





**Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**

**Πολυτεχνική Σχολή**

**Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών**

**Ηλεκτρονικών Υπολογιστών**

**Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία**

***Ανίχνευση φάσματος για γνωστική  
ραδιοεπικοινωνία***

**ΤΟΥ**

**Φωτίου Πολυζώη Αλέξανδρου**

**Επιβλέπων καθηγητής: Πλέσσας Φώτιος**

**Βόλος, Οκτώβριος 2015**

**Copyright © Φωτίου Πολυζώης Αλέξανδρος, 2015**

**Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, η αποθήκευση και η διανομή της παρούσας διπλωματικής 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.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Πλέσσα, για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα πραγματικά σύγχρονο θέμα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, καθώς και για την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε, τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου, οι οποίοι με τις θυσίες τους αλλά και τη διαρκή τους συμπαράσταση με στήριξαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## Πρόλογος

Η ταχεία αύξηση των ασύρματων τεχνολογιών που είναι απαιτητικές σε εύρος ζώνης, έχει οδηγήσει στο πρόβλημα της έλλειψης ραδιοφάσματος, με αποτέλεσμα οι ραδιοσυχνότητες να έχουν γίνει πολύ ακριβές. Ωστόσο, μελέτες δείχνουν ότι το 70% του αδειοδοτημένου ραδιοφάσματος υποχρησιμοποιείται. Η γνωστική ραδιοεπικοινωνία υπόσχεται μια λύση στο πρόβλημα αυτό, επιτρέποντας στους χρήστες χωρίς άδεια (SUs), λεγόμενοι και δευτερεύοντες χρήστες, να έχουν πρόσβαση στις αδειοδοτημένες ζώνες, όταν αυτές δεν χρησιμοποιούνται από τους αδειοδοτημένους χρήστες, λεγόμενοι και πρωτεύοντες χρήστες (PUs). Η βασική αυτή λειτουργία της γνωστικής ραδιοεπικοινωνίας, ονομάζεται ανίχνευση φάσματος. Το πιο σημαντικό στη γνωστική ραδιοεπικοινωνία είναι, οι δευτερεύοντες χρήστες να μην προκαλούν παρεμβολές στους πρωτεύοντες χρήστες ή σε άλλους δευτερεύοντες χρήστες. Η διπλωματική αυτή εργασία παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες ενός CR, τα πολλαπλά οφέλη και τις προκλήσεις που υπάρχουν, καθώς και τις διάφορες τεχνικές ανίχνευσης φάσματος που υπάρχουν στην βιβλιογραφία, οι οποίες ανιχνεύουν την παρουσία ή όχι ενός αδειοδοτημένου χρήστη σε μία συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Επίσης, η διπλωματική εργασία αξιολογεί την απόδοση των αλγορίθμων ανίχνευσης ενέργειας σε θορυβώδη περιβάλλον, συγκεκριμένα σε λευκό προσθετικό γκαουσιανό θόρυβο. Στους αριθμητικούς υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Monte Carlo και όλες οι προσομοιώσεις έγιναν σε περιβάλλον Matlab.

## **Abstract**

The rapid growth of wireless technologies that are demanding in bandwidth has led to the problem of spectrum scarcity and so the radiofrequencies are very expensive. However, studies show that 70% of the licensed spectrum is underutilized. Cognitive radio technology promises a solution to this problem, allowing unauthorized users, called secondary users (SUs) to have access to the licensed bands, when they are not used by the licensed users, called primary users (PUs). This basic function of cognitive radio technology is spectrum sensing. The most important in the cognitive radio technology, is that the secondary users must prevent interference to the primary users or other secondary users. This bachelor thesis presents the features and functions of a cognitive radio, the multiple benefits and challenges that exist and the different detection techniques in the literature, which detect the presence or absence of a licensed user in a specific frequency band. Also, this bachelor thesis evaluates the performance of the energy detection algorithm in noisy environment, particularly in additive white gaussian noise. For the calculations was used the Monte Carlo method and all simulations were done in Matlab.

## Περιεχόμενα

Ευρετήριο εικόνων.....	10
Ευρετήριο διαγραμμάτων.....	12
Ευρετήριο πινάκων.....	13
Λίστα Ακρωνυμίων.....	15

### **Κεφάλαιο 1: Συστήματα Γνωστικών Ραδιοεπικοινωνιών**

1.1 Εισαγωγή.....	17
1.2 Η εξέλιξη για την κατασκευή των Cognitive Radio .....	24
1.3 Ορισμοί.....	27
1.4 Κατηγορίες Cognitive Radio .....	28
1.5 Χαρακτηριστικά και Λειτουργίες των Cognitive Radio .....	29
1.6 Κατηγορίες φασματικών οπών.....	32
1.7 Τα βασικά οφέλη των Cognitive Radio .....	33
1.8 Το πρώτο Cognitive Radio.....	35
1.9 Το πρότυπο IEEE 802.22.....	37

### **Κεφάλαιο 2: Ανίχνευση Φάσματος**

2.1 Εισαγωγή.....	42
2.2 Τεχνικές ανίχνευσης φάσματος.....	42
2.2.1 Ανίχνευση πομπού (Μη συνεργατική ανίχνευση).....	43
2.2.1.1 Ανίχνευση προσαρμοσμένου φίλτρου.....	44
2.2.1.2 Ανίχνευση ενέργειας.....	45

2.2.1.3 Ανίχνευση κυκλοστάσιμων χαρακτηριστικών.....	47
2.2.2 Ανίχνευση Δέκτη (Συνεργατική ανίχνευση).....	48
2.2.3 Ανίχνευση με βάση την παρεμβολή.....	53
2.3 Άλλες τεχνικές ανίχνευσης.....	54
2.4 Κατηγορίες ανίχνευσης φάσματος.....	55
2.5 Μετρικές απόδοσης ανιχνευτών φάσματος.....	57
2.6 Προκλήσεις στα Cognitive Radio.....	58

### **Κεφάλαιο 3: Ανίχνευση φάσματος βασισμένη στην ανίχνευση ενέργειας**

3.1 Το μοντέλο του συστήματος.....	61
3.2 Αλγόριθμος ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου.....	62
3.3 Αλγόριθμος ανίχνευσης ενέργειας δύο κατωφλίων.....	64
3.4 Αλγόριθμος ανίχνευσης ενέργειας τριών κατωφλίων.....	68

### **Κεφάλαιο 4: Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα**

4.1 Εισαγωγή.....	70
4.2 Παράμετροι συστήματος.....	70
4.3 Προσομοιώσεις και αποτελέσματα.....	71

### **Κεφάλαιο 5: Σύνοψη και μελλοντικές επεκτάσεις**

5.2 Σύνοψη.....	94
5.3 Μελλοντικές επεκτάσεις.....	94



## **Παράρτημα Α:**

A.1 Μέθοδος Monte Carlo.....	95
A.2 Θερμικός θόρυβος – Θόρυβος του Johnson.....	95
A.3 Το θεώρημα δειγματοληψίας του Nyquist.....	96
A.4 Λευκός προσθετικός γκαουσιανός θόρυβος.....	97
A.5 SNR.....	98
A.6 Φαινόμενα σημάτων.....	99
A.7 Η συνάρτηση Q.....	99
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>100</b>

## Ευρετήριο εικόνων

**Εικόνα 1.1:** Μετρήσεις έντασης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο Lichtenau της Γερμανίας στη ζώνη 50MHz – 1GHz.

**Εικόνα 1.2:** Διάγραμμα ανάθεσης συχνοτήτων των ΗΠΑ.

**Εικόνα 1.3:** Οι αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων στις Η.Π.Α.

**Εικόνα 1.4:** Η κατανομή της ISM ζώνης για τις Η.Π.Α.

**Εικόνα 1.5:** Χρήση φάσματος στη Σιγκαπούρη.

**Εικόνα 1.6:** Η μέση χρησιμοποίηση του φάσματος στη Σιγκαπούρη.

**Εικόνα 1.7:** Στιγμιότυπο χρήσης του φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων στη ζώνη 0-6 GHz στο BWRC.

**Εικόνα 1.8:** Δυναμική πρόσβαση στο φάσμα.

**Εικόνα 1.9:** Παράδειγμα δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα.

**Εικόνα 1.10:** Οι βασικές μονάδες ενός SDR πομποδέκτη.

**Εικόνα 1.11:** Οι βασικές μονάδες ενός CR πομποδέκτη.

**Εικόνα 1.12:** Ο βασικός κύκλος γνώσης.

**Εικόνα 1.13:** Το Adapt4 XG1.

**Εικόνα 1.14:** Η τοπολογία του προτύπου 802.22.

**Εικόνα 1.15:** Τα σημερινά δίκτυα.

**Εικόνα 2.1:** Τεχνικές ανίχνευσης φάσματος.

**Εικόνα 2.2:** Το μπλοκ διάγραμμα του ανιχνευτή προσαρμοσμένου φίλτρου.

**Εικόνα 2.3:** Το μπλοκ διάγραμμα του ανιχνευτή ενέργειας.

**Εικόνα 2.4:** Το μπλοκ διάγραμμα του ανιχνευτή κυκλοστάσιμων χαρακτηριστικών.

**Εικόνα 2.5:** Τα αποτελέσματα στην απόδοση της ανίχνευσης από διάφορα φαινόμενα και η βελτίωση από την συνεργατική ανίχνευση.

**Εικόνα 2.6:** Ένα βασικό και ένα CR δίκτυο.

**Εικόνα 2.7:** a- Κεντριοποιημένη, b- Κατανεμημένη, c- Βοηθούμενη με αναμετάδοση.

**Εικόνα 2.8:** Το μοντέλο θερμοκρασίας παρεμβολής.

**Εικόνα 2.9:** Η ακρίβεια και η πολυπλοκότητα διάφορων τεχνικών ανίχνευσης φάσματος.

**Εικόνα 2.10:** Η σχέση μεταξύ πιθανότητας και ισχύς στην ανίχνευση φάσματος.

**Εικόνα 3.1:** Το μπλοκ διάγραμμα του ανιχνευτή ενέργειας.

**Εικόνα 3.2:** a- Ανίχνευση ενέργειας μονού κατωφλίου b- Ανίχνευση ενέργειας δύο κατωφλίων.

**Εικόνα 3.3:** Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ανίχνευσης ενέργειας δύο κατωφλίων.

**Εικόνα 3.4:** Ανίχνευση ενέργειας δύο κατωφλίων.

**Εικόνα 3.5:** Ανίχνευση ενέργειας τριών κατωφλίων.

## Ευρετήριο διαγραμμάτων

**Διάγραμμα 4.1:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.05$ .

**Διάγραμμα 4.2:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.05$ .

**Διάγραμμα 4.3:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.1$  και  $p = 1.05$ .

**Διάγραμμα 4.4:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.1$  και  $p = 1.05$ .

**Διάγραμμα 4.5:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.6$ .

**Διάγραμμα 4.6:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.6$ .

**Διάγραμμα 4.7:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 3$ .

**Διάγραμμα 4.8:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 3$ .

**Διάγραμμα 4.9:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 6$ .

**Διάγραμμα 4.10:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 6$ .

**Διάγραμμα 4.11:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για αριθμό δειγμάτων σήματος πληροφορίας 800 και 1400

**Διάγραμμα 4.12:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και πιθανότητας εσφαλμένου συναγερμού για SNR: -14, -12 και -11 dB.

**Διάγραμμα 4.13:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και αριθμού δειγμάτων του σήματος πληροφορίας για SNR = -12 dB.

**Διάγραμμα 4.14:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και πιθανότητας εσφαλμένου συναγερού για SNR: -14, -12 και -11 dB.

### Ευρετήριο πινάκων

**Πίνακας 4.1:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.05$ .

**Πίνακας 4.2:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.05$ .

**Πίνακας 4.3:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.1$  και  $p = 1.05$ .

**Πίνακας 4.4:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.1$  και  $p = 1.05$ .

**Πίνακας 4.5:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.6$ .

**Πίνακας 4.6:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.6$ .

**Πίνακας 4.7:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 3$ .

**Πίνακας 4.8:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 3$ .

**Πίνακας 4.9:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 6$ .

**Πίνακας 4.10:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 6$ .

**Πίνακας 4.11:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για αριθμό δειγμάτων σήματος πληροφορίας 800 και 1400.

**Πίνακας 4.12:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και πιθανότητας εσφαλμένου συναγερμού για SNR: -14, -12 και -11 dB.

**Πίνακας 4.13:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και αριθμού δειγμάτων του σήματος πληροφορίας για SNR = -12 dB.

**Πίνακας 4.14:** Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και πιθανότητας εσφαλμένου συναγερμού για SNR: -14, -12 και -11 dB.

## Λίστα Ακρωνυμίων

<b>ADC</b>	Μετατροπέας Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό
<b>AP</b>	Σημείο Πρόσβασης
<b>ASIC</b>	Ολοκληρωμένο κύκλωμα για ειδικές εφαρμογές
<b>AWGN</b>	Λευκός Προσθετικός Γκαουσιανός Θόρυβος
<b>BS</b>	Σταθμός Βάσης
<b>BPF</b>	Ζωνοπερατό Φίλτρο
<b>CDMA</b>	Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα
<b>CR</b>	Γνωστική Ραδιοεπικοινωνία
<b>DAC</b>	Μετατροπέας Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό
<b>DSA</b>	Δυναμική Πρόσβαση στο Φάσμα
<b>DSP</b>	Ψηφιακός Επεξεργαστής Σήματος
<b>DVB-T</b>	Εκπομπή Ψηφιακού Βίντεο - Επίγεια
<b>EIRP</b>	Ισοδύναμη Ισότροπη Ακτινοβολούμενη Ισχύς
<b>FCC</b>	Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Επικοινωνιών των ΗΠΑ
<b>FPGA</b>	Συστοιχία Επιτόπια Προγραμματιζόμενων Πυλών
<b>FU</b>	Κέντρο Συγχώνευσης
<b>GPS</b>	Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης
<b>GSM</b>	Παγκόσμιο Σύστημα για τις Κινητές Τηλεπικοινωνίες
<b>HDR</b>	Σύστημα Ραδιοεπικοινωνίας Οριζόμενο από Υλικό
<b>IEEE</b>	Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
<b>ISM</b>	Ραδιοσυχνότητες για Βιομηχανική, Επιστημονική και Ιατρική χρήση
<b>LAN</b>	Δίκτυο Τοπικής Περιοχής

<b>LTE</b>	Μακροπρόθεσμη Εξέλιξη
<b>MAN</b>	Δίκτυο Μητροπολιτικής περιοχής
<b>OFDMA</b>	Πολλαπλή Πρόσβαση Ορθογώνιας Διαίρεσης Συχνότητας
<b>P2MP</b>	Σημείο σε Πολλαπλά σημεία
<b>PSD</b>	Φασματική Πυκνότητα Ισχύος
<b>PU</b>	Πρωτεύων Χρήστης
<b>QoS</b>	Ποιότητα Υπηρεσίας
<b>RF</b>	Ραδιοσυχνότητα
<b>SDR</b>	Σύστημα Ραδιοεπικοινωνίας Οριζόμενο από Λογισμικό
<b>SNR</b>	Λόγος Σήματος προς Θόρυβο
<b>SU</b>	Δευτερεύων Χρήστης
<b>TDMA</b>	Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου
<b>UWB</b>	Συστήματα Υπερευρείας Ζώνης
<b>WiMAX</b>	Παγκόσμια Διαλειτουργικότητα για Πρόσβαση Μικροκυμάτων
<b>WLAN</b>	Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο Περιοχής
<b>WPAN</b>	Ασύρματο Προσωπικό Δίκτυο Περιοχής
<b>WRAN</b>	Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο Περιοχής



# Κεφάλαιο 1

## Συστήματα Γνωστικών Ραδιοεπικοινωνιών

### 1.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας επικρατεί η κοινή αντίληψη, ότι υπάρχει έλλειψη συχνοτήτων για νέες υπηρεσίες και συστήματα. Ωστόσο, πραγματικές μετρήσεις της χρήσης του φάσματος που διενεργήθηκαν από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) στην Αμερική, αλλά και από αντίστοιχους οργανισμούς στην Ευρώπη, αποκαλύπτουν μία διαφορετική εικόνα: σε μια αυθαίρετη θέση και χρονική στιγμή, ένα μεγάλο μέρος του αδειοδοτημένου φάσματος παραμένει ανενεργό. Για παράδειγμα, η εικόνα 1.1 δείχνει μετρήσεις έντασης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο Lichtenau, στη Γερμανία, στη ζώνη 50 MHz – 1 GHz για μία ημέρα. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει, συνεχή χρήση στις συχνοτικές ζώνες κάτω από 300 MHz, που έχουν ανατεθεί στην αναλογική εκπομπή ήχου και εικόνας. Το σύστημα GSM εμφανίζεται σαν μία φασματική κορυφή γύρω από τα 900 MHz. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν πλατιά διαστήματα ενδιάμεσα που παρουσιάζουν σχεδόν μηδενική δραστηριότητα.



στην ειδική ζώνη συχνοτήτων στις Ηνωμένες Πολιτείες. Πολλές από τις κύριες κατανομές, όπως η τηλεόραση (TV), το FM ραδιόφωνο, το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS), το Wi-Fi, το Bluetooth, κλπ είναι πανομοιότυπες. Οι ζώνες των 2.4 GHz και 5 GHz χρησιμοποιούνται συνήθως για ασύρματη δικτύωση υπολογιστών. Αυτές οι ζώνες, καθώς και οι φασματικές ζώνες που χρησιμοποιούνται για βιομηχανικούς, επιστημονικούς και ιατρικούς σκοπούς, ονομάζονται ISM (industrial, scientific, medicine) ζώνες. Στις εικόνες 1.3 και 1.4 παρουσιάζονται οι αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων στις Η.Π.Α. και η κατανομή της ISM ζώνης για τις Η.Π.Α αντίστοιχα.

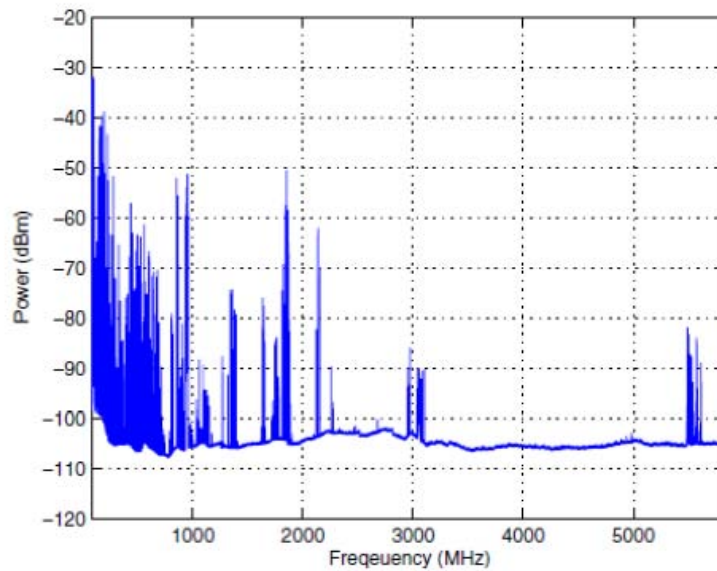
Service/system	Frequency
AM radio	535–1605 KHz
FM radio	88–108 MHz
Broadcast TV (channels 2–6)	54–88 MHz
Broadcast TV (channels 7–13)	174–216 MHz
Broadcast TV (UHF)	470–806 MHz
Broadband wireless	746–764 MHz, 776–794 MHz
3G wireless	1.7–1.85 GHz, 2.5–2.69 GHz
1G and 2G cellular	806–902 MHz
Personal communications systems	1.85–1.99 GHz
Wireless communications service	2.305–2.32 GHz, 2.345–2.36 GHz
Satellite digital radio	2.32–2.325 GHz
MMDS	2.15–2.68 GHz
Satellite TV	12.2–12.7 GHz
LMDS	27.5–29.5 GHz, 31–31.3 GHz
Fixed wireless services	38.6–40 GHz

**Εικόνα 1.3: Οι αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων στις Η.Π.Α.**

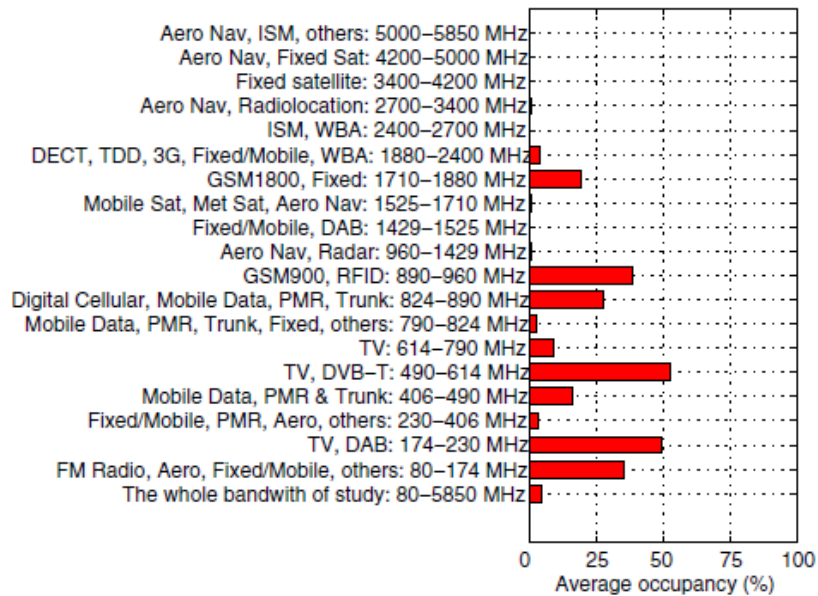
Band	Usage	Frequency
ISM band I	Cordless phones, 1G WLANs	902–928 MHz
ISM band II	Bluetooth®, 802.11b, 802.11g WLANs	2.4–2.4835 GHz
ISM band III	Wireless PBX	5.725–5.85 GHz
U-NII band I	Indoor systems, 802.11a WLANs	5.15–5.25 GHz
U-NII band II	Short-range outdoor systems, 802.11a WLANs	5.25–5.35 GHz
U-NII band III	Long-range outdoor systems, 802.11a WLANs	5.725–5.825 GHz

**Εικόνα 1.4: Η κατανομή της ISM ζώνης για τις Η.Π.Α.**

Οι εικόνες 1.5 και 1.6 δείχνουν την πληρότητα των ζωνών του φάσματος στη Σιγκαπούρη. Παρατηρούμε, ότι η χρήση του φάσματος στις υψηλές συχνότητες είναι πολύ χαμηλή, ενώ στις χαμηλές συχνότητες η χρήση είναι πολύ υψηλότερη. Μια έρευνα που διεξήχθει, δείχνει ότι η μέση πληρότητα του φάσματος στη Σιγκαπούρη είναι 4.54%.

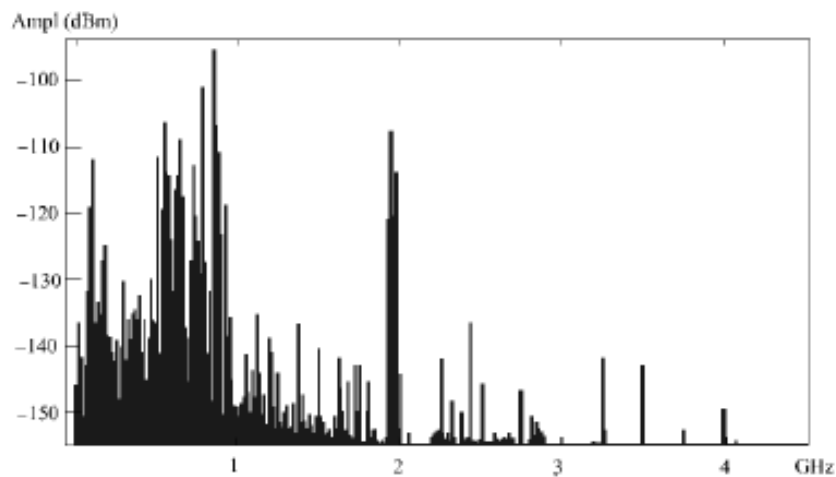


**Εικόνα 1.5: Χρήση φάσματος στη Σιγκαπούρη.**



**Εικόνα 1.6: Η μέση χρησιμοποίηση του φάσματος στη Σιγκαπούρη.**

Η εικόνα 1.7 δείχνει τη χρήση του φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων στη ζώνη 0-6 GHz στο BWRC (Berkeley Wireless Research Center). Οι ζώνες φάσματος χαμηλής συχνότητας χρησιμοποιούνται περισσότερο σε σχέση με τις ζώνες φάσματος υψηλών συχνοτήτων, οι οποίες χρησιμοποιούνται λιγότερο.

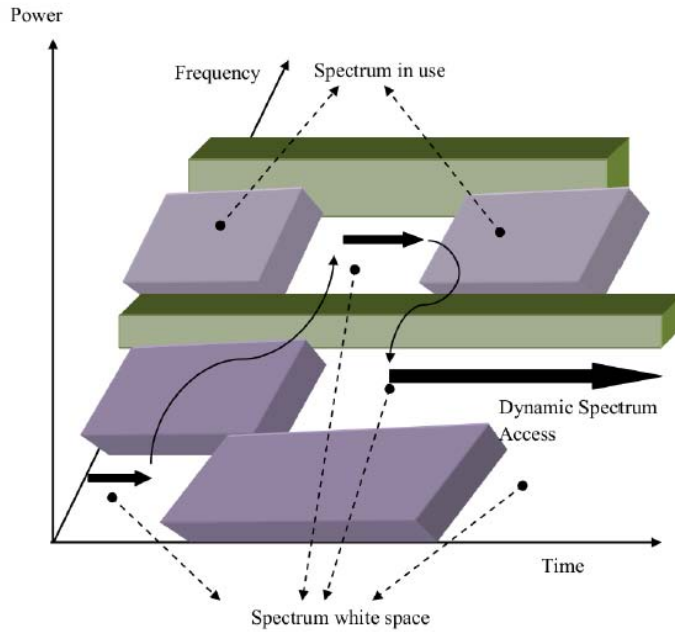


**Εικόνα 1.7: Στιγμιότυπο χρήσης του φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων στη ζώνη 0-6 GHz στο BWRC.**

Η FCC είναι υπεύθυνη για τη ρύθμιση των διακρατικών τηλεπικοινωνιών, της διαχείρισης και της αδειοδότησης του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος εντός των Ηνωμένων Πολιτειών. Αδειοδοτεί τμήματα σε συγκεκριμένους χρήστες σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές. Λίγες, μικρές, μη αδειοδοτημένες ζώνες έμειναν ανοιχτές, για να χρησιμοποιήθουν από οποιονδήποτε, με την προϋπόθεση να ακολουθούν ορισμένους κανονισμούς ισχύος.

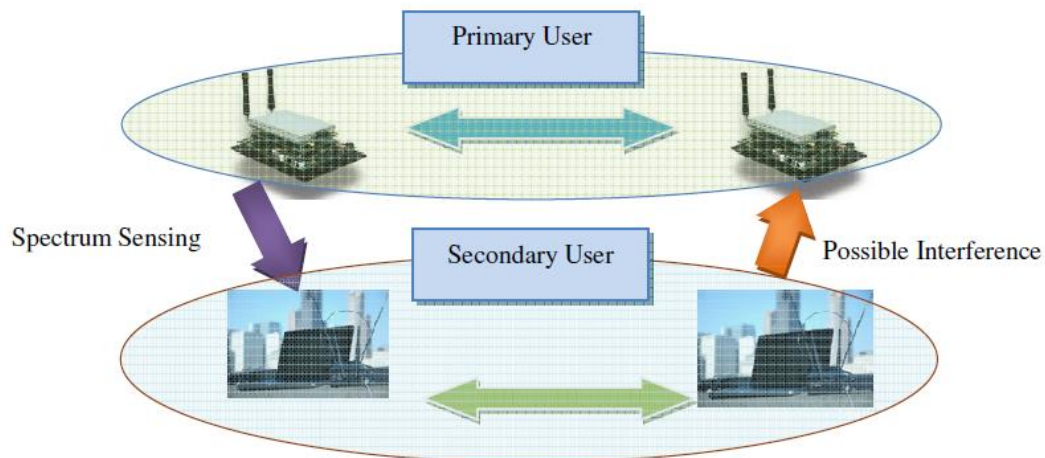
Για την αντιμετώπιση της υποχρησιμοποίησης του φάσματος λόγω της στατικής κατανομής του, δημιουργείται η ανάγκη χρήσης τεχνικών δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα (εικόνα 1.8). Η βασική ιδέα είναι να δώσουμε την δυνατότητα στους χρήστες να χρησιμοποιούν τις αδειοδοτημένες συχνότητες, με την προϋπόθεση, ότι μπορούν να εγγυηθούν, ότι οι παρεμβολές που θα γίνονται αντιληπτές από τους κύριους κατόχους αδειών, να είναι ελάχιστες. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την γνωστική ραδιοεπικοινωνία.

Ένας πομποδέκτης της γνωστικής ραδιοεπικοινωνία, μπορεί έξυπνα να προσαρμόζεται στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον, αλλάζοντας τις παραμέτρους εκπομπής του, όπως είναι η διαμόρφωση και η συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα, η γνωστική ραδιοεπικοινωνία, θα δίνει τη δυνατότητα στο δευτερεύων χρήστη: να προσδιορίζει ποιο τμήμα του φάσματος είναι διαθέσιμο, να ανιχνεύει την παρουσία του πρωτεύων χρήστη (spectrum sensing), να επιλέγει το καλύτερο διαθέσιμο κανάλι (spectrum management), να συντονίζει με άλλους χρήστες την πρόσβαση στο κανάλι (spectrum sharing) και να αλλάζει κανάλι, όταν ανιχνεύεται πρωτεύων χρήστης (spectrum mobility).



**Εικόνα 1.8: Δυναμική πρόσβαση στο φάσμα.**

Η εικόνα 1.9 αναπαριστά ένα παράδειγμα της δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα (DSA). Το δίκτυο αποτελείται από ένα ζευγάρι πρωτεύοντων χρηστών και ένα ζευγάρι δευτερεύοντων χρηστών, που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Οι πρωτεύοντες χρήστες έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα πρόσβασης στο φάσμα, ενώ οι δευτερεύοντες χρήστες πρέπει να ανιχνεύσουν το φάσμα και αν βρουν φασματική οπή, μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Λάθος ανιχνεύσεις από τους δευτερεύοντες χρήστες, θα προκαλέσουν παρεμβολές στους πρωτεύοντες χρήστες.



**Εικόνα 1.9: Παράδειγμα δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα**

## **1.2 Η εξέλιξη για την κατασκευή του Cognitive Radio**

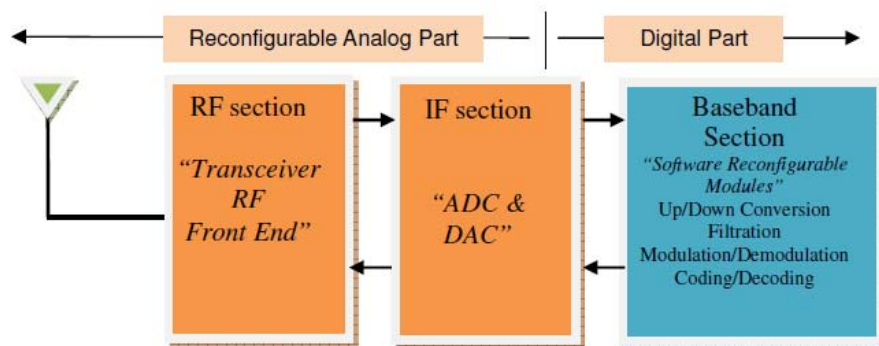
Ο όρος radio αναφέρεται στην ασύρματη συσκευή πομποδέκτη, που χρησιμοποιεί τις ραδιοσυχνότητες για τη μεταφορά των πληροφοριών. Το παραδοσιακό σύστημα ραδιοεπικοινωνίας οριζόμενο από υλικό (Hardware Defined Radio - HDR), μπορεί να εκτελέσει έναν περιορισμένο σύνολο λειτουργιών, να τροποποιηθεί μόνο μέσω φυσικής παρέμβασης, και η διαμόρφωση και η αποδιαμόρφωση πραγματοποιείται στον αναλογικό τομέα. Αυτό οδηγεί σε μεγάλο κόστος παραγωγής και μικρότερη ευελιξία στην υποστήριξη πολλαπλών προτύπων σημάτων.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, τα αναλογικά συστήματα ραδιοεπικοινωνίας υποκαθίστανται από τα ψηφιακά συστήματα ραδιοεπικοινωνίας σε αρκετές εφαρμογές ραδιοεπικοινωνίας, όπως στρατιωτικές, ιδιωτικές και εμπορικές. Ως εκ τούτου, ο Mitola επινόησε την ιδέα του SDR. Το SDR, είναι ένα σύστημα ραδιοεπικοινωνίας που περιλαμβάνει έναν πομπό, του οποίου οι παράμετροι λειτουργίας, όπως η ζώνη συχνοτήτων, ο τύπος διαμόρφωσης, η κωδικοποίηση και η ισχύς, μπορούν να αλλάξουν, κάνοντας μια αλλαγή στο λογισμικό, χωρίς να γίνουν κάποιες αλλαγές στο υλικό. Δεδομένου ότι οι παράμετροι λειτουργίας μπορούν να αλλάξουν φορτώνοντας ένα καινούργιο λογισμικό, το SDR αποτελεί μία πολύ ευέλικτη ραδιοεπικοινωνιακή πλατφόρμα, που είναι ικανή να:



- χρησιμοποιεί διαφορετικές διαμορφώσεις και πολλές μορφές κυματομορφών.
- υποστηρίζει πολλαπλά πρότυπα, όπως: GSM, EDGE, WCDMA, CDMA2000, Wi-Fi, WiMAX και πολλαπλές τεχνολογίες πρόσβασης, όπως: TDMA, CDMA, OFDMA.
- υποστηρίζει πολλαπλά κανάλια, δηλαδή να λειτουργεί ταυτόχρονα (εκπομπή-λήψη) σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων.
- υποστηρίζει περισσότερες από μία ζώνες συχνοτήτων στα πλαίσια ενός προτύπου (π.χ. GSM 900, GSM 1800, GSM 1900).

Το SDR περιέχει τα ίδια βασικά λειτουργικά τμήματα, όπως και κάθε άλλο ψηφιακό σύστημα ραδιοεπικοινωνίας, αλλά τα περισσότερα, αν όχι όλα, εφαρμόζονται στο λογισμικό και όχι στο υλικό (π.χ. μίκτες, φίλτρα, διαμορφωτές, αποδιαμορφωτές). Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.10, η SDR αρχιτεκτονική, αποτελείται από τρεις βασικές μονάδες, οι οποίες είναι ελεγχόμενες από λογισμικό: RF front-end, μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC), μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC), και ένα βασικής ζώνης ψηφιακό σύστημα ραδιοεπικοινωνίας, επαναπρογραμματίσιμο από λογισμικό.



**Εικόνα 1.10: Οι βασικές μονάδες ενός SDR πομποδέκτη.**

Το RF front-end, αναφέρεται στο αναλογικό κύκλωμα μεταξύ της κεραίας και τους μετατροπείς δεδομένων. Οι κύριες λειτουργίες του RF front-end, είναι να διαμορφώνει και να αποδιαμορφώνει το φέρον με και από τα δεδομένα αντίστοιχα.

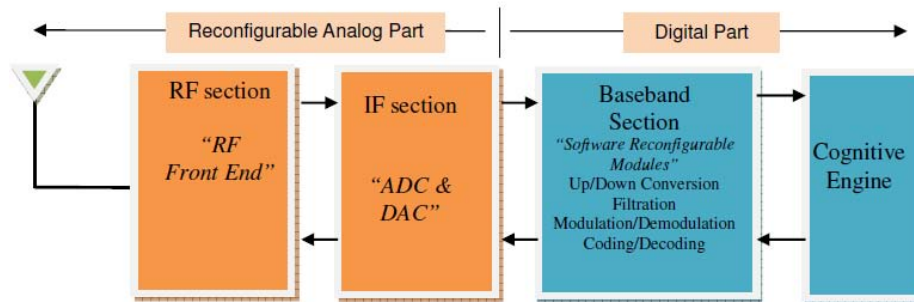
Οι μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και ψηφιακού σήματος σε αναλογικό, είναι η σύνδεση ανάμεσα στον φυσικό κόσμο των συνεχών αναλογικών σημάτων και στον κόσμο των διακριτών ψηφιακών, η οποία ελέγχεται από λογισμικό. Λειτουργίες επεξεργασίας σημάτων βασικής ζώνης, ορίζονται από προγραμματιζόμενα σχέδια που λειτουργούν σε ψηφιακό υλικό. Οι λειτουργίες του SDR επιτυγχάνονται από μονάδες λογισμικού που εκτελούνται σε: DSPs, FPGAs και GPPs.

Μία μεγάλη πρόκληση, στη μετάβαση από HDR σε SDR είναι αύξηση των υπολογισμών, διότι η επεξεργασία γίνεται σε λογισμικό. Αυτό οδηγεί σε μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, μειωμένη διάρκεια μπαταρίας και μεγάλου μεγέθους συσκευές. Αυτοί είναι οι κύριοι λόγοι που δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμη συσκευές SDR για τελικούς χρήστες. Αντίθετα έχουν αναπτυχθεί SDR για BSs και APs, τα οποία έχουν εξωτερική τροφοδοσία και δεν έχουν περιορισμό μεγέθους.

Ο επαναπρογραμματισμός που παρέχεται από την SDR τεχνολογία, επιτρέπει στην ραδιοεπικοινωνία να αλλάζει λειτουργίες. Όμως, αυτό γίνεται κατ'απαιτήση του χρήστη και επομένως ένα SDR, δεν έχει τη δυνατότητα να επαναπρογραμματίζεται από μόνο του. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη κατασκευής μίας ραδιοεπικοινωνίας, η οποία θα μπορεί να επαναπρογραμματίζεται από μόνη της. Αυτή ονομάστηκε γνωστική ραδιοεπικοινωνία.

Ένας πομποδέκτης της γνωστικής ραδιοεπικοινωνίας, είναι ικανός να 'αισθάνεται' το περιβάλλον του και να προσαρμόζει τις παραμέτρους του φυσικού στρώματός του. Προκειμένου, να επιτευχθεί αυτό το ευέλικτο επαναπροσδιοριζόμενο φυσικό στρώμα, ο πυρήνας του CR, είναι ένα SDR μαζί με όλες τις τελευταίες τεχνικές των τηλεπικοινωνιών.

Στην εικόνα 1.11 φαίνεται, η αυστηρή σχέση μεταξύ της SDR και CR αρχιτεκτονικής. Με την προσθήκη μιας μονάδας τεχνητής νοημοσύνης σε μία SDR αρχιτεκτονική, είναι εφικτό να επιτευχθεί μία προσαρμόσιμη, ευέλικτη συσκευή, που είναι σε θέση να 'μαθαίνει' ανεξάρτητα και να αντιδρά με κατάλληλο τρόπο στα εξωτερικά ερεθίσματα.



Εικόνα 1.11: Οι βασικές μονάδες ενός CR πομποδέκτη.

### 1.3 Ορισμοί

Έχουν δοθεί αρκετοί ορισμοί για το CR. Σε ένα έγγραφο του 1999, το οποίο για πρώτη φορά επινόησε τον όρο «cognitive radio», ο **Mitola** ορίζει το CR ως εξής: «το σημείο όπου τα ασύρματα PDAs (Personal Digital Assistants) και τα σχετικά δίκτυα διαθέτουν αρκετή υπολογιστική ισχύ ώστε να γνωρίζουν για τους ασύρματους πόρους και την επικοινωνία από υπολογιστή σε υπολογιστή, με σκοπό να: ανιχνεύουν τις τηλεπικοινωνιακές ανάγκες του χρήστη σε συνάρτηση με το περιβάλλον χρήσης, και να παρέχουν ασύρματους πόρους και υπηρεσίες κατάλληλες για αυτές τις ανάγκες».

Έξι χρόνια μετά το πρώτο άρθρο του Mitola για το CR, ο **Simon Haykin** σε άρθρο του για το IEEE Journal on Selected Areas in Communications, παραθέτει τον εξής ορισμό, ο οποίος αποτελεί έναν από τους πληρέστερους ορισμούς που έχουν δοθεί για το CR: «Το Cognitive Radio είναι ένα έξυπνο ασύρματο σύστημα επικοινωνιών που έχει γνώση για το περιβάλλον του, δηλαδή για τον εξωτερικό κόσμο και χρησιμοποιεί τη μέθοδο “κατανοώ οικοδομώντας” (understanding-by-building) για να μάθει από το περιβάλλον του και να προσαρμόσει την εσωτερική του κατάσταση στις στατιστικές μεταβολές των εισερχόμενων RF ερεθισμάτων, κάνοντας αντίστοιχες αλλαγές σε συγκεκριμένες λειτουργικές παραμέτρους (π.χ. στην ισχύ μετάδοσης, τη συχνότητα των φερόντων και την τεχνική διαμόρφωσης) σε πραγματικό χρόνο και έχοντας δύο κύριους στόχους:

- Αξιόπιστη επικοινωνία όταν και όποτε χρειαστεί

- *Αποτελεσματική χρησιμοποίηση του φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων ».*

Η **FCC** έδωσε τον ακόλουθο ορισμό για το CR: «*Το CR είναι ένα σύστημα ραδιοεπικοινωνιών που μπορεί να αλλάξει τις παραμέτρους μετάδοσής του, βασισμένο στην αλληλεπίδραση με το περιβάλλον μέσα στο οποίο λειτουργεί*».

Τέλος, η **IEEE** των ΗΠΑ παρουσίασε τον ακόλουθο ορισμό: «Ένας τύπος ραδιοεπικοινωνιακού συστήματος, στον οποίο τα συστήματα επικοινωνίας είναι ενήμερα για το περιβάλλον και την εσωτερική τους κατάσταση, και μπορούν να λάβουν αποφάσεις σχετικά με την λειτουργική τους συμπεριφορά, με βάση τις πληροφορίες αυτές και τους προκαθορισμένους στόχους.

#### **1.4 Κατηγορίες Cognitive Radio**

Ανάλογα με τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη, τα CR χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- **Τα Πλήρη Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών (Full Cognitive Radios γνωστά και ως 'Mitola radios')**: Τα πλήρη CR λαμβάνουν υπόψη όλες τις πιθανές παραμέτρους. Ένας ασύρματος κόμβος ή δίκτυο μπορεί να γνωρίζει κάθε πιθανή παράμετρο που είναι παρατηρήσιμη από το περιβάλλον.
- **Τα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών με Ανίχνευση Φάσματος (Spectrum Sensing Cognitive Radios γνωστά και ως 'Haykin radios')**: Στα CR με ανίχνευση φάσματος, λαμβάνεται υπόψη μόνο το φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων και τα χαρακτηριστικά του.

Το σύστημα ραδιοεπικοινωνίας του Mitola αναμένεται να υλοποιηθεί πλήρως μέχρι όλο το υλικό να γίνει διαθέσιμο σε κατάλληλο μέγεθος. Ανάλογα με τα τμήματα του φάσματος που είναι διαθέσιμα, τα CR χωρίζονται στις εξής δύο κατηγορίες:

- **CR αδειοδοτημένης ζώνης (Licensed band CR)**: Τα CR αυτής της κατηγορίας, εκτός του ότι μπορούν να χρησιμοποιούν τις μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων (ISM), έχουν την ικανότητα να χρησιμοποιούν και ζώνες οι οποίες έχουν δοθεί με άδεια σε συγκεκριμένους χρήστες. CR αδειοδοτημένης ζώνης

είναι τα συστήματα που υποστηρίζουν το πρότυπο IEEE 802.22. Το πρότυπο IEEE 802.22 καθορίζει ένα σύστημα για ένα ασύρματο δίκτυο περιφερειακής ζώνης (WRAN), που χρησιμοποιεί τις οπές του φάσματος στις ζώνες συχνότητας της τηλεόρασης, δηλαδή μεταξύ 54 και 862 MHz. Για την επίτευξη του στόχου του, το 802.22 πρότυπο χρησιμοποιεί την CR τεχνολογία, για να διασφαλίσει ότι δε θα προκληθεί αθέμιτη παρεμβολή στις τηλεοπτικές υπηρεσίες που χρησιμοποιούν τις τηλεοπτικές ζώνες.

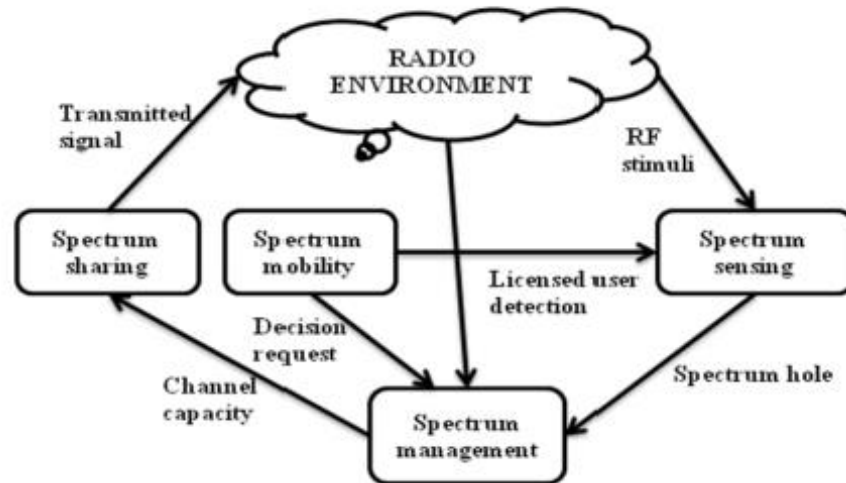
- **CR μη αδειοδοτημένης ζώνης (Unlicensed band CR):** Στην κατηγορία αυτή, ανήκουν τα CR που μπορούν να λειτουργήσουν μόνο στα μη αδειοδοτημένα τμήματα του φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων. CR μη αδειοδοτημένης ζώνης είναι τα συστήματα που υποστηρίζουν το πρότυπο IEEE 802.15. Η πρώτη ομάδα εργασίας στο πρότυπο IEEE 802.15 είναι η WPAN/Bluetooth Task Group 1 (TG1), η οποία είναι βασισμένη στην Bluetooth τεχνολογία, Η δεύτερη ομάδα εργασίας είναι η Coexistence Task Group 2 (TG2), η οποία επικεντρώνεται στην συνύπαρξη των WPAN, όπως το Bluetooth, με άλλες ασύρματες συσκευές που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων χωρίς άδεια, όπως τα WLAN.

### **1.5 Χαρακτηριστικά και Λειτουργίες των Cognitive Radio**

Ένα CR έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά:

- **Γνωστική ικανότητα (Cognitive Capability):** αναφέρεται στην ικανότητα του CR, να αισθάνεται πληροφορίες από το περιβάλλον του και να αλληλεπιδρά με αυτό σε πραγματικό χρόνο.
- **Ικανότητα επαναπρογραμματισμού (Reconfigurability):** αναφέρεται στην ικανότητα του CR, να προσαρμόζει τις παραμέτρους του ανάλογα με το περιβάλλον, όπως την συχνότητα λειτουργίας, τον τύπο διαμόρφωσης, την ισχύ μετάδοσης και το πρωτόκολλο επικοινωνίας του, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία.

Το CR έχει τέσσερις κύριες λειτουργίες, οι οποίες φαίνονται στην εικόνα 1.12, η οποία δείχνει τον βασικό κύκλο γνώσης ενός CR.



Εικόνα 1.12: Ο βασικός κύκλος γνώσης.

- **Ανίχνευση Φάσματος (Spectrum Sensing):** Το πρώτο στάδιο της ανίχνευσης φάσματος, είναι ότι καθορίζει την παρουσία ή όχι ενός πρωτεύων χρήστη σε μία ζώνη συχνοτήτων. Μετά την ανίχνευση του φάσματος, το CR είναι σε θέση να γνωστοποιήσει το αποτέλεσμα της ανίχνευσής του με άλλα CR. Ο σκοπός της ανίχνευσης φάσματος, είναι να ανακαλύψει την κατάσταση και την δραστηριότητα του φάσματος, με την περιοδική ανίχνευση των ζωνών συχνοτήτας. Συγκεκριμένα, ένας CR πομποδέκτης ανιχνεύει το φάσμα που είναι αχρησιμοποίητο (την οπή φάσματος) και καθορίζει τη μέθοδο πρόσβασης, χωρίς να παρέμβει στην αδειοδοτημένη μετάδοση.
- **Διαχείριση Φάσματος (Spectrum Management):** Στην διαχείριση φάσματος, επιλέγεται το καλύτερο διαθέσιμο φάσμα που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του χρήστη. Στην διαχείριση φάσματος συμπεριλαμβάνεται: η ανάλυση του φάσματος και η απόφαση φάσματος. Στην ανάλυση φάσματος, αναλύονται οι πληροφορίες από την ανίχνευση φάσματος, έτσι ώστε να αποκτηθεί γνώση για τις οπές φάσματος που βρέθηκαν. Η απόφαση φάσματος, αναφέρεται στην

δυνατότητα του CR να αποφασίζει για τον ρυθμό δεδομένων, να καθορίζει τη λειτουργία και το εύρος ζώνης της μετάδοσης.

- **Διαμοιρασμός Φάσματος (Spectrum Sharing):** αναφέρεται στην ύπαρξη μιας δίκαιης μέθodu συντονισμού του φάσματος μεταξύ των χρηστών. Ο συντονισμός φάσματος είναι η μια μεγάλη πρόκληση στην ανοικτή χρήση του ραδιοφάσματος. Ο διαμοιρασμός φάσματος διακρίνεται σε δύο είδη:
  - **Υποκαλυπτικός διαμοιρασμός φάσματος (Underlay Spectrum Sharing):** Στον υποκαλυπτικό διαμοιρασμό φάσματος, οι μη αδειοδοτημένοι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν μία ζώνη φάσματος εκπέμποντας σε χαμηλή ισχύ. Το χαμηλής ισχύος εκπεμπόμενο σήμα εξαπλώνεται σε ένα μεγάλο φασματικό εύρος, έτσι ώστε η παρεμβολή στους αδειοδοτημένους χρήστες να μην ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο όριο. Υποκαλυπτικός διαμοιρασμός φάσματος χρησιμοποιείται και στα UWB συστήματα, όπου γίνεται μετάδοση παλμών μικρής χρονικής διάρκειας σε μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Ένα μεγάλο μειονέκτημα αυτού του διαμοιρασμού, είναι το μικρό γεωγραφικό εύρος του δικτύου, λόγω της χαμηλής ισχύος εκπομπής.
  - **Επικαλυπτικός διαμοιρασμός φάσματος (Overlay Spectrum Sharing):** Στον επικαλυπτικό διαμοιρασμό φάσματος, οι μη αδειοδοτημένοι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν μία ζώνη φάσματος μόνο όταν αυτή υποχρησιμοποιείται ή δε χρησιμοποιείται από τους αδειοδοτημένους χρήστες.
- **Φασματική Κινητικότητα (Spectrum Mobility):** Όταν ανιχνεύεται ένας πρωτεύων (αδειοδοτημένος) χρήστης, το CR εγκαταλείπει τη συγκεκριμένη ζώνη φάσματος. Αυτή η ιδιότητα του CR, ονομάζεται φασματική κινητικότητα. Αυτή είναι η διαδικασία, που επιτρέπει στον CR χρήστη, να αλλάζει την συχνότητα λειτουργίας του. Τα γνωστικά δίκτυα ραδιοεπικοινωνίας (cognitive radio networks) προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν το φάσμα δυναμικά, για να λειτουργήσουν στην καλύτερη διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων και να διατηρηθεί διαφανής η επικοινωνία.

Τα χαρακτηριστικά των CR, για να είναι δυνατή η αποδοτική και ευέλικτη χρήση του φάσματος είναι τα εξής:

- **Ευελιξία συχνότητας (Frequency Agility):** Το CR έχει την δυνατότητα να αλλάζει την συχνότητα λειτουργίας του, έτσι ώστε να προσαρμόζεται στο περιβάλλον του.
- **Δυναμική Επιλογή Συχνότητας (Dynamic Frequency Selection):** Το CR ανιχνεύει σήματα από κοντινούς πομπούς, για να επιλέξει ένα βέλτιστο περιβάλλον στο οποίο θα λειτουργήσει.
- **Προσαρμοστική διαμόρφωση (Adaptive Modulation):** Για να χρησιμοποιηθεί το φάσμα με αποτελεσματικό τρόπο, το CR είναι ικανό να μεταβάλλει δυναμικά την τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιεί κατά την εκπομπή σημάτων.
- **Έλεγχος ισχύος μετάδοσης (Transmit Power Control):** Όταν είναι απαραίτητο, το CR προσαρμόζει την ισχύ μετάδοσής του ανάλογα τις συνθήκες που επικρατούν, για να επιτρέψει τον καλύτερο διαμοιρασμό του φάσματος.

## 1.6 Κατηγορίες φασματικών οπών

Το CR επιτρέπει την χρήση των προσωρινά αχρησιμοποίητων ζωνών συχνότητας που είναι γνωστές και ως οπές φάσματος. Συνήθως οι οπές φάσματος κατηγοριοποιούνται σε:

- **Χρονικές φασματικές οπές (Temporal Spectrum Holes) :** Μια χρονική φασματική οπή, εμφανίζεται όταν δεν υπάρχει μετάδοση από κάποιον PU κατά τη διάρκεια μιας ορισμένης χρονικής περιόδου. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από SUs σε αυτή την συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η ανίχνευση φάσματος αυτού του είδους, δεν απαιτεί κάποια πολύπλοκη επεξεργασία σήματος.
- **Χωρικές φασματικές οπές (Spatial Spectrum Holes):** Μια χωρική φασματική οπή, εμφανίζεται όταν δεν υπάρχει μετάδοση από κάποιον PU σε μία συγκεκριμένη



περιοχή. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από SUs. Η ανίχνευση φάσματος αυτού του είδους, απαιτεί πολύπλοκους αλγορίθμους επεξεργασίας σήματος. Επίσης οι οπές φάσματος κατατάσσονται στις εξής τρεις κατηγορίες:

- **Μαύρα διαστήματα (Black spaces):** Σε αυτά τα διαστήματα, κάποιες φορές, υπερισχύει τοπική παρεμβολή μεγάλης ισχύος.
- **Γκρι διαστήματα (Grey spaces):** Αυτά τα διαστήματα, περιέχουν εν μέρει χαμηλής ισχύος παρεμβολές.
- **Λευκά διαστήματα (White spaces):** Αυτά τα διαστήματα είναι απαλλαγμένα από RF παρεμβολές, εκτός από λευκό γκαουσιανό θόρυβο.

Μεταξύ αυτών των τριών κατηγοριών, τα γκρι και τα λευκά διαστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μη αδειοδοτημένους χρήστες, εφόσον πρώτα σχεδιαστεί η ακριβής τεχνική ανίχνευσης. Τα μαύρα διαστήματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, επειδή η χρήση τους, θα προκαλούσε παρεμβολές στον PU.

### **1.7 Τα βασικά οφέλη των Cognitive Radio**

Το CR προσφέρει βέλτιστη ποικιλομορφία (στην συχνότητα, ισχύ, διαμόρφωση, κωδικοποίηση, στον χώρο και στον χρόνο), η οποία οδηγεί σε:

1. **Αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος:** Με την αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος, θα μπορεί να εξυπηρετηθεί η παροντική και μελλοντική ζήτηση φάσματος και αυτός είναι ο βασικός λόγος για την χρησιμοποίηση των CR.
2. **Υπηρεσίες μεγαλύτερου εύρου ζώνης:** Η ζήτηση για MBMS υπηρεσίες συνεχώς αυξάνεται, και αυτή διευκολύνεται με την χρησιμοποίηση των CR.
3. **Καλή υποβάθμιση των υπηρεσιών:** Όταν οι συνθήκες δεν είναι ιδανικές, υπάρχει η δυνατότητα υποβάθμισης της υπηρεσίας, αντί την πλήρη και ξαφνική

απώλεια της υπηρεσίας. Αυτό το χαρακτηριστικό των CR είναι πολύ σημαντικό, ειδικά όταν πρόκειται για κινητούς χρήστες, όπου οι σταθμοί βάσης κοντά τους, αλλάζουν συνεχώς.

4. **Βελτίωση της ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS)** (καθυστέρηση, ρυθμός δεδομένων, κόστος κλπ): Από την πλευρά του χρήστη, θα βελτιωθεί η καταλληλότητα, η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία των ασύρματων υπηρεσιών.
5. **Εμπορική Εκμετάλλευση:** Το CR προωθεί την απελευθέρωση του φάσματος, δηλαδή καθιστά πιο εύκολη την αγοραπωλησία του φάσματος μεταξύ των χρηστών. Μπορεί να δημιουργηθούν επιχειρηματικές ευκαιρίες, όπως το να γίνει κάποιος μεσάζων φάσματος, ο οποίος θα διαχειρίζεται την αγοραπωλησία μεταξύ του προμηθευτή και του καταναλωτή-πελάτη, και θα λαμβάνει μια προμήθεια.
6. **Οφέλη για τους φορείς παροχής υπηρεσιών:** Περισσότεροι πελάτες στην αγορά και αύξηση της ταχύτητας μεταφοράς των πληροφοριών στους υπάρχον πελάτες.
7. **Ευελιξία συσκευής:** Ένα CR είναι σε θέση να αλλάζει: υπηρεσίες, πρωτόκολλα, διαμόρφωση, φάσμα, κλπ, χωρίς να έχει την ανάγκη ένας χρήστης ή κατασκευαστής, να κάνει αναβάθμιση σε μία νέα συσκευή.
8. **Κοινή πλατφόρμα υλικού:** Όφελος στους κατασκευαστές, διότι πλέον δεν θα χρειάζεται να κατασκευάζονται πολλές παραλλαγές υλικού, αλλά θα χρησιμοποιούν μια ενιαία κοινή πλατφόρμα για να τρέχουν μία πληθώρα από λογισμικά.
9. **Επικοινωνίες για υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης:** Οι κοινές επιχειρήσεις κατά τη διάρκεια σοβαρών περιστατικών, όπως η αστυνομία, η πυροσβεστική, το

ασθενοφόρο και η ακτοφυλακή, θα επωφεληθούν σε μεγάλο βαθμό, διότι θα συνδέονται μεταξύ τους σε ένα σύστημα ραδιοεπικοινωνίας, με κάθε χρήστη να ανιχνεύει το φάσμα, το οποίο θα χρησιμοποιείται και από άλλους χρήστες, και να αναπροσαρμόζεται.

10. **Οφέλη στους κατόχους αδειών:** Το CR θα επιτρέπει στους κατόχους αδειών, να μισθώνουν ένα μέρος των δικαιωμάτων του ραδιοφάσματός τους, χωρικά ή χρονικά σε τρίτους, για να καλύψουν παραδείγματος χάριν ένα μέρος των δαπανών τους, όπως το κόστος της άδειας, ακόμη και να έχουν κάποιο κέρδος.

### **1.8 Το πρώτο Cognitive Radio**

Η DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency - Υπηρεσία Προηγμένων Ερευνητικών Έργων στον τομέα της Άμυνας), είναι μία υπηρεσία του τμήματος άμυνας των ΗΠΑ, η οποία είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για χρήση από τον αμερικάνικο στρατό. Μία από τις εργασίες της, είναι το Πρόγραμμα Επικοινωνιών Νέας Γενιάς (NeXt Generation Communication Program - XG), το οποίο στοχεύει στην ανάπτυξη ενός προτύπου για το Cognitive Radio. Στα πλαίσια του XG αναπτύχθηκε το Adapt4 XG1, το οποίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



### **Εικόνα 1.13: Το Adapt4 XG1.**

Το Adapt4 XG1 μπορεί να προσαρμόζεται στο περιβάλλον του και να εκμεταλλεύεται τις φασματικές οπές. Έχει την ικανότητα να χρησιμοποιεί τις αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων, όταν αυτές δεν χρησιμοποιούνται από τους χρήστες με άδεια.

Συγκεκριμένα, το Adapt4 XG1 παρέχει data throughput 30-180 kbps. Υποστηρίζει Ethernet (συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων IP) και επικοινωνίες σειριακών δεδομένων. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιήσει έως και 45 κανάλια ταυτόχρονα, καθένα από τα οποία μπορεί αμέσως να αλλάξει για την αποφυγή παρεμβολών, χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση. Με τη δυνατότητα πολλαπλών φερόντων, το Adapt4 XG1 μπορεί να υποστηρίξει μια ποικιλία εφαρμογών, όπως SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition – εποπτικός έλεγχος και συλλογή δεδομένων), τηλεμετρία, ασφάλεια (συμπεριλαμβανομένης και της παρακολούθησης με βίντεο), κινητή IP και άλλες.

## **1.8 Το πρότυπο IEEE 802.22**

Το IEEE 802.22, είναι ένα πρότυπο για WRAN, που θα χρησιμοποιεί τα λευκά διαστήματα στο φάσμα συχνοτήτων της τηλεόρασης, δηλαδή θα χρησιμοποιεί τις UHF/VHF τηλεοπτικές ζώνες μεταξύ 54 και 862 MHz. Για την επικοινωνία στο IEEE 802.22 πρότυπο, θα χρησιμοποιηθούν συγκεκριμένα τηλεοπτικά κανάλια, καθώς και οι ζώνες προστασίας (guard bands) των καναλιών αυτών. Η ανάπτυξη του προτύπου IEEE 802.22 WRAN στοχεύει στη χρήση των CR τεχνικών, και θα επιτρέπει την κοινή χρήση του γεωγραφικά αχρησιμοποίητου φάσματος που έχει παραχωρηθεί στην υπηρεσία τηλεοπτικής εκπομπής, χωρίς παρεμβολές. Ο στόχος του προτύπου αυτού, είναι η ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές με μικρό πληθυσμό, με απόδοση συγκρίσιμη με εκείνης των υφισταμένων τεχνολογιών ευρυζωνικής πρόσβασης (π.χ. DSL και καλωδιακά μόντεμ) που εξυπηρετούν αστικές και προαστιακές περιοχές. Είναι η πρώτη παγκόσμια προσπάθεια, να καθοριστεί μια τυποποιημένη διεπαφή αέρα, βασιζόμενη σε CR τεχνικές για τη ευκαιριακή χρήση των ζωνών της τηλεόρασης, ενώ θα εξασφαλίζεται ότι δεν θα υπάρχουν επιζήμιες παρεμβολές, στις ψηφιακές και αναλογικές τηλεοπτικές εκπομπές και σε χαμηλής ισχύος αδειοδοτημένες συσκευές, όπως τα ασύρματα μικρόφωνα.

Η ανίχνευση της λειτουργίας των ασύρματων μικροφώνων, είναι πιο δύσκολη από την ανίχνευση τηλεοπτικής εκπομπής, διότι εκπέμπουν σε πολύ χαμηλότερη ισχύ (τυπικά 50mW για εύρος κάλυψης 100m) και καταλαμβάνουν χαμηλότερο εύρος ζώνης (περίπου 200 KHz). Μία λύση στο παραπάνω πρόβλημα, είναι τα ασύρματα μικρόφωνα να περιέχουν μία ειδική συσκευή, η οποία θα εκπέμπει beacons στο κανάλι που θα χρησιμοποιούν. Για παράδειγμα: σε μία συναυλία που χρησιμοποιούνται ασύρματα μικρόφωνα σε ένα κανάλι, έστω C, οι ειδικές αυτές συσκευές θα εκπέμπουν περιοδικά με υψηλή ισχύ beacons στο κανάλι C. Οι BSs και οι CPEs, οι οποίοι θα λάβουν αυτά τα beacons από το κανάλι C, θα εγκαταλείπουν αυτό το κανάλι για την αποφυγή παρεμβολής.

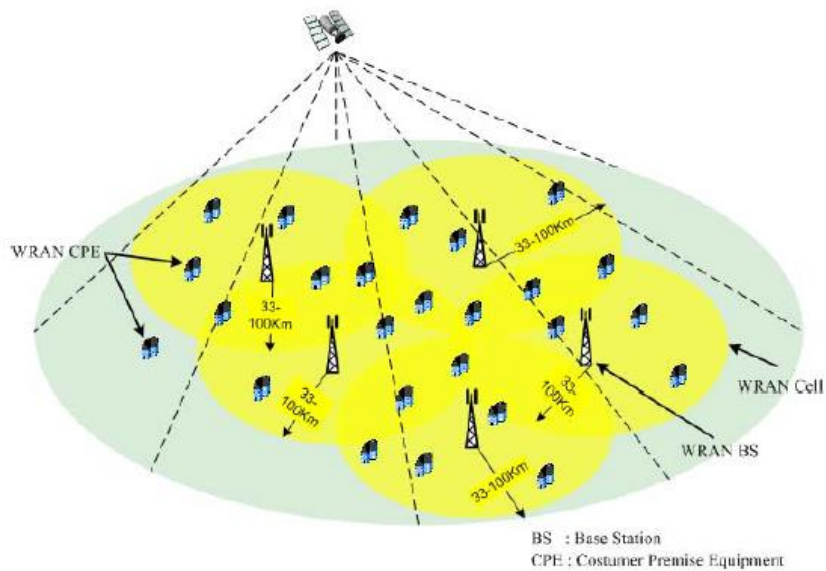
Το IEEE P802.22.1 είναι ένα συναφές πρότυπο που αναπτύχθηκε για να ενισχύσει την προστασία από επιβλαβείς παρεμβολές, για χαμηλής ισχύος αδειοδοτημένες συσκευές που λειτουργούν στις τηλεοπτικές ζώνες μετάδοσης. Το IEEE P802.22.2 είναι μια προτεινόμενη πρακτική για την εγκατάσταση και την ανάπτυξη των IEEE 802.22 συστημάτων. Το IEEE 802.22 WG είναι η ομάδα εργασίας της επιτροπής του IEEE 802

LAN/MAN προτύπου, που σύνταξε το 802.22 πρότυπο. Οι δύο 802.22 ομάδες εργασίας (TG1 και TG2) αναπτύσσουν τα 802.22.1 και 802.22.2 αντίστοιχα.

Τα τελευταία πέντε χρόνια, οι ΗΠΑ έπεσαν από την τρίτη στην δέκατη έκτη θέση, όσον αφορά το ποσοστό του πληθυσμού με ευρυζωνική σύνδεση και την ταχύτητα αυτών των συνδέσεων. Ενώ η διαθεσιμότητα της ευρυζωνικής πρόσβασης μπορεί να μην είναι κρίσιμης σημασίας στις αστικές και προαστιακές περιοχές, αυτό σίγουρα δεν ισχύει στην περίπτωση των αγροτικών και απομακρυσμένων περιοχών, όπου είναι συγκεντρωμένο περίπου το ήμισυ του πληθυσμού των ΗΠΑ. Αυτό οδήγησε την FCC, στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών (π.χ., βασισμένες στα CRs), οι οποίες θα αυξήσουν τη διαθεσιμότητα της ευρυζωνικής πρόσβασης σε αυτές τις περιοχές.

Η FCC επέλεξε τις ζώνες της τηλεόρασης για την παροχή αυτής της υπηρεσίας, επειδή αυτές οι συχνότητες διαθέτουν πολύ ευνοϊκά χαρακτηριστικά διάδοσης, τα οποία θα επιτρέψουν στους χρήστες να εξυπηρετηθούν, και θα παρέχουν ένα κατάλληλο επιχειρηματικό ενδιαφέρον για τους παρόχους ασύρματων υπηρεσιών Internet (WISPs). Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί ότι πολλά τηλεοπτικά κανάλια είναι σε μεγάλο βαθμό αχρησιμοποίητα σε πολλά μέρη των ΗΠΑ, δεδομένου ότι τα περισσότερα σπίτια και επιχειρήσεις στηρίζονται στις υπηρεσίες της καλωδιακής και δορυφορικής τηλεόρασης. Τέλος, άλλο ένα πλεονέκτημα, είναι ότι οι 802.22 συσκευές στις ζώνες της τηλεόρασης θα είναι χωρίς άδεια, το οποίο θα μειώνει το κόστος και θα είναι κατάλληλο για την ύπαρξη μιας πιο προσιτής υπηρεσίας.

Τα 802.22 WRAN δίκτυα απευθύνονται και σε: μονοκατοικίες, πολυκατοικίες, μικρό γραφεία / γραφεία στο σπίτι (SOHO), μικρές επιχειρήσεις, κτίρια με πολλαπλούς νοικοκυριούς, δημόσια και ιδιωτικά πανεπιστήμια. Το 802.22 δίκτυο θα παρέχει υπηρεσίες, όπως μετάδοση δεδομένων, φωνής, καθώς ήχου και βίντεο, με την κατάλληλη ποιότητα υπηρεσίας (QoS).



**Εικόνα 1.14: Η τοπολογία του προτύπου 802.22.**

### Τοπολογία

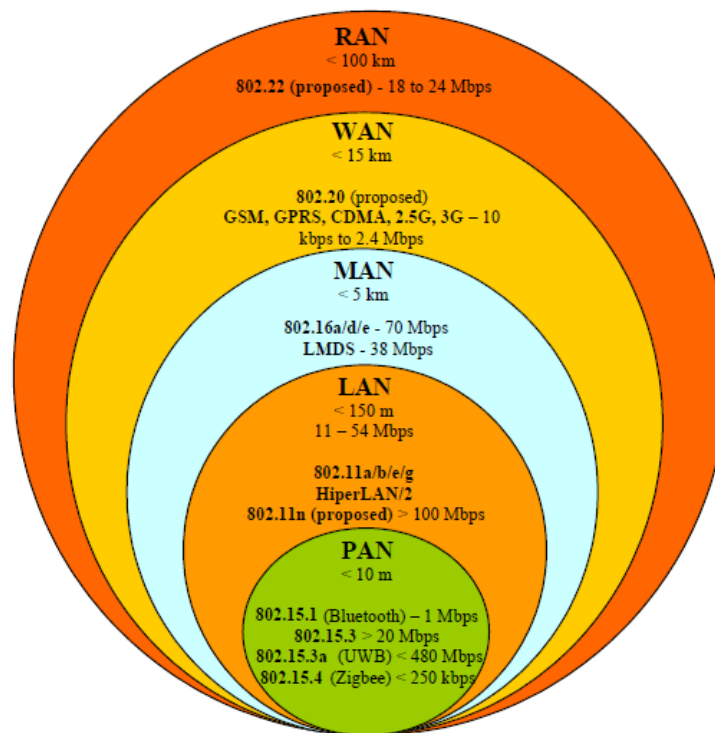
Το 802.22 σύστημα, καθορίζει μία σταθερή P2MP ασύρματη διεπαφή αέρα. Το σύστημα θα αποτελείται από σταθμούς βάσης (BS), οι οποίοι θα διαχειρίζονται τις δικές τους κυψέλες και τους CPEs (Consumer Premise Equipments). Οι CPEs θα συνδέονται σε ένα σταθμό βάσης μέσω μιας ασύρματης ζεύξης. Οι σταθμοί βάσης θα ελέγχουν το μέσο πρόσβασης, για όλους τους CPE που προσάρτωνται σε αυτό. Για να επιτύχουν την κατάλληλη προστασία, οι σταθμοί βάσης, εκτελούν γνωστική ανίχνευση, μέσω των CPEs, οι οποίοι ανιχνεύουν το φάσμα και στέλνουν περιοδικά εκθέσεις (reports) στους σταθμούς βάσης, ενημερώνοντάς τους για το τι ανιχνεύουν. Οι σταθμοί βάσης, με τις πληροφορίες που έχουν συλλέξει, αξιολογούν κατά πόσον είναι απαραίτητη μία αλλαγή στο κανάλι που χρησιμοποιείται, ή όχι, και αν πρέπει συνεχιστεί η εκπομπή και η λήψη σε ένα κανάλι.

## Χωρητικότητα υπηρεσίας

Το 802.22 σύστημα καθορίζει φασματικές αποδόσεις από 0,5 bit/(sec/Hz) έως 5 bit/(sec/Hz). Με έναν μέσο όρο 3 bits/(sec/Hz), αυτό αντιστοιχεί σε ένα συνολικό ρυθμό δεδομένων φυσικού στρώματος(PHY) 18 Mbps σε ένα τηλεοπτικό κανάλι των 6 MHz.

## Κάλυψη υπηρεσίας

Ένα άλλο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του 802.22 WRAN προτύπου σε σύγκριση με τα υφιστάμενα IEEE 802 πρότυπα, είναι η περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης που μπορεί να φτάσει και τα 100 χιλιόμετρα αν δεν υπάρχει περιορισμός στην ισχύ (το τρέχον καθορισμένο εύρος κάλυψης είναι τα 33 χιλιόμετρα σε 4 Watts CPE EIRP). Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.15, τα WRANs έχουν πολύ μεγάλο εύρος κάλυψης, το οποίο κατά κύριο λόγο οφείλεται στην υψηλότερη ισχύ και στα ευνοϊκά χαρακτηριστικά διάδοσης των τηλεοπτικών ζωνών συχνότητας.



Εικόνα 1.15: Τα σημερινά δίκτυα.



Δύο μεγάλες διαφορές το προτύπου 802.22 με το πρότυπο 802.16e (WiMAX), το οποίο παρέχει ευρυζωνικές συνδέσεις σε μεγάλες αποστάσεις και κινητό περιβάλλον είναι: η μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης που προσφέρει το πρότυπο 802.22 και αδυναμία λειτουργίας του προτύπου 802.16e σε αδειοδοτημένες ζώνες, λόγω έλλειψης τεχνικών ασφαλείας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

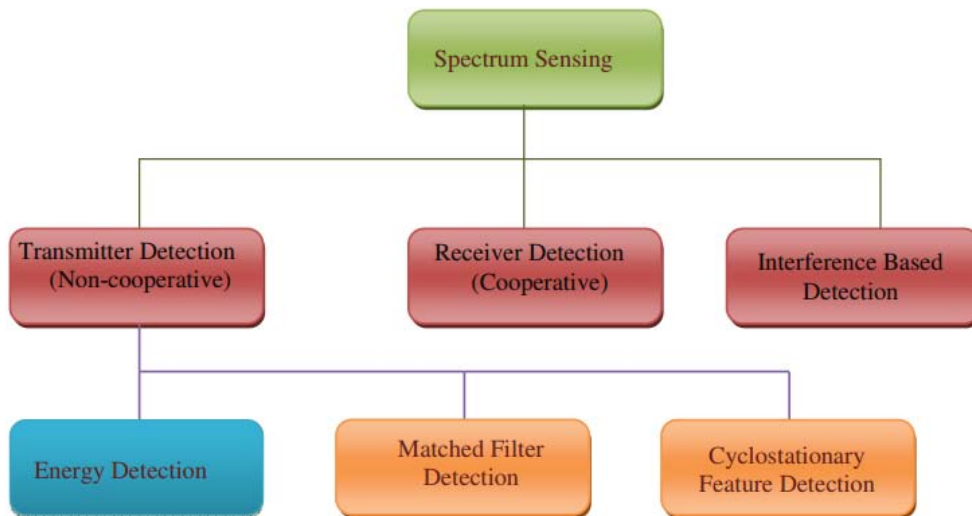
### Ανίχνευση Φάσματος

#### 2.1 Εισαγωγή

Η κύρια πρόκληση στα CRs και ο κύριος στόχος στον γνωστικό κύκλο, είναι η ανίχνευση φάσματος, δηλαδή η εύρεση οπών στο ραδιόφασμα, για την χρησιμοποίησή τους από τους CR χρήστες, χωρίς την παρεμβολή στους πρωτεύοντες χρήστες. Για να αυξηθεί η πιθανότητα ανίχνευσης, χρησιμοποιούνται τεχνικές ανίχνευσης φάσματος.

Στη βιβλιογραφία, οι τεχνικές ανίχνευσης φάσματος μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: *Ανίχνευση πομπού* (Transmitter detection), *Ανίχνευση δέκτη* (Receiver detection) και *Ανίχνευση με βάση την παρεμβολή* (Interference-based detection), όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1.

#### 2.2 Τεχνικές ανίχνευσης φάσματος



Εικόνα 2.1: Τεχνικές ανίχνευσης φάσματος.

### 2.2.1 Ανίχνευση πομπού (Μη συνεργατική ανίχνευση) – Transmitter detection (Non cooperative)

Μια αποτελεσματική προσέγγιση για τον εντοπισμό φασματικών ευκαιριών με χαμηλές απαιτήσεις υποδομής, είναι η ανιχνεύση του πρωτεύων δέκτη εντός εμβέλειας ενός δευτερεύων χρήστη. Ωστόσο αυτό δεν είναι πρακτικά εφικτό, διότι ο δευτερεύων χρήστης δεν είναι αρκετά ευφυής για να ανιχνεύσει ένα δέκτη. Ως εκ τούτου, οι μέθοδοι ανίχνευσης φάσματος βασίζονται στην ανίχνευση του πρωτεύων πομπού. Η ιδέα είναι να βρεθούν πρωτεύοντες πομποί που λειτουργούν σε συγκεκριμένο χρόνο, με τη χρήση τοπικών μετρήσεων και παρατηρήσεων. Με αυτήν την τεχνική, ο δευτερεύων χρήστης εξετάζει την ισχύ του σήματος που παράγεται από τον πρωτεύων χρήστη, για την αξιοποίηση του ελεύθερου χώρου μέσα στο κανάλι.

Το βασικό μοντέλο υπόθεσης αυτής της κατηγορίας τεχνικών μπορεί να ορισθεί ως εξής:

$$x(t) = \begin{cases} n(t) & H_0 \\ hs(t) + n(t) & H_1 \end{cases}$$

όπου  $x(t)$  είναι το σήμα που δέχεται ο δευτερεύων χρήστης,  $s(t)$  είναι το σήμα που στέλνει ο πρωτεύων πομπός,  $n(t)$  είναι ο προσθετικός λευκός γκαουσιανός θόρυβος (Additive White Gaussian Noise – AWGN) και  $h$  είναι το κέρδος του καναλιού.  $H_0$  είναι η μηδενική υπόθεση, που δηλώνει ότι δεν υπάρχει σήμα πρωτεύων χρήστη στη συγκεκριμένη συχνοτική ζώνη.  $H_1$  είναι η εναλλακτική υπόθεση, που υποδεικνύει ότι κάποιο πρωτεύων σήμα είναι παρόν.

Με βάση το παραπάνω μοντέλο υπόθεσης, υπάρχουν τρεις τεχνικές ανίχνευσης πομπού: η *ανίχνευση προσαρμοσμένου φίλτρου* (matched filter detection), η *ανίχνευση ενέργειας* (energy detection) και η *ανίχνευση κυκλοστάσιμων χαρακτηριστικών* (cyclostationary feature detection). Παρακάτω θα αναλυθούν και οι τρεις αυτές τεχνικές, και θα παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μίας.

### 2.2.1.1 Ανίχνευση προσαρμοσμένου φίλτρου (Matched Filter Detection)



**Εικόνα 2.2: Το μπλοκ διάγραμμα του ανιχνευτή προσαρμοσμένου φίλτρου.**

Σε αυτήν την ανίχνευση συγκρίνεται το λαμβανόμενο σήμα με ένα ήδη γνωστό σήμα, ένα σήμα οδηγό. Για να χρησιμοποιηθεί αυτού του είδους η ανίχνευση, πρέπει ο πρωτεύων χρήστης να χρησιμοποιεί πιλοτικό σήμα, προοίμια ή κώδικες εξάπλωσης. Πιο συγκεκριμένα, ένα προσαρμοσμένο φίλτρο, είναι ένα γραμμικό φίλτρο, σχεδιασμένο να παρέχει το μέγιστο SNR στην έξοδο του για μία δεδομένη μεταδιδόμενη κυματομορφή. Η εικόνα 2.2 απεικονίζει το διάγραμμα βαθμίδων του προσαρμοσμένου φίλτρου. Το σήμα που λαμβάνεται από τον δευτερεύων χρήστη, είναι η είσοδος στο προσαρμοσμένο φίλτρο, το οποίο είναι  $r(t) = s(t) + n(t)$ . Η έξοδος του προσαρμοσμένου φίλτρου είναι η συνέλιξη του  $r(t)$  με το  $h(t)$ , όπου  $h(t) = s(T-t + \tau)$ . Τέλος, η έξοδος του προσαρμοσμένου φίλτρου συγκρίνεται με ένα κατώφλι, για να αποφασιστεί αν υπάρχει παρόν ή όχι πρωτεύων χρήστης.

Εάν το σήμα που επρόκειτο να ανιχνευθεί είναι απολύτως γνωστό, ο βέλτιστος ανιχνευτής σε ένα AWGN κανάλι, είναι το προσαρμοσμένο φίλτρο. Αυτό σημαίνει, ότι δευτερεύων χρήστες πρέπει να έχουν εκ των προτέρων γνώση, σχετικά με τον τύπο της διαμόρφωσης, τη μορφοποίηση παλμού και τη μορφή των πακέτων, αλλιώς θα είναι δύσκολο να εντοπιστεί ο πρωτεύων χρήστης, και το προσαρμοσμένο φίλτρο δεν θα αποδώσει. Συνήθως όμως είναι γνωστό, τι είδους πρωτεύοντες χρήστες επρόκειτο να ανιχνευθούν, και συνήθως τα μεταδιδόμενα σήματα καθορίζονται σε κάποιο βαθμό από πρότυπα και κανονισμούς.

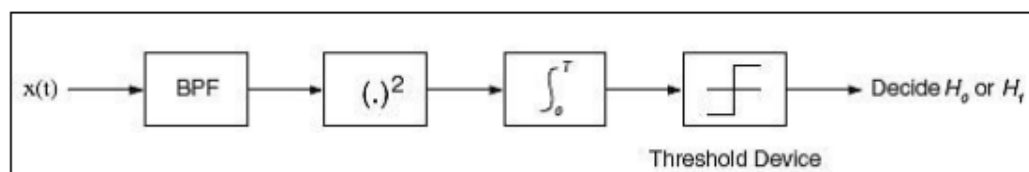
### Πλεονεκτήματα:

- Η ανίχνευση προσαρμοσμένου φίλτρου χρειάζεται λιγότερο χρόνο ανίχνευσης, επειδή απαιτεί μόνο  $O(1 / \text{SNR})$  δείγματα για να ικανοποιήσει έναν περιορισμό μιας δοθείσας πιθανότητας ανίχνευσης.
- Όταν η πληροφορία του σήματος του πρωτεύων χρήστη είναι γνωστή στον δευτερεύων χρήστη, η ανίχνευση προσαρμοσμένου φίλτρου είναι η βέλτιστη ανίχνευση σε σταθερό γκαουσιανό θόρυβο.

### Μειονεκτήματα:

- Το μεγάλο μειονέκτημα της ανίχνευσης προσαρμοσμένου φίλτρου είναι ότι χρειάζεται προηγούμενη γνώση για κάθε πρωτεύων σήμα.
- Για την ανίχνευση, ο δευτερεύων χρήστης θα χρειαστεί έναν ειδικό δέκτη για κάθε τύπο πρωτεύων χρήστη.

### 2.2.1.2 Ανίχνευση ενέργειας (Energy detection)



**Εικόνα 2.3: Το μπλοκ διάγραμμα του ανιχνευτή ενέργειας.**

Στην πιο γενική περίπτωση, όπου ο δευτερεύων δέκτης δε διαθέτει αρκετές πληροφορίες για το πρωτεύον σήμα, αν για παράδειγμα γνωρίζει μόνο την ισχύ του θορύβου, ο βέλτιστος ανιχνευτής είναι ο ανιχνευτής ενέργειας. Προκειμένου να μετρήσει την ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος, το τετραγωνίζει και στη συνέχεια ολοκληρώνει επί το διάστημα παρατήρησης  $T$ . Τελικά η έξοδος του ολοκληρωτή,  $Y$ ,

συγκρίνεται με ένα κατώφλι και λαμβάνεται η απόφαση για το αν είναι παρόν ή όχι κάποιος πρωτεύων χρήστης.

Ο ανιχνευτής ενέργειας μπορεί να ανιχνεύσει κάθε τύπο σήματος, δεν απαιτεί καμία γνώση για το σήμα που επρόκειτο να ανιχνευθεί και είναι πολύ εύκολος στην υλοποίηση, γι' αυτό και έχει υιοθετηθεί ευρέως στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, η επίδοσή του είναι πολύ ευαίσθητη στην αβεβαιότητα της ισχύος του θορύβου. Σε πραγματικές συνθήκες, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι ο δευτερεύων δέκτης θα γνωρίζει μόνο κατ' εκτίμηση την ισχύ του θορύβου. Επομένως, αν το SNR είναι αρκετά χαμηλό, ο ανιχνευτής δεν μπορεί να διακρίνει αξιόπιστα μεταξύ σήματος και θορύβου και καθίσταται ανώφελος. Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί, ότι για μια αβεβαιότητα  $x$  dB στην ισχύ του θορύβου υπάρχει ένα κατώφλι στο SNR, κάτω από το οποίο ο ανιχνευτής ενέργειας δεν μπορεί να ανιχνεύσει το σήμα. Το κατώφλι αυτό καλείται  $SNR_{wall}$  και δίνεται από τη σχέση:

$$SNR_{wall} = 10 \log_{10} [10^{(x/10)} - 1]$$

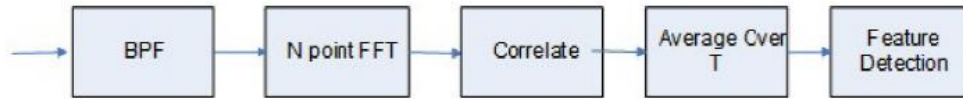
#### **Πλεονεκτήματα:**

- Ο ανιχνευτής ενέργειας είναι καθολικός, με την έννοια ότι μπορεί να ανιχνεύσει κάθε τύπο σήματος, και δεν απαιτεί καμία γνώση για το σήμα που επρόκειτο να ανιχνευθεί.

#### **Μειονεκτήματα:**

- Πρέπει να είναι γνωστή η ισχύς του θορύβου για να οριστεί το κατώφλι.
- Ο ανιχνευτής ενέργειας δεν είναι σε θέση να διακρίνει μεταξύ διαφορετικών τύπων σημάτων, παρά μόνο να αποφασίσει περί παρουσίας ή απουσίας σήματος.

### 2.2.1.3 Ανίχνευση κυκλοστάσιμων χαρακτηριστικών (Cyclostationary feature detection)



**Εικόνα 2.4:** Το μπλοκ διάγραμμα του ανιχνευτή κυκλοστάσιμων χαρακτηριστικών.

Η ανίχνευση κυκλοστάσιμων χαρακτηριστικών είναι μία τεχνική, η οποία μπορεί να διακρίνει το διαμορφωμένο πρωτεύον σήμα από τον προσθετικό θόρυβο και την παρεμβολή, εκμεταλλεύομενη την περιοδικότητα του πρωτεύοντος σήματος. Ένα σήμα λέγεται ότι είναι κυκλοστάσιμο, αν η μέση τιμή και η αυτοσυσχέτισή του είναι περιοδικές συναρτήσεις. Ένα σήμα συνεχούς χρόνου  $x(t)$  είναι κυκλοστάσιμο, αν υπάρχει  $T_0 > 0$  τέτοιο ώστε:

$$\mu_x(t) = \mu_x(t + T_0) \quad \forall t$$

$$R_x(t_1, t_2) = R_x(t_1 + T_0, t_2 + T_0) \quad \forall t_1, t_2$$

Η ανίχνευση χαρακτηριστικών υποδήλωνει την εξαγωγή χαρακτηριστικών από το λαμβανόμενο σήμα και την εκτέλεση της ανίχνευσης με βάση τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά.

Η ανίχνευση κυκλοστάσιμων χαρακτηριστικών, αποδίδει καλύτερα σε περιοχές με χαμηλό SNR, σε σχέση με έναν ανιχνευτή ενέργειας και είναι πιο ανθεκτική στην αβεβαιότητα του θορύβου. Παρόλο, που η ανίχνευση αυτή απαιτεί εκ των προτέρων γνώση για τα χαρακτηριστικά του σήματος, έχει την δυνατότητα να διακρίνει τις δευτερευον εκπομπές από τα διαφορετικά είδη πρωτεύοντων σημάτων.

#### **Πλεονεκτήματα:**

- Ανθεκτική στην αβεβαιότητα του θορύβου και αποδίδει καλύτερα από την ανίχνευση ενέργειας σε περιοχές χαμηλού SNR.
- Χρειαζόμαστε εκ των προτέρων γνώση των χαρακτηριστικών του σήματος.

- Βελτιώνει την συνολική απόδοση του CR.

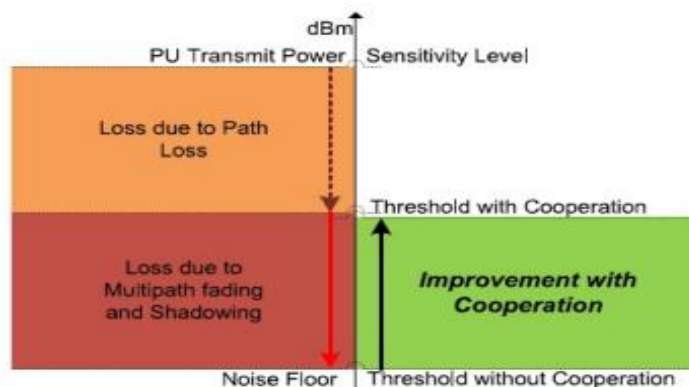
#### Μειονεκτήματα:

- Υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα
- Μεγάλος χρόνος ανίχνευσης

Λόγω των παραπάνω μειονεκτημάτων, αυτή η τεχνική ανίχνευσης, είναι λιγότερο συχνη από ό,τι η ανίχνευση ενέργειας, στις συνεργατικές τεχνικές ανίχνευσης.

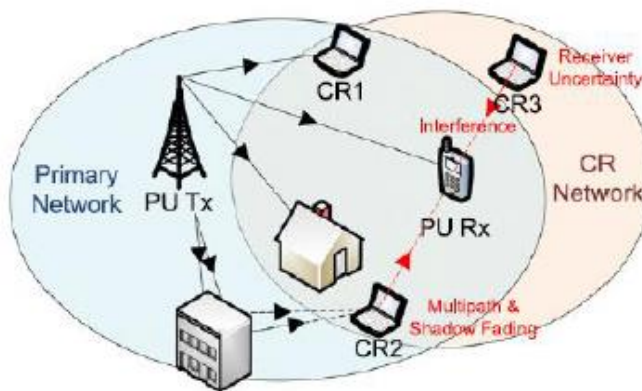
Πρόσφατα, υπάρχει ένα τεράστιο ενδιαφέρον για την ανίχνευση OFDM σημάτων. Ένας λόγος είναι, ότι πολλές από τις τρέχον και μελλοντικές τεχνολογίες για την ασύρματη επικοινωνία, όπως WiFi, WiMAX, LTE και DVB-T, χρησιμοποιούν OFDM σήματα. Ως εκ τούτου, είναι λογικό να υποθέσει κανείς ότι τα CR, πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύουν OFDM σήματα. Ένας άλλος λόγος, είναι ότι τα OFDM σήματα εμφανίζουν πολύ γνωστές ιδιότητες φασματικής συσχέτισης. Έχουν προταθεί αρκετοί ανιχνευτές κυκλοστάσιμων χαρακτηριστικών για την ανίχνευση τηλεοπτικών σημάτων, βασισμένα σε OFDM, όπως για παράδειγμα το πρότυπο IEEE 802.22.

### 2.2.2 Ανίχνευση Δέκτη (Συνεργατική ανίχνευση) - Receiver detection (Cooperative)





**Εικόνα 2.5: Τα αποτελέσματα στην απόδοση της ανίχνευσης από διάφορα φαινόμενα και η βελτίωση από την συνεργατική ανίχνευση.**



**Εικόνα 2.6: Ένα βασικό και ένα CR δίκτυο.**

Πολλά φαινόμενα, όπως η εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών, η σκίαση, η απώλεια διαδρομής και η αβεβαιότητα του δέκτη, μειώνουν την απόδοση της ανίχνευσης φάσματος. Τα φαινόμενα αυτά απαιτούν μεγάλες απαιτήσεις ευαισθησίας, οι οποίες περιορίζονται από το κόστος και τις απαιτήσεις ισχύος. Όμως λόγω της χωρικής ποικιλομορφίας, είναι απίθανο όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες να αντιμετωπίσουν τα παραπάνω φαινόμενα.

Στην εικόνα 2.6, θεωρούμε ότι υπάρχουν τρία CR και ένας PU με έναν πρωτεύων πομπό (PU TX) και ένα βασικό δέκτη (PU RX). Το CR2 έχει εμπόδιο ένα κτίριο, το CR3 είναι εκτός εμβέλειας από τον PU TX, και το CR1 ανιχνεύει ένα ισχυρό σήμα από τον PU. Λόγω των πολλαπλών εξασθενημένων αντιγράφων του PU σήματος και του κτιρίου, ο CR2 'υποφέρει' από εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών και σκίαση, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην ανιχνευθεί σωστά το PU σήμα. Ο CR3 'υποφέρει' από την αβεβαιότητα του δέκτη, διότι δεν έχει επίγνωση για την PU μετάδοση και δεν γνωρίζει την ύπαρξη του PU RX, με αποτέλεσμα η εκπομπή από τον CR3 μπορεί να παρεμβάλει την λήψη του PU RX.

Στην συνεργατική ανίχνευση, οι δευτερεύοντες χρήστες που ανιχνεύουν ένα ισχυρό πρωτεύων σήμα, όπως ο CR1, μπορούν να συνεργαστούν με κεντρικό ή αποκεντρωμένο τρόπο και να ανταλλάξουν πληροφορίες ανίχνευσης, για να εντοπίσουν τις οπές του φάσματος. Κάθε συνεργαζόμενος κόμβος χρησιμοποιεί τοπικά, οποιαδήποτε από τις

τεχνικές ανίχνευσης φάσματος που περιγράφηκαν προηγουμένως. Υπάρχουν τρεις τεχνικές συνεργασίας:

- **Κεντριοκοποιημένη (Centralized):** Στην κεντριοκοποιημένη συνεργατική ανίχνευση υπάρχει ένα κέντρο συγχώνευσης (FC). Το κέντρο αυτό, διαλέγει για ανίχνευση ένα κανάλι ή μία ζώνη συχνοτήτων και δίνει εντολή σε όλους τους συνεργαζόμενους CR χρήστες, να εκτελέσουν ανεξάρτητα τοπική ανίχνευση. Στη συνέχεια, όλοι οι συνεργαζόμενοι CR χρήστες, στέλνουν αναφορά στο κέντρο με τα αποτελέσματα της ανίχνευσής τους. Τέλος, το κέντρο, συνδυάζει τα τοπικά αποτελέσματα ανίχνευσης που έλαβε, αποφασίζει για την παρουσία ή όχι PUs, και στέλνει την απόφαση του πίσω στους συνεργαζόμενους CR χρήστες.

Στην εικόνα 2.7a, το CR0 είναι το FC, και τα CR1-CR5 είναι οι συνεργαζόμενοι CR χρήστες. Για την τοπική ανίχνευση, όλοι οι CR χρήστες είναι συντονισμένοι στο επιλεγμένο αδειοδοτημένο κανάλι ή ζώνη συχνοτήτων, όπου υπάρχει μία φυσική σημείο-προς-σημείο ζεύξη ανάμεσα στον κάθε CR χρήστη και τον PU εκπομπό για την παρατήρηση του πρωτεύων σήματος, το λεγόμενο, κανάλι ανίχνευσης. Για την αναφορά των αποτελεσμάτων, όλοι οι CR χρήστες είναι συντονισμένη σε ένα κανάλι ελέγχου, όπου υπάρχει μία φυσική σημείο-προς-σημείο ζεύξη ανάμεσα στον κάθε CR χρήστη και το κέντρο συγχώνευσης για την αποστολή των αποτελεσμάτων ανίχνευσης, το λεγόμενο, κανάλι αναφοράς.

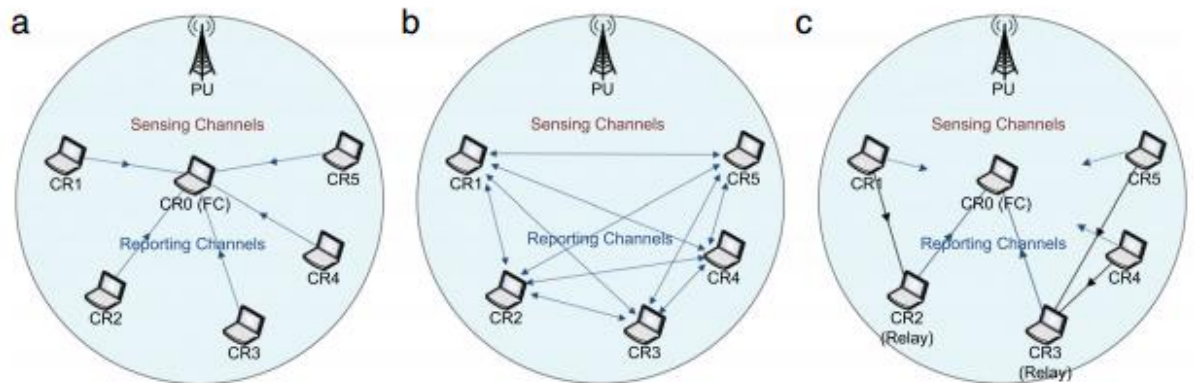
- **Κατανεμημένη (Distributed):** Σε αντίθεση με την κεντριοκοποιημένη τεχνική, η κατανεμημένη τεχνική, δεν βασίζεται σε ένα κέντρο συγχώνευσης για να λάβει την απόφαση. Σε αυτή την τεχνική, οι CR χρήστες επικοινωνούν μεταξύ τους και συγκλίνουν σε μία ενοποιημένη απόφαση, για την παρουσία ή όχι PUs.

Στην εικόνα 2.7b, μετά την τοπική ανίχνευση, οι CR1-CR5 χρήστες ανταλλάσσουν εντός εμβέλειας της εκπομπής τους, τα αποτελέσματα της τοπικής τους ανίχνευσης. Βάση ενός κατανεμημένου αλγορίθμου, κάθε CR χρήστης, στέλνει τα δεδομένα ανίχνευσής του στους άλλους CR χρήστες, συνδυάζει τα δικά του δεδομένα με τα δεδομένα ανίχνευσης που έλαβε, και αποφασίζει για την παρουσία ή όχι PU, με βάση κάποιο τοπικό κριτήριο. Αν δεν ικανοποιείται το κριτήριο αυτό, στέλνει τα συνδυαζόμενα δεδομένα ανίχνευσης στους άλλους CR

χρήστες, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συγκλίνει ο αλγόριθμος και βρεθεί μία ομόφωνη απόφαση.

- **Βοηθούμενη με αναμετάδοση (Relay-Assisted):** Τα κανάλια ελέγχου και ανίχνευσης δεν είναι τέλεια. Γι' αυτό το λόγο, ένας CR χρήστη που παρατηρεί ένα εξασθενημένο κανάλι ανίχνευσης και ένα ισχυρό κανάλι αναφοράς, μπορεί για παράδειγμα, να συνεργαστεί με έναν CR χρήστη που παρατηρεί ένα ισχυρό κανάλι ανίχνευσης και ένα εξασθενημένο κανάλι αναφοράς, για να αυξήσουν την απόδοση της συνεργατικής ανίχνευσης.

Στην εικόνα 2.7c, οι CR1, CR4 και CR5 παρατηρούν ένα ισχυρό πρωτεύων σήμα, όμως έχουν εξασθενημένο κανάλι αναφοράς, Οι CR2, CR3, οι οποίοι έχουν ισχυρό κανάλι αναφοράς, μπορούν να λειτουργούν ως αναμεταδότες και να βοηθούν στην προώθηση των αποτελεσμάτων ανίχνευσης των CR1, CR4 και CR5 στο κέντρο συγχώνευσης.



Εικόνα 2.7: a- Κεντρικοποιημένη, b- Κατανεμημένη, c- Βοηθούμενη με αναμετάδοση.

### **Πλεονεκτήματα:**

- Με τη συνεργατική ανίχνευση, μπορεί να μειωθούν δραστικά οι απαιτήσεις ευαισθησίας έως και -25 dBm, ο χρόνος ανίχνευσης και αυτά οδηγούν στην αύξηση συνολικά της απόδοσης της ανίχνευσης .
- Μπορεί να επιτευχθεί μείωση στο κατώφλι ευαισθησίας.

### **Μειονεκτήματα:**

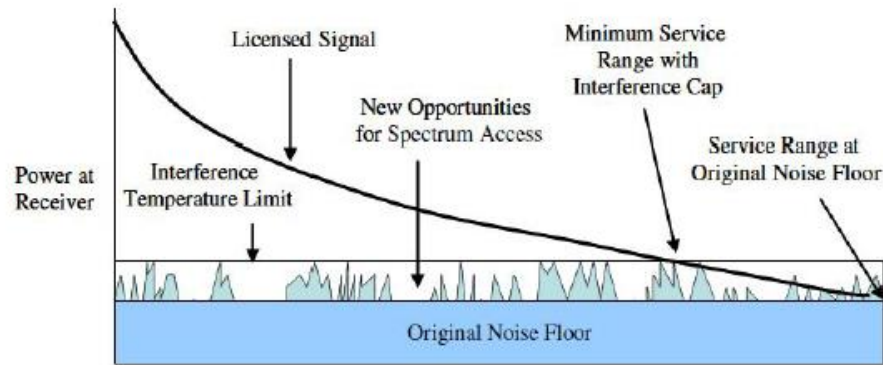
- Οι CR χρήστες χρειάζεται να εκτελούν ανίχνευση σε τακτά χρονικά διαστήματα, διότι οι ανιχνεύσιμες πληροφορίες γίνονται μη έγκυρες, εξαιτίας παραγόντων, όπως η σκίαση και οι απώλειες διαδρομής. Αυτό συνεπάγεται στην αύξηση των δεδομένων.
- Ένα ευρύ κανάλι πρέπει να σαρωθεί ολόκληρο, παρόλο που μόνο ένα τμήμα του αλλάζει κάθε φορά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να γίνεται ενημέρωση των πληροφοριών ολόκληρου του σαρωμένου φάσματος και όχι μόνο των πληροφοριών που αλλάζουν.

Καθώς ο αριθμός των συνεργαζόμενων χρηστών αυξάνεται, αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας του δικτύου γνωστικής ραδιοεπικοινωνίας (cognitive radio network), με αποτέλεσμα η απόδοση να φτάνει σε κορεσμό. Ως εκ τούτου, έχουν αναπτυχθεί τεχνικές για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στα γνωστικά δίκτυα ραδιοεπικοινωνίας.

Μια απλή τεχνική για την εξοικονόμηση ενέργειας είναι η on-off ανίχνευση ή sleeping, όπου τυχαία κάθε γνωστική ραδιοεπικοινωνία θα απενεργοποιεί την συσκευή ανίχνευσής της με πιθανότητα  $\mu$ .

Μία άλλη δημοφιλής προσέγγιση, είναι η censoring. Σε ένα τέτοιο σύστημα, μία γνωστική ραδιοεπικοινωνία  $m$  θα στέλνει την απόφαση ανίχνευσης, μόνο εάν κριθεί ενημερωτική/πληροφοριακή, και θα λογοκρίνει την απόφαση ανίχνευσης που είναι μη ενημερωτική/πληροφοριακή.

### 2.2.3 Ανίχνευση με βάση την παρεμβολή (Interference based detection)



**Εικόνα 2.8: Το μοντέλο θερμοκρασίας παρεμβολής.**

Για τη μέτρηση των παρεμβολών, τα τελευταία χρόνια, υιοθετήθηκε ένα νέο μοντέλο μέτρησης της παρεμβολής, το οποίο ονομάζεται **θερμοκρασία παρεμβολής στον δέκτη (interference temperature)**. Το μοντέλο θερμοκρασίας παρεμβολής διαχειρίζεται την παρεμβολή στο δέκτη μέσω του *ορίου θερμοκρασίας παρεμβολής* (interference temperature limit), το οποίο μετρά το ποσό παρεμβολής που μπορεί να ανεχτεί ο δέκτης για μία συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων.

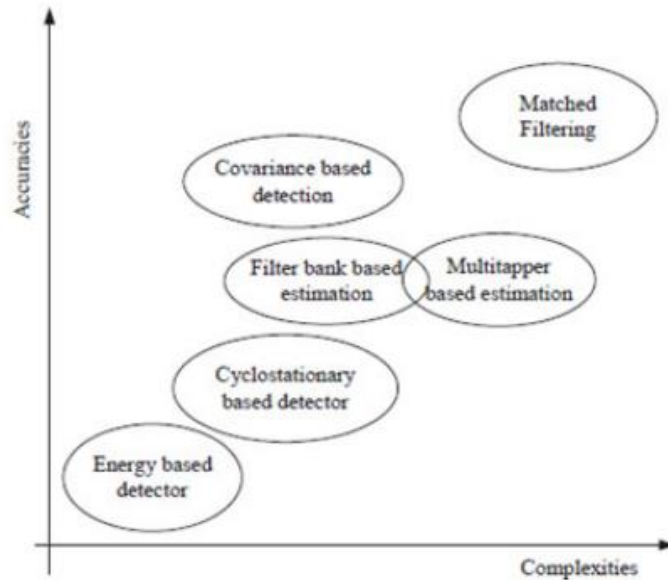
Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου αυτής, είναι σαν την UWB τεχνολογία, όπου οι δευτερεύοντες χρήστες επιτρέπεται να συνυπάρχουν και να μεταδίδουν ταυτόχρονα με τους πρωτεύοντες χρήστες, ρυθμίζοντας την ισχύ της εκπομπής τους, έτσι ώστε η συνολική ενέργεια παρεμβολής στον πρωτεύων δέκτη να μην ξεπερνά ένα συγκεκριμένο όριο.

Η δυσκολία αυτής της μεθόδου, που είναι και το μεγάλο της μειονέκτημα, έγκειται στην αξιόπιστη μέτρηση της θερμοκρασίας παρεμβολής. Ένας δευτερεύων χρήστης, είναι ενήμερος για το δικό του επίπεδο ισχύος εκπομπής και για την ακριβή θέση του, μέσω ενός συστήματος εντοπισμού. Ωστόσο, προς το παρόν δεν υπάρχει πρακτικός τρόπος για ένα CR να μετρήσει ή να εκτιμήσει τη θερμοκρασία παρεμβολής σε έναν κοντινό πρωτεύων δέκτη. Εφ' όσον οι πρωτεύοντες δέκτες είναι συνήθως παθητικές συσκευές, ένας δευτερεύων χρήστης δεν μπορεί να γνωρίζει τις ακριβείς θέσεις τους. Μία μέθοδος ανίχνευσης αυτών των παθητικών δεκτών, είναι η εκμετάλλευση της

διαρρέουσας ισχύς του τοπικού ταλαντωτή που εκπέμπουν όλοι οι ασύρματοι δέκτες. Για την ανίχνευση όμως αυτής της διαρρέουσας ισχύος, η μέθοδος απαιτεί την προσάρτηση μικρών αισθητήρων κοντά στους πρωτεύοντες δέκτες που θα πληροφορούν το CR, γεγονός που δυσκολεύει την πρακτική εφαρμογή της μεθόδου.

### **2.3 Άλλες τεχνικές ανίχνευσης φάσματος**

- **Wavelet based detection:** Είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική, στην επεξεργασία εικόνας για εφαρμογές ανίχνευσης ακρών. Οι Tian και Γιαννάκης (2006) έχουν προτείνει αυτή την τεχνική ανίχνευσης φάσματος, στην οποία, χρησιμοποιούνται κυματομορφές για την ανίχνευση ακρών στην φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD) ενός καναλιού ευρείας ζώνης. Οι άκρες στην φασματική πυκνότητα ισχύος, είναι το όριο μεταξύ των οπών του φάσματος και των χρησιμοποιούμενων ζωνών, και ως εκ τούτου βοηθούν στην εύρεση ελεύθερων ζωνών. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, ο δευτερεύων χρήστης μπορεί να εντοπίσει τις ευκαιρίες φάσματος.
- **Radio identification based detection:** Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο του European Transparent Ubiquitous Terminal (TRUST) σχεδίου, και βασίζονται σε διάφορα εξαγόμενα χαρακτηριστικά, όπως η συχνότητα εκπομπής, η εμβέλεια εκπομπής, το είδος της διαμόρφωσης κ.λπ. Μόλις τα χαρακτηριστικά εξαχθούν από το λαμβανόμενο σήμα, οι δευτερεύοντες χρήστες εκμεταλλεύονται αυτά τα χαρακτηριστικά και επιλέγουν τις κατάλληλες παραμέτρους εκπομπής.



Εικόνα 2.9: Η ακρίβεια και η πολυπλοκότητα διαφόρων τεχνικών ανίχνευσης φάσματος.

## 2.4 Κατηγορίες ανίχνευσης

Η ανίχνευση φάσματος μπορεί να χωριστεί στις εξής κατηγορίες:

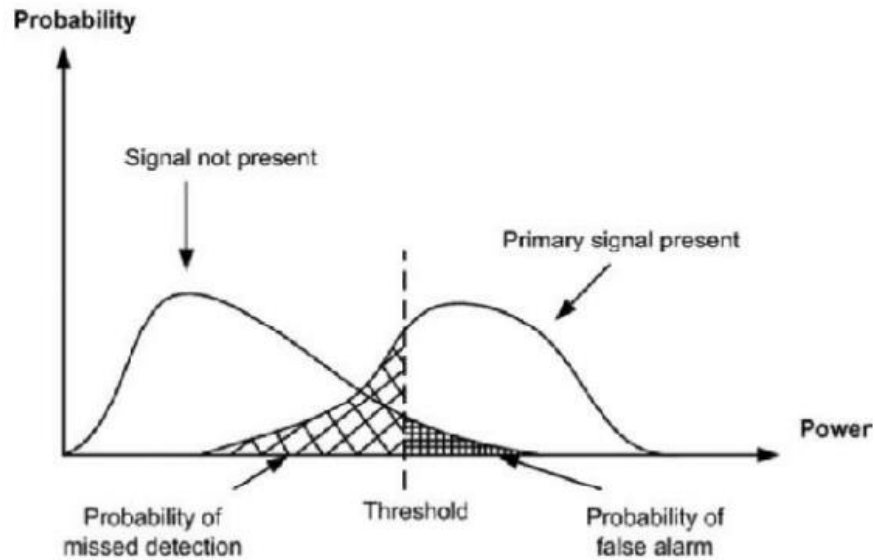
- **Παράλληλη ή Σειριακή ανίχνευση (Parallel or Sequential Sensing):** Έστω ότι υπάρχουν  $N$  κανάλια συχνότητας. Η παράλληλη ανίχνευση, ανιχνεύει και τα  $N$  κανάλια την ίδια χρονική στιγμή (ταυτόχρονα). Η σειριακή ανίχνευση, ανιχνεύει ένα κανάλι κάθε χρονική στιγμή, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καθυστερεί να βρει το ελεύθερο κανάλι.
- **Προδραστική ή Αντιδραστική ανίχνευση (Proactive or Reactive Sensing):** Με την προδραστική ανίχνευση, το CR ανιχνεύει ακόμα και αν δεν έχει σκοπό να εκπέμψει αμέσως, δηλαδή πραγματοποιεί περιοδική ανίχνευση. Με αυτό το είδος της ανίχνευσης συλλέγονται πληροφορίες σχετικά με τα κανάλια, όμως αυξάνεται το κόστος ανίχνευσης. Με την αντιδραστική ανίχνευση, το CR ανιχνεύει μόνο όταν θέλει να εκπέμψει ή να λάβει. Είναι ενεργειακά πιο

αποδοτική, όμως ο χρόνος για να βρεθεί ένα αδρανές κανάλι μπορεί να είναι μεγαλύτερος σε σχέση με την προδραστική ανίχνευση.

- **Σύγχρονη ή Ασύγχρονη ανίχνευση (Synchronous or Asynchronous Sensing):** Στην σύγχρονη ανίχνευση, όλα τα CR έχουν το ίδιο πρόγραμμα ανίχνευσης για να ανιχνεύσουν ένα κανάλι, ενώ στην ασύγχρονη ανίχνευση, κάθε CR έχει το δικό του πρόγραμμα για να ανιχνεύσει ένα κανάλι. Εάν άλλα CR εκπέμπουν, ενώ ένα άλλο CR ανιχνεύει, πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ SU και PU σήματος.
- **Εντός ζώνης ή Εκτός ζώνης ανίχνευση (In-band or out-of-band Sensing):** Στην εντός ζώνης ανίχνευση, το CR ανιχνεύει το κανάλι στο οποίο ήδη μεταδίδει, για να ανιχνεύσει εάν εμφανιστεί ένας PU. Στην εκτός ζώνης ανίχνευση, το CR ανιχνεύει και άλλα κανάλια, εκτός από το κανάλι στο οποίο βρίσκεται, για να εντοπίσει άλλες οπές φάσματος ή/και για να εντοπίσει ένα άλλο κανάλι, στο οποίο θα μεταβεί, σε περίπτωση που εμφανιστεί ένας PU.



## 2.5 Μετρικές απόδοσης ανιχνευτών φάσματος



**Εικόνα 2.10:** Η σχέση μεταξύ πιθανότητας και ισχύς στην ανίχνευση φάσματος.

Η επίδοση ενός ανιχνευτή φάσματος συχνά μετράται κυρίως από τέσσερις πιθανότητες: την *πιθανότητα ανίχνευσης* (Probability of detection -  $P_d$ ), την *πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού* (Probability of false alarm -  $P_f$ ), την *πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης* (Probability of missed detection-  $P_d$ ) και την *πιθανότητα σύγκρουσης* (Probability of collision -  $P_c$ ).

Η πιθανότητα ανίχνευσης, είναι η πιθανότητα ο ανιχνευτής να αποφασίσει ότι υπάρχει σήμα-πρωτεύων χρήστης, όταν αυτό είναι πραγματικά παρόν. Η πιθανότητα ανίχνευσης είναι ένα μέτρο της αξιοπιστίας του CR, ως προς την αποφυγή παρεμβολής στο πρωτεύον τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Για αυτό είναι επιθυμητή μία όσο το δυνατόν μεγαλύτερη πιθανότητα ανίχνευσης.

Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού, είναι η πιθανότητα ο ανιχνευτής να αποφασίσει ότι υπάρχει σήμα-πρωτεύων χρήστης, όταν στην πραγματικότητα υπάρχει μόνο θόρυβος. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού μετρά ουσιαστικά τις “χαμένες ευκαιρίες” ή, αλλιώς, την υποχρησιμοποίηση του φάσματος από το CR. Για αυτό, είναι επιθυμητή μία όσο το δυνατόν μικρότερη πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού. Η απόδοση της τεχνικής ανίχνευσης φάσματος συνήθως επηρεάζεται από την πιθανότητα

εσφαλμένου συναγερμού, δεδομένου ότι αυτή η μετρική έχει την μεγαλύτερη επιρροή. Ένα θεμελιώδες αποτέλεσμα της θεωρίας ανίχνευσης είναι ότι οι δύο αυτές απαιτήσεις είναι ανταγωνιστικές, δηλαδή η αύξηση της πιθανότητας ανίχνευσης οδηγεί υποχρεωτικά σε αύξηση της πιθανότητας εσφαλμένου συναγερμού.

Η πιθανότητα λάθους ανίχνευσης, είναι η πιθανότητα ο ανιχνευτής να αποφασίσει ότι δεν υπάρχει σήμα-πρωτεύων χρήστης, ενώ στην πραγματικότητα υπάρχει. Αν υπάρξει λάθος ανίχνευση, ο δευτερεύων χρήστης θα ξεκινήσει μία μετάδοση με αποτέλεσμα την παρεμβολή στο σήμα του πρωτεύων χρήστη. Υψηλή πιθανότητα λάθους ανίχνευσης, συνεπάγεται στην αύξηση της πιθανότητας παρεμβολής μεταξύ του πρωτεύων χρήστη και του δευτερεύων χρήστη.

Τέλος, η πιθανότητα σύγκρουσης, είναι η πιθανότητα ο ανιχνευτής να αποφασίσει ότι δεν υπάρχει σήμα-πρωτεύων χρήστης, να παραχωρήσει το φάσμα σε έναν δευτερεύων χρήστη, ενώ στην πραγματικότητα υπάρχει σήμα-πρωτεύων χρήστης. Δείχνει την παρεμβολή μεταξύ δευτερεύων και πρωτεύων χρήστη αλλά και μεταξύ δευτερεύοντων χρηστών, εξαιτίας της αβεβαιότητας στην ανίχνευση φάσματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα σύγκρουσης, τόσο πιο μεγάλη είναι η πιθανότητα παρεμβολής μεταξύ δευτερεύων και πρωτεύων χρήστη και μεταξύ δευτερεύοντων χρηστών.

## **2.6 Προκλήσεις στα Cognitive Radio**

Υπάρχουν αρκετές προκλήσεις που σχετίζονται με την ανίχνευση φάσματος σε ένα CR, οι οποίες είναι οι εξής:

- 1. Απαιτήσεις υλικού:** Το CR πρέπει να έχουν την δυνατότητα να αναλύουν, μεγάλου εύρους ζώνες, για τον εντοπισμό των φασματικών ευκαιριών (οπών). Τα μεγάλα λειτουργικά εύρη ζώνης, επιβάλλουν πρόσθετες απαιτήσεις σχετικά με τα στοιχεία των ραδιοσυχνοτήτων (RF), όπως κεραίες και ενισχυτές ισχύος. Επίσης, χρειάζονται υψηλής ταχύτητας μονάδες επεξεργασίας (DSPs ή FPGAs), που ανταποκρίνονται υπολογιστικά, σε απαιτητικές εργασίες επεξεργασίας σήματος, με σχετικά χαμηλή καθυστέρηση.

- 2. Ασφάλεια:** Σε ένα CR, ένας κακόβουλος χρήστης, μπορεί να τροποποιήσει την διεπαφή του, και να παριστάνει τον πρωτεύων χρήστη, οδηγώντας σε λανθασμένη ανίχνευση φάσματος. Μία προσέγγιση που έχει προταθεί για το πρόβλημα αυτό, είναι οι νόμιμοι πρωτεύοντες χρήστες να υποχρεούνται, μαζί με τις εκπομπές τους, να εκπέμπουν μία κρυπτογραφημένη τιμή (μία υπογραφή), η οποία παράγεται από ένα ιδιωτικό κλειδί. Η υπογραφή αυτή, θα χρησιμοποιείται αργότερα για την επαλήθευση του πρωτεύων χρήστη. Δυστυχώς η μέθοδος αυτή, μπορεί χρησιμοποιηθεί μόνο σε ψηφιακές διαμορφώσεις.
  
- 3. Το πρόβλημα του κρυμμένου πρωτεύων χρήστη:** Το πρόβλημα του κρυμμένου πρωτεύων χρήστη μπορεί να προκληθεί από πολλούς παράγοντες, όπως είναι η διάλεια πολλοπλών διαδρομών και η σκίαση. Το συγκεκριμένο πρόβλημα δημιουργείται, όταν ο πρωτεύων πομπός δεν μπορεί να εντοπιστεί από έναν δευτερεύων χρήστη, διότι είναι εκτός εμβέλειάς του, με αποτέλεσμα ο δευτερεύων χρήστης να ξεκινάει μία εκπομπή, η οποία δημιουργεί παρεμβολή στον πρωτεύων δέκτη. Στην βιβλιογραφία, για την εν μέρει αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, προτείνεται η συνεργατική ανίχνευση.
  
- 4. Συχνότητα ανίχνευσης:** Η συχνότητα ανίχνευσης, είναι πόσο συχνά το CR πρέπει να πραγματοποιεί ανίχνευση φάσματος. Η τιμή της, εξαρτάται από την δυνατότητες του CR και τα χαρακτηριστικά των πρωτεύοντων χρηστών. Αν η κατάσταση των πρωτεύοντων χρηστών αλλάζει αργά, η συχνότητα ανίχνευσης μπορεί να είναι μικρή. Ένα παράδειγμα, είναι η ανίχνευση τηλεοπτικών σημάτων, διότι οι τηλεοπτικοί σταθμοί δεν αλλάζουν συχνά γεωγραφική θέση. Επίσης η συχνότητα ανίχνευσης, εξαρτάται και από την ανοχή στην παρεμβολή πρωτεύοντων χρηστών. Για παράδειγμα, αν ένα CR πραγματοποιεί ανίχνευση σε ζώνη συχνοτήτων δημόσιας ασφάλειας, η ανίχνευση θα πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν πιο συχνά, για την αποφυγή οποιασδήποτε παρεμβολής.

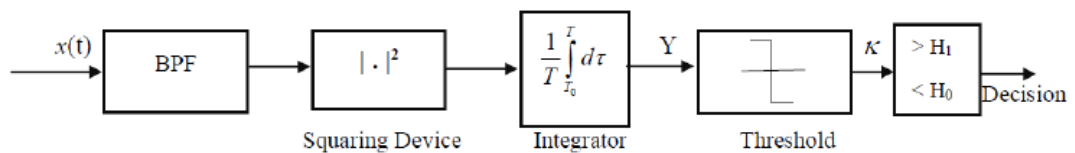
5. **Συγχώνευση αποφάσεων στην συνεργατική ανίχνευση:** Στην περίπτωση των συνεργατικών τεχνικών, η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ CRs και ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων ανίχνευσης από το κέντρο συγχωνεύσεων (FC), είναι δύσκολες διαδικασίες. Τα αποτελέσματα ανίχνευσης που στέλνονται στο FC ή ανταλλάσσονται μεταξύ CR χρηστών, μπορούν να συνδυαστούν με 2 τρόπους:

- a) Με την μέθοδο **Soft Combining**, όπου όλοι οι CR χρήστες στέλνουν στο FC, τα τοπικά δεδομένα της ανίχνευσής τους, τα οποία συνδυάζονται για να παρθεί μία soft απόφαση. Αυτό συνεπάγεται, ότι το FC έχει πρόσβαση σε όλα τα δεδομένα όλων των αισθητήρων. Η μέθοδος Soft Combining, μπορεί να επιτύχει την καλύτερη απόδοση, όμως το μειονέκτημά της είναι, η μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων προς το FC.
- b) Και με την μέθοδο **Hard Combining**, όπου κάθε CR χρήστης παίρνει μία τοπική απόφαση και στέλνει την 1-bit απόφασή του στο FC. Στη συνέχεια, το κέντρο απόφασης, συνδυάζει αυτές τις hard αποφάσεις για να βγάλει την τελική απόφαση, με βάση έναν από τους παρακάτω κανόνες:
  - **Κανόνας AND:** ο κανόνας AND αποφασίζει ότι ένα σήμα έχει ανιχνευθεί, εάν όλοι οι αισθητήρες έχουν ανιχνεύσει ένα σήμα.
  - **Κανόνας OR:** ο κανόνας OR αποφασίζει για την παρουσία σήματος, εάν έστω και ένας αισθητήρας έχει ανιχνεύσει ένα σήμα.
  - **Κανόνας ψηφοφορίας:** ο κανόνας ψηφοφορίας αποφασίζει ότι ένα σήμα είναι παρόν, αν τουλάχιστον  $V$  από τους  $M$  αισθητήρες έχουν ανιχνεύσει ένα σήμα, για  $1 \leq V \leq M$ .
  - Υπάρχει και η **απόφαση πλειοψηφίας**, που είναι μια ειδική περίπτωση του κανόνα ψηφοφορίας για  $V = M / 2$ . Ο κανόνας AND και ο κανόνας OR είναι επίσης ειδικές περιπτώσεις του κανόνα ψηφοφορίας, για  $V = M$  και  $V = 1$  αντίστοιχα.

## Κεφάλαιο 3

### Ανίχνευση φάσματος βασισμένη στην ανίχνευση ενέργειας

#### 3.1 Το μοντέλο του συστήματος



**Εικόνα 3.1:** Το μπλοκ διάγραμμα του ανιχνευτή ενέργειας.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το μοντέλο του συστήματος της ανίχνευσης ενέργειας. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.1, αρχικά το ληφθέν σήμα στο δέκτη  $x(t)$ , διέρχεται από ένα ζωνοπερατό φίλτρο (BPF) για να μειωθεί το εύρος ζώνης του θορύβου, και στη συνέχεια διέρχεται από μία συσκευή τετραγωνισμού και ολοκληρώνεται επί το διάστημα παρατήρησης  $T$ . Τέλος, το σήμα εξόδου από τον ολοκληρωτή (η στατιστική απόφαση),  $Y$ , συγκρίνεται με ένα κατώφλι, για να αποφασισθεί από τον ανιχνευτή, αν είναι παρόν ή όχι ένας πρωτεύων χρήστης.

Το σύστημα θεωρείται ότι αποτελείται από ένα μοναδικό πρωτεύων χρήστη και έναν μόνο δευτερεύων χρήστη. Ο δευτερεύων χρήστης εφαρμόζει ανίχνευση ενέργειας για να ανιχνεύσει τις μεταδόσεις του πρωτεύων χρήστη. Σε όλη τη διαδικασία της ανίχνευσης υποθέτουμε ότι ο πρωτεύων χρήστης παραμένει σε κατάσταση εκπομπής για αρκετό διάστημα.

Το πρόβλημα της ανίχνευσης φάσματος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα πρόβλημα δυαδικής υπόθεσης, όπου η κατάσταση του πρωτεύων χρήστη ορίζεται από τις εξής δύο υποθέσεις:

$$H_0: y[n] = w[n]$$

$$H_1: y[n] = s[n] + w[n]$$

$$\text{για } n = 1, \dots, N$$

Στην πρώτη υπόθεση ( $H_0$ ) ο πρωτεύων χρήστης είναι απών, ενώ στην δεύτερη ( $H_1$ ) είναι παρών. Το  $y[n]$  αντιστοιχεί στα δείγματα του λαμβανόμενου σήματος, το  $w[n]$  αντιστοιχεί στα δείγματα του θορύβου, ο οποίος θεωρείται ότι είναι λευκός προσθετικός γκαουσιανός θόρυβος (AWGN), το  $s[n]$  αντιστοιχεί στα δείγματα του πρωτεύων σήματος και το  $N$  είναι το μήκος του διαστήματος παρατήρησης που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση της διαδικασίας της ανίχνευσης.

### 3.2 Αλγόριθμος ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου

Η στατιστική απόφαση για την ανίχνευση ενέργειας είναι η εξής:

$$\mathbf{T} = \sum_{n=1}^N (\mathbf{Y}[\mathbf{n}])^2$$

Όταν το πρωτεύων σήμα είναι απών, η στατιστική απόφαση έχει chi square κεντρική κατανομή (central chi square distribution) με  $N$  βαθμούς ελευθερίας. Όταν το πρωτεύων σήμα είναι παρών, η στατιστική απόφαση έχει chi square μη κεντρική κατανομή (non-central chi square distribution) με τους ίδιους βαθμούς ελευθερίας. Εάν ο αριθμός των δειγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση είναι αρκετά μεγάλος ( $N > 250$ ) μπορεί να χρησιμοποιηθεί το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα (Central Limit Theorem) για την προσέγγιση της κατανομής του τέστ στατιστικής ως Gaussian, με μέση τιμή και διασπορά, όπως αναφέρεται στις παρακάτω δύο υποθέσεις, όπου  $\sigma_w^2$  είναι η διακύμανση της διαδικασίας του θορύβου και  $\sigma_s^2$  είναι η ισχύς του πρωτεύων σήματος.

$$\mathbf{T} \sim \mathbf{N}(N\sigma_w^2, 2N\sigma_w^4) \quad H_0$$

$$\mathbf{T} \sim \mathbf{N}(N(\sigma_s^2 + \sigma_w^2), 2N(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)^2) \quad H_1$$

Η πιθανότητα ανίχνευσης, εσφαλμένου συναγερμού, λάθους ανίχνευσης και σύγκρουσης ορίζονται ως εξής:

$$P_d = \Pr(T > \lambda | H_1)$$

$$P_f = \Pr(T > \lambda | H_0)$$

$$P_m = \Pr(T \leq \lambda | H_1) = 1 - P_d$$

$$P_c = P_m$$

Όπου  $\lambda$ , το κατώφλι που λαμβάνεται υπόψιν για τον προσδιορισμό της παρουσίας πρωτεύων χρηστών. Δεδομένου ότι η στατιστική απόφαση  $T$  μπορεί να είναι περίπου κατανομή Gauss, η  $P_f$  και η  $P_d$  μπορούν να προσδιοριστούν ως εξής:

$$P_f = Q\left(\frac{\lambda - N\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right)$$

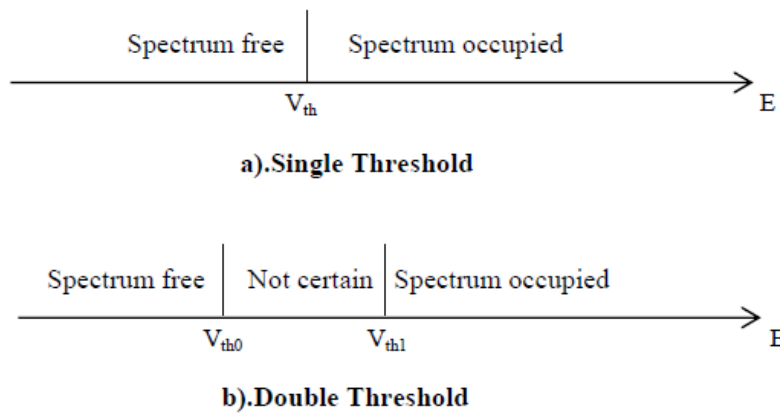
$$P_d = Q\left(\frac{\lambda - N(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)}{\sqrt{2N(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)^2}}\right)$$

Όπου το  $Q(\cdot)$  συμβολίζει την Gaussian Q-Function. Υπάρχει μία σχέση εξάρτησης, μεταξύ της  $P_f$  και της  $P_d$ , αφού μια μείωση της  $P_f$ , θα μειώσει την  $P_d$ , και μια αύξηση της  $P_d$ , θα αυξήσει την  $P_f$ . Όμως το κριτήριο του Neyman-Pearson βάζει ένα όριο στην  $P_f$  και, στη συνέχεια, μεγιστοποιεί την πιθανότητα ανίχνευσης  $P_d$  εντός αυτού του περιορισμού. Το κριτήριο ονομάζεται επίσης και σταθερό ποσοστό λανθασμένων συναγερμών (Constant False Alarm Rate - CFAR). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση για την επιλογή του κατωφλίου, το οποίο υπολογίζεται από την σχέση του  $P_f$ , η εξίσωση του είναι:

$$\lambda = \sigma_w^2 (Q^{-1}(P_f) \times \sqrt{2N} + N)$$

Στον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, αν η ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος, είναι μεγαλύτερη από το κατώφλι ( $V_{th}$ ), τότε υπάρχει παρόν ένας πρωτεύων χρήστης, σε αντίθετη περίπτωση (δηλαδή αν η ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος είναι μικρότερη από το κατώφλι), δεν υπάρχει παρόν πρωτεύων χρήστης.

### 3.3 Αλγόριθμος ανίχνευσης ενέργειας δύο κατωφλίων



**Εικόνα 3.2: a- Ανίχνευση ενέργειας μονού κατωφλίου b- Ανίχνευση ενέργειας δύο κατωφλίων.**

Ο αλγόριθμος ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, μπορεί να δημιουργήσει σοβαρή παρεμβολή στον πρωτεύων χρήστη, λόγω της αβεβαιότητας του θορύβου. Έτσι προτάθηκε ο αλγόριθμος ανίχνευσης ενέργειας δύο κατωφλίων για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της αβεβαιότητας του θορύβου.

Στον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας δύο κατωφλίων, αν η ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος, είναι μεγαλύτερη από το κατώφλι  $\lambda_2$ , τότε υπάρχει παρόν πρωτεύων χρήστης. Αν η ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος είναι μικρότερη από το



κατώφλι  $\lambda_1$ , τότε δεν υπάρχει πρωτεύων χρήστης. Η τρίτη περίπτωση είναι, η ενέργεια να είναι μεταξύ του  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$ , δηλαδή να είναι στην περιοχή σύγχυσης. Σε αυτή την περίπτωση η παρουσία ή απουσία πρωτεύοντων χρηστών είναι αβέβαιη.

Η αβεβαιότητα του θορύβου ορίζεται ως εξής:

$$\sigma^2 \in \left[ \frac{1}{\rho} \sigma_w^2, \rho \sigma_w^2 \right]$$

Όπου  $\rho > 1$  και είναι μία παράμετρος που καθορίζει το μέγεθος της αβεβαιότητας του θορύβου.

Η πιθανότητα ανίχνευσης, εσφαλμένου συναγερμού, λάθους ανίχνευσης και σύγκρουσης ορίζονται ως εξής:

$$P_d = Pr(T > \lambda_2 | H_1)$$

$$P_f = Pr(T > \lambda_2 | H_0)$$

$$P_m = Pr(T \leq \lambda_1 | H_1) = 1 - P_d$$

$$P_c = Pr(T < \lambda_1 | H_1)$$

Εξαιτίας της αβεβαιότητας του θορύβου, η εξισώσεις της πιθανότητας ανίχνευσης, και της πιθανότητας εσφαλμένου συναγερμού, τροποποιούνται ως εξής:

$$P_{f|\max} = Q\left(\frac{\lambda_2 - N\rho\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right)$$

$$P_{f|min} = Q \left( \frac{\lambda_1 - N/\rho\sigma_w^2}{\sqrt{2N/\rho\sigma_w^4}} \right)$$

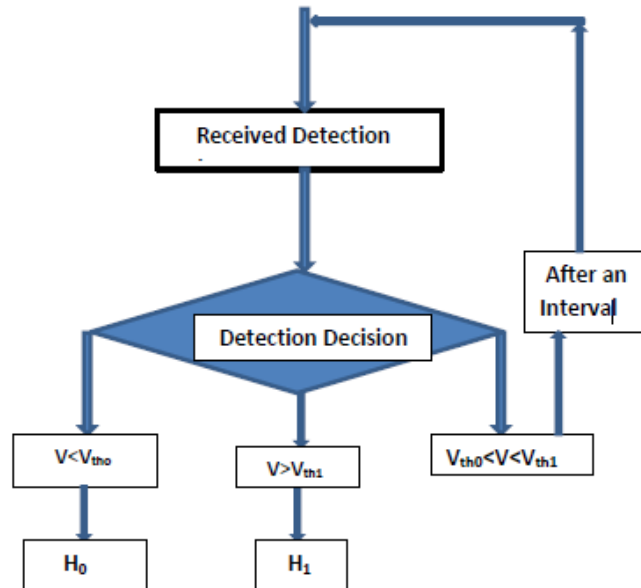
$$P_{d|max} = Q \left( \frac{\lambda_2 - N(\sigma_s^2 + \rho\sigma_w^2)}{\sqrt{2N(\sigma_s^2 + \rho\sigma_w^2)^2}} \right)$$

$$P_{d|min} = Q \left( \frac{\lambda_1 - N \left( \sigma_s^2 + \frac{1}{\rho} \sigma_w^2 \right)}{\sqrt{2N \left( \sigma_s^2 + \frac{1}{\rho} \sigma_w^2 \right)^2}} \right)$$

Με βάση το  $P_{f|max}$  και  $P_{f|min}$ , μπορούμε να υπολογίσουμε το ελάχιστο κατώφλι και το μέγιστο κατώφλι αντίστοιχα ως εξής:

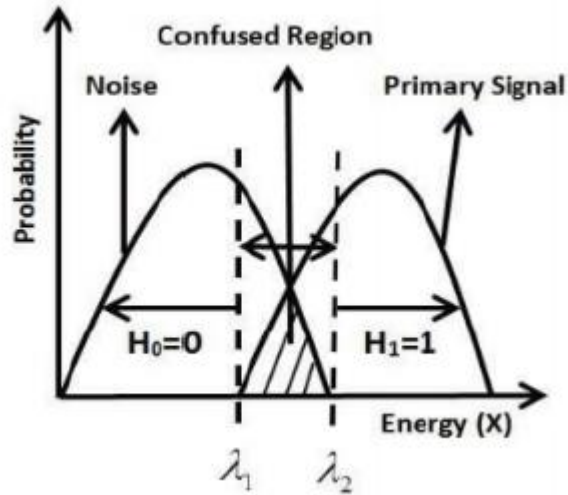
$$\lambda_1 = \left( Q^{-1}(P_f) \times \sqrt{2N/\rho\sigma_w^4} + N/\rho\sigma_w^2 \right)$$

$$\lambda_2 = \left( Q^{-1}(P_f) \times \sqrt{2N\rho\sigma_w^4} + N\rho\sigma_w^2 \right)$$

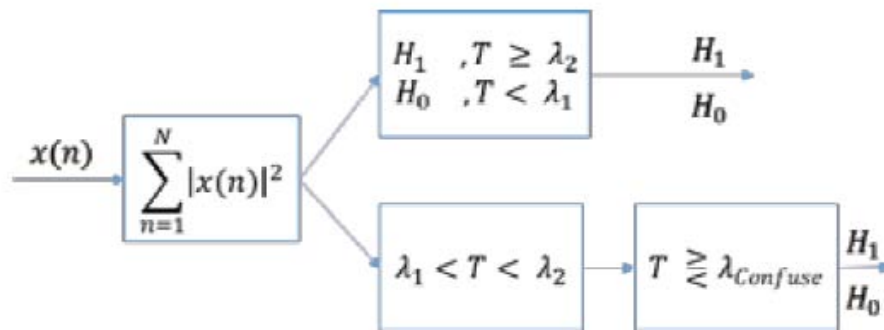


Εικόνα 3.3: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ανίχνευσης ενέργειας δύο κατωφλίων.

### 3.4 Αλγόριθμος ανίχνευσης ενέργειας τριών κατωφλίων



Εικόνα 3.4: Ανίχνευση ενέργειας δύο κατωφλίων.



Εικόνα 3.5: Ανίχνευση ενέργειας τριών κατωφλίων

Παρόλο που ο αλγόριθμος ανίχνευσης ενέργειας δύο κατωφλίων λύνει το πρόβλημα της αβεβαιότητας του θορύβου, υπάρχει πρόβλημα όταν η ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος είναι μεταξύ του χαμηλότερου κατωφλίου ( $\lambda_1$ ) και του υψηλότερου κατωφλίου ( $\lambda_2$ ), δηλαδή στην περιοχή σύγχυσης. Σε αυτήν την περίπτωση, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.5, η ενέργεια θα συγκρίνεται με ένα τρίτο κατώφλι, το οποίο ονομάζεται κατώφλι σύγχυσης ( $\lambda_{confused}$ ). Αν η ενέργεια είναι μεγαλύτερη του κατωφλίου σύγχυσης, υπάρχει παρόν πρωτεύων χρήσης, αλλιώς όχι.

Στην ανίχνευση ενέργειας τριών κατωφλίων, θεωρούμε  $\rho' > 1$ , έναν παράγοντα δυναμικού κατωφλίου, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$\lambda' \in \left[ \frac{\lambda}{\rho'}, \lambda\rho' \right]$$

Κατά συνέπεια, η εξίσωση της πιθανότητας ανίχνευσης, και της πιθανότητας εσφαλμένου συναγερμού, τροποποιούνται ως εξής:

$$P_{f|\max} = Q \left( \frac{\lambda_2 \rho' - N \rho \sigma_w^2}{\sqrt{2N \rho \sigma_w^4}} \right)$$

$$P_{d|\min} = Q \left( \frac{\frac{\lambda_1}{\rho'} - N \left( \sigma_s^2 + \frac{1}{\rho} \sigma_w^2 \right)}{\sqrt{2N \left( \sigma_s^2 + \frac{1}{\rho} \sigma_w^2 \right)^2}} \right)$$

Σύμφωνα με τον παράγοντα δυναμικού κατωφλίου, το κατώφλι σύγχυσης ορίζεται ως εξής:

$$\lambda_{\text{Confused}} = \frac{\left( Q^{-1}(P_f) \times \sqrt{2N \rho \sigma_w^4 + N \rho \sigma_w^2} \right)}{\rho'}$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα

#### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, μελετάται η επίδοση του αλγόριθμου ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, δύο και τριών κατωφλίων με βάση την πιθανότητα: ανίχνευσης( $P_d$ ), εσφαλμένου συναγερού( $P_f$ ) και σύγκρουσης( $P_c$ ), καθώς και με την βοήθεια των καμπυλών:  $P_d - P_f$ ,  $P_d - \text{SNR}$ ,  $P_c - \text{SNR}$ .

Αρχικά, περιγράφονται οι παράμετροι του συστήματος που προσομοιώσαμε και οι τιμές αυτών. Στη συνέχεια, για κάθε αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των παραπάνω καμπυλών και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε περιβάλλον Matlab, καθώς και η ανάλυση των αποτελεσμάτων.

#### 4.2 Παράμετροι συστήματος

Για το σύστημα έχουμε θεωρήσει τα ακόλουθα:

- Τα κανάλι στο σύστημα, ακολουθεί το μοντέλο του λευκού προσθετικού γκαουσιανού θορύβου.
- Η ισχύς του λευκού θορύβου, ορίζεται από την εξίσωση:

$$P = k \times T \times B$$

Όπου  $k$  η σταθερά του Boltzman,  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία και  $B$  το εύρος ζώνης του θορύβου.

- Το εύρος ζώνης του σήματος πληροφορίας είναι:  $W = 1e+5$ .
- Ο χρόνος παρατήρησης είναι:  $T_s = 1e-2$ .
- Ο προεπιλεγμένος αριθμός δειγμάτων του σήματος πληροφορίας και του θορύβου είναι:

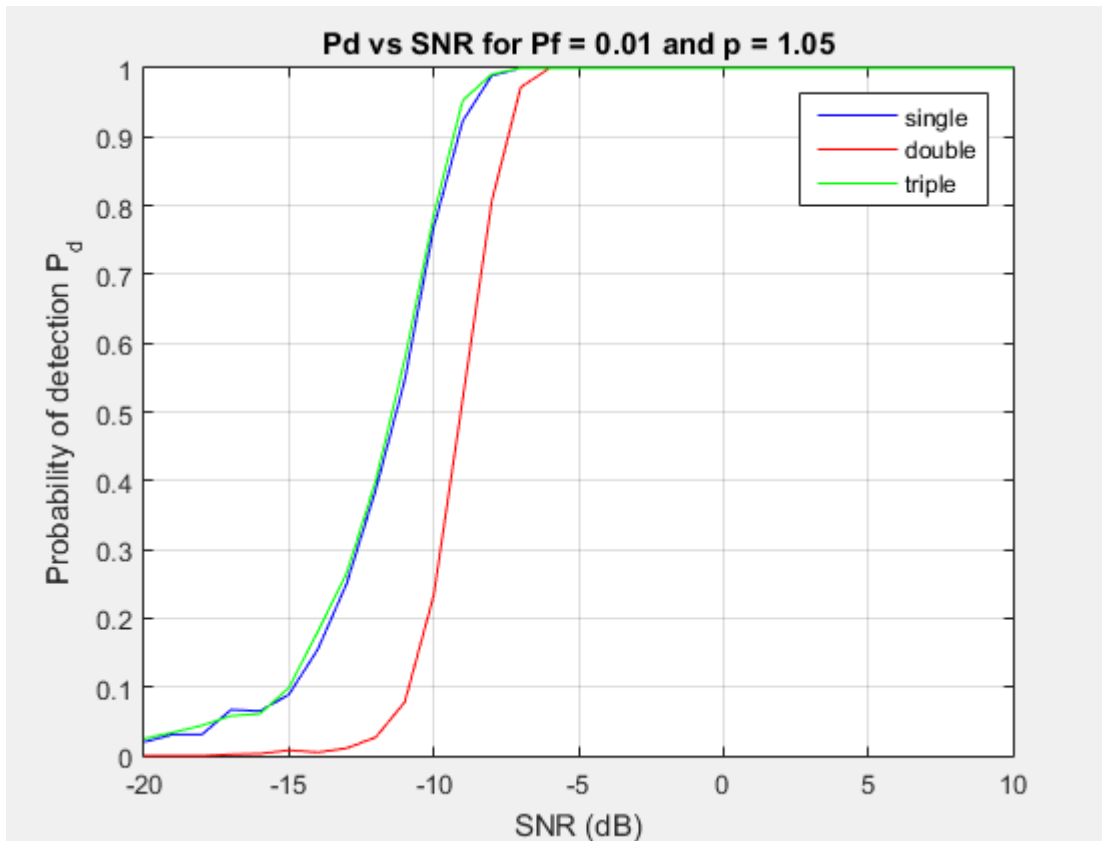
$$N = 2 \times T_s \times W = 2000$$

Όπου  $2 \times W$ , ο ρυθμός Nyquist.

- Στην προσομοίωση των αλγορίθμων ανίχνευσης ενέργειας, χρησιμοποιείται η μέθοδος Monte Carlo.
- Τα SNR σε dB στα οποία γίνεται η προσομοίωση είναι από -20 μέχρι 10.

### **4.3 Προσομοιώσεις και αποτελέσματα**

Στα παρακάτω γραφήματα, το μπλε, το κόκκινο και το πράσινο χρώμα αναφέρονται στον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, δύο και τριών κατωφλίων αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.1: Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.05$ .

SNR	Single threshold Pd	Double threshold Pd	Triple threshold Pd
-20	0.0150	0	0.0280
-16	0.0550	0.0020	0.0840
-12	0.3580	0.0310	0.3930
-8	0.9920	0.7990	0.9950
-6	1	0.9990	1



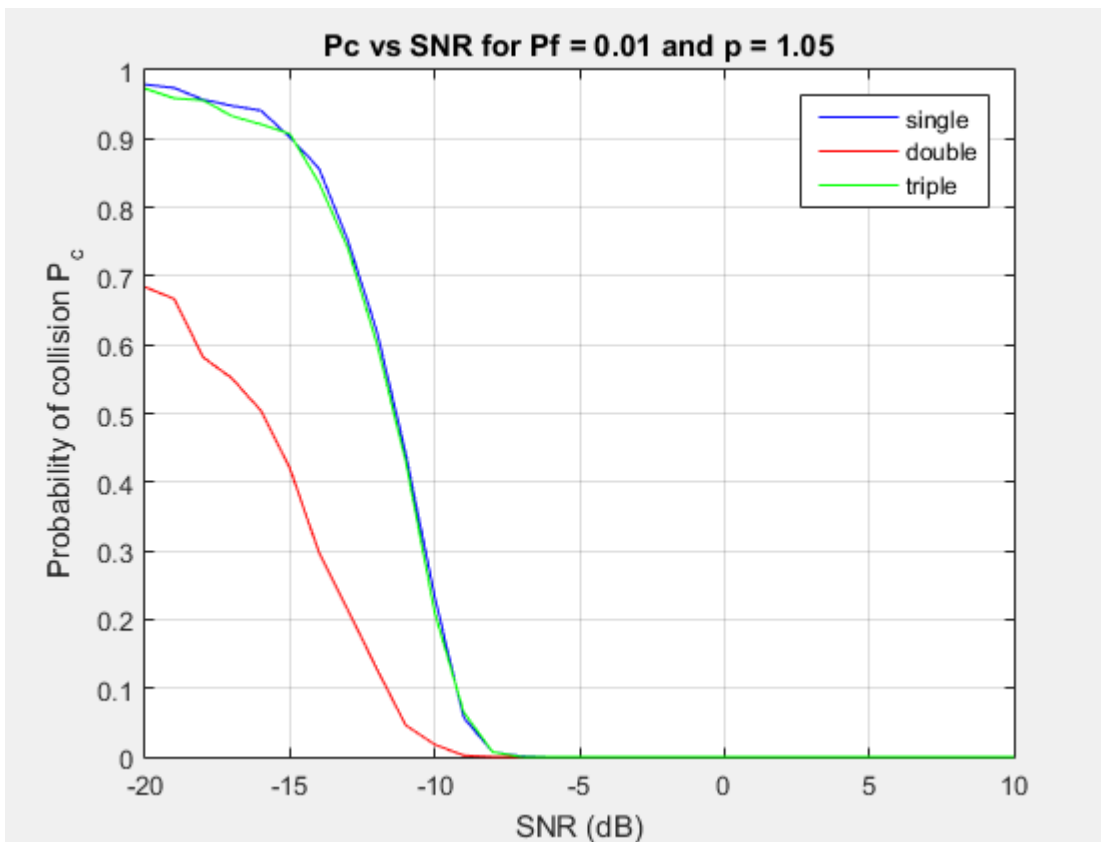
**Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $\rho = 1.05$ .**

Το διάγραμμα 4.1 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, δύο και τριών κατωφλίων. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού( $P_f$ ) ισούται με 0.01 και η αβεβαιότητα του θορύβου( $\rho$ ) ισούται με 1.05.

Από το διάγραμμα 4.1 και τον πίνακα 4.1, φαίνεται ότι όσο αυξάνεται το SNR, αυξάνεται η πιθανότητα ανίχνευσης. Ενώ όσο μειώνεται το SNR, η πιθανότητα ανίχνευσης μειώνεται.

Η ανίχνευση ενέργειας δύο κατωφλίων, επιτυγχάνει μικρότερη πιθανότητα ανίχνευσης σε σχέση με την ανίχνευση ενέργειας μονού κατωφλίου.

Η ανίχνευση ενέργειας τριών κατωφλίων, επιτυγχάνει σχεδόν την ίδια πιθανότητα ανίχνευσης με την ανίχνευση ενέργειας μονού κατωφλίου.



**Διάγραμμα 4.2: Γράφημα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.05$ .**

SNR	Single threshold $P_c$	Double threshold $P_c$	Triple threshold $P_c$
-20	0.9850	0.6830	0.9720
-16	0.9450	0.4890	0.9160
-12	0.6420	0.1200	0.6070
-8	0.0080	0	0.0050
-6	0	0	0

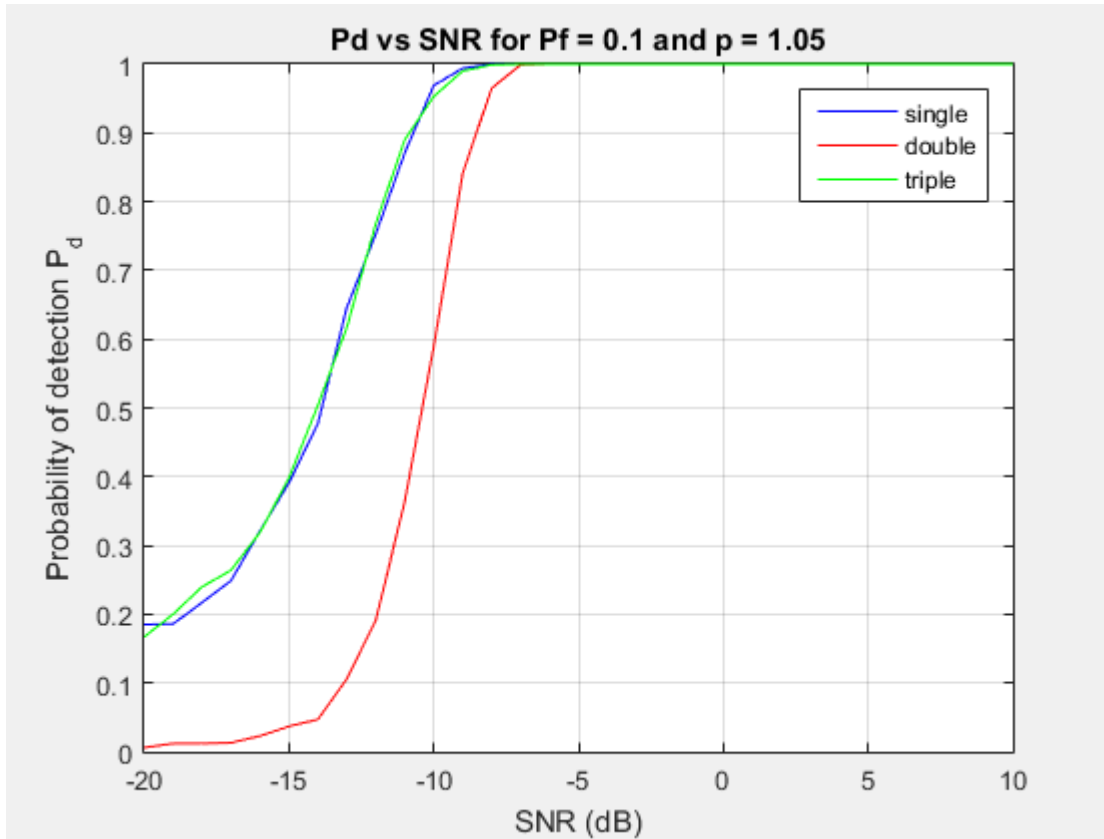
**Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.05$ .**

Το διάγραμμα 4.2 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, δύο και τριών κατωφλίων. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού( $P_f$ ) ισούται με 0.01 και η αβεβαιότητα του θορύβου( $p$ ) ισούται με 1.05.

Από το διάγραμμα 4.2 και τον πίνακα 4.2, φαίνεται ότι όσο αυξάνεται το SNR, μειώνεται η πιθανότητα σύγκρουσης.

Η ανίχνευση ενέργειας δύο κατωφλίων, επιτυγχάνει μικρότερη πιθανότητα σύγκρουσης σε σχέση με την ανίχνευση ενέργειας μονού κατωφλίου.

Η ανίχνευση ενέργειας τριών κατωφλίων, επιτυγχάνει σχεδόν την ίδια πιθανότητα σύγκρουσης την ανίχνευση ενέργειας μονού κατωφλίου.



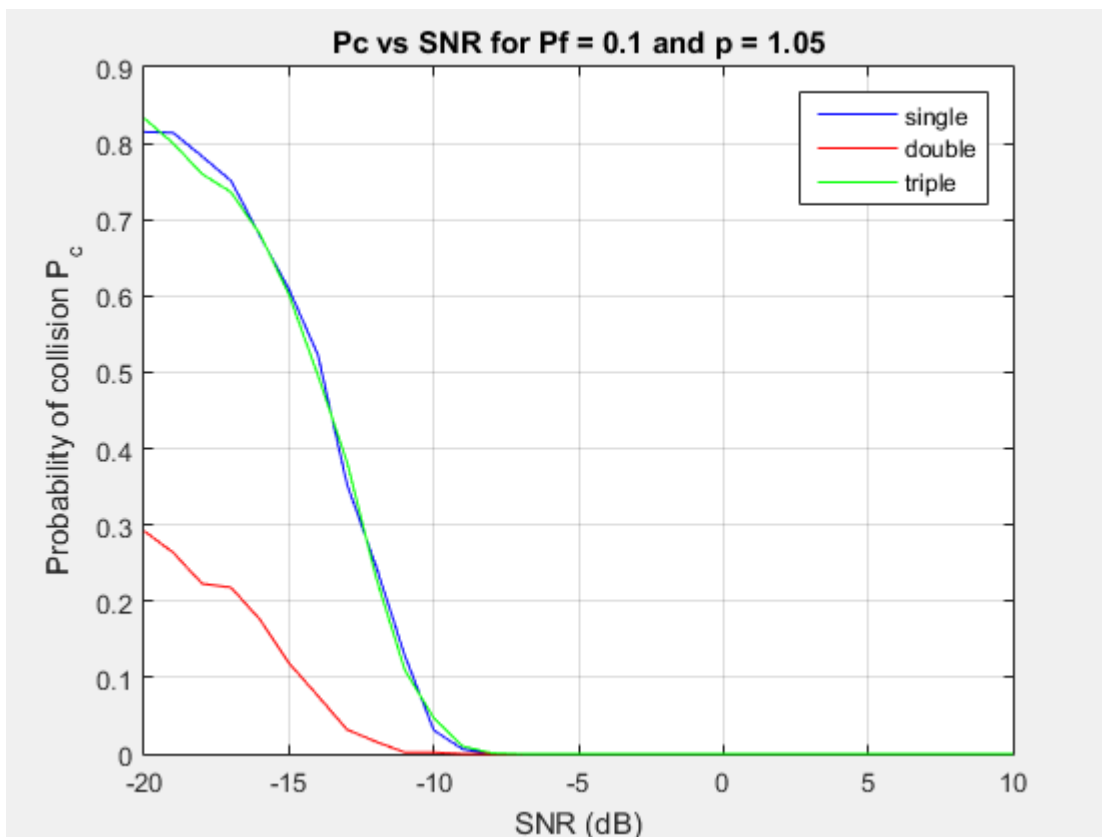
**Διάγραμμα 4.3: Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.1$  και  $p = 1.05$ .**

SNR	Single threshold Pd	Double threshold Pd	Triple threshold Pd
-20	0.1780	0.0100	0.1890
-16	0.3100	0.0360	0.3370
-12	0.7490	0.1730	0.7610
-8	1	0.9620	1
-6	1	1	1

**Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.1$  και  $\rho = 1.05$ .**

Το διάγραμμα 4.3 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, δύο και τριών κατωφλίων. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού ( $P_f$ ) ισούται με 0.1 και η αβεβαιότητα του θορύβου ( $\rho$ ) ισούται με 1.05.

Από το διάγραμμα 4.3 και τον πίνακα 4.3, φαίνεται ότι αυξάνοντας την πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού από 0.01 σε 0.1, αυξήθηκε η πιθανότητα ανίχνευσης και για τους τρεις αλγόριθμους ανίχνευσης ενέργειας.



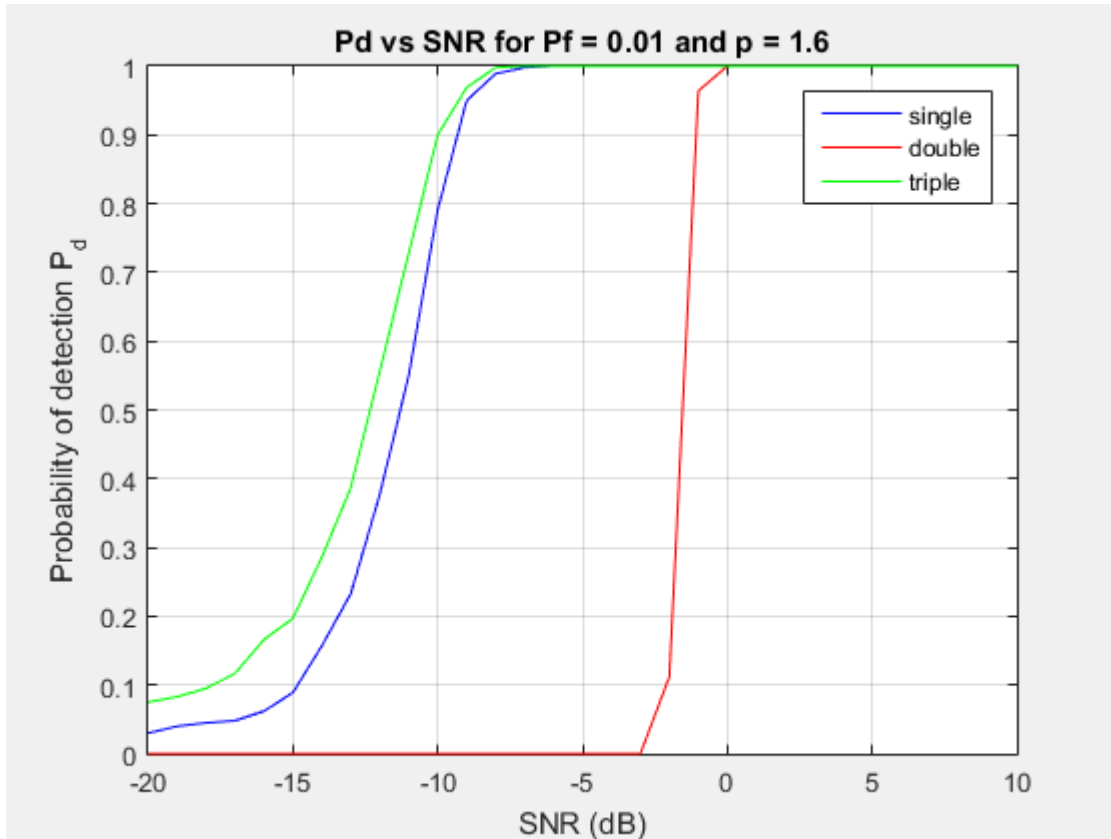
**Διάγραμμα 4.4: Γράφημα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.1$  και  $\rho = 1.05$ .**

SNR	Single threshold Pc	Double threshold Pc	Triple threshold Pc
-20	0.8220	0.2830	0.81
-16	0.6900	0.1520	0.6630
-12	0.2510	0.0130	0.2390
-8	0	0	0
-6	0	0	0

**Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.1$  και  $\rho = 1.05$ .**

Το διάγραμμα 4.4 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, δύο και τριών κατωφλίων. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερού( $P_f$ ) ισούται με 0.1 και η αβεβαιότητα του θορύβου( $\rho$ ) ισούται με 1.05.

Από το διάγραμμα 4.4 και τον πίνακα 4.4, φαίνεται ότι αυξάνοντας την πιθανότητα εσφαλμένου συναγερού από 0.01 σε 0.1, μειώθηκε η πιθανότητα σύγκρουσης και για τους τρεις αλγόριθμους ανίχνευσης ενέργειας.



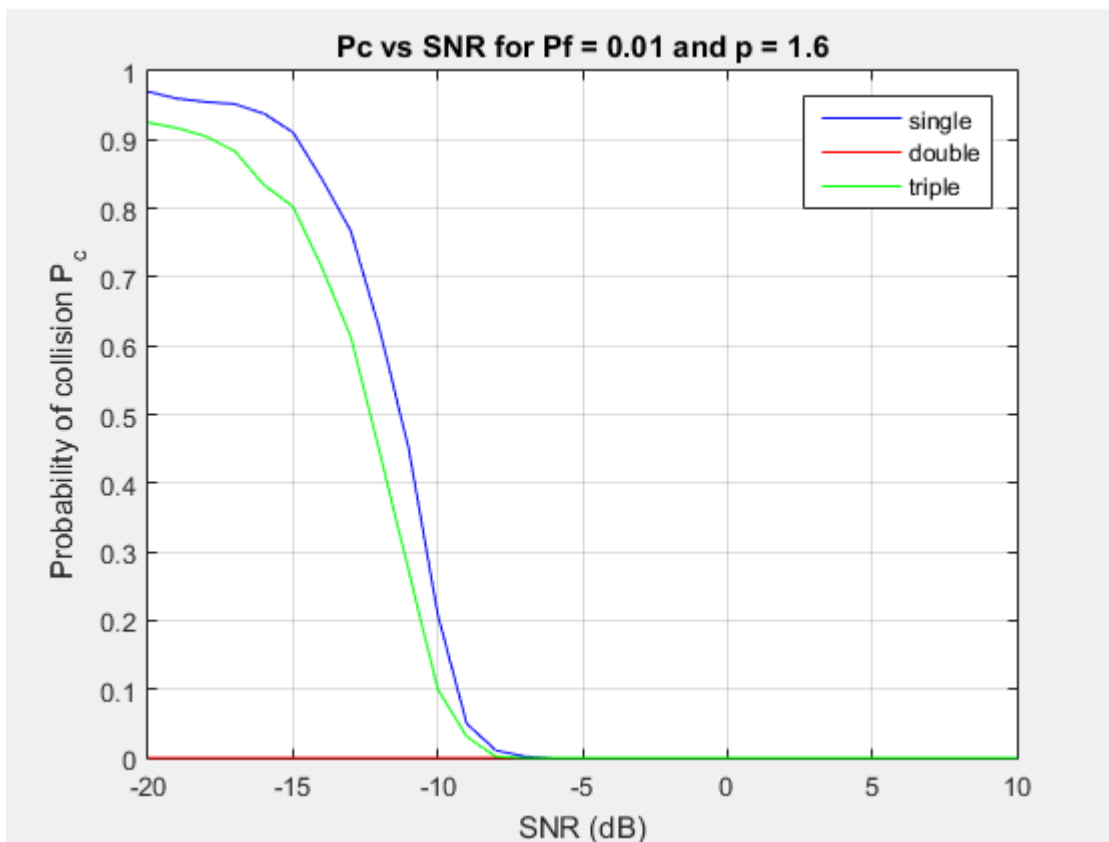
Διάγραμμα 4.5: Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.6$ .

SNR	Single threshold Pd	Double threshold Pd	Triple threshold Pd
-20	0.0180	0	0.0770
-16	0.0650	0	0.1390
-12	0.3630	0	0.5630
-8	0.9950	0	0.9990
-6	1	0	1

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.6$ .

Το διάγραμμα 4.5 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, δύο και τριών κατωφλίων. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερού( $P_f$ ) ισούται με 0.01 και η αβεβαιότητα του θορύβου( $p$ ) ισούται με 1.6.

Από το διάγραμμα 4.5 και τον πίνακα 4.5, φαίνεται ότι αυξάνοντας την αβεβαιότητα του θορύβου από 1.05 σε 1.6, αυξήθηκε η πιθανότητα ανίχνευσης για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας τριών κατωφλίων, έμεινε σχεδόν ίδια για τον αλγόριθμο μονού κατωφλίου, ενώ μειώθηκε για τον αλγόριθμο δύο κατωφλίων.



**Διάγραμμα 4.6: Γράφημα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 1.6$ .**

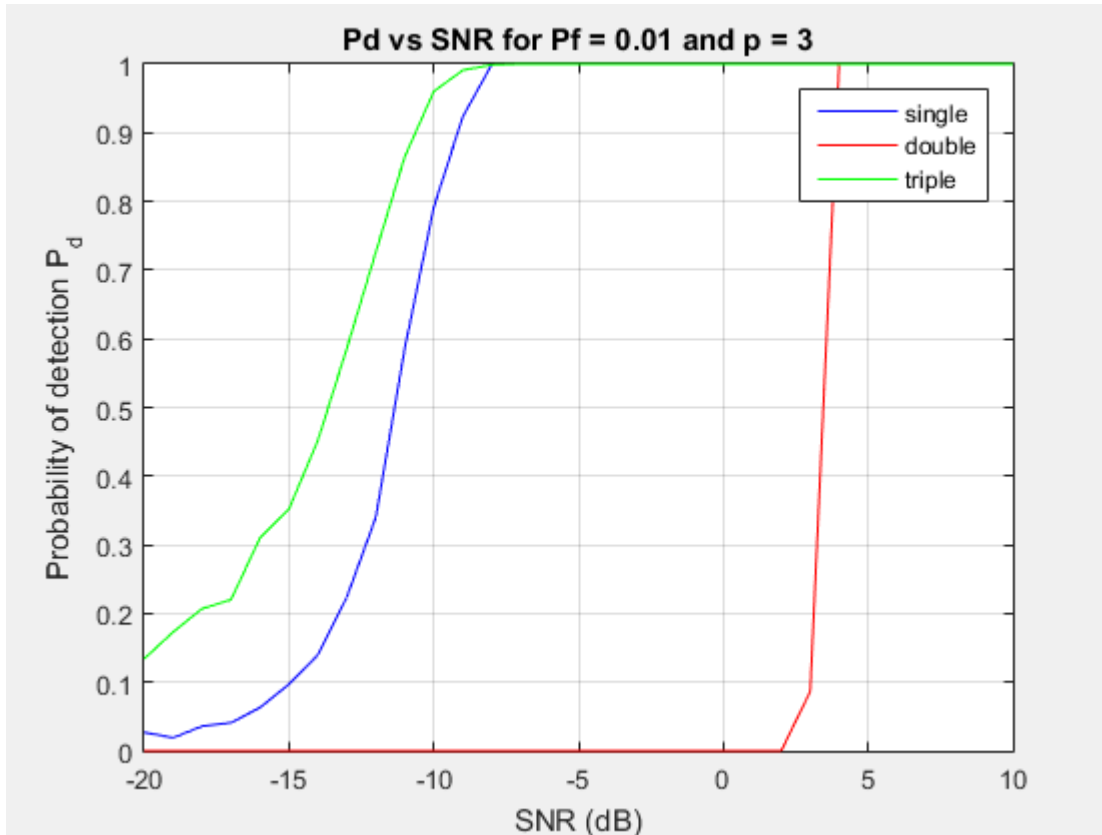
SNR	Single threshold Pc	Double threshold Pc	Triple threshold Pc
-20	0.9820	0	0.9230
-16	0.9350	0	0.8610
-12	0.6370	0	0.4370
-8	0.0050	0	1.0000e-3
-6	0	0	0

**Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $\rho = 1.6$ .**

Το διάγραμμα 4.6 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, δύο και τριών κατωφλίων. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού( $P_f$ ) ισούται με 0.01 και η αβεβαιότητα του θορύβου( $\rho$ ) ισούται με 1.6.

Από το διάγραμμα 4.6 και τον πίνακα 4.6, φαίνεται ότι αυξάνοντας την αβεβαιότητα του θορύβου από 1.05 σε 1.6, μειώθηκε η πιθανότητα σύγκρουσης για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας τριών κατωφλίων, έμεινε σχεδόν ίδια για τον αλγόριθμο μονού κατωφλίου, ενώ μειώθηκε δραστικά για τον αλγόριθμο δύο κατωφλίων.





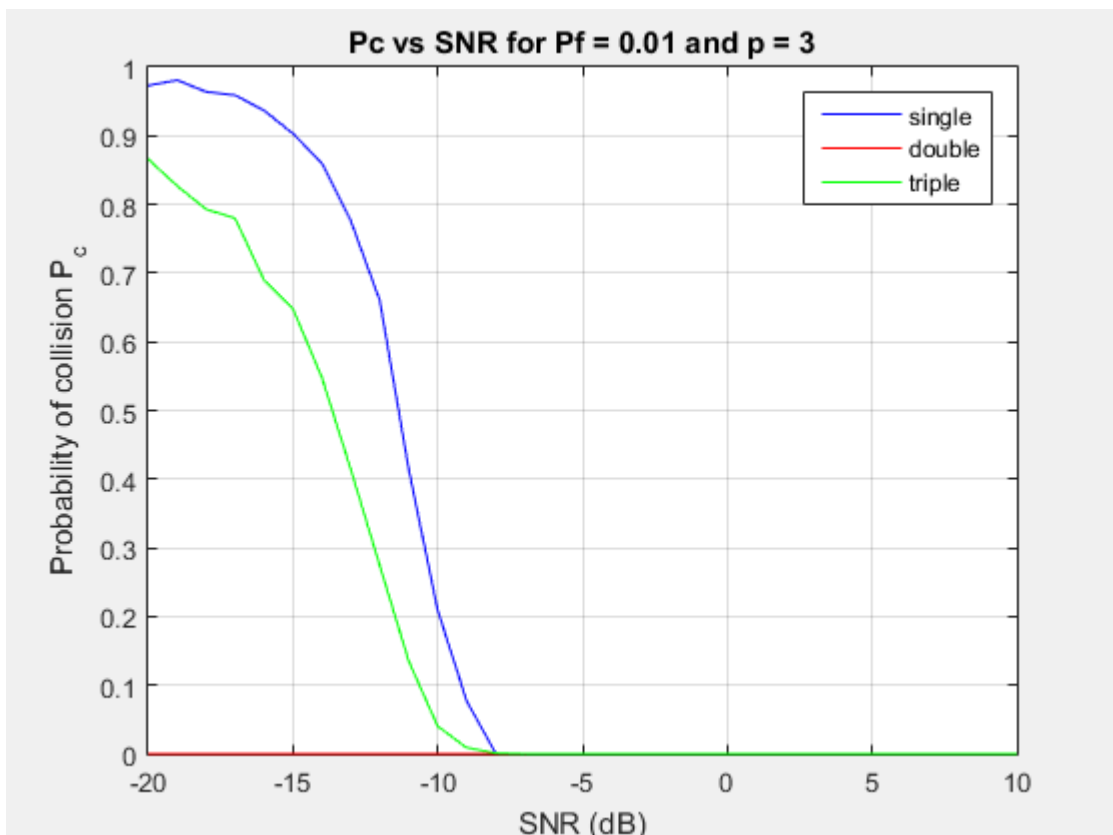
**Διάγραμμα 4.7: Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 3$ .**

SNR	Single threshold Pd	Double threshold Pd	Triple threshold Pd
-20	0.0350	0	0.1490
-16	0.0830	0	0.2910
-12	0.3830	0	0.7440
-8	0.9920	0	0.9990
-6	0	0	1

**Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 3$ .**

Το διάγραμμα 4.7 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, δύο και τριών κατωφλίων. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού( $P_f$ ) ισούται με 0.01 και η αβεβαιότητα του θορύβου( $p$ ) ισούται με 3.

Από το διάγραμμα 4.7 και τον πίνακα 4.7, φαίνεται ότι αυξάνοντας την αβεβαιότητα του θορύβου από 1.6 σε 3, αυξήθηκε η πιθανότητα ανίχνευσης για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας τριών κατωφλίων, έμεινε σχεδόν ίδια για τον αλγόριθμο μονού κατωφλίου, ενώ μειώθηκε κι άλλο για τον αλγόριθμο δύο κατωφλίων.



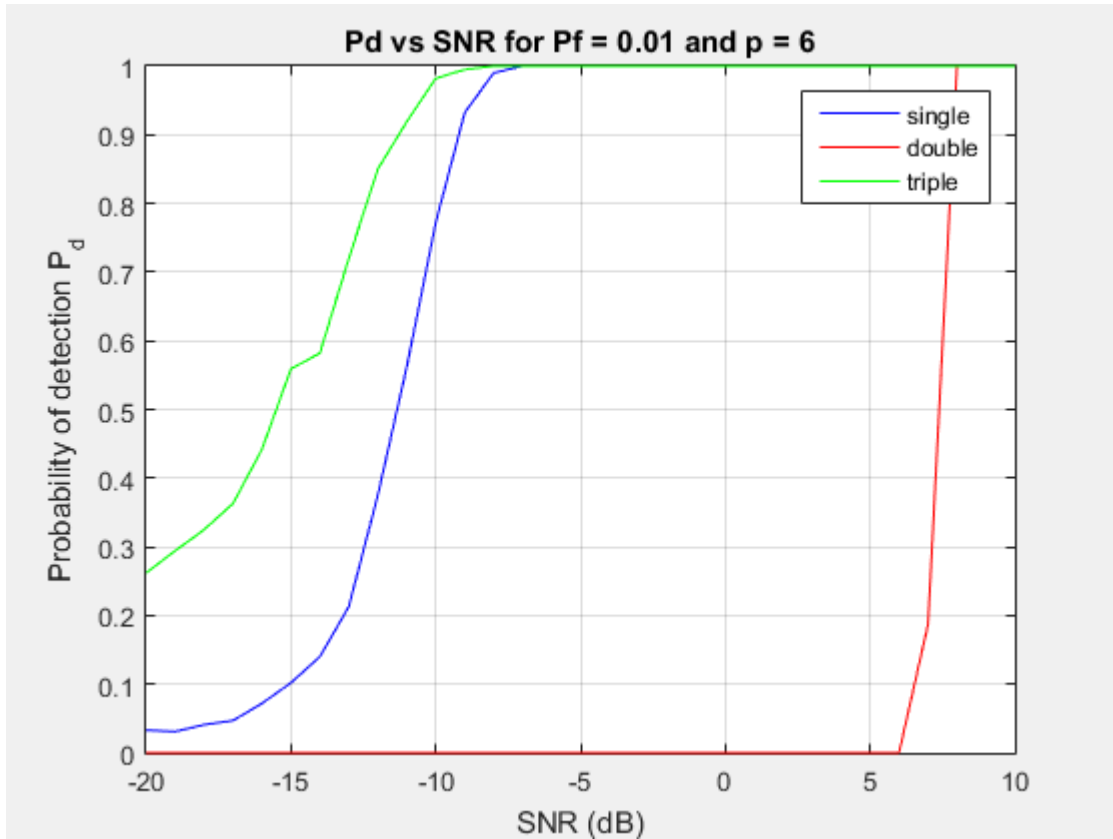
**Διάγραμμα 4.8: Γράφημα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 3$ .**

SNR	Single threshold Pc	Double threshold Pc	Triple threshold Pc
-20	0.9650	0	0.8510
-16	0.9170	0	0.7090
-12	0.6170	0	0.2560
-8	0.0080	0	10000e-03
-6	0	0	0

**Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $\rho = 3$ .**

Το διάγραμμα 4.8 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, δύο και τριών κατωφλίων. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού( $P_f$ ) ισούται με 0.01 και η αβεβαιότητα του θορύβου( $\rho$ ) ισούται με 3.

Από το διάγραμμα 4.8 και τον πίνακα 4.8, φαίνεται ότι αυξάνοντας την αβεβαιότητα του θορύβου από 1.6 σε 3, μειώθηκε η πιθανότητα σύγκρουσης για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας τριών κατωφλίων, έμεινε σχεδόν ίδια για τον αλγόριθμο μονού κατωφλίου, ενώ μειώθηκε δραστικά (μηδενίστηκε) για τον αλγόριθμο δύο κατωφλίων.



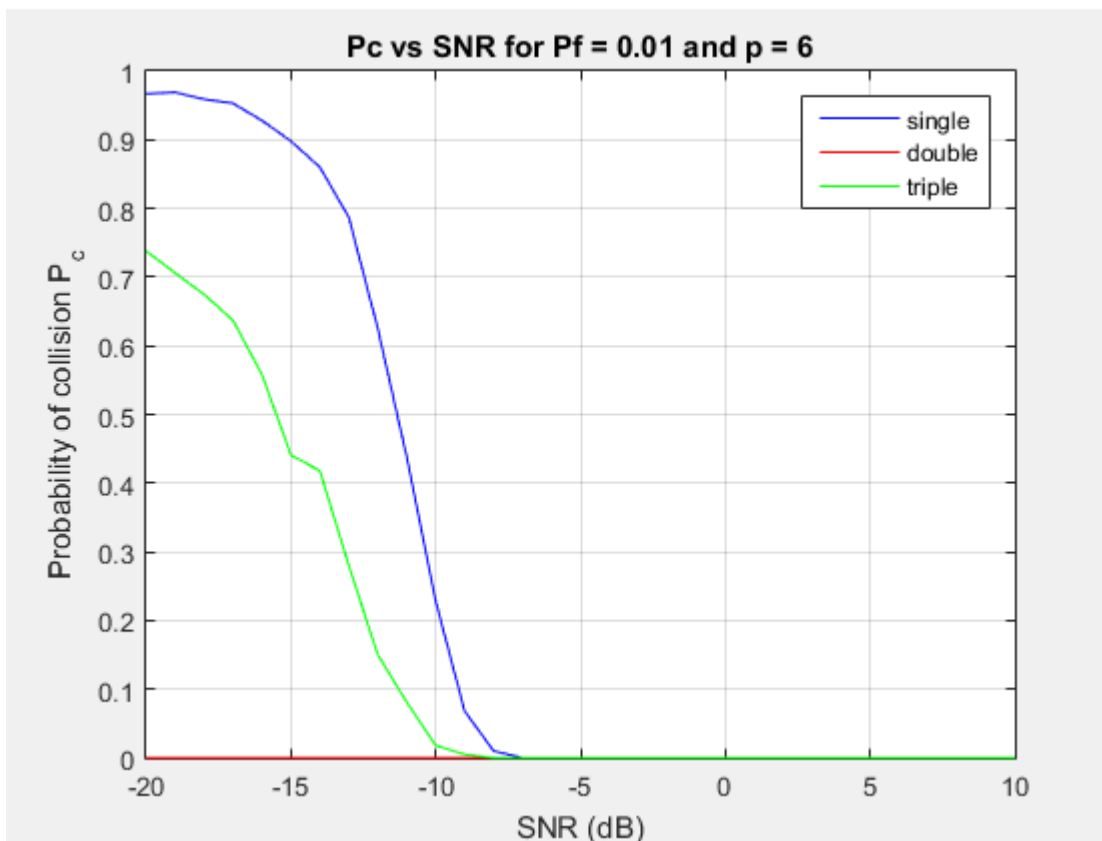
Διάγραμμα 4.9: Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 6$ .

SNR	Single threshold Pd	Double threshold Pd	Triple threshold Pd
-20	0.0140	0	0.2330
-16	0.0630	0	0.4330
-12	0.3900	0	0.8470
-8	0.9950	0	0.9990
-6	1	0	1

**Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 6$ .**

Το διάγραμμα 4.9 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, δύο και τριών κατωφλίων. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού( $P_f$ ) ισούται με 0.01 και η αβεβαιότητα του θορύβου( $p$ ) ισούται με 6.

Από το διάγραμμα 4.9 και τον πίνακα 4.9, φαίνεται ότι αυξάνοντας την αβεβαιότητα του θορύβου από 3 σε 6, αυξήθηκε η πιθανότητα ανίχνευσης για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας τριών κατωφλίων, έμεινε σχεδόν ίδια για τον αλγόριθμο μονού κατωφλίου, ενώ μειώθηκε για τον αλγόριθμο δύο κατωφλίων.



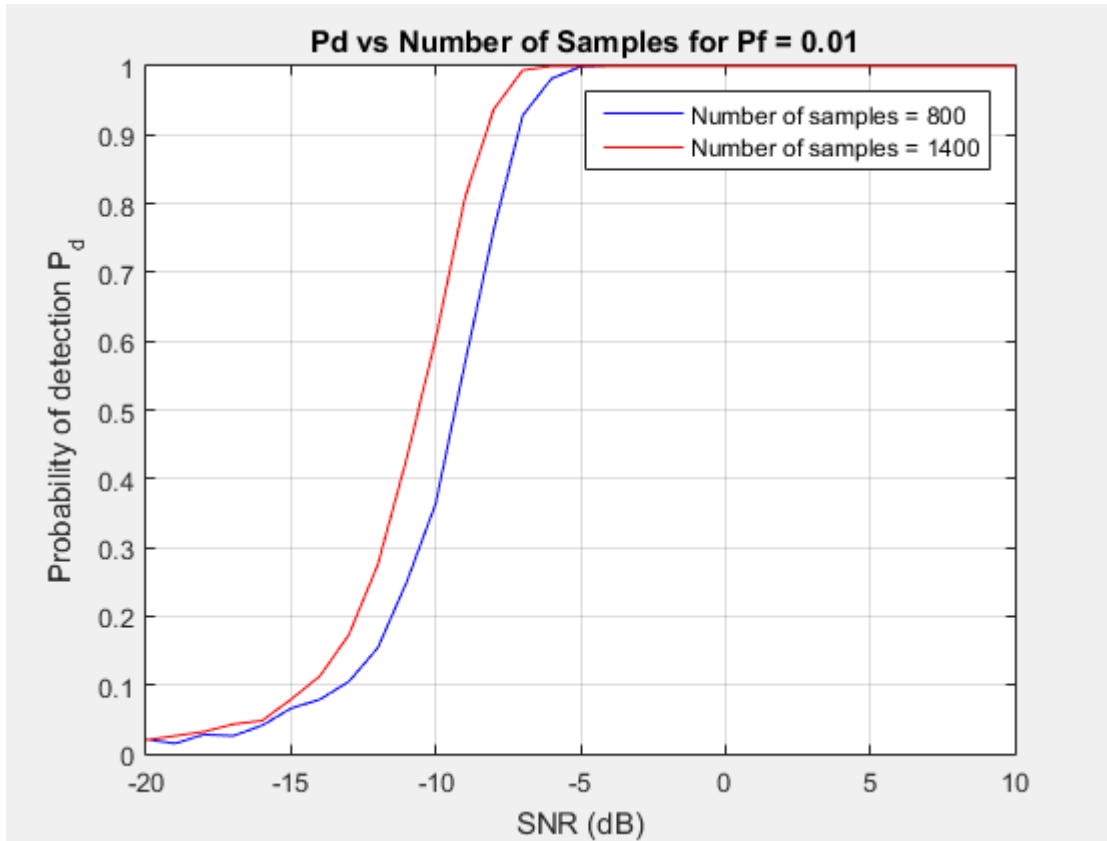
**Διάγραμμα 4.10: Γράφημα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $p = 6$ .**

SNR	Single threshold Pc	Double threshold Pc	Triple threshold Pc
-20	0.9860	0	0.7670
-16	0.9370	0	0.5670
-12	0.6100	0	0.1530
-8	0.0050	0	1.0000e-3
-6	0	0	0

**Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για  $P_f = 0.01$  και  $\rho = 6$ .**

Το διάγραμμα 4.10 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας σύγκρουσης και SNR για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου, δύο και τριών κατωφλίων. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού( $P_f$ ) ισούται με 0.01 και η αβεβαιότητα του θορύβου( $\rho$ ) ισούται με 6.

Από το διάγραμμα 4.10 και τον πίνακα 4.10, φαίνεται ότι αυξάνοντας την αβεβαιότητα του θορύβου από 3 σε 6, μειώθηκε η πιθανότητα σύγκρουσης για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας τριών κατωφλίων, έμεινε σχεδόν ίδια για τον αλγόριθμο μονού κατωφλίου, ενώ μειώθηκε δραστικά (μηδενίστηκε) για τον αλγόριθμο δύο κατωφλίων.



**Διάγραμμα 4.11: Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για αριθμό δειγμάτων σήματος πληροφορίας 800 και 1400.**

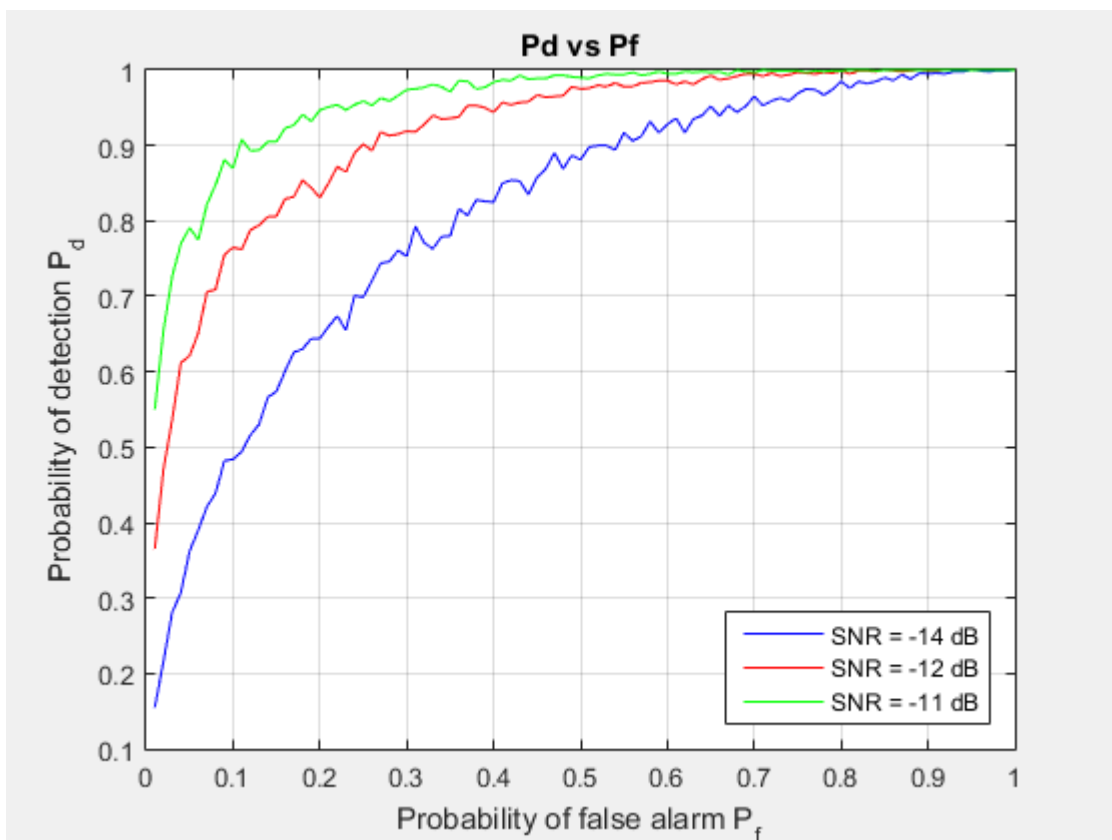
SNR	Pd For Number of Samples = 800	Pd For Number of Samples = 1400
-20	0.0240	0.0230
-16	0.0460	0.0500
-12	0.1780	0.2660
-8	0.7670	0.9630

-6	0.9920	1
----	--------	---

**Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και SNR για αριθμό δειγμάτων σήματος πληροφορίας 800 και 1400.**

Το διάγραμμα 4.11 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας ανίχνευσης και του SNR για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου για αριθμό δειγμάτων 800 και 1400. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού ( $P_f$ ) ισούται με 0.01.

Από το διάγραμμα 4.11 και τον πίνακα 4.11, φαίνεται ότι αν αυξηθεί ο αριθμός δειγμάτων από 800 σε 1400, αυξάνεται η πιθανότητα ανίχνευσης για τα ίδια επίπεδα SNR.



**Διάγραμμα 4.12: Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και πιθανότητας εσφαλμένου συναγερμού για SNR: -14, -12 και -11 dB.**

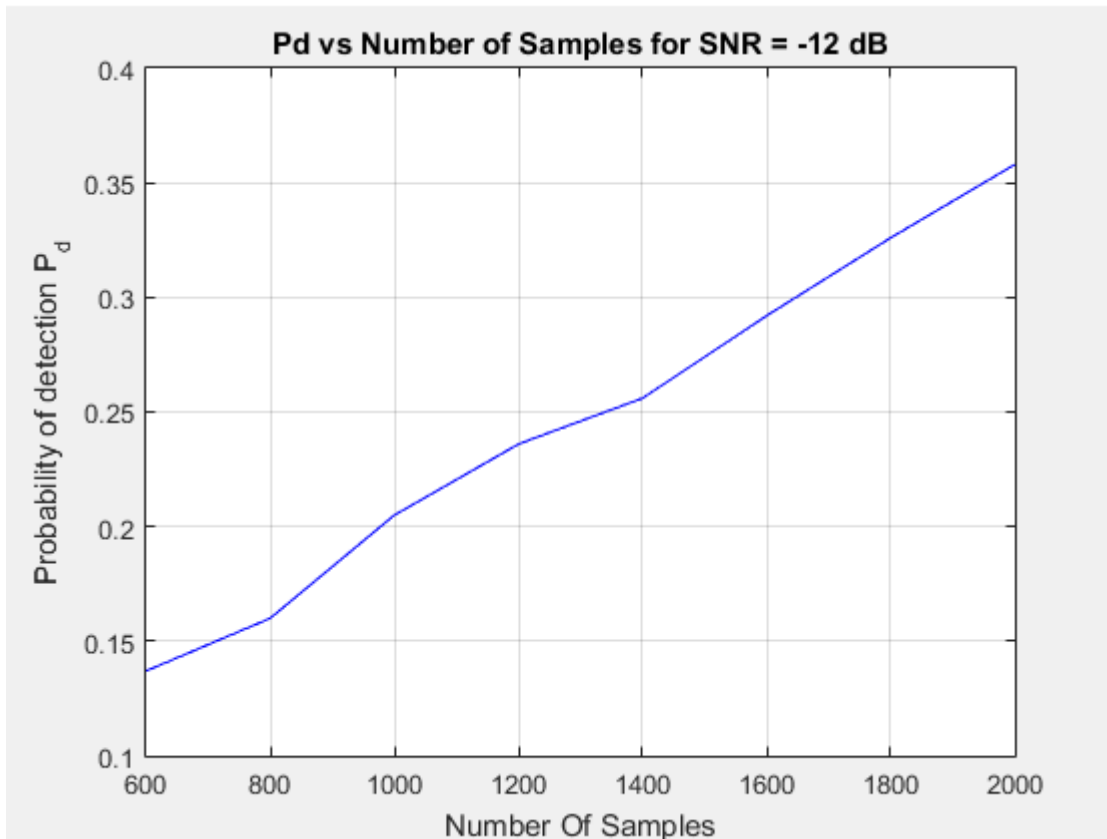


<b>Pf</b>	<b>Pd</b> <b>For SNR = -14 dB</b>	<b>Pd</b> <b>For SNR = -12 dB</b>	<b>Pd</b> <b>For SNR = -11 dB</b>
0.05	0.3400	0.6320	0.8090
0.1	0.4540	0.7470	0.8790
0.15	0.5620	0.8180	0.9120
0.2	0.6510	0.8490	0.9520
0.25	0.7000	0.9050	0.9460
0.3	0.7520	0.9080	0.9660
0.4	0.8380	0.9440	0.9910
0.5	0.8860	0.9780	0.9900
0.6	0.9320	0.9840	0.9940
0.7	0.9610	0.9870	0.9990

**Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και πιθανότητας εσφαλμένου συναγερού για SNR: -14, -12 και -11 dB.**

Το διάγραμμα 4.12 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας ανίχνευσης και της πιθανότητας εσφαλμένου συναγερού για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου για SNR: -14 dB, -12 dB, και -11 dB.

Από το διάγραμμα 4.12 και τον πίνακα 4.12, φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερού, αυξάνεται και η πιθανότητα ανίχνευσης.



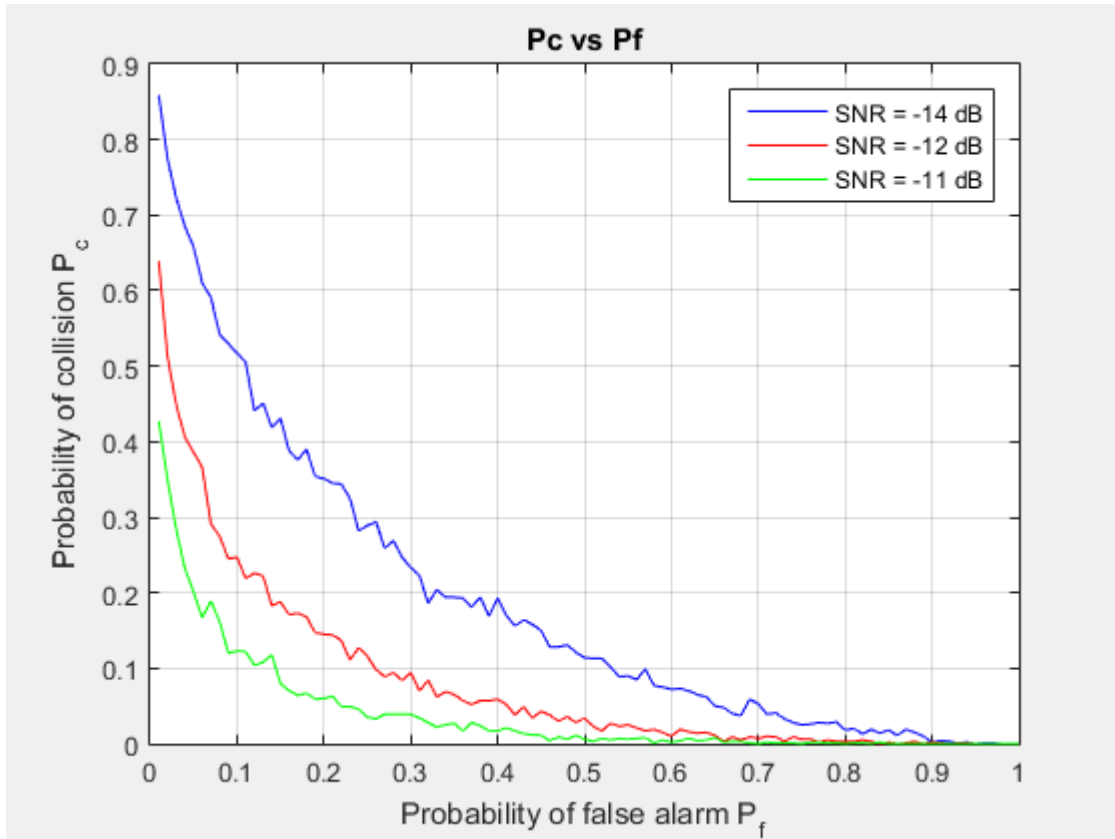
**Διάγραμμα 4.13: Γράφημα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και αριθμού δειγμάτων του σήματος πληροφορίας για SNR = -12 dB.**

Number of Samples	Pd
600	0.1370
800	0.1600
1000	0.2050
1200	0.2360
1400	0.2560
1600	0.2920
1800	0.3260
2000	0.3580

**Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας ανίχνευσης και αριθμού δειγμάτων του σήματος πληροφορίας για SNR = -12 dB.**

Το διάγραμμα 4.13 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας ανίχνευσης και του αριθμού δειγμάτων για SNR -12 dB και πιθανότητα εσφαλμένου συναγερού 0.01.

Από το διάγραμμα 4.13 και τον πίνακα 4.13, φαίνεται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των δειγμάτων του σήματος πληροφορίας, αυξάνεται και η πιθανότητα ανίχνευσης.



**Διάγραμμα 4.14:** Γράφημα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και πιθανότητας εσφαλμένου συναγερμού για SNR: -14, -12 και -11 dB.

Pf	Pc	Pc	Pc
	For SNR = -14 dB	For SNR = -12 dB	For SNR = -11 dB
0.05	0.6430	0.3740	0.2090
0.1	0.4750	0.2540	0.1340
0.15	0.4270	0.1920	0.0740
0.2	0.3500	0.1320	0.0640
0.25	0.3120	0.0860	0.0400
0.3	0.2490	0.0850	0.0220
0.4	0.1640	0.0480	0.0120

0.5	0.1130	0.0200	0.0080
0.6	0.0750	0.0140	0.0050
0.7	0.0450	0.0110	0

**Πίνακας 4.14: Αποτελέσματα μεταξύ πιθανότητας σύγκρουσης και πιθανότητας εσφαλμένου συναγερμού για SNR: -14, -12 και -11 dB.**

Το διάγραμμα 4.14 δείχνει το γράφημα μεταξύ της πιθανότητας σύγκρουσης και της πιθανότητας εσφαλμένου συναγερμού για τον αλγόριθμο ανίχνευσης ενέργειας μονού κατωφλίου για SNR: -14 dB, -12 dB, και -11 dB.

Από το διάγραμμα 4.14 και τον πίνακα 4.14, φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού, μειώνεται η πιθανότητα σύγκρουσης.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, αυξάνοντας την αβεβαιότητα του θορύβου, ο αλγόριθμος που επιτυγχάνει συγχρόνως πολύ καλή πιθανότητα ανίχνευσης και σύγκρουσης, είναι ο αλγόριθμος ανίχνευσης ενέργειας τριών κατωφλίων. Μεταξύ των τριών αλγορίθμων, είναι ο πιο αποδοτικός. Ο αλγόριθμος δύο κατωφλίων παρόλο που επιτυγχάνει την μικρότερη πιθανότητα σύγκρουσης, αποτυγχάνει ως προς την πιθανότητα ανίχνευσης, η οποία μειώνεται δραστικά.

## **Κεφάλαιο 5**

### **Σύνοψη και μελλοντικές επεκτάσεις**

#### **5.1 Σύνοψη**

Το CR είναι μία καινούργια τεχνολογία, η οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει αποτελεσματικά τις φασματικές οπές των αδειοδοτημένων ζωνών συχνότητας. Για να αποφευχθεί όμως η παρεμβολή με τους πρωτεύοντες χρήστες (χρήστες με άδεια), το CR πρέπει να έχει την δυνατότητα να εντοπίζει γρήγορα την παρουσία των πρωτεύοντων χρηστών και να εγκαταλείπει άμεσα την αδειοδοτημένη ζώνη συχνότητων.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά των CR, καθώς και οι διάφορες τεχνικές ανίχνευσης φάσματος που υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Επίσης, η διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στην ανίχνευσης ενέργειας και τους διάφορους αλγόριθμους της. Συγκρίθηκαν οι επιδόσεις των αλγορίθμων και παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός. Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις που έγιναν, ο αλγόριθμος ανίχνευσης ενέργειας τριών κατωφλίων είναι ο βέλτιστος, όσον αναφορά τις πιθανότητες ανίχνευσης και σύγκρουσης. Ακόμη λύνει το πρόβλημα της αβεβαιότητας του θορύβου και της περιοχής σύγχυσης.

#### **5.2 Μελλοντικές επεκτάσεις**

Θα μπορούσε να μετρηθεί στο μέλλον, η επίδοση του αλγορίθμου ανίχνευσης ενέργειας τριών κατωφλίων σε περιβάλλον συνεργατικής ανίχνευσης, και να αποφανθεί αν είναι το ίδιο αποδοτικός όσο και στην μη συνεργατική ανίχνευσης που εξετάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Επίσης, θα μπορούσε να εξεταστεί ένας συνδυασμός των αλγορίθμων ανίχνευσης ενέργειας με άλλες τεχνικές ανίχνευσης φάσματος, για την επίτευξη μεγαλύτερης πιθανότητας ανίχνευσης και μικρότερης πιθανότητας σύγκρουσης.

# Παράρτημα Α

## A.1 Προσομοίωση Monte Carlo

Μια τεχνική επίλυσης προβλημάτων, που χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει την πιθανότητα ορισμένων αποτελεσμάτων από την εκτέλεση πολλών προσομοιώσεων, χρησιμοποιώντας τυχαίες μεταβλητές. Η προσομοίωση Monte Carlo είναι μια μέθοδος για την επαναληπτική αξιολόγηση ενός ντετερμινιστικού μοντέλου, που χρησιμοποιεί ως είσοδο τυχαίους αριθμούς.

## A.2 Θερμικός θόρυβος – Θόρυβος του Johnson

Αυτό το είδος του θορύβου παράγεται από όλες τις αντιστάσεις (π.χ. αντίσταση, ημιαγωγός, η αντίσταση ενός κυκλώματος συντονισμού, δηλαδή το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης, καλώδιο, κλπ).

Πειραματικά αποτελέσματα (από τον Johnson) και θεωρητικές μελέτες (από τον Nyquist) δίνουν τη μέση τετραγωνική τάση θορύβου ως εξής:

$$\bar{V}^2 = 4 \times k \times T \times B \times R \text{ (volt}^2\text{)}$$

Όπου:

k = σταθερά του Boltzmann =  $1,38 \times 10^{-23}$  joule/K

T = απόλυτη θερμοκρασία (Kelvin)

B = το εύρος ζώνης του θορύβου (Hz)

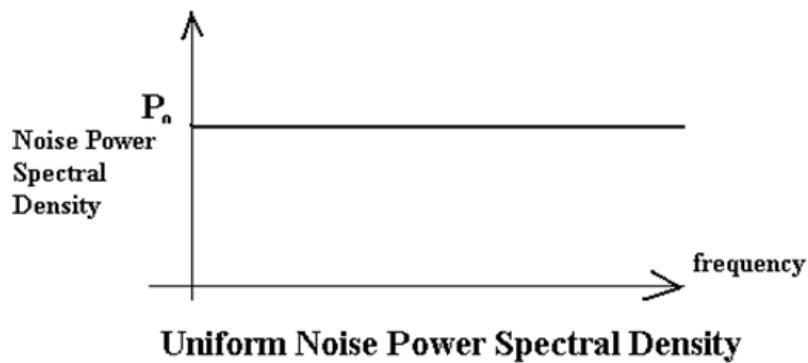
R = αντίσταση ( $\Omega$ )

Η σχέση που συνδέει την ισχύ του θορύβου N, με την θερμοκρασία και το εύρος ζώνης είναι:

$$N = k \times T \times B \text{ (Watts)}$$

Ο θερμικός θόρυβος συχνά αναφέρεται ως λευκός θόρυβος, επειδή έχει ομοιόμορφη φασματική πυκνότητα.

Η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου είναι η ισχύς του θορύβου που μετράται/μετριέται σε εύρος ζώνης 1 Hz, Watt ανά Hz. Μια ομοιόμορφη φασματική πυκνότητα σημαίνει ότι αν μετρήσουμε τον θερμικό θόρυβο σε οποιοδήποτε εύρος ζώνης 1 Hz ~ από 0 Hz → 1 MHz → 1GHz ... 10.000 GHz κλπ θα μετρήσουμε την ίδια τιμή θορύβου. Από την εξίσωση  $N = kTB$ , η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου είναι  $p_0 = kT$  Watt ανά Hz.



**Εικόνα Α.1:** Η σχέση μεταξύ της φασματικής πυκνότητα ισχύος του θορύβου και την συχνότητα.

### **A.3 Το θεώρημα δειγματοληψίας του Nyquist**

Δειγματοληψία είναι η διαδικασία μετατροπής ενός σήματος (για παράδειγμα, μιας συνάρτησης συνεχούς χρόνου ή / και του χώρου) σε μια αριθμητική ακολουθία (μία συνάρτηση του διακριτού χρόνου ή / και του χώρου).

Το θεώρημα δειγματοληψίας του Nyquist: *Για να αποφευχθεί το φαινόμενο που λέγεται aliasing, πρέπει η συχνότητα δειγματοληψίας να είναι τουλάχιστον δύο φορές μεγαλύτερη από την υψηλότερη συχνότητα που περιέχεται στο σήμα.*

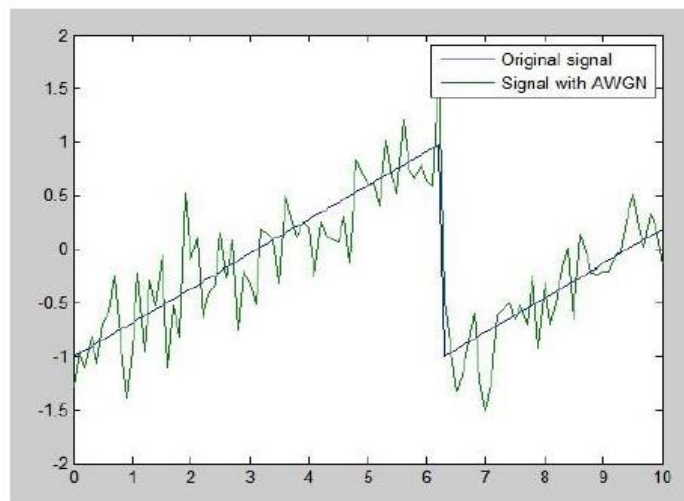


$$f_s \geq 2f_c$$

Aliasing είναι το φαινόμενο που προκαλεί διαφορετικά σήματα να μην ξεχωρίζουν όταν δειγματοληφθούν. Είναι επίσης μία παραμόρφωση, η οποία προκαλεί το ανακατασκευασμένο σήμα από τα δείγματα να είναι διαφορετικό από το αρχικό συνεχές σήμα.

#### **A.4 Λευκός προσθετικός γκαουσιανός θόρυβος**

Ο λευκός προσθετικός γκαουσιανός θόρυβος (Additive White Gaussian Noise AWGN) είναι ένας τύπος θορύβου που υπάρχει στα κανάλια επικοινωνίας γενικότερα. Σε ένα AWGN μοντέλο κανάλι μπορούμε πάντα να υποθέσουμε ότι δεν υπάρχουν άλλες παραμορφώσεις ή αποτελέσματα από άλλες πηγές. Ο προσθετικός λευκός γκαουσιανός θόρυβος είναι ένα μοντέλο για τον θερμικό θόρυβο που δημιουργείται από την τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων στο δέκτη. Το Εικόνα 3 δείχνει ένα σήμα με AWGN.



**Εικόνα A.2:** Το αρχικό σήμα και το σήμα με AWGN.

## A.5 SNR

Είναι ο λόγος της ισχύος του σήματος ως προς την ισχύ του θορύβου. Δείχνει την ένταση του σήματος σε σχέση με το θόρυβο του περιβάλλοντος. Το SNR ορίζεται ως εξής:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$$

όπου P είναι η μέση ισχύς. Στην περίπτωση που είναι γνωστή η διακύμανση του σήματος και του θορύβου, και το σήμα έχει μηδενική μέση τιμή, το SNR μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$SNR = \frac{\sigma_{signal}^2}{\sigma_{noise}^2}$$

Δεδομένου ότι πολλά σήματα έχουν μεγάλο δυναμικό εύρος, συχνά το SNR εκφράζεται σε λογαριθμική κλίμακα ντεσιμπέλ:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) = P_{signal,dB} - P_{noise,dB}$$

## A.6 Φαινόμενα σημάτων

Τα σημαντικότερα φαινόμενα που παρατηρούνται στα σήματα είναι:

1. **Απώλειες διαδρομής** (path losses) : εξασθένηση ισχύος σήματος λόγω της απόστασης πομπού και δέκτη.
2. **Σκίαση** (shadowing): εξασθένηση λόγω μεγάλων εμποδίων.

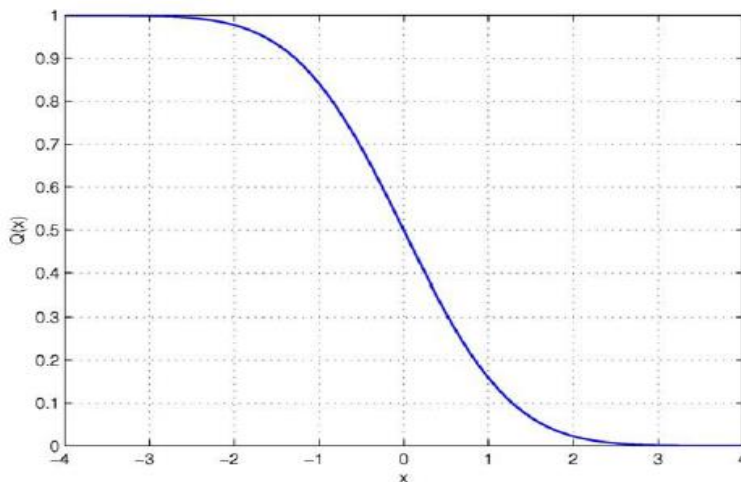
3. **Εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών** (multipath fading): είναι η καταστροφική συμβολή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην κεραία λήψεως.

### A.7 Η συνάρτηση Q

Για  $x \in \mathbb{R}$ ,  $Q(x)$  είναι η πιθανότητα, ότι μία κανονική (γκουσιανή) τυχαία μεταβλητή  $y$ , θα αποκτήσει μια τιμή μεγαλύτερη από  $x$  τυπικές αποκλίσεις, πάνω από τη μέση τιμή.

$$x = \frac{y - \mu}{\sigma}$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt$$



**Εικόνα A.3:** Η γραφική παράσταση της συνάρτησης Q.

## Βιβλιογραφία

- [1] Mahmood A. Abdulsattar, Zahir A. Hussein, “ ENERGY DETECTION TECHNIQUE FOR SPECTRUM SENSING IN COGNITIVE RADIO: A SURVEY ”, International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC) Vol.4, No.5, September 2012.
- [2] Mansi Subhedar, Gajanan Birajdar, “SPECTRUM SENSING TECHNIQUES IN COGNITIVE RADIO NETWORKS: A SURVEY”, International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN) Vol.3, No.2, June 2011.
- [3] Goutam Ghosh, Prasun Das, Subhajit Chatterjee, “SIMULATION AND ANALYSIS OF COGNITIVE RADIO SYSTEM USING MATLAB”, International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN) Vol.6, No.2, June 2014.
- [4] S.VENKATESWARI, R.MUTHAIAH, “AN OVERVIEW OF COGNITIVE RADIO ARCHITECTURE A REVIEW”, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 15 July 2012. Vol. 41 No.1.
- [5] Tevfik Yücek, Hüseyin Arslan, “A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications”, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 11, NO. 1, FIRST QUARTER 2009.
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise_ratio)
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.22](https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.22)

- [8] Tulika Mehta, Naresh Kumar, Surender S Saini, "Comparison of Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio Networks", IJECT Vol. 4, Issue Spl - 3, April - June 2013.
- [9] Suzan Bayhan, "Overview of Cognitive Radio Basics and Spectrum Sensing", University of Helsinki, Faculty of Science Department of Computer Science, 2013.
- [10] Ian F. Akyildiz, Brandon F. Lo, Ravikumar Balakrishnan, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey", Physical Communication 4 (2011) 40–62.
- [11] Carlos Cordeiro, Kiran Challapali, Dagnachew Birru, "IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios", JOURNAL OF COMMUNICATIONS, VOL. 1, NO. 1, APRIL 2006.
- [12] Erik Axell, Geert Leus, Erik G. Larsson, "Overview of Spectrum Sensing for Cognitive Radio", IAPR Workshop on Cognitive Information Processing, 2010.
- [13] Jianfeng Wang, Myung Sun Song, Soma Santhiveeran, Kyutae Lim, Gwangzeen Ko, Kihong Kim, Sung Hyun Hwang, Monisha Ghosh, Vasanth Gaddam, Kiran Challapali, "First Cognitive Radio Networking Standard for Personal/Portable Devices in TV White Spaces", Ecma/TC48 TG1/2009/132.
- [14] Waleed Ejaz, "SPECTRUM SENSING IN COGNITIVE RADIO NETWORKS", A thesis submitted to the faculty of Computer Engineering Department College of Electrical & Mechanical Engineering, National University of Sciences and Technology, Pakistan, 2008.

- [15] OYIBO, ALEWO MICHAEL, "Performance Evaluation of Energy Detection Based Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks", Department of Electrical/Electronics Engineering, College of Engineering, April 2014.
- [16] SIDDHARTH JAIN, RAVI BAID JAIN, "SPECTRUM SENSING METHODS IN COGNITIVE RADIO", Department of Electronics and Communication Engineering National Institute of Technology, 2011.
- [17] Jinbo Wu, Tao Luo, Guangxin Yue, "An Energy Detection Algorithm Based on Double-Threshold in Cognitive Radio Systems", Information Science and Engineering (ICISE), 2009.
- [18] Satrio Cahyo Tri, Jaeshin Jang, "A New Spectrum Sensing Scheme using Three Adaptive Thresholds Based on Energy Detection", Inje University, 2015.
- [19] Aravind Puttupu, "Improved Double Threshold Energy Detection in Cognitive Radio Networks", Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, 2013.
- [20] Won-Yeol Lee, Ian. F. Akyildiz, "Optimal Spectrum Sensing Framework for Cognitive Radio Networks", IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, VOL. 7, NO. 10, OCTOBER 2008.
- [21] SUN YUHANG, "Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems using Energy Detection", FACULTY OF ENGINEERING AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, University of Gävle, 09/2011.

- [22] Χαχάμπης Νικόλαος, “Ανίχνευση Φάσματος και Ταυτοποίηση Σήματος για Συστήματα Γνωστικών Επικοινωνιών (Cognitive Radio)”, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ, ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ, Αύγουστος 2009.
- [23] Κατσιαβριά Κωνσταντίνου, “Μελέτη και υλοποίηση τεχνικών ανίχνευσης φάσματος για Cognitive Radio σε SIMO συστήματα”, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής, Απρίλιος 2009.
- [24] Alexander M. Wyglinski, Maziar Nekovee, Y. Thomas Hou, “Cognitive Radio Communications and Networks”, 2010.
- [25] <http://www.adapt4.com/index.php>
- [26] Garima Nautiyal, Rajesh Kumar, “Spectrum Sensing In Cognitive Radio Using Matlab”, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), June 2013.
- [27] Santa Rahman, Nahid Hossain, Nizam Sayeed, M.L. Palash, “Comparative Study between Wireless Regional Area Network (IEEE Standard 802.22) and WiMAX and Coverage Planning of a Wireless Regional Area Network Using Cognitive Radio Technology”, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), January 2013.

