperature	T_s	-40 - 125	°C

Operating conditions

Temperature range	T_o	0 - 85	°C
Current in deep sleep mode	I_{sleep}	387	uA
Current in active mode (13 MHz, radio off)	I_{avg1}	31	mA
Current in active mode (13 MHz, radio Tx/Rx)	I_{avg2}	44	mA
Current in active mode (104 MHz, radio Tx/Rx)	I_{avg3}	66	mA

Εικόνα 30 Τεχνικές λεπτομέρειες Imote2

Το ad-hoc WiFi δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από δύο Laptops που διέθεταν την κάρτα ασύρματης δικτύωσης Intel PRO /Wireless 2200BG NIC. Το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας είναι 2400 – 2483 MHz.

*Εικόνα 31. Ad-hoc δίκτυο μεταξύ δύο Laptop*

Τα Bluetooth dongles που χρησιμοποιήθηκαν λειτουργούσαν στην περιοχή συχνοτήτων των 2400 – 2483.5 MHz, διέθεταν Class 2 κεραία η οποία συνεπάγεται ισχύ μετάδοσης της τάξης των 4 dBm και η ταχύτητα μετάδοσης ήταν 3 Mb/s.

*Εικόνα 32. Bluetooth dongles*

Παρακάτω απεικονίζονται συγκεντρωτικά τα βασικά χαρακτηριστικά και των 3 διαφορετικών δικτύων (IEEE 802.15.4, 802.15.1 και 802.11) που χρησιμοποιήσαμε στις μετρήσεις:

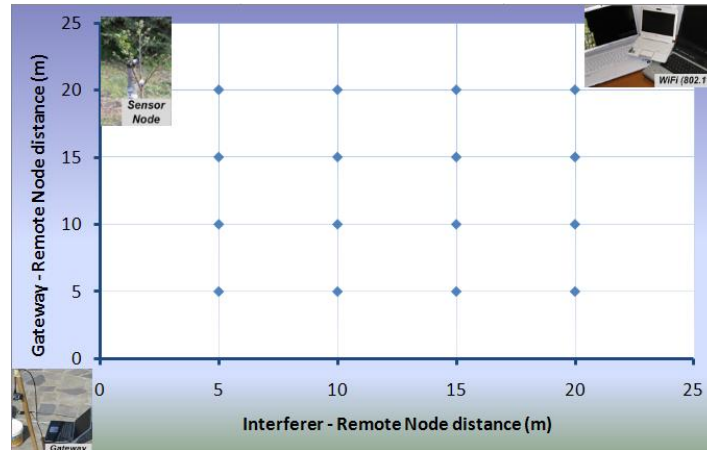
	Imote2 Sensors	Bluetooth Dongles	Intel PRO /Wireless 2200BG NIC
Frequency	(2400.0 – 2483.5 MHz)	2400 – 2483.5 MHz	2400-2483 MHz (DSSS-OFDM)
Processor	PXA271 XScale® Processor at 13–416MHz	-	-
Memory	256kB SRAM, 32MB FLASH, 32MB SDRAM	-	-
Chassis Radio Antenna	Thin, plastic film bags Integrated 802.15.4 Radio Integrated 2.4GHz Antenna	Laptop/Netbooks Bluetooth Class 2 2dBi PCB Antenna	Laptop/Netbook 802.11g Integrated 2.4GHz Antenna
Transmission Power	-24 – 0 dBm	4 dBm (Class 2)	20dBm
Transmission Rate	250 Kb/s	3 Mb/s	54 Mb/s
Transmission Range	30 m	10 m	30 m
Power Supply	Imote2 Battery Board	USB	Battery

7.1.3 Λεπτομέρειες μετρήσεων – Αποτελέσματα

7.1.3.1 Wi-Fi Interference

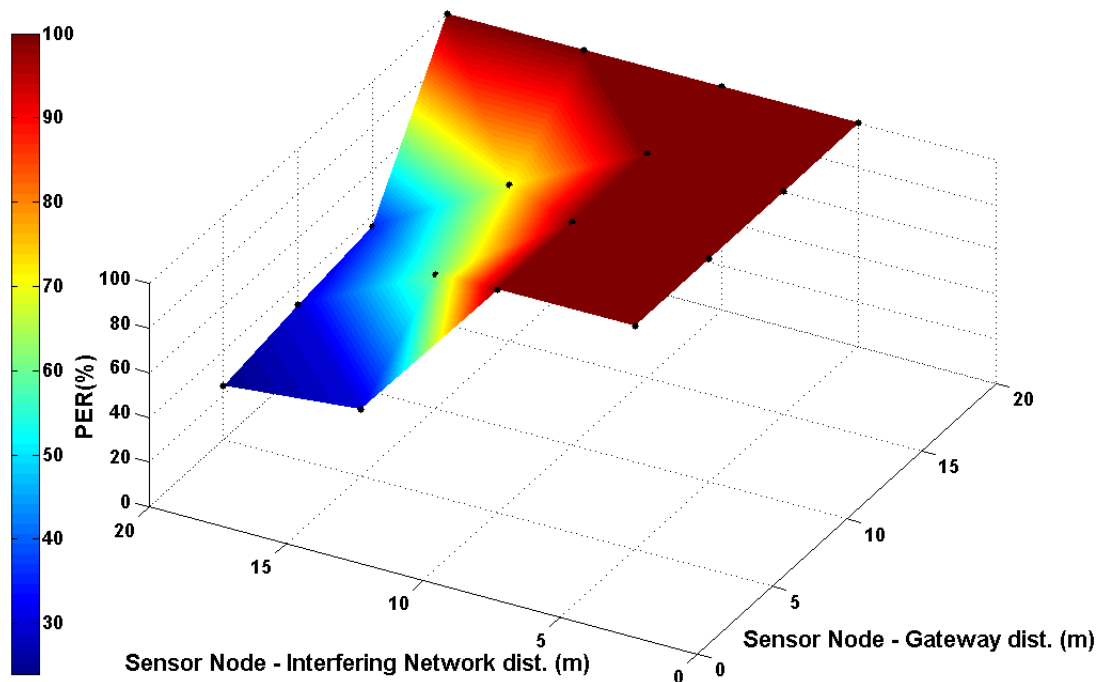
Αρχικά, μελετήθηκε το ύψος των παρεμβολών που προκαλεί πάνω σε ένα ΑΔΑ ένα δίκτυο WiFi βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.11b. Εξετάστηκε πρωτίστως η επίδραση που επιφέρει ένα τέτοιου είδους συνυπάρχον δίκτυο πάνω στο μελετούμενο ΑΔΑ, όταν το πρώτο βρίσκεται σε διαφορετικές αποστάσεις κάθε φορά από το δεύτερο, καθώς και όταν το υποκείμενο ΑΔΑ εκπέμπει σε διαφορετικές στάθμες ισχύος. Το προς μελέτη ασύρματο δίκτυο αισθητήρων λειτουργεί στο κανάλι 22 του IEEE 802.15.4 και το επίπεδο ισχύος μετάδοσης είναι 0 dBm αρχικά, ενώ σταδιακά πέφτει ως τα -10 dBm. Αντίστοιχα το WiFi δίκτυο-παρεμβολέας λειτουργεί στο κανάλι 11 το οποίο επικαλύπτεται με το 22 του 802.15.4, ενώ η ισχύς μετάδοσης του είναι 20 dBm. Οι αποστάσεις μεταξύ του Κόμβου Αισθητήρα - Gateway καθώς και Κόμβου Αισθητήρα – δίκτυο-παρεμβολέας IEEE 802.11 κυμαίνονταν από 5 έως 20 μέτρα, και στις δύο περιπτώσεις. Αυτό έγινε έτσι ώστε να υπολογιστεί το PER που χαρακτηρίζει την επικοινωνία μεταξύ των πρώτων, όχι μόνο για διάφορες αποστάσεις μεταξύ του Κόμβου-Αισθητήρα και του Δικτύου-Παρεμβολέα, αλλά και για διάφορες αποστάσεις μεταξύ Κόμβου Αισθητήρα και του Gateway. Το τελευταίο στηρίζεται στο γεγονός ότι η ποιότητα επικοινωνίας μεταξύ των δυο ΑΔΑ κόμβων εξαρτάται άμεσα εκτός από όλα τα άλλα και από την μεταξύ τους απόσταση, μιας και όσο πιο μεγάλη είναι αυτή, τόσο μεγαλύτερη η εξασθένηση του σήματος λόγω των φαινομένων εξασθένησης διάδοσης (propagation fading effects) κτλ. Στην εικόνα 33 που ακολουθεί απεικονίζονται (στα σημεία –

ρόμβους) όλοι οι συνδυασμοί των δύο διαφορετικών μεγεθών – αποστάσεων που προέκυψαν κατά την καταγραφή των μετρήσεων (αποστάσεις μεταξύ του Κόμβου Αισθητήρα - Gateway καθώς και Κόμβου Αισθητήρα – δίκτυο-παρεμβολέας IEEE 802.11).



Εικόνα 33. Οι διαφορετικοί συνδυασμοί των δύο μεταβλητών αποστάσεων που περιγράφηκαν, κατά τις μετρήσεις, υπό την παρεμβολή του ad-hoc WiFi δικτύου

Όπως έχει προαναφερθεί, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο επίπεδα ισχύος για το υπό μελέτη δίκτυο (IEEE 802.15.4): Ένα σε υψηλή ισχύ μετάδοσης, 0dBm, και ένα σε χαμηλότερη, -10 dBm. Ωστόσο, στο διάγραμμα που ακολουθούν περιλαμβάνεται μόνο εκείνο που απεικονίζει τα αποτελέσματα σε επίπεδο ισχύς 0 dBm, μιας και στη δεύτερη περίπτωση της χαμηλότερης ισχύος όλες οι τιμές του PER είναι 100%. Με το 100% εννοείται ότι είτε δεν υπήρχε καμία επιτυχημένη αποστολή πακέτου από τον Gateway στον κόμβο αισθητήρα, ή ότι η επικοινωνία μεταξύ των δύο κόμβων ήταν αδύνατη εξαιτίας πολύ δυσμενών συνθηκών παρεμβολής. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται επομένως οι τιμές του PER από το οποίο υποφέρει η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του μελετούμενου ΑΔΑ όταν αυτό λειτουργεί σε ισχύ μετάδοσης 0 dBm και σε συνάρτηση των μεταβλητών αποστάσεων Gateway – απομακρυσμένου κόμβου και απομακρυσμένου κόμβου – δίκτυο παρεμβολών:

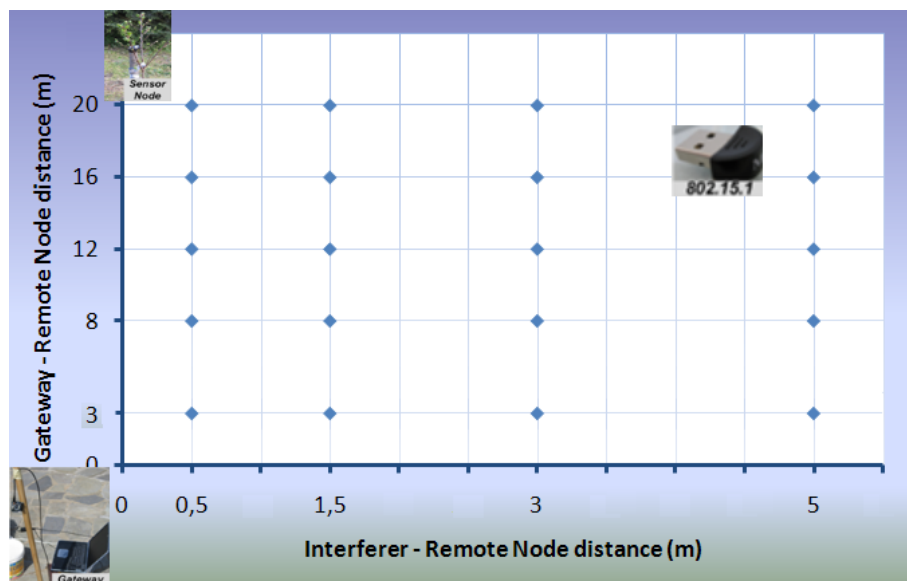


Εικόνα 34. Τιμές PER υπό παρεμβολή δικτύου IEEE 802.11 όταν το IEEE 802.15.4 λειτουργεί σε υψηλή ισχύ μετάδοσης.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η τιμή του PER μεγιστοποιείται (100%) - ανεξάρτητα από την απόσταση του Wi-Fi δικτύου που προκαλεί τις παρεμβολές – όταν ο απομακρυσμένος Κόμβος – Αισθητήρας βρίσκεται στη μεγαλύτερη απόσταση από τον Gateway, δηλαδή 20 μέτρα. Στην περίπτωση αυτή λόγω της υπερβολικής εξασθένησης σήματος, το υπό εξέταση δίκτυο δείχνει πολύ ευάλωτο σε οποιοδήποτε μέγεθος παρεμβολής – στα πλαίσια του WiFi Interferer-. Για μικρότερες αποστάσεις Sensor Node-Gateway, όπως 5 και 10 μέτρα, η επίδραση που έχει το WiFi δίκτυο στην ποιότητα του link που εξετάσαμε δείχνει να είναι αισθητά μικρότερη από την προαναφερθείσα όταν το πρώτο βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το WSN δίκτυο (20 ή 15 μέτρα), ωστόσο η τιμή του PER παραμένει σε υψηλά επίπεδα, της τάξης του 40 -70 %. Όταν όμως η απόσταση του WiFi δικτύου πέσει κάτω από τα 10 μέτρα, η επίδραση που έχει αυτό στο WSN δίκτυο –ανεξάρτητα από την απόσταση Remote Node-Gateway – είναι καταστροφική. Μπορεί να παρατηρήσει επιπλέον κανείς, ότι παρουσιάζεται μια συμμετρία στην επίδραση των δύο διαφορετικών μεταβλητών αποστάσεων όσον αφορά την τιμή του PER. Γενικότερα με μια πιο συνολική ματιά στο παραπάνω διάγραμμα γίνεται προφανές ότι το PER αυξάνει όταν αυξάνεται η απόσταση του Κόμβου – Αισθητήρα από τον Gateway ή μειώνεται η απόσταση του πρώτου από WiFi δίκτυο που προκαλεί τις παρεμβολές. Αυτό είναι λογικό, καθώς η λαμβανόμενη ισχύς για τον απομακρυσμένο κόμβο είναι μεγαλύτερη κοντά στον Gateway, επομένως χάνονται πολύ λιγότερα μηνύματα, ενώ η παρεμβολή αυξάνεται δραματικά όταν ο κόμβος αισθητήρας του υπό μελέτη δικτύου πλησιάζει την πηγή παρεμβολών. Επίσης, το PER επηρεάζεται αισθητά και από την ισχύ εκπομπής του Gateway: καθώς η τελευταία μειώνεται, το PER αυξάνεται. Αυτό είναι επίσης πολύ λογικό αφού ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) μειώνεται (αφού μειώνεται η ισχύς εκπομπής του Gateway, δηλαδή ο αριθμητής του SNR).

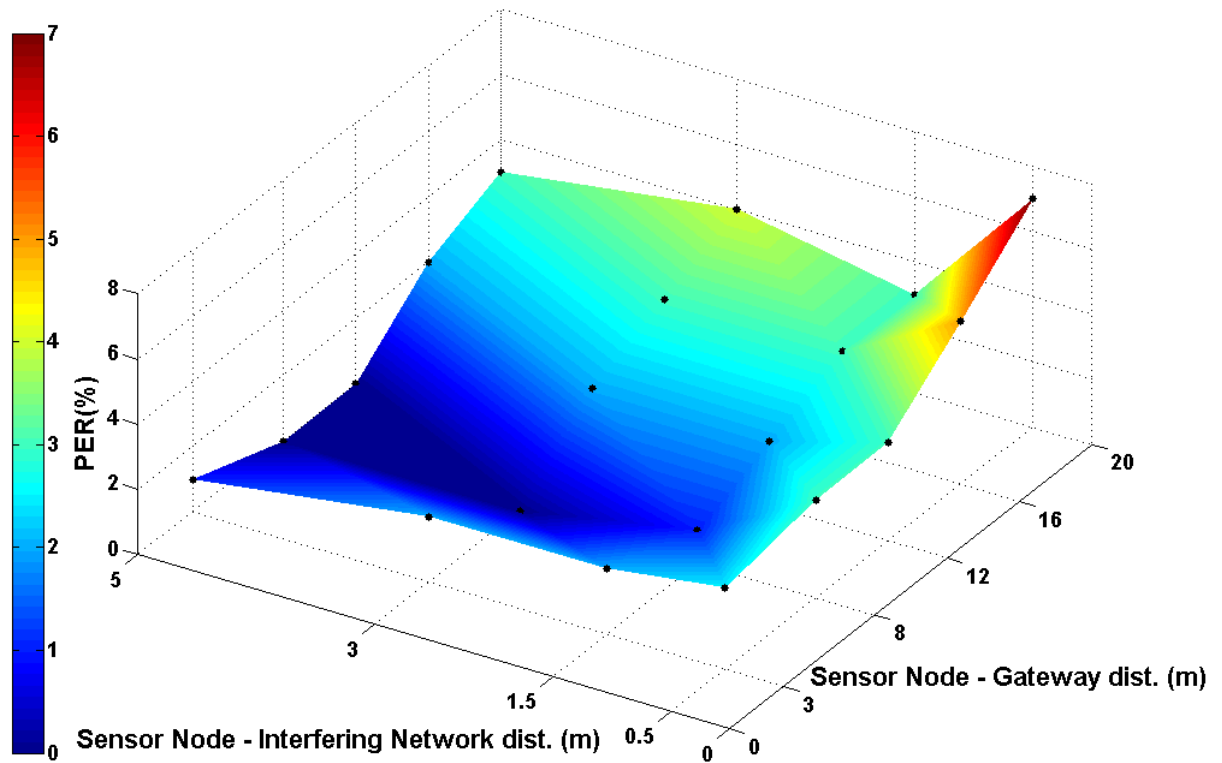
7.1.3.2 Bluetooth Interference

Η δεύτερη ομάδα μετρήσεων αφορούσε την καταγραφή των τιμών PER που παρουσιάζονται στον απομακρυσμένο κόμβο – αισθητήρα, όταν στην ίδια περιοχή λειτουργεί ένα δίκτυο προτύπου IEEE 802.15.1 (Bluetooth). Η απόσταση μεταξύ του Κόμβου Αισθητήρα - Gateway κυμαινόταν από 3 έως 20 μέτρα, ενώ η απόσταση Κόμβου Αισθητήρα – δίκτυο παρεμβολής IEEE 802.15.1 κυμαίνονταν από 0.5 έως 5 μέτρα. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται και πάλι οι συνδυασμοί των αποστάσεων μεταξύ του Κόμβου Αισθητήρα - Gateway καθώς και Κόμβου Αισθητήρα – δίκτυο-παρεμβολέας, όσον αφορά το Bluetooth δίκτυο αυτή τη φορά.

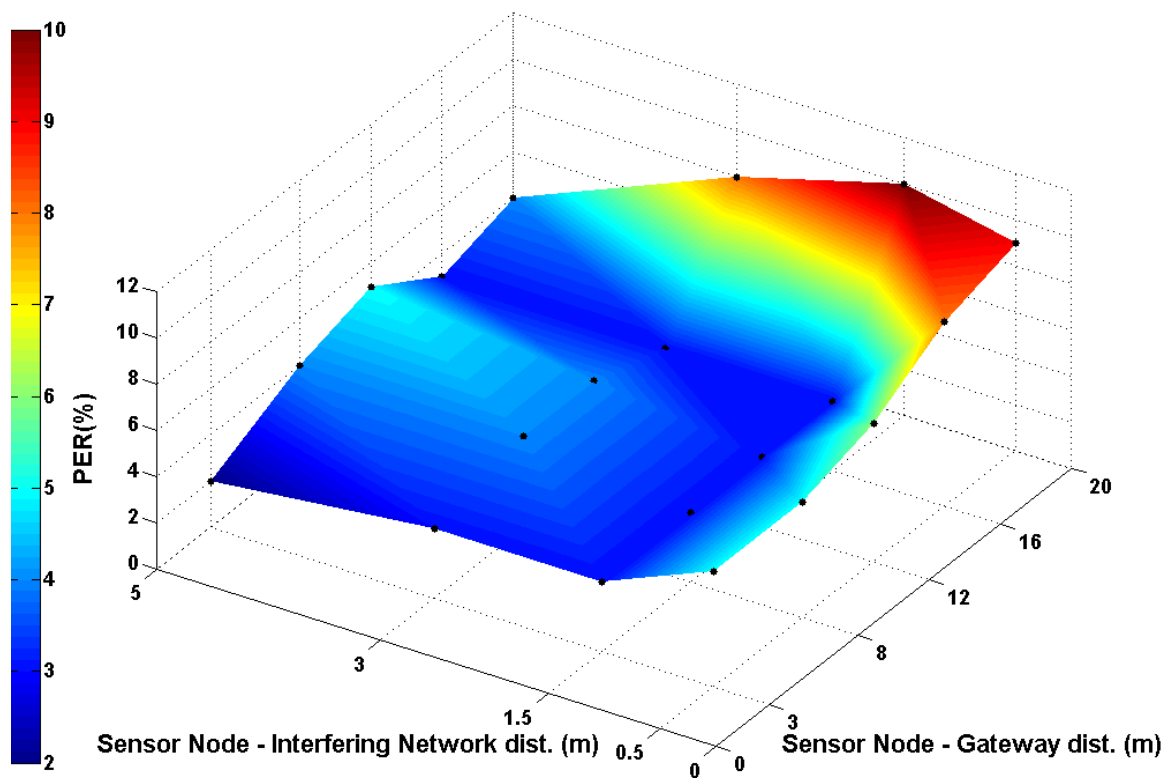


Εικόνα 35. Οι διαφορετικοί συνδυασμοί των δύο μεταβλητών αποστάσεων που περιγράφηκαν, κατά τις μετρήσεις, υπό την παρεμβολή του Bluetooth δικτύου

Το ασύρματο δίκτυο των αισθητήρων λειτουργούσε –όπως και στην προηγούμενη περίπτωση- στο κανάλι 22 του προτύπου IEEE 802.15.4. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν και πάλι σε δύο διαφορετικά επίπεδα ισχύος για το 802.15.4. δίκτυο: 0 dBm και -10 dBm. Τα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζουν τα σχετικά αποτελέσματα:



Εικόνα 36. Τιμές PER υπό παρεμβολή δικτύου IEEE 802.15.1 όταν το IEEE 802.15.4 λειτουργεί σε υψηλή ισχύ μετάδοσης.



Εικόνα 37. Τιμές PER υπό παρεμβολή δικτύου IEEE 802.15.1 όταν το IEEE 802.15.4 λειτουργεί σε χαμηλή ισχύ μετάδοσης.

Αρχικά μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι σε σχέση με την περίπτωση του WiFi Interferer, όπου η τιμή του PER έφτανε και το 100%, στην περίπτωση του IEEE 802.15.1 δικτύου οι επιπτώσεις που έχει η παρεμβολή του στην ποιότητα επικοινωνίας του υπό εξέταση WSN δικτύου μας, είναι εμφανώς λιγότερο δυσμενείς. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή που παρατηρείται στο PER είναι της τάξης του 10%.

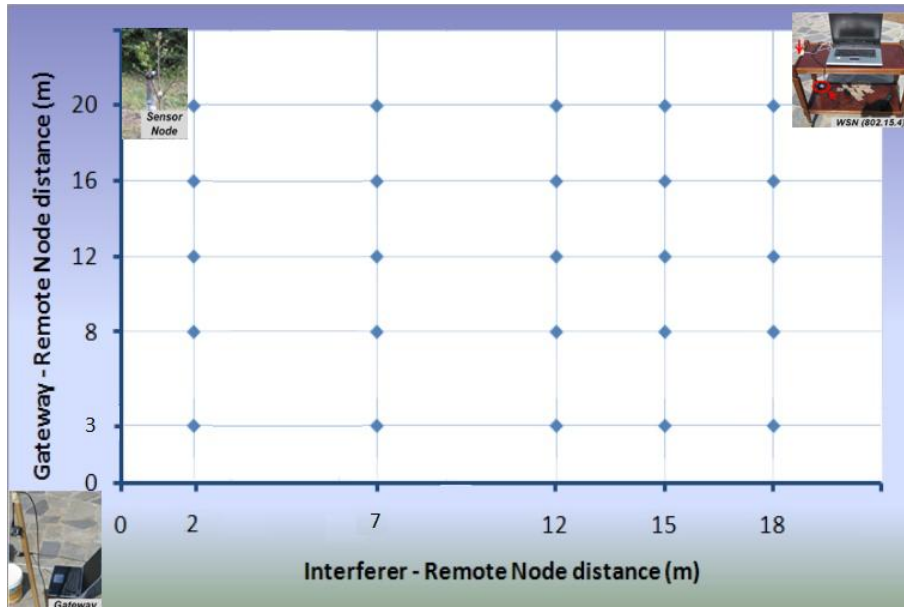
Στο πρώτο διάγραμμα που αφορά την υψηλή ισχύ μετάδοσης μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η τιμή του PER μειοτοποιείται (7%) όταν ο απομακρυσμένος Κόμβος – Αισθητήρας βρίσκεται στη μεγαλύτερη απόσταση από τον Gateway, δηλαδή 20 μέτρα και το δίκτυο Bluetooth βρίσκεται σε απόσταση 0,5 μέτρα από το υποκείμενο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή λόγω της υπερβολικής εξασθένησης σήματος που προκύπτει από τη μεγάλη απόσταση απομακρυσμένου κόμβου-Gateway, το υπό εξέταση δίκτυο δείχνει αρκετά ευάλωτο στις παρεμβολές του -γενικά ασθενέστερου σε σχέση ειδικά με το Wifi δίκτυο-IEEE 802.15.1 δικτύου. Για μικρότερες αποστάσεις Sensor Node-Gateway, όπως 5 και 10 μέτρα, η επίδραση που έχει το Bluetooth δίκτυο στην ποιότητα του link που εξετάσαμε δείχνει να είναι αισθητά μικρότερη από την προαναφερθείσα όταν το πρώτο βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το WSN δίκτυο (20 ή 15 μέτρα).

Όσον αφορά το δεύτερο διάγραμμα που αφορά τη χαμηλή ισχύ μετάδοσης, η διακύμανση της τιμής του PER συναρτήσει των δύο μεταβλητών αποστάσεων είναι αρκετά όμοια με αυτή της περίπτωσης υψηλής ισχύος μετάδοσης. Παρατηρείται απλά μια μετατόπιση στον κατακόρυφο άξονα (τιμή του PER) κατά 5% περίπου. Αυτό που συμβαίνει είναι απόλυτα λογικό, καθώς όταν το υπό εξέταση δίκτυο μεταδίδει σε χαμηλότερη ισχύ το SNR (σηματοθρομβικός λόγος) μειώνεται αρκετά, το επιθυμητό σήμα επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την παρεμβολή και επομένως η ποιότητα του link επιβαρύνεται.

Μπορεί να παρατηρήσει επίσης κανείς, αντίστοιχα με την περίπτωση του WiFi δικτύου, ότι παρουσιάζεται μια συμμετρία στην επίδραση των δύο διαφορετικών μεταβλητών αποστάσεων όσον αφορά την τιμή του PER. Γίνεται προφανές ότι το PER αυξάνει όταν αυξάνεται η απόσταση του Κόμβου – Αισθητήρα από τον Gateway ή μειώνεται η απόσταση του πρώτου από WiFi δίκτυο που προκαλεί τις παρεμβολές. Αυτό είναι λογικό, καθώς η λαμβανόμενη ισχύς για τον απομακρυσμένο κόμβο είναι μεγαλύτερη κοντά στον Gateway, επομένως χάνονται πολύ λιγότερα μηνύματα, ενώ η παρεμβολή αυξάνεται δραματικά όταν ο κόμβος αισθητήρας του υπό μελέτη δικτύου πλησιάζει την πηγή παρεμβολών. Επίσης, το PER επηρεάζεται αισθητά και από την ισχύ εκπομπής του Gateway: καθώς η τελευταία μειώνεται, το PER αυξάνεται. Αυτό είναι επίσης πολύ λογικό αφού ο σηματοθρομβικός λόγος (SNR) μειώνεται (αφού μειώνεται η ισχύς εκπομπής του Gateway, δηλαδή ο αριθμητής του SNR).

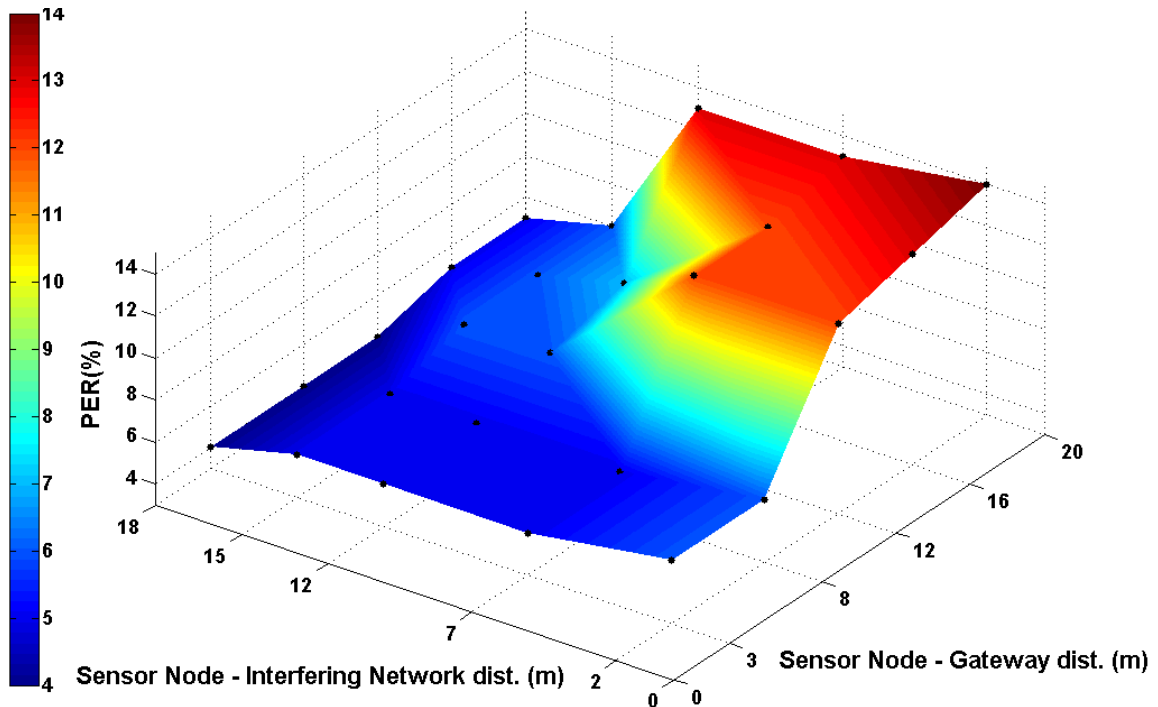
7.1.3.3 2nd WSN Interference

Τέλος, η τρίτη ομάδα μετρήσεων είχε να κάνει με δύο όμοια Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων IEEE 802.15.4 τα οποία λειτουργούν στο ίδιο κανάλι συχνοτήτων στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Πραγματοποιήθηκαν δύο καταγραφές PER για κάθε συνδυασμό αποστάσεων, μία σε υψηλά επίπεδα ισχύος (0 dBm) και μία σε χαμηλότερη (-10 dBm). Η απόσταση μεταξύ του Κόμβου Αισθητήρα - Gateway κυμαινόταν από 3 έως 20 μέτρα, ενώ η απόσταση Κόμβου Αισθητήρα – 2^ο δίκτυο IEEE 802.15.4 κυμαίνονταν από 2 έως 18 μέτρα:

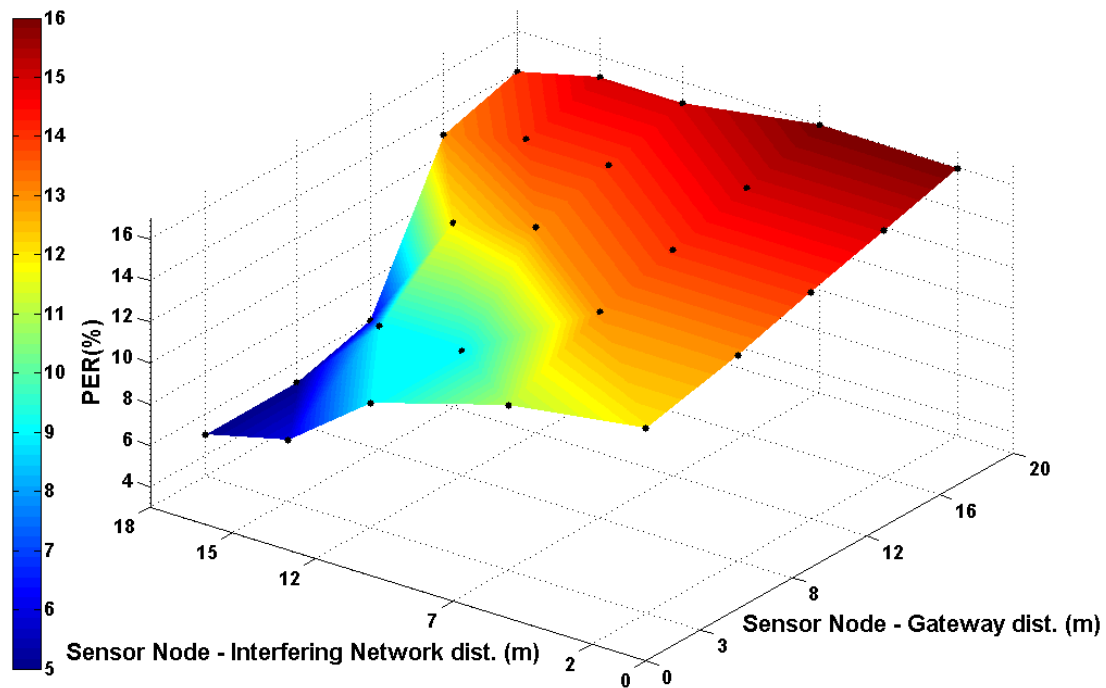


Εικόνα 38. Οι διαφορετικοί συνδυασμοί των δύο μεταβλητών αποστάσεων που περιγράφηκαν, κατά τις μετρήσεις, υπό την παρεμβολή του δεύτερου WSN δικτύου

Ακολουθούν τα διαγράμματα που απεικονίζουν τη διακύμανση της τιμής του PER συναρτήσει αυτών των αποστάσεων:



Εικόνα 39. Τιμές PER υπό παρεμβολή 2^{ου} IEEE 802.15.4 όταν το αρχικό IEEE 802.15.4 λειτουργεί σε υψηλή ισχύ μετάδοσης.



Εικόνα 40. Τιμές PER υπό παρεμβολή 2^{ου} IEEE 802.15.4 όταν το αρχικό IEEE 802.15.4 λειτουργεί σε χαμηλή ισχύ μετάδοσης.

Στο πρώτο διάγραμμα το οποίο απεικονίζει τη διακύμανση του PER όταν η ισχύς μετάδοσης του υπό εξέταση WSN είναι υψηλή, παρατηρούμε ότι τα επίπεδα της τιμής του PER διατηρούνται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα όταν ο Gateway βρίσκεται σχετικά κοντά με τον Remote Node. Μέχρι τα 8 μέτρα ,δηλαδή, απόστασης, η ποιότητα του link δε δείχνει να επηρεάζεται ιδιαίτερα από το δεύτερο WSN δίκτυο που προκαλεί παρεμβολές ακόμα και όταν αυτό πλησιάζει στα 2 μέτρα. Για την ακρίβεια, η μέγιστη τιμή PER που παρατηρείται είναι της τάξης του 4-5%. Ωστόσο, όταν η απόσταση του Remote Node αρχίζει να αυξάνεται, ενώ ταυτόχρονα το WSN που προκαλεί τις παρεμβολές πλησιάζει πιο κοντά από 15 μέτρα, η τιμή του PER αγγίζει το 14%.

Στην περίπτωση του δεύτερου διαγράμματος που αφορά τη χαμηλή ισχύ μετάδοσης, τα πράγματα όσον αφορά την ποιότητα του link όπως αυτή επηρεάζεται από τις παρεμβολές του δεύτερου WSN είναι αισθητά χειρότερα. Η τιμή του PER είναι σταθερά πάνω από 10%, ενώ αγγίζει και το 16%. Η μόνη περίπτωση που παρατηρείται μια σχετικά χαμηλή τιμή είναι και η βέλτιστη – δεδομένου του ζεύγους των μεταβλητών αποστάσεων- όπου το δίκτυο που παρεμβάλλει βρίσκεται 20 μέτρα μακριά από το υπό εξέταση WSN, ενώ ο Gateway με το Remote Node βρίσκονται στην ελάχιστη απόσταση των 2 μέτρων. Και πάλι, μπορεί κανείς να δικαιολογήσει απόλυτα τη διαφορά αυτή μεταξύ υψηλής και χαμηλής ισχύος μετάδοσης, λαμβάνοντας υπόψιν το πώς μεταβάλλονται τα μεγέθη του σηματοθορυβικού λόγου SNR.

7.1.3.4 Συνολικές παρατηρήσεις

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται προφανές ότι, σε όλες τις περιπτώσεις, το PER αυξάνει ότι αυξάνεται η απόσταση του Κόμβου – Αισθητήρα από τον Gateway ή μειώνεται η απόσταση του πρώτου από το εκάστοτε δίκτυο που προκαλεί τις παρεμβολές.

Αυτό είναι λογικό, καθώς η λαμβανόμενη ισχύς για τον απομακρυσμένο κόμβο είναι μεγαλύτερη κοντά στον Gateway, επομένως χάνονται πολύ λιγότερα μηνύματα, ενώ η παρεμβολή αυξάνεται δραματικά όταν ο κόμβος αισθητήρας του υπό μελέτη δικτύου πλησιάζει την πηγή παρεμβολών. Επίσης, το PER επηρεάζεται αισθητά και από την ισχύ εκπομπής του Gateway: καθώς η τελευταία μειώνεται, το PER αυξάνεται. Αυτό είναι επίσης πολύ λογικό αφού ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) μειώνεται (αφού μειώνεται η ισχύς εκπομπής του Gateway, δηλαδή ο αριθμητής του SNR). Άλλη σημαντική παρατήρηση είναι ότι τα σημαντικότερα προβλήματα παρεμβολών δημιουργούνται από το δίκτυο IEEE 802.11, ενώ η επίδραση του 2^{ου} 802.15.4 δικτύου είναι μικρότερη. Τέλος, οι συσκευές του IEEE 802.15.1 προτύπου δημιουργούν αξιοσημείωτα προβλήματα παρεμβολών μονάχα σε πολύ μικρές αποστάσεις στον υπό εξέταση Κόμβο – Αισθητήρα.

7.2 Σενάριο αξιολόγησης του αλγορίθμου

7.2.1 Εισαγωγή - Γενικά

Ως απόδειξη του σκεπτικού που αναπτύσσεται στον αλγόριθμο που αναφέρθηκε στην ενότητα 5.6, χρησιμοποιείται μια εφαρμογή στο πλαίσιο ενός σεναρίου συστήματος ανίχνευσης πυρκαγιάς, εφαρμογή η οποία ταιριάζει αρκετά με την έννοια της παρακολούθησης από ΑΔΑ καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Αναφορικά, οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν μια περίπτωση φυσικών καταστροφών που αποτελεί πραγματικότητα σε ένα όλο και αυξανόμενο αριθμό χωρών σε όλο τον κόσμο, εν μέρει λόγω της κλιματικής αλλαγής που επηρεάζει τα τελευταία χρόνια τον πλανήτη. Συνήθως εμφανίζονται σε αραιοκατοικημένες περιοχές, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα, ο εντοπισμός τους από τη μία καθώς και η καταστολή τους από την άλλη να είναι εξαιρετικά δύσκολα. Εξαιτίας της φύσης του φαινομένου, η γρήγορη και αποτελεσματική ανίχνευση μιας πυρκαγιάς θεωρείται εξαιρετικά σημαντική για την έγκαιρη και επιτυχή αντιμετώπισή της.

Επιπλέον, πολλά συστήματα πυρανίχνευσης έχουν δώσει έμφαση στις επιχειρήσεις υποστήριξης και διαχείρισης μετά την καταστροφή, με πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα την αρχιτεκτονική FireNet [34]. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, οι πυροσβέστες θα πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες για την παροχή δεδομένων σε έναν κεντρικό κόμβο σχετικά με το συνολικό χρόνο συμμετοχής τους στη διαδικασία διάσωσης, τη θέση τους, τη φυσική τους κατάσταση, καθώς επίσης και μετρήσεις σχετικά με το περιβάλλον στο οποίο δρουν, όπως για παράδειγμα η υγρασία, η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η πυκνότητα του καπνού και ούτω καθεξής. Τα δεδομένα αυτά θα μπορούσαν να αποτελέσουν αναφορές πραγματικού χρόνου από τους πυροσβέστες, καθιστώντας τα κέντρα επιχειρήσεων ικανά να καταστρώσουν πολύ πιο αποδοτικά σχέδια πυρόσβεσης, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζεται και η προστασία της ζωής των υποκείμενων πυροσβεστών που επιχειρούν.

Κατά παρόμοιο τρόπο, προσεγγίσεις όπως η [35] κάνουν χρήση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων για την –μετά την καταστροφή- ανίχνευση ανθρώπινης ζωής ή ύπαρξη σπάνιων ζωικών ειδών και την αποδοτική διάσωσή τους. Δυστυχώς, η πλειοψηφία των σημερινών συστημάτων ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών και των σχετικών προσεγγίσεων στη βιβλιογραφία [36-38], βασίζονται στην υπεραπλούστευση υποθέσεων σχετικά με ένα γνωστό κανάλι λειτουργίας, που επιλέγεται εκ των προτέρων για κάθε δίκτυο, παραβλέποντας το

ενδεχόμενο άλλες συσκευές ή δίκτυα να λειτουργούν επίσης στην ίδια γεωγραφική περιοχή δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα παρεμβολών στα πρώτα.

7.2.2 Περιγραφή τοπολογίας - εξοπλισμού

Η τοπολογία του δικτύου το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση του αλγορίθμου που περιγράφηκε παραπάνω [17] παρουσιάζεται στην εικόνα 41 παρακάτω. Η τοπολογία αυτή θεωρείται ενδεικτική, δεδομένου ότι μπορεί να υποστηρίξει όλες τις απαιτούμενες λειτουργίες για την υλοποίηση του συγκεκριμένου σεναρίου, καθώς επίσης θεωρείται σχετικά επαρκής για να αξιολογηθεί ο αλγόριθμος. Πιο συγκεκριμένα, η χρησιμοποιούμενη τοπολογία αποτελείται από ένα ήδη ανεπτυγμένο, μικρής κλίμακας Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων, στο οποίο έχουν αποδοθεί καθήκοντα συλλογής περιβαλλοντικών δεδομένων και έγκαιρης ανίχνευσης φωτιάς, ενώ ταυτόχρονα άλλα δίκτυα που προκαλούν παρεμβολές αναπτύσσονται «on-the-fly» όταν παρουσιαστεί ένα περιστατικό έκτακτης ανάγκης. Ωστόσο, η προαναφερθείσα μέθοδος μπορεί κάλλιστα να εφαρμοστεί και σε ευρύτερης κλίμακας ΑΔΑ τα οποία αποτελούνται από πολυάριθμους κόμβους και διάφορα μοντέλα συνδεσιμότητας. Η διαδικασία αξιολόγησης, ως εκ τούτου, στην παρούσα εργασία, μπορεί να θεωρηθεί μια μικρογραφία μιας μεγαλύτερης, πραγματικής ανάπτυξης δικτύου.



Εικόνα 41. Τοπολογία αξιολόγησης αλγορίθμου

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ανοιχτό χώρο, σε μια δασώδη περιοχή όπου δεν υπάρχουν υφιστάμενες παρεμβολές από ασύρματα τηλέφωνα (DECT) ή άλλες συσκευές που λειτουργούν στη ζώνη των 2.4 Ghz, ενώ χρησιμοποιήθηκε όμοιος εξοπλισμός με αυτόν που περιγράφηκε αναλυτικά παραπάνω, καθώς επίσης υιοθετήθηκαν και οι ίδιες παραδοχές (πχ απόσταση αισθητήρων από το έδαφος) με αυτές που ήδη αναφέρθηκαν στην ίδια ενότητα. Όπως φαίνεται, λοιπόν, και στην

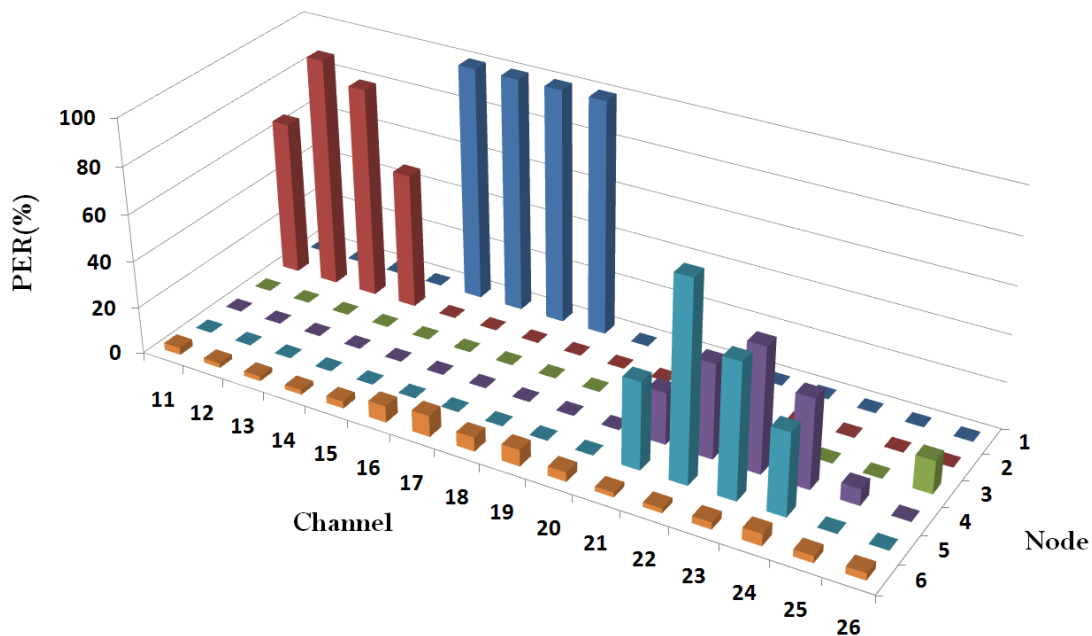
εικόνα 41, στο κέντρο της προς μελέτη τοπολογίας βρίσκεται ένας κόμβος-Gateway, ενώ άλλοι έξι κόμβοι – αισθητήρες (κόμβοι 1 έως 6 στο σχήμα) έχουν τοποθετηθεί σε αποστάσεις 20m, 10m, 20m, 16m, 15m και 20m από τον πρώτο αντίστοιχα. Το συγκεκριμένο δίκτυο αισθητήρων λειτουργούσε στο κανάλι 26 του IEEE 802.15.4 προτύπου και δεν παρατηρήθηκε κανενός είδους παρεμβολή (PER=0% και στους έξι κόμβους) κατά τη φάση της εγκατάστασης (πράγμα που αποδεικνύει τον προαναφερθέν ισχυρισμό της παντελούς έλλειψης παραγόντων πρόκλησης παρεμβολών στην υποκείμενη περιοχή).

Όπως αναφέρθηκε πριν, όταν εμφανίζεται ένα περιστατικό έκτακτης ανάγκης, πυροδοτείται η ανάπτυξη πολλών δικτύων έκτακτης ανάγκης στην ίδια γεωγραφική περιοχή για έναν αριθμό διαφορετικών λόγων. Στο σενάριο που αναλύεται, υποθέτουμε ότι ένα δίκτυο του προτύπου IEEE 802.11 (WiFi) που λειτουργεί στο κανάλι 5 έχει τοποθετηθεί σε απόσταση 10 μέτρων από τον κόμβο 1, όπως φαίνεται εικόνα 41. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμη και αν η χρήση των «μη-επικαλυπτόμενων» καναλιών 1, 6 και 11 του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 είναι αυτή που προτείνεται γενικά, η χρησιμοποίηση οποιουδήποτε άλλου (εκτός από τα κανάλια 12, 13 και 14 η χρήση των οποίων απαγορεύεται στην Βόρεια Αμερική) καναλιού είναι δυνατή. Δεδομένου ότι το κανάλι 5 του 802.11 προτύπου επικαλύπτεται με τα κανάλια 15, 16, 17 και 18 του προτύπου 802.15.4 (βλ. διάγραμμα ενότητας 3.1), μπορεί να θεωρηθεί ως δεδομένο ότι κυρίως ο Κόμβος 1 θα δέχεται παρεμβολές και θα παρουσιάζει υψηλό PER, εάν θα πρέπει να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε από αυτά τα κανάλια. Μια παρόμοια κατάσταση ισχύει και για τη λειτουργία του δικτύου IEEE 802.11 στο κανάλι 1, και σε απόσταση 15 μέτρα από τον Κόμβο 2. Πρόκειται να προκαλέσει παρεμβολές στα κανάλια 11, 12, 13 και 14 του IEEE 802.15.4 στην περιοχή γύρω από την οποία είναι τοποθετημένο και λειτουργεί κυρίως το συγκεκριμένο δίκτυο. Επιπλέον, άλλο ένα IEEE 802.11 δίκτυο το οποίο λειτουργεί στο κανάλι 11 έχει εγκατασταθεί σε αποστάσεις 15 και 20 μέτρα από τους Κόμβους 5 και 4 αντίστοιχα, προκαλώντας παρεμβολές στα κανάλια 21, 22, 23 και 24 του IEEE 802.15.4 σε αυτή τη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Εκτός από τα IEEE 802.11 δίκτυα, ένα IEEE 802.15.4 δίκτυο το οποίο λειτουργεί στο κανάλι 26 έχει αναπτυχθεί σε απόσταση 12 μέτρων από τον Κόμβο 3, καθώς κι ένα δεύτερο του ίδιου προτύπου το οποίο λειτουργεί στο κανάλι 25 έχει αναπτυχθεί σε απόσταση 12 μέτρων από τον Κόμβο 4. Κατά συνέπεια, κυρίως αυτοί οι δύο κόμβοι θα παρουσίαζαν αύξηση του PER σε περίπτωση που χρειαζόταν να λειτουργήσουν στα αντίστοιχα IEEE 802.15.4 κανάλια. Τέλος, ένα IEEE 802.15.1 (Bluetooth) δίκτυο είναι εγκατεστημένο σε μια απόσταση 0.5 μέτρων από τον Κόμβο 6, προκαλώντας παρεμβολές σε ολόκληρη τη ζώνη λειτουργίας, άρα και στο σύνολο των 802.15.4 καναλιών τα οποία είναι διαθέσιμα στον τελευταίου. Όλα τα παραπάνω στοιχεία απεικονίζονται γραφικά και με πλήρη λεπτομέρεια στην εικόνα 41.

7.2.3 Περιγραφή εκτέλεσης πειράματος

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, προτού εκδηλωθεί το περιστατικό έκτακτης ανάγκης, δεν παρατηρούταν καμία παρεμβολή σε κανέναν από τους Κόμβους – Αισθητήρες του υποκείμενου ΑΔΑ και ως εκ τούτου, το PER το οποίο χαρακτήριζε το σύνολο των link αυτού στο συγκεκριμένο κανάλι λειτουργίας του δικτύου (IEEE 802.15.4 κανάλι 26) ήταν 0%. Ωστόσο, μετά την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων έκτακτης ανάγκης που αναλύθηκαν προηγουμένως, ο φασματικός χάρτης συχνότητας άλλαξε ριζικά. Το διάγραμμα που

ακολουθεί (εικόνα 42) απεικονίζει το PER που θα παρουσίαζε κάθε ένας από τους Κόμβους (1 έως 6) της συγκεκριμένης τοπολογίας όταν δρούσε σαν παραλήπτης πακέτων απεσταλμένων από το ορισμένο Gateway σε περίπτωση που θα έπρεπε να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε από τα 16 προτεινόμενα κανάλια του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4. Ο χάρτης αυτός παράγεται εφαρμόζοντας την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.6, με τις τιμές ελέγχου ποιότητας της ενδιάμεσης ποιότητας *THRESHOLD* και *TARGET* να αγνοούνται παντελώς. Αν η τελευταία υπόθεση δεν είχε θεωρηθεί, οι έλεγχοι αυτοί θα διέκοπταν την εκτέλεση του αλγορίθμου ακριβώς μετά την εύρεση του πρώτου ικανοποιητικού καναλιού για ολόκληρο το ΑΔΑ, και δεν θα τροφοδοτούσαν την πειραματική διαδικασία με τα επιθυμητά δεδομένα. Μια ακόμα λεπτομέρεια η οποία θα πρέπει εδώ να σημειωθεί είναι ότι η προαναφερθείσα μεθοδολογία εφαρμόζεται για κάθε κόμβο με κάθε φορά ενεργοποιημένα στην περιοχή όπου βρίσκεται αναπτυγμένη η προς μελέτη τοπολογία τα αντίστοιχα ασύρματα δίκτυα - παρεμβολείς. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα είναι σύμφωνα τόσο με τη θεωρία του προβλήματος συνύπαρξης (Coexistence problem), όσο και με τα πειράματα που παρουσιάστηκαν στην παραπάνω ενότητα 7.



Εικόνα 42. Ο φασματικός χάρτης της τοπολογίας που περιγράφεται.

Σε περίπτωση, λοιπόν, που το ΑΔΑ που έχουμε θεωρήσει επιλέξει να συνεχίσει να λειτουργεί στο κανάλι 26, δηλαδή στο κανάλι που επιλέχθηκε κατά την φάση της εγκατάστασής του, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να αντιμετωπίσει σημαντικά προβλήματα παρεμβολών και να παρουσιαστούν υψηλά επίπεδα PER στα link που το απαρτίζουν. Δεδομένου ότι η προτεινόμενη στην [17] προσέγγιση μπορεί να διευκολύνει την επιλογή βέλτιστου IEEE 802.15.4 καναλιού για να λειτουργεί το συγκεκριμένο ΑΔΑ, η συμβολή της σε μια τέτοια περίπτωση θα μπορούσε να θεωρηθεί εξαιρετικά πολύτιμη. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο που προτείνεται στην [17], λοιπόν, η διαδικασία επιλογής καναλιού αρχικά ελέγχει το PER στο τρέχον κανάλι λειτουργίας του υπό εξέταση ΑΔΑ, το κανάλι 26 στην

προκειμένη περίπτωση. Όπως αναμενόταν, μετά τον υπολογισμό του PER, κάποια από τα link του υποκειμένου ΑΔΑ, όπως για παράδειγμα αυτό που συνδέει το Gateway με τον Κόμβο 3 (πράγμα λογικό καθώς ο Κόμβος 3 βρίσκεται 12 μέτρα μακριά από ένα δεύτερο ΑΔΑ που λειτουργεί στο ίδιο κανάλι και προκαλεί παρεμβολές), παρουσιάζουν PER το οποίο καθιστά το 26 ένα κανάλι μερικώς αποδεκτής ποιότητας. Ο χαρακτηρισμός ως μερικώς αποδεκτής ποιότητας για ένα κανάλι μεταφράζεται ως το γεγονός ότι οι τιμές PER για όλα τα link του υποκειμένου ΑΔΑ είναι μικρότερες από την καθορισμένη τιμή *THRESHOLD*, όπως αναλυτικά αναφέρεται στην υποενότητα 5.6, η οποία στην προκειμένη περίπτωση έχει επιλεγεί να είναι 15%. Ωστόσο εδώ, οι τιμές του PER για το κανάλι 26 για όλα τα link της προς μελέτης τοπολογίας δε μπορούν να ικανοποιήσουν την έτερη καθορισμένη τιμή *TARGET*, της οποίας η τιμή έχει οριστεί 5% και, ως εκ τούτου, δε συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις που έχει επιβάλλει το συγκεκριμένο ΑΔΑ ώστε να αναδειχθεί ένα κανάλι ως πλήρως αποδεκτής ποιότητας. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές αποθηκεύονται στον Gateway για μελλοντική ανάκτηση σε περίπτωση που δεν ανιχνευθεί καλύτερο κανάλι, ενώ ο αλγόριθμος προσπαθεί να εντοπίσει ένα καλύτερο κανάλι λειτουργίας ελέγχοντας το επόμενο στην ουρά ChPrio, δηλαδή το κανάλι 25 στην περίπτωση μας. Αλλά και σε αυτό το κανάλι, τα προβλήματα παρεμβολών δεν απουσιάζουν, για παράδειγμα στο link που συνδέει το Gateway με τον Κόμβο 4 το οποίο παρουσιάζει PER της τάξης του 7% εξαιτίας της λειτουργίας στο ίδιο κανάλι στην ίδια γεωγραφική περιοχή ενός άλλου ΑΔΑ. Παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση, οι τιμές PER δεν υπερβαίνουν το καθορισμένο *THRESHOLD*, ωστόσο υπερβαίνουν την τιμή του *TARGET*. Κατά συνέπεια, ο εξέταση των καναλιών συνεχίζεται με το κανάλι 15, όπου σημαντικά προβλήματα παρεμβολών εμφανίζονται για το link που συνδέει το Gateway με τον Κόμβο 1 όπου το PER πλησιάζει το 100%. Η παρεμβολή στον Κόμβο 1 προκαλείται από το γειτονικό IEEE 802.11 δίκτυο του οποίου η συχνότητα λειτουργίας επικαλύπτεται με το κανάλι 15 που εξετάζεται. Δεδομένου ότι η παρεμβολή που προκαλείται είναι αρκετά σοβαρή, το PER ορισμένων κόμβων υπερβαίνει ακόμα και την τιμή του *THRESHOLD*, και συνεπώς, οι συγκεκριμένες τιμές για το κανάλι 15 απορρίπτονται πλήρως από τον Gateway. Τέλος, εξετάζεται το κανάλι 20, όπου το σύνολο των links του μελετούμενου ΑΔΑ παρουσιάζουν μηδενικές απώλειες πακέτων, εκτός από αυτό που συνδέει το Gateway με τον Κόμβο 6 το οποίο παρουσιάζει PER της τάξης του 4% δεδομένου ότι βρίσκεται σε γειτονική θέση με το παρακείμενο IEEE 802.15.1 δίκτυο. Δεδομένου ότι οι τιμές PER όλων των links δε παραβιάζουν τους καθορισμένους ελέγχους που αφορούν το *THRESHOLD* και το *TARGET*, το συγκεκριμένο IEEE 802.15.4 κανάλι θεωρείται αποδεκτό και επιλέγεται προς υποστήριξη της λειτουργίας του υποκειμένου ΑΔΑ.

Αυτό που είναι σημαντικό να σημειωθεί σε αυτό το σημείο είναι ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία στην [17] επιτυγχάνει την κατάλληλη ανίχνευση καναλιού σε λιγότερα βήματα από τον έλεγχο σε όλα τα 16 κανάλια του προτύπου IEEE 802.15.4 κατά διαδοχικό τρόπο. Η κατάταξη των καναλιών σύμφωνα με την πιθανότητά τους να υποφέρουν από λιγότερες παρεμβολές (ουρά ChPrio) είχε ως αποτέλεσμα την εξέταση τεσσάρων μόνο καναλιών, σε αντίθεση με τη σειριακή περίπτωση κατά την οποία θα ελέγχονταν 10 κανάλια. Η μείωση των αλγοριθμικών επαναλήψεων θεωρείται ένα σημαντικό θέμα, αφού οδηγεί όπως είναι λογικό σε αξιοσημείωτη εξοικονόμηση πόρων του δικτύου, καθώς επίσης συρρικνώνεται και ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Προφανώς, η μείωση είναι ιδιαίτερα επιθυμητή σε ΑΔΑ μεγάλης κλίμακας, όπου και κάθε τέτοια επανάληψη έχει ως συνέπεια ένα μεγάλο αριθμό μηνυμάτων που πρέπει να ανταλλαχθούν μεταξύ των κόμβων του εξεταζόμενου ΑΔΑ.

Τέλος, με βάση την τοπολογία που παρουσιάστηκε στην εικόνα 41, θα μπορούσε να θεωρηθεί ένα ελαφρώς διαφορετικό σενάριο όπου όλα τα απεικονιζόμενα δίκτυα, εκτός από το βασικό και προηγούμενως μελετούμενο ΑΔΑ, είναι ήδη εγκατεστημένα στη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Εξαιτίας ενός έκτακτου γεγονότος, το τελευταίο θα πρέπει να εγκατασταθεί και να γίνει λειτουργικό σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει χρόνος και πόροι για να πραγματοποιηθεί μια λεπτομερής ανάλυση του φάσματος στην υποκείμενη γεωγραφική περιοχή, το ΑΔΑ πρέπει να αποφασίσει αυτόνομα σε ποιο κανάλι θα λειτουργήσει. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου που αναλύθηκε, στη συγκεκριμένη περίπτωση θα ήταν ακριβώς τα ίδια με αυτά που περιγράφονται στο αναλυτικό σενάριο της ενότητας αυτής. Με άλλα λόγια, πάντα ανιχνεύεται ένα κατάλληλο κανάλι για ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων, ανεξάρτητα από το αν αυτό έχει ήδη αναπτυχθεί και λειτουργεί σε μια περιοχή ή όχι.

Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Από όλα τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η ανάγκη για σωστή και αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος από τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων καθίσταται επιτακτική. Το πρόβλημα της συνύπαρξης υφίσταται όπως αποδείχτηκε και με τα σχετικά πειράματα, και μάλιστα δείχνει να είναι αρκετά έντονο και ικανό να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στα μελλοντικά συνυπάρχοντα και ανταγωνιστικά ασύρματα δίκτυα.

Η λύση της ανάλυσης και καταγραφής φάσματος, μέσω των Αναλυτών Φάσματος και των φασματικών χαρτών είναι σίγουρα μια λύση η οποία μπορεί να βοηθήσει στην σωστή αξιοποίησή του και αποδοτική χρησιμοποίησή του, ωστόσο αυτή απαιτεί ακριβό εξοπλισμό, πράγμα που την κάνει λιγότερο ελκυστική και δυσκολότερα εφαρμόσιμη σε συνήθεις περιπτώσεις της καθημερινής ζωής, όπου θα απαιτείται η σωστή συνύπαρξη ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Οι περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, οι οποίες μελλοντικά θα αντιμετωπίζονται από πολλαπλά, διαφορετικού σκοπού δίκτυα –τα οποία θα συνυπάρχουν και θα λειτουργούν σε επικαλυπτόμενες ζώνες συχνοτήτων- καθιστούν αναγκαστική την εξεύρεση μιας λύσης, να μεν έγκυρης και αποδοτικής, κυρίτερα ωστόσο ευέλικτης, οικονομικής, και ταχείας στην ανταπόκρισή της.

Το εργαλείο καταγραφής PER και αξιολόγησης της ποιότητας ενός link μεταξύ κόμβων που υλοποιήθηκε, στα πλαίσια της ιδέας που παρουσιάστηκε [17], είναι το πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση.

Ένας βασικός περιορισμός της έως τώρα υλοποίησης είναι ότι λειτουργεί μονάχα σε TinyOS 1.x και επομένως η αξιοποίησή της, μόνο από συστήματα που χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο λειτουργικό. Θα μπορούσε επομένως, αυτό να επεκταθεί και να αξιοποιηθεί και από διαφορετικές πλατφόρμες.

Τέλος, εκκρεμούν θέματα σταθερότητας και αξιοπιστίας τα οποία δεν ήταν δυνατό να ελεγχθούν στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας. Σε κρίσιμες καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, το σύστημα οφείλει μέσα από μηχανισμούς αυτορρύθμισης να μπορεί να ξεπερνά τα οποιαδήποτε προβλήματα συνδεσιμότητας, τυχόν disconnects και να συνεχίζει τη λειτουργία του αυτόνομα, δίχως την ανάγκη επέμβασης του χρήστη.

Βιβλιογραφία

- [1] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network
- [2] *Wireless sensor networks: a survey* - I.F. Akyildiz, W. Su*, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci
- [3] C. Perkins, *Ad Hoc Networks*, Addison-Wesley, Reading, MA, 2000.
- [4] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Sensor_node
- [5] *Automatic Fire Detection: A survey from Wireless Sensor Network Perspective*- Majid Bahrepour, Nirvana Meratnia, Paul Havinga
- [6] *A High-Density Earthquake Monitoring System Using Wireless Sensor Networks* - Suzuki, Kurata, Morikawa
- [7] *CodeBlue: An Ad Hoc Sensor Network Infrastructure for Emergency Medical Care*- Malan, Fulford-Jones, Welsh, Moulton
- [8] Zigbee Alliance *ZigBee Wireless Sensor Applications for Health, Wellness and Fitness* - March 2009
- [9] *Πειραματική μελέτη αδυναμιών ασφαλείας σε μηχανισμούς δημοπρασιών εφαρμοσμένων σε γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών* - Βασίλειος Χ. Μπάμπαλης
- [10] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive_radio
- [11] *NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey* - Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran *, Shantidev Mohanty
- [12] *Spectrum Sharing for unlicensed bands* - Etkin, Parekh, Tse
- [13] *Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios* - Cabric, Mubaraq, Brodersen
- [14] *Cognitive Radio Sensor Networks* - Ozgur B. Akan, Osman B. Karli, and Ozgur Ergul, Middle East Technical University
- [15] *Crowded Spectrum in Wireless Sensor Networks* - Zhou, Stankovic, Son
- [16] *Field Measurements and Guidelines for the Application of Wireless Sensor Networks to the Environment and Security*
- [17] *Cognitive radio-aided WSNs for emergency response* -Arkoulis, Barbounakis, Spanos, Zafeiropoulos, Mitrou
- [18] Petrova M, Riihijarvi J, Mahonen P and Labella S 2006 *Performance study of IEEE 802.15.4 using measurements and simulations* Proc. of 2006 IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC) 487–92

- [19] Rice J A and Spencer Jr B F 2009 *Flexible Smart Sensor Framework for Autonomous Full-scale Structural Health Monitoring* NSEL Report No. 18 (University of Illinois at Urbana-Champaign)
- [20] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, and K. R. Chowdhury, "CRAHNS: Cognitive Radio Ad Hoc Networks," *Ad Hoc Net.*, 2009; doi:10.1016/j.adhoc.2009.01.001
- [21] S. Gao et al., "Energy Efficient Adaptive Modulation in Wireless Cognitive Radio Sensor Networks," *Proc. IEEE ICC*, June 2007, pp. 3980–86.
- [22] S. Byun, I. Balasingham, and X. Liang, "Dynamic Spectrum Allocation in Wireless Cognitive Sensor Networks: Improving Fairness and Energy Efficiency," *Proc. IEEE VTC*, Sept. 2008, pp. 1–5.
- [23] J. Zhao, H. Zheng, and G. Yang, "Distributed Coordination in Dynamic Spectrum Allocation Networks," *Proc. IEEE DySPAN*, Nov. 2005, pp. 259–68.
- [24] A. K. M. Azad and J. Kamruzzaman, "A Framework for Collaborative Multi Class Heterogeneous Wireless Sensor Networks," *Proc. IEEE ICC*, May 2008, pp. 4396–4401
- [25] ("Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communication", *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 23, no. 2, February 2005)
- [26] Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Smartdust>
- [27] The Illinois Structural Health Monitoring Project (ISHMP) - <http://shm.cs.uiuc.edu/>
- [28] Shin S Y, Choi S, Park H S, and Kwon W H 2005 «Packet error rate analysis of IEEE 802.15.4 under IEEE 802.11b interference» *Proc. of WWIC 2005* (Springer) 279–88
- [29] Shin S Y, Kang J S, and Park H S 2009 «Packet Error Rate Analysis of ZigBee under Interferences of Multiple Bluetooth Piconets» *Proc. of IEEE VTC*
- [30] Musaloiu E R and Terzis A 2008 «Minimising the Effect of WiFi Interference in 802.15.4 Wireless Sensor Networks» *Int. J. of Sensor Networks* 3 43–54
- [31] Penna F, Pastrone C, Spirito M A and Garello R 2008 *An Experimental Study on Spectrum Sensing for Cognitive WSNs under Wi-Fi Interference* *Proc. Wireless World Research Forum (WWRF)*
- [32] Crossbow Technologies, http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/Imote2_Datasheet.pdf
- [33] CC2420 Data Sheet 2006 Texas Instruments
- [34] Sha, K, Shi, W and Watkins O 2006 *Using Wireless Sensor Networks for Fire Rescue Applications: Requirements and Challenges* *IEEE Int. Conf. on Electro/information Technology* 239-44
- [35] IEEE Humanitarian Technology Network, http://www.ieeehtn.org/htn/index.php/Life-Saving_Sensor_networks_for_post_disaster_applications

- [36] Hefeeda M and Bagheri M 2009 *Forest Fire Modeling and Early Detection using Wireless Sensor Networks Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*,7 169-224
- [37] Yu L, Wang N and Meng X 2005 *Real-time Forest Fire Detection with Wireless Sensor Networks* Proc. of the 2005 Int. Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing 2 1214–17
- [38] Son B, Her Y and Kim J 2006 *A Design and Implementation of Forest-Fires Surveillance System based on Wireless Sensor Networks for South Korea Mountains* Int. J. of Computer Science and Network Security (IJCSNS) 6 124–30
- [39] Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Contiki>
- [40] *MANTIS OS: An Embedded Multithreaded Operating System for Wireless Micro Sensor Platforms* - Bhatti, Carlson, Dai, Deng, Rose, Sheth, Shucker, Gruenwald, Torgerson, Han
- [41] Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Nano-RK>
- [42] <https://projects.nesl.ucla.edu/public/sos-2x/doc/>
- [43] The BTnut Operating System - www.vs.inf.ethz.ch/edu/SS2007/WSN/tut/ch4-5.pdf
- [44] http://en.wikipedia.org/wiki/Linpus_Linux
- [45] Omnet ++, <http://www.omnetpp.org/>
- [46] mobility-fw.sourceforge.net/
- [47] [http://www.museumstuff.com/learn/topics/Castalia_\(simulator\)](http://www.museumstuff.com/learn/topics/Castalia_(simulator))
- [48] <http://www.isis.vanderbilt.edu/projects/nest/prowler/>
- [49] Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/QualNet
- [50] <http://wise.ecs.soton.ac.uk/project.php?id=546>
- [51] *T-SNIPER: Trust-Aware Sensor Network Information Protocol for Efficient Routing* - Sourendra Sinha, Zenon Chaczko
- [52] <http://www.opengeospatial.org/>
- [53] *Exploiting Low-Cost Directional Antennas in 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks* - A. Cidronali, S.K.S. Gupta and G. Manes
- [54] *Co-Design of Efficient Contention MAC with Directional Antennas in Wireless Sensor Networks* - John Dunlop and Joan Cortes
- [55] *System Design Considerations for a ZigBee RF Receiver with regard to Coexistence with Wireless Devices in the 2.4GHz ISM-band* – Hae-Moon Seo, Yong-Kuk Park, Woo-Chool Park, Dongsu Kim, Myung-Soo Lee, Hyeong-Seok Kim, Pyung Choi
- [56] *Minimizing 802.11 Interference on Zigbee Medical Sensors* – James Hou, Benjamin Chang, Dae-Ki Cho, Mario Gerla

- [57] *A Proposal of the Co-existence MAC of IEEE 802.11b/g and 802.15.4 used for The Wireless Sensor Network* - Nakatsuka, K. Nakamura, K. Hirata, Y. Hattori, T. Sophia
- [58] *Synchronized Wireless Sensor Networks for Coexistence* - P. Ferrari, A. Flammini, D. Marioli, E. Sisinni
- [59] *Interference Mediation for Coexistence of WLAN and ZigBee Networks* - Byoung Hoon Jung, Jo Woon Chong, Chang Yong Jung, Su Min Kim, and Dan Keun Sung
- [60] *Is CSMA/CA really efficient against interference in a Wireless Control System? An experimental answer* - M. Bertocco, G. Gamba, A. Sona. University of Padova
- [61] *Adaptive Radio Channel Allocation for Supporting Coexistence of 802.15.4 and 802.11b* - Chulho Won, Jong-Hoon Youn, Hesham Ali
- [62] *Chamaeleon – Exploiting Multiple Channels to Mitigate Interference*
- [63] *Adaptive Interference-Aware Multi-Channel Clustering Algorithm in a ZigBee Network in the Presence of WLAN Interference* - Ko, D.N. Chong, J.W. Jung, B.H. Sung, D.K.
- [64] *TMMAC: An Energy Efficient Multi-Channel MAC Protocol for Ad Hoc Networks* - Jingbin Zhang, Gang Zhou, Chengdu Huang, Sang H. Son, John A. Stankovic
- [65] *A self-organizing multi-channel medium access control (SMMAC) protocol for wireless sensor networks* - Kae-Hsiang Kwong, Tsung-Ta Wu, Michie, C. Andonovic, I. Inst. for Commun. & Signal Process., Glasgow
- [66] *Channel Surfing: Defending Wireless Sensor Networks from Jamming and Interference* - Wenyuan Xu, Wade Trappe, Yanyong Zhang
- [67] *Interference Aware Self-Organization for Wireless Sensor Networks: a Reinforcement Learning Approach* - Luca Stabellini, Jens Zander
- [68] *Exploring vs Exploiting: Enhanced Distributed Cognitive Coexistence of 802.15.4 with 802.11* - Timmers, M. Pollin, S. Dejonghe, A. Van der Perre, L. Catthoor, F. Interuniversity Micro-Electron. Center, Leuven
- [69] *Distributed cognitive coexistence of 802.15.4 with 802.11* - Sofie Pollin, Mustafa Ergen, Antoine Dejonghe, Liesbet Van der Perre, Francky Catthoor, Ingrid Moerman, Ahmad Bahai
- [70] *Technical Overview of Time Synchronized Mesh Protocol (TSMP)*
- [71] *Wireless Sensor Networks for Building Automation. Hype or Reality?*
- [72] *Realistic and Efficient Multi-Channel Communications in Wireless Sensor Networks* - Yafeng Wu, John A. Stankovic, Tian He†, Jiakang Lu, and Shan Lin
- [73] *Metronome: Coordinating Spectrum Sharing in Heterogeneous Wireless Networks* - Gummadi, R. Balakrishnan, H. Seshan, S.

- [74] *A Channel switching scheme for avoiding interference of between IEEE 802.15.4 and other network* – Jangkyu Yun, Byeongjik Lee, Jilong Li, Kijun Han
- [75] *Crowded Spectrum in Wireless Sensor Networks* - Gang Zhou, John A. Stankovic and Sang H. Son. Department of Computer Science, University of Virginia
- [76] *An Experimental Study of The Multiple Channels and Channel Switching in Wireless Sensor Networks*
- [77] *A Practical Multi-Channel Media Access Control Protocol for Wireless Sensor Networks* - Hieu Khac Le, Dan Henriksson, and Tarek Abdelzaher
- [78] *A study on coexistence of WLAN and WPAN using a pan coordinator with an array antenna* – Yuta Nakao, Kotaro Watanabe, Tadatomo Sato, Ryuji Kohno
- [79] *Demo Abstract: Spectrum Agile Medium Access Control Protocol for Wireless Sensor Networks* - Junaid Ansari, Tobias Ang, and Petri M-ah-onen
- [80] *Adaptive Multi-Channel Utilization Scheme for Coexistence of IEEE802.15.4 LR-WPAN with Other Interfering Systems* - Kwang-il Hwang Sang-Soo Yeo Jong Hyuk Park Dept. of Comput. Control Eng., Incheon City Coll., Incheon, South Korea
- [81] G. Zhou, C. Huang, T. Yan, T. He, J. A. Stankovic, and T. F. Abdelzaher. *Mmsn: Multi-frequency media access control for wireless sensor networks*. 2006.
- [82] Xun Chen, Peng Han, Qiu-Sheng He, Shi liang Tu, and Zhang-Long Chen. A multichannel mac protocol for wireless sensor networks. 2006.
- [83] *The Hitchhiker’s Guide to Successful Wireless Sensor Network Deployments*
- [84] Jennic - Site Survey Tool
- [85] *SeeDTV: Deployment-Time Validation for Wireless Sensor Networks* - H. Liu, L. Selavo, J. Stankovic, Department of Computer Science, University of Virginia
- [86] *Monitoring wireless sensor networks through logical deductive processes* - Gatani, L. Re, G.L. Ortolani, M. Dept. di Ingegneria Inf., Univ. degli Studi di Palermo
- [87] *Deployment support for wireless sensor networks* - Matthias Dyer, Jan Beutel, and Lennart Meier
- [88] *Planning Site Surveys for 6LoWPAN deployments* - Patrick Grossetete, September 2008
- [89] *Minimizing the effect of WiFi interference in 802.15.4 wireless sensor networks* - Razvan Musaloiu-E. and Andreas Terzis
- [90] “CC2420 Data Sheet”, Texas Instruments, 2006.
- [91] *Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks* – Alec Woo, Terence Tong, David Culler

[92] *Channel Characterization and Link Quality Assessment of IEEE 802.15.4-Compliant Radio for Factory Environments* - Lei Tang, Kuang-Ching Wang

[93] *ATPC: Adaptive Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks* - Shan Lin, Jingbin Zhang, Gang Zhou, Lin Gu, Tian He, and John A. Stankovic