



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Εφαρμογή των Γνωστικών Ραδιοδικτύων στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λαμπρινή Γ. Παππά

Επιβλέπων : Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Εφαρμογή των Γνωστικών Ραδιοδικτύων στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λαμπρινή Γ. Παππά

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την^η Ιουλίου 2012.

.....
Α. Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Ι. Κανελλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

.....
Λαμπρινή Γ. Παππά

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

Copyright © Λαμπρινή Γ. Παππά, 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η ψηφιακή μετάβαση, δηλαδή η μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεοπτική εκπομπή, έχει ως επακόλουθο την απελευθέρωση διαθέσιμου φάσματος εξαιτίας της μεγαλύτερης φασματικής απόδοσης της ψηφιακής μετάδοσης. Αυτές οι διαθέσιμες ζώνες φάσματος που δημιουργούνται αποκαλούνται Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης (TV White Spaces-TVWS).

Η αξιοποίηση και η αποδοτική εκμετάλλευση των παραπάνω έχει προσελκύσει το έντονο ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας των ασυρμάτων επικοινωνιών. Στην παρούσα εργασία εξετάζουμε το ενδεχόμενο της χρησιμοποίησης της καινοτόμου τεχνολογίας των γνωστικών ραδιοδικτύων στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης. Ωστόσο, βασική προϋπόθεση αποτελεί η προστασία των υφιστάμενων αδειοδοτημένων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών από ανεπιθύμητες παρεμβολές. Δύο είναι οι κύριες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί προς αυτή την κατεύθυνση: η μέθοδος της ανίχνευσης (sensing) και η μέθοδος του γεωγραφικού προσδιορισμού με πρόσβαση σε βάση δεδομένων των αντίστοιχων ραδιοδικτύων (geolocation database). Υπολογίζονται αναλυτικά τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπής των συσκευών TVWS που χρησιμοποιούν τις παραπάνω μεθόδους. Η μέθοδος του γεωγραφικού προσδιορισμού προκρίνεται για εφαρμογή στο εγγύς μέλλον.

Τέλος, παρουσιάζουμε ένα αναλυτικό μοντέλο υπολογισμού της πιθανότητας διακοπής της παρεχόμενης υπηρεσίας (outage probability) στην περίπτωση ύπαρξης πολλαπλών μη αδειοδοτημένων συσκευών γύρω από μία αδειοδοτημένη, και εξετάζουμε τον τρόπο και το βαθμό στον οποίο επηρεάζουν την ποιότητα της υπηρεσίας οι διάφορες παράμετροι του μοντέλου, ενώ ταυτόχρονα το κανάλι υποφέρει από διαλείψεις λόγω του φαινομένου της πολλαπλής διάδοσης ή/και του φαινομένου της σκίασης. Παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά

Γνωστική ραδιοεπικοινωνία, Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης (TVWS), ανίχνευση, βάση δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού, όριο εκπομπής, πιθανότητα θέσης, παρεμβολή γειτονικού καναλιού, πιθανότητα διακοπής, διαλείψεις λόγω του φαινομένου πολλαπλής διάδοσης, λογαριθμοκανονική σκίαση.

Abstract

The digital switchover that is, the transition from analogue to digital television broadcasting, results to the releasing of available spectrum due to the higher spectral efficiency of digital transmission. These available portions of spectrum that are produced are called TV White Spaces (-TVWS).

The utilization and the efficient operation of the available spectrum have attracted the great interest from the research community of wireless communications. In this Diploma Thesis we examine the possibility of using the innovative technology of cognitive radio networks on the TV White Spaces. However, the key requirement is the protection of the incumbent telecommunication services from the unwanted interference. There are two main methods that have been presented here: the sensing of primary users and the geolocation method that is combined with the employment of a database. The allowed emission limits of TVWS devices that use these methods are calculated analytically. The geolocation method seems to have better results and may be chosen for implementation in the nearest future.

Finally, we present an analytical model for the calculation of the outage probability in the case of existence of multiple unlicensed devices around a licensed one. We examine the impact of the various system parameters on the quality of service of the primary, taking into account the channels suffer from multipath fading or/and shadowing. Numerical results are presented and useful conclusions are drawn.

Keywords

Cognitive Radio, TV White Spaces (TVWS), sensing, geolocation database, emission limit, location probability, Adjacent Channel Interference, outage probability, multipath fading, lognormal shadowing.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Α. Παναγόπουλο, ο οποίος μου εμπιστεύθηκε το συγκεκριμένο πολύ ενδιαφέρον θέμα διπλωματικής εργασίας και με καθοδήγησε σε όλη την πορεία εκπόνησής της.

Επίσης, θέλω να εκφράσω θερμές ευχαριστίες προς την οικογένειά μου που με υπομονή με στήριξε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, ευχαριστώ ολόψυχα όλους εκείνους τους ανθρώπους που με βοήθησαν και πίστεψαν σε εμένα. Με τον τρόπο τους με ενθάρρυναν, με ενέπνευσαν και με κινητοποίησαν.

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή.....	17
1. Η τεχνολογία των γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης.....	21
1.1. Εισαγωγή.....	21
1.2. Η “γνωστική” πρόσβαση στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης (TVWS)	24
1.2.1. Τι είναι τα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης;.....	24
1.2.2. Ανίχνευση και προστασία των υφιστάμενων υπηρεσιών.....	24
1.2.2.1. “Φάροι”.....	25
1.2.2.2. Γεωγραφικός προσδιορισμός με πρόσβαση σε βάση δεδομένων.....	25
1.2.2.3. Ανίχνευση (sensing).....	26
1.2.2.3.1. Το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου.....	27
1.2.3. Εποπτική ανάπτυξη.....	28
1.2.3.1. Η.Π.Α.....	28
1.2.3.2. Ηνωμένο Βασίλειο.....	29
1.2.3.3. Σε Παγκόσμιο Επίπεδο.....	30
1.2.4. Προσπάθεια τυποποίησης και βιομηχανοποίησης.....	30
1.2.4.1. Το Πρότυπο Συμμαχίας Γνωστικών Δικτύων (CogNeA – The Cognitive Networking Alliance Standard).....	30
1.2.4.2. Τα πρότυπα IEEE 802.22.....	31
1.3. Ερευνητικές Προκλήσεις.....	33
1.3.1. Υψηλής Ακρίβειας Ανίχνευση Φάσματος.....	33
1.3.2. Ευέλικτες Εκπομπές και Τεχνικές Συγκέντρωσης Φάσματος.....	36
1.3.3. Τεχνολογίες Πολλαπλών Κεραιών για Γνωστικές Ραδιοεπικοινωνίες.....	37
1.3.4. Ζητήματα σε επίπεδο συστήματος.....	37
1.4. Διαθεσιμότητα TVWS και Περιπτώσεις Χρήσης.....	38
1.4.1. Ποιό είναι το μέγεθος των Λευκών Φασματικών Κενών που είναι διαθέσιμα;.....	38
1.4.2. Περιπτώσεις χρήσεως.....	43
1.4.2.1. Ασύρματα οικιακά δίκτυα του μέλλοντος.....	44
1.4.2.2. Γνωστικά/TVWS Femtocells (πολύ μικρά κελιά).....	45
2. Ορισμοί χρήσιμων όρων των γνωστικών ραδιοδικτύων.....	49
2.1. Λευκά Φασματικά Κενά.....	49
2.2. Γνωστικό ραδιοσύστημα.....	49
2.3. Συσκευή Λευκών Φασματικών Κενών (White Space Device-WSD).....	49
2.4. Υπάρχουσα (υφιστάμενη) ασύρματη υπηρεσία.....	49
3. Υποθέσεις εργασίας με βάση τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των συσκευών λευκών φασματικών κενών, που προβλέπεται να αναπτυχθούν στη ζώνη 470-790 MHz.....	51
3.1. Σενάρια.....	51
3.1.1. Γενικά.....	51
3.1.2. Προσωπικές/Κινητές.....	52

3.1.3. Οικιακές συσκευές/συσκευές γραφείου.....	52
3.1.4. Ιδιωτικά και Δημόσια σημεία πρόσβασης.....	52
3.2. Σενάρια ανάπτυξης.....	53
3.2.1. Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – χαμηλό ύψος – εξωτερικός χώρος.....	53
3.2.2. Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – χαμηλό ύψος – απευθείας λειτουργία – εξωτερικός χώρος.....	54
3.2.3. Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – χαμηλό ύψος – εσωτερικός χώρος.....	54
3.2.4. Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – και οι δύο τοποθετημένες ψηλά.....	55
3.2.5. Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – η μία βρίσκεται σε ύψος και η άλλη χαμηλά.....	55
3.3. Χαρακτηριστικά εκπομπής.....	56
4. Προστασία της τηλεοπτικής μετάδοσης στη ζώνη 470-790 MHz από τις εκπομπές των συσκευών λευκών φασματικών κενών.....	59
4.1. Χαρακτηριστικά του συστήματος τηλεοπτικής εκπομπής και μετάδοσης και κριτήρια προστασίας.....	60
4.2. Ανίχνευση (sensing) (συμπεριλαμβάνεται ο υπολογισμός του κατωφλίου ανίχνευσης).....	62
4.2.1. Κατώφλι ανίχνευσης.....	62
4.2.1.1. Κατώφλι ανίχνευσης για WSD εξωτερικού χώρου.....	63
4.2.1.2. Κατώφλι ανίχνευσης για WSD εσωτερικού χώρου.....	64
4.3. Όρια εκπομπής των WSD.....	66
4.3.1. Όρια e.i.r.p. στην περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας (τεχνική ανίχνευσης).....	67
4.3.1.1. Μεθοδολογία.....	67
4.3.1.2. Παραδοχές.....	70
4.3.1.3. Όρια e.i.r.p.....	71
4.3.1.3.1. Περιορισμοί.....	73
4.3.2. Όρια e.i.r.p. στην περίπτωση του γεωγραφικού προσδιορισμού με πρόσβαση σε βάση δεδομένων.....	76
4.3.2.1. Βάση δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού.....	76
4.3.2.2. Γεωγραφικός προσδιορισμός με βάση δεδομένων και πιθανότητα θέσης (location probability).....	77
4.3.2.2.1. Ορισμός της πιθανότητας θέσης.....	77
4.3.2.2.2. Υπολογισμός του εντός του μπλοκ ορίου εκπομπής μιας WSD για συγκεκριμένη υποβάθμιση της πιθανότητας θέσης.....	78
4.3.2.2.3. Υπολογισμός του εκτός του μπλοκ ορίου εκπομπής μιας WSD για συγκεκριμένη υποβάθμιση της πιθανότητας θέσης.....	79
4.3.2.3. Υπολογισμοί της βάσης δεδομένων.....	80
4.3.2.3.1. Υπολογισμός των εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ επιπέδων για συγκεκριμένη θέση, για δεδομένο διαχωρισμό συχνότητας μεταξύ μιας WSD και ενός DTT καναλιού θύματος.....	80
4.3.2.3.2. Εναρμόνιση των υπολογισμένων εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ επιπέδων μιας WSD για την εξαγωγή των κανονικών ορίων εκπομπής	82

προς όλα τα κανάλια DTT.....	
4.4. Συμπεράσματα σχετικά με την προστασία της τηλεοπτικής μετάδοσης.....	86
5. Μη αδειοδοτημένες εκπομπές στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης και η επίδρασή τους στις υφιστάμενες υπηρεσίες.....	89
5.1. Εισαγωγή.....	89
5.2. Σχετικές εργασίες.....	90
5.3. Το μοντέλο του συστήματος.....	91
5.4. Μαθηματική ανάλυση.....	93
5.5. Αποτελέσματα και σχόλια.....	98
5.6. Επίλογος.....	100
Παραπομπές.....	103

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1	Το πρόβλημα ‘κρυμμένου’ κόμβου.....	28
Σχήμα 2	Στις μελλοντικές εμπορικές εφαρμογές τα ολικά επίπεδα ισχύος από τις γνωστικές συσκευές πρέπει να ελέγχονται ώστε να αποφεύγεται η παρεμβολή στους βασικούς δέκτες.....	34
Σχήμα 3	Οι τηλεοπτικές UHF ζώνες στο Ηνωμένο Βασίλειο μετά την ολοκλήρωση της ψηφιακής μετάβασης.....	39
Σχήμα 4	Διαθέσιμη χωρητικότητα σε TVWS για γνωστική πρόσβαση χαμηλής ισχύος σε 18 περιοχές του Ηνωμένου Βασιλείου. Τα αποτελέσματα φαίνονται τόσο για την περίπτωση που λαμβάνουμε υπ’ όψιν τον περιορισμό για παρεμβολή σε γειτονικά κανάλια (κόκκινες ράβδοι), όσο και χωρίς αυτόν (πράσινες ράβδοι).....	42
Σχήμα 5	Κανάλια TVWS διαθέσιμα για γνωστική πρόσβαση στο κεντρικό Λονδίνο.....	43
Σχήμα 6	Αρχιτεκτονική για διανομή τηλεοπτικού σήματος υψηλής ευκρίνειας με τη χρήση των Λευκών Φασματικών Κενών Τηλεόρασης.....	46
Σχήμα 7	Ασύρματες μονάδες σε χαμηλό ύψος.....	54
Σχήμα 8	Ασύρματες μονάδες σε χαμηλό ύψος και σε άμεση λειτουργία.....	54
Σχήμα 9	Ασύρματες μονάδες σε χαμηλό ύψος, εσωτερικά.....	55
Σχήμα 10	Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – και οι δύο τοποθετημένες ψηλά.....	55
Σχήμα 11	Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – η μία βρίσκεται ψηλά και η άλλη σε μικρό ύψος.....	56
Σχήμα 12	Παράδειγμα περίπτωσης παρεμβολής.....	59
Σχήμα 13	Μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.....	62
Σχήμα 14	Προστασία των περιπλεγμένων περιοχών/ορίων κάλυψης.....	74
Σχήμα 15	Γεωμετρία των περιπλεγμένων περιοχών/ορίων κάλυψης.....	75
Σχήμα 16	Υπολογισμοί στα περιβάλλοντα πίζελ ώστε να συνεκτιμηθούν τα σφάλματα θέσης της WSD.....	82
Σχήμα 17	Χρήση των συχνοτήτων f_1 , f_2 και f_3 από την WSD και την υπηρεσία DTT. Τα πιο κοντινά πίζελ όπου χρησιμοποιούνται οι f_1 και f_3 από την υπηρεσία DTT βρίσκονται 5 και 20 km μακριά, αντίστοιχα.....	83
Σχήμα 18	LD που περιβάλλεται από UD (απεικονίζονται μόνο οι τρεις βαθμίδες). Ο αδειοδοτημένος πομπός δεν φαίνεται στο σχήμα.....	92
Σχήμα 19	Πιθανότητα διακοπής (P_{out}) σε σχέση με την απόσταση από τον σταθμό εκπομπής DTV (R_1) για τρεις διαφορετικές συνθήκες καναλιού. Απόσταση ομοκαναλικής επαναχρησιμοποίησης, $R_2 = 50$ m.....	99
Σχήμα 20	Πιθανότητα διακοπής (P_{out}) σε σχέση με την απόσταση ομοκαναλικής επαναχρησιμοποίησης (R_2) για τρεις διαφορετικές συνθήκες καναλιού. Απόσταση από τον σταθμό εκπομπής DTV, $R_1 = 97,621$ km.....	100

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1	Παράμετροι DVB-T που χρησιμοποιούνται σε μελέτες συμβατότητας..	60,61
Πίνακας 2	Κατώφλι ανίχνευσης για WSD εξωτερικού χώρου.....	64
Πίνακας 3	Κατώφλι ανίχνευσης για WSD εσωτερικού χώρου.....	65
Πίνακας 4	Εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ όρια εκπομπής υπολογισμένα για μια WSD που λειτουργεί σε συχνότητα f_1	84
Πίνακας 5	Εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ όρια εκπομπής υπολογισμένα για μια WSD που λειτουργεί σε συχνότητα f_2	84
Πίνακας 6	Εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ όρια εκπομπής υπολογισμένα για μια WSD που λειτουργεί σε συχνότητα f_3	85
Πίνακας 7	Κανονικά όρια εκπομπής.....	85

Εισαγωγή

Η απελευθέρωση των τηλεπικοινωνιακών αγορών, καθώς και η ταχεία εξέλιξη των σχετιζόμενων με τις τηλεπικοινωνίες τεχνολογιών, έχουν αυξήσει σημαντικά τη ζήτηση φάσματος. Η ολοένα αυξανόμενες ανάγκες σε φάσμα σε συνδυασμό με το περιορισμένο μέγεθός του, το καθιστούν δυσεύρετο και συνεπώς πολύτιμο. Συνεπώς, καθίσταται επιβεβλημένη η ορθή διαχείρισή του ώστε να εξασφαλιστεί η κατά το δυνατόν μέγιστη αποδοτικότητά του. Η διαχείριση του φάσματος εξασκείται από δημόσιες ή ανεξάρτητες ρυθμιστικές αρχές. Οι τελευταίες φέρουν την ευθύνη να καθορίσουν τις ζώνες φάσματος που θα επιτρέπεται αποκλειστικά η αδειοδοτημένη χρήση, καθώς και εκείνων των ζωνών που θα επιτρέπεται η μη-αδειοδοτημένη κοινόχρηστη χρήση. Η εκχώρηση φάσματος (δηλαδή, η ανάθεση δικαιωμάτων αποκλειστικής χρήσης σε ζώνες αδειοδοτημένου φάσματος) είναι μια σύνθετη διαδικασία και καταδεικνύει, πέραν όλων των άλλων, και το ρόλο του φάσματος ως σημαντικού οικονομικού μεγέθους. Επιπλέον, η διαχείριση του φάσματος περιλαμβάνει τον καθορισμό των ορίων εκπομπής ώστε να αποτρέπονται οι παρεμβολές μεταξύ των χρηστών, την τήρηση ορίων ασφαλείας για ζητήματα υγείας, τη συμμόρφωση με διεθνή πρότυπα, την παρακολούθηση της χρήσης του φάσματος, κ.α.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες που στοχεύουν στην ευέλικτη χρήση του φάσματος και στην καλύτερη αξιοποίησή του. Μία από αυτές αποτελεί και η τεχνολογία των γνωστικών ραδιοδικτύων (Cognitive Radio). Σε γενικές γραμμές, θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε τις συσκευές που ακολουθούν τη συγκεκριμένη τεχνολογία ως «έξυπνες» συσκευές. Έχουν την ικανότητα να ανιχνεύουν και να αξιοποιούν τη θέση στην οποία βρίσκονται, να ανιχνεύουν περιβάλλοντα ασύρματων μεταδόσεων καθώς και τα χαρακτηριστικά τους, έχουν την ικανότητα της αυτοεκμάθησης και της λήψης αποφάσεων, διαπραγματεύονται σε πραγματικό χρόνο για να επιτύχουν το καλύτερο φάσμα, στην καλύτερη ισχύ, ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του χρήστη.

Με τον όρο ψηφιακή μετάβαση αναφερόμαστε στη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεοπτική εκπομπή. Η ψηφιακή τηλεοπτική μετάδοση έχει υψηλότερη φασματική απόδοση σε σχέση με την αναλογική, καθώς ένας ψηφιακός τηλεοπτικός πολυπλέκτης κωδικοποιεί, συνδυάζει και μεταδίδει 4-6 τηλεοπτικά προγράμματα σε ένα μόνο κανάλι που έχει εύρος ζώνης 8 MHz, όσο δηλαδή καταλαμβάνει και το αναλογικό τηλεοπτικό σήμα. Κατά συνέπεια, με την ψηφιακή μετάβαση προκύπτουν ζώνες του φάσματος που δεν χρησιμοποιούνται και που αποκαλούνται Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης (TV White Spaces - TVWS).

Στόχος, λοιπόν, της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εξεταστεί η δυνατότητα εκμετάλλευσης των Λευκών Φασματικών Κενών Τηλεόρασης μέσω της

χρήσης της τεχνολογίας των γνωστικών ραδιοδικτύων. Φυσικά, βασική προϋπόθεση αποτελεί η προστασία της υπάρχουσας αδειοδοτημένης υπηρεσίας από ανεπιθύμητες παρεμβολές. Συνεπώς, τίθενται αυστηροί περιορισμοί στην ενδεχόμενη λειτουργία των γνωστικών ραδιοδικτύων.

Στο πρώτο κεφάλαιο εξηγούνται οι έννοιες της γνωστικής ραδιοεπικοινωνίας καθώς και των Λευκών Φασματικών Κενών. Αναλύονται διεξοδικά οι τρεις βασικές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί με στόχο την αξιοποίησή τους και την προστασία των υφιστάμενων, αδειοδοτημένων υπηρεσιών από ενδεχόμενες επιβλαβείς παρεμβολές εξαιτίας της λειτουργίας των γνωστικών συσκευών (ή συσκευών Λευκών Φασματικών Κενών). Επίσης, αναφέρονται τα πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί έως τώρα με σκοπό την προτυποποίηση και βιομηχανοποίηση των γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών, ώστε να καταστούν εμπορικό προϊόν. Παράλληλα, έχουν ανακύψει και ερευνητικές προκλήσεις για την καλύτερη αξιοποίηση αυτής της καινοτόμου και πολλά υποσχόμενης τεχνολογίας. Τέλος, αναφερόμαστε σε μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο και δίνουν εικόνα για το πραγματικό μέγεθος, αλλά και τη δομή των διαθέσιμων Λευκών Φασματικών Κενών Τηλεόρασης. Και φυσικά, δεν θα μπορούσαμε να παραλείψουμε τους πιθανούς τομείς όπου ενδεχομένως θα έχει εφαρμογή η νέα αυτή τεχνολογία, που έχει προσελκύσει το έντονο ενδιαφέρον τόσο του ερευνητικού, όσο και του βιομηχανικού κόσμου, εξαιτίας των ιδιαίτερα ελκυστικών χαρακτηριστικών της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται συνοπτικά οι ορισμοί των βασικότερων εννοιών που θα μας απασχολήσουν στην παρούσα εργασία.

Το τρίτο κεφάλαιο ασχολείται με ορισμένες πιθανές κατηγορίες συσκευών, σενάρια ανάπτυξης και γνωστικές τεχνικές για χρήση στα Λευκά Φασματικά Κενά, με σκοπό τη διερεύνηση των απαιτήσεων ασφαλείας των υφιστάμενων υπηρεσιών.

Το τέταρτο κεφάλαιο ασχολείται κατεξοχήν με την προστασία της τηλεοπτικής μετάδοσης στη ζώνη 470-790 MHz από τις εκπομπές των συσκευών Λευκών Φασματικών Κενών. Δίνονται τα χαρακτηριστικά του συστήματος τηλεοπτικής εκπομπής και μετάδοσης και τα κριτήρια προστασίας τους και υπολογίζεται διεξοδικά το κατώφλι ανίχνευσης (δηλαδή εκείνο το επίπεδο ισχύος, στο οποίο η συσκευή Λευκών Φασματικών Κενών αντιλαμβάνεται την ύπαρξη περιβάλλοντος τηλεοπτικής μετάδοσης) για την περίπτωση που η συσκευή Λευκών Φασματικών Κενών λειτουργεί τόσο σε εξωτερικό, όσο και σε εσωτερικό χώρο, έχοντας ως κύριο γνώμονα την αποτροπή ανεπιθύμητων παρεμβολών στο τηλεοπτικό σήμα. Στη συνέχεια, υπολογίζονται αναλυτικά τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπής των συσκευών Λευκών Φασματικών Κενών τόσο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η μέθοδος της ανίχνευσης (αυτόνομη λειτουργία), όσο και κατά την εφαρμογή της μεθόδου γεωγραφικού προσδιορισμού σε συνδυασμό με βάση δεδομένων.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο μοντελοποιούμε το σενάριο ύπαρξης πολλαπλών μη-αδειοδοτημένων συσκευών που λειτουργούν κοντά σε μια αδειοδοτημένη συσκευή. Στη συνέχεια, διατυπώνουμε το θεωρητικό υπόβαθρο που μας επιτρέπει να αναλύσουμε την πιθανότητα διακοπής της παρεχόμενης υπηρεσίας ως αποτέλεσμα της παρουσίας παρεμβολών από τη λειτουργία των μη αδειοδοτημένων συσκευών, καθώς και διαλείψεων λόγω του φαινομένου της πολλαπλής διάδοσης και/ή του φαινομένου της σκίασης. Παρατίθεται παράδειγμα όπου εφαρμόζονται οι θεωρητικές μαθηματικές σχέσεις τις οποίες έχουμε εξάγει, και όπου καταδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο οι διάφορες παράμετροι του μοντέλου που χρησιμοποιήσαμε επιδρούν στην πιθανότητα διακοπής της παρεχόμενης υπηρεσίας, και κατά συνέπεια στην ποιότητα λήψης του σήματος.

1. Η τεχνολογία των γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης.

1.1. Εισαγωγή

Η διαδικασία της γνωστικής ραδιοεπικοινωνίας [1], [2] περιλαμβάνει: 1) Μια «γνωστική μηχανή» (CE), η οποία περιέχει αλγόριθμους και εργαλεία για την ανίχνευση περιβάλλοντος ραδιοεκπομπής. Επίσης, η CE έχει την ικανότητα της αυτοεκμάθησης και της λήψης αποφάσεων. 2) Μια διαμορφώσιμη πλατφόρμα που θα μπορούσε να είναι κάποιο λογισμικό σχεδιασμένο για τις ασύρματες επικοινωνίες (Software Defined Radio – SDR), που κατά βάση θα κάνει ό,τι του η υπαγορεύει η CE. Οι Mitola και Maguire [3] ήταν οι πρώτοι που περιέγραψαν την ιδέα της γνωστικής ραδιοεπικοινωνίας (Cognitive Radio – CR) με τον ακόλουθο τρόπο : “Ραδιο – κόμβοι που μετασχηματίζονται από τυφλοί (άβουλοι) εκτελεστές προκαθορισμένων πρωτοκόλλων σε έξυπνους κατασκόπους, γνώστες του πεδίου των ραδιοεπικοινωνιών, που αναζητούν τρόπους να παρέχουν τις υπηρεσίες που θέλει ο χρήστης ακόμη κι όταν ο τελευταίος δεν ξέρει πώς να τις αποκτήσει”. Η ιδανική CR γνωρίζει τα πάντα για τις απαιτήσεις του χρήστη, τις δυνατότητες της συσκευής, τις απαιτήσεις του δικτύου και του εξωτερικού περιβάλλοντος (συμπεριλαμβανομένου και του περιβάλλοντος των ασύρματων επικοινωνιών). Θα προγραμματίσει και θα διαπραγματευτεί ώστε να επιτύχει το καλύτερο μέρος του φάσματος μέσα στο οποίο θα λειτουργήσει, στην καλύτερη ισχύ, με το κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης, κ.ο.κ., ενώ όλες αυτές τις πληροφορίες θα τις διαχειριστεί σε πραγματικό χρόνο ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της υπηρεσίας και του χρήστη. Η ιδανική CR βρίσκεται προς το παρόν σε ένα πρώιμο στάδιο έρευνας με την περισσότερη δουλειά να πραγματοποιείται σε πανεπιστήμια.

Μια πιο εξελιγμένη μορφή της τεχνολογίας γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών είναι η CR για δυναμική πρόσβαση στο φάσμα (Dynamic Spectrum Access -DSA)[4]. Σε αυτή την περίπτωση σκοπός είναι ο έλεγχος των παρεμβολών με βάση τη συσκευή, και η δυναμική επαναχρησιμοποίηση του φάσματος βασισμένη στην ευελιξία και την ευφυΐα που προσφέρει η τεχνολογία των γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών. Επί του παρόντος, αυτή η μορφή τεχνολογίας CR ερευνάται εντατικά. Ωστόσο, παρατηρείται ήδη από πλευράς βιομηχανίας αξιόλογη προσπάθεια προς την κατεύθυνση της προτυποποίησης, της τυποποίησης και της εμπορευματικής χρήσης της εν λόγω τεχνολογίας. Σημαντικούς παίκτες σε αυτό τον τομέα αποτελούν οι εταιρίες Alcatel-Lucent, Ericsson και Motorola από την βιομηχανία εξοπλισμού κινητών τηλεπικοινωνιών, οι BT και Orange από τους παρόχους, οι Philips και Samsung από τη βιομηχανία των καταναλωτικών ηλεκτρονικών ειδών, οι HP και Dell από τη βιομηχανία υπολογιστών και οι Microsoft και Google από τη βιομηχανία λογισμικού διαδικτύου. Η δυναμική πρόσβαση στο φάσμα μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους : μεταξύ ενός κύριου

αδειοδοτημένου συστήματος και ενός δευτερεύοντος μη-αδειοδοτημένου συστήματος, μέσα στο κύριο σύστημα, και τέλος μεταξύ δύο κύριων συστημάτων.

Η πρώτη μορφή δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα είναι η πιο ριζοσπαστική εφαρμογή της τεχνολογίας CR, καθώς επιτρέπει σε μη-αδειοδοτημένους χρήστες (τερματικές συσκευές και σταθμούς βάσης) να ενεργούν ως ‘καθαριστές’ φάσματος. Μπορούν να αναγνωρίσουν αχρησιμοποίητα τμήματα του αδειοδοτημένου φάσματος (που επίσης αποκαλούνται Λευκά Φασματικά Κενά) και να κάνουν ευκαιριακή χρήση αυτού του φάσματος για την σύνδεσή τους σε τοποθεσίες που δεν χρησιμοποιείται. Η λειτουργία αυτού του είδους ‘καθαριστών’ υπόσχεται μεγάλη αύξηση στην αποδοτικότητα της χρήσης του φάσματος, καθώς εμποδίζει το αποκλειστικά αδειοδοτημένο φάσμα από το να σπαταλάται λόγω της χαμηλής χωρικής χρήσης ή λόγω προσωρινής χρήσης. Γι’ αυτόν κυρίως το λόγο, η γνωστική πρόσβαση των μη-αδειοδοτημένων χρηστών σε συγκεκριμένες αδειοδοτημένες ζώνες προωθείται έντονα από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) των ΗΠΑ [5], [6], [7], [8] και πιο πρόσφατα από την Επιτροπή Επικοινωνιών (Ofcom) του Ηνωμένου Βασιλείου [9], [10], [11]. Το σκεπτικό έγκειται στην μεγιστοποίηση της χρήσης του αδειοδοτημένου φάσματος, μέσω της δευτερογενούς πρόσβασης από γνωστικά ραδιοδίκτυα, ενώ ταυτόχρονα προάγεται η ραγδαία είσοδος νέων ασύρματων τεχνολογιών και υπηρεσιών, χωρίς την ανάγκη να καταληφθεί νέο φάσμα γι’ αυτό τον σκοπό. Οι περισσότεροι πάροχοι υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας βλέπουν την είσοδο των γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών ως μια διαδικασία άκρως αποδιοργανωτική για το υπάρχον επιχειρηματικό τους μοντέλο.

Σε βάθος χρόνου (3-5 χρόνια), αναμένουμε ότι η δυναμική πρόσβαση στο φάσμα βασισμένη στα γνωστικά ραδιοδίκτυα θα προχωρήσει αρκετά πιο πέρα από την αποκλειστικά ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα. Ως αποτέλεσμα των σύγχρονων τάσεων στην απελευθέρωση του φάσματος, συμπεριλαμβανομένης της διαθεσιμότητας αδειοδοτημένου φάσματος για εμπορία σε πραγματικό χρόνο, οι γνωστικές συσκευές θα έχουν τη δυνατότητα πρόσβασης σε μια οργάνωση (portfolio) του φάσματος που περιλαμβάνει διαφορετικούς τύπους φάσματος, με σκοπό τη σύνδεσή τους. Αυτή η οργάνωση του φάσματος (“spectrum portfolio”) μπορεί να περιλαμβάνει αρκετούς διαφορετικούς τύπους φάσματος : αδειοδοτημένο, μη-αδειοδοτημένο, ακόμα και φάσμα που αποκτάται σε πραγματικό χρόνο, είτε με την διαδικασία της εκμίσθωσης, είτε σε δευτερεύουσα βάση. Οι συσκευές που διαθέτουν γνωστική λειτουργικότητα θα έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν με δυναμικό τρόπο το φάσμα μέσα στο οποίο λειτουργούν, προσπελαύνοντας εκείνο που είναι διαθέσιμο, την κατάλληλη χρονική στιγμή. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε με λήψη οδηγιών από ένα σταθμό-βάση, ή αυτόνομα από τις ίδιες τις συσκευές. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη και του δικτύου, οι συσκευές μπορούν να συνεργάζονται και να χρησιμοποιούν ξεχωριστά τμήματα του φάσματος και να τα αφήνουν ελεύθερα όταν δεν είναι πλέον χρήσιμα

ή όταν άλλα πιο κατάλληλα καθίστανται διαθέσιμα. Αυτές οι απαιτήσεις μπορεί να εξαρτώνται από το περιβάλλον, την εκάστοτε εφαρμογή και την τοποθεσία και μπορεί να περιλαμβάνουν την τιμή, την Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) και την εξοικονόμηση ενέργειας.

Μέχρι σήμερα τόσο στο Ηνωμένο Βασίλειο, όσο και στις ΗΠΑ, οι εποπτικές αρχές έχουν δεσμευτεί να εξαιρέσουν από το καθεστώς της αδειοδότησης την είσοδο των γνωστικών επικοινωνιών στα αποκαλούμενα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης (TV White Spaces-TVWS). Τα τελευταία αποτελούνται από μεγάλα τμήματα του UHF/VHF φάσματος που καθίστανται διαθέσιμα σε γεωγραφική βάση για γνωστική πρόσβαση, ως αποτέλεσμα της μετάβασης από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση. Η συνολική χωρητικότητα που σχετίζεται με τα TVWS είναι σημαντική. Σύμφωνα με μελέτες που διενεργούνται από το Ofcom, πάνω από το 50% των περιοχών της χώρας πιθανολογείται να έχουν πάνω από 150 MHz παρεμβαλλόμενου φάσματος και ότι σχεδόν το 90% των περιοχών κοντά στα 100 MHz παρεμβαλλόμενου φάσματος μπορεί να είναι διαθέσιμο για γνωστική πρόσβαση. Επιπλέον των TVWS, το φάσμα που προορίζεται για αμυντικούς σκοπούς μπορεί να προσφέρει μια ακόμη σημαντική ευκαιρία για αύξηση της χωρητικότητας της μη-αδειοδοτημένης γνωστικής πρόσβασης. Για παράδειγμα, το 30% του φάσματος κάτω των 15GHz διανέμεται στην Άμυνα. Το Υπουργείο Άμυνας (MoD) του Ηνωμένου Βασιλείου μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990 είχε πρόσβαση στο φάσμα με καθόλου ή πολύ χαμηλό κόστος. Ωστόσο, ακολουθώντας την αναφορά του καθηγητή Martin Cave και μιας συνεργαζόμενης ομάδας ελέγχου (γνωστής ως Cave Audit) που αφορά τη χρήση και την ιδιοκτησία του φάσματος, η κυβέρνηση έχει δεσμευτεί να απελευθερώσει ένα σημαντικό ποσοστό του φάσματος που παρέχεται για αμυντικούς σκοπούς στο χρονικό διάστημα μεταξύ 2008 και 2010. Θεωρείται πως το συγκεκριμένο απελευθερωμένο φάσμα αποτελεί σημαντική ευκαιρία για χρήση τεχνολογιών γνωστικής ραδιοεπικοινωνίας τόσο σε χωρική όσο και σε χρονική βάση. Για παράδειγμα, γνωστικές συσκευές χαμηλής ισχύος ενδεχομένως θα μπορούσαν να συνυπάρξουν με ραντάρ, εάν είναι δυνατή η ανίχνευση της σάρωσης του ραντάρ, και η εκπομπή της γνωστικής συσκευής να προγραμματίζεται ώστε να αποφεύγεται η παρεμβολή.

Σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης είναι η κανονικοποίηση και τυποποίηση της λειτουργίας γνωστικών ραδιοδικτύων στα TVWS. Επίσης, εξετάζει τις διάφορες δυνατότητες του φάσματος που προκύπτει, όπως πιθανές επαγγελματικές εφαρμογές, ενώ αποτελεί πρόσφορο έδαφος για περαιτέρω έρευνα.

1.2. Η “γνωστική” πρόσβαση στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης (TVWS)

1.2.1. Τι είναι τα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης;

Οι υπηρεσίες τηλεοπτικής εκπομπής λειτουργούν σε αδειοδοτημένα κανάλια στα VHF και UHF τμήματα του ραδιοφάσματος. Οι ρυθμιστικοί κανόνες στις περισσότερες χώρες απαγορεύουν τη χρήση μη-αδειοδοτημένων συσκευών στις τηλεοπτικές ζώνες, με εξαίρεση τα τηλεχειριστήρια, τις ιατρικές συσκευές τηλεμετρίας, και τα ασύρματα μικρόφωνα. Στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες αυτή την περίοδο γίνεται η μετατροπή της αναλογικής εκπομπής των τηλεοπτικών σταθμών σε ψηφιακή. Η ψηφιακή μετάβαση έχει ολοκληρωθεί στις Η.Π.Α. από τον Ιούνιο του 2009, και αναμένεται να ολοκληρωθεί στο Ηνωμένο Βασίλειο μέσα στο 2012. Αντίστοιχη μετάβαση πραγματοποιείται ή προγραμματίζεται και στις υπόλοιπες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς και σε πολλές άλλες χώρες ανά τον κόσμο. Μετά την ψηφιακή μετάβαση, ένα μέρος των αναλογικών τηλεοπτικών καναλιών έμεινε εντελώς άδειο, λόγω της υψηλότερης φασματικής απόδοσης της ψηφιακής τηλεόρασης (DTV). Αυτά τα άδεια κανάλια, στη συνέχεια θα ανακατανεμηθούν σε άλλες υπηρεσίες μέσω δημοπρασίας.

Επιπροσθέτως, μετά την ψηφιακή μετάβαση θα δημιουργηθεί προφανώς ένας αριθμός τηλεοπτικών καναλιών σε μια δοσμένη γεωγραφική περιοχή, που δεν θα χρησιμοποιούνται από τους ψηφιακούς τηλεοπτικούς σταθμούς, διότι αυτοί οι σταθμοί δεν είναι σε θέση να λειτουργούν προκαλώντας ομοκαναλικές παρεμβολές ή εξωτερικές παρεμβολές σε γειτονικά κανάλια. Εντούτοις, ένας πομπός που λειτουργεί σε αυτού του είδους τα τοπικά κενά τηλεοπτικά κανάλια σε πολύ χαμηλά επίπεδα ισχύος, δεν θα χρειαζόταν μεγάλο βαθμό διαχωρισμού ώστε να αποφευχθεί τόσο η ομοκαναλική, όσο και η γειτονική παρεμβολή. Συνεπώς, συσκευές χαμηλής ισχύος μπορούν να λειτουργούν στα άδεια κανάλια σε περιοχές όπου η χρήση τους από τηλεοπτικούς σταθμούς απαγορεύεται εξαιτίας προβλεπόμενων παρεμβολών. Αυτά τα κενά τηλεοπτικά κανάλια είναι γνωστά ως Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης.

1.2.2. Ανίχνευση και προστασία των υφιστάμενων υπηρεσιών.

Η λειτουργία των γνωστικών ραδιοδικτύων στις ζώνες τηλεοπτικής εκπομπής εναπόκειται στην ικανότητα των γνωστικών συσκευών να ανιχνεύσουν επιτυχώς τα TVWS, καθώς και στην ικανότητά τους να αποφεύγουν την επιβλαβή παρεμβολή σε αδειοδοτημένους χρήστες αυτών των ζωνών, που πέραν της ψηφιακής τηλεόρασης περιλαμβάνει και τα ασύρματα μικρόφωνα. Τρεις μέθοδοι προτείνονται για την διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας των υφιστάμενων υπηρεσιών μακριά από επιβλαβείς παρεμβολές λόγω της λειτουργίας των γνωστικών συσκευών: οι “φάροι”, ο γεωγραφικός προσδιορισμός συνδυασμένος με πρόσβαση σε μια βάση δεδομένων, και η ανίχνευση (sensing). Επί του παρόντος, η

μέθοδος με τη χρήση βάσης δεδομένων φαίνεται να προσφέρει την καλύτερη βραχυπρόθεσμη λύση για την ανίχνευση προστατευμένων υπηρεσιών και την αποφυγή των παρεμβολών. Συνεπώς, καταβάλλεται προσπάθεια για την περαιτέρω εξέλιξη αυτής της μεθόδου, καθώς και για την απαραίτητη ανάπτυξη αλγορίθμων και την δημιουργία του βασικού πλαισίου λειτουργίας.

1.2.2.1. “Φάροι”

Με τη μέθοδο του “φάρου”, οι μη-αδειοδοτημένες συσκευές εκπέμπουν μόνον εάν λάβουν ένα σήμα ελέγχου (φάρος) που πιστοποιεί την ύπαρξη κενών καναλιών μέσα στις περιοχές ενδιαφέροντος. Αυτό το σήμα μπορεί να ληφθεί από ένα τηλεοπτικό σταθμό, από ένα ραδιοφωνικό σταθμό, ή από έναν μη-αδειοδοτημένο πομπό σε σταθερή τηλεοπτική ζώνη. Χωρίς τη λήψη αυτού του σήματος ελέγχου, δεν επιτρέπεται κανενός είδους εκπομπή. Ένα ζήτημα που τίθεται από τη μέθοδο με τη χρήση σήματος ελέγχου, είναι η απαίτηση ύπαρξης στην κατάλληλη θέση μιας δομής “φάρου”, που θα πρέπει να συντηρείται και να λειτουργεί είτε από την υποκείμενη υπηρεσία, είτε από κάποιον τρίτο. Επιπλέον, τα σήματα που εκπέμπονται από τον φάρο μπορεί να χαθούν, εξαιτίας της ύπαρξης μηχανισμών παραπλήσιων με το πρόβλημα του “κρυμμένου” κόμβου που περιγράφεται παρακάτω.

1.2.2.2. Γεωγραφικός προσδιορισμός με πρόσβαση σε βάση δεδομένων

Σε αυτή τη μέθοδο, μια συσκευή προσδιορίζει τη γεωγραφική της θέση και προσπελαύνει μια βάση δεδομένων ώστε να καθορίσει τα κενά τηλεοπτικά κανάλια που υπάρχουν στη συγκεκριμένη περιοχή. Υπάρχουν τουλάχιστον τρία ζητήματα που σχετίζονται με τη χρήση αυτής της μεθόδου. Αρχικά, η ανάγκη για τη δημιουργία μιας νέας (εμπορικής) οντότητας που θα κατασκευάσει και θα συντηρήσει τη βάση δεδομένων. Οι συσκευές πρέπει να γνωρίζουν την γεωγραφική τους θέση με προκαθορισμένη ακρίβεια. Για εφαρμογές εξωτερικού χώρου τα GPS μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να καλύψουν αυτές τις απαιτήσεις, αλλά στην περίπτωση των εφαρμογών εσωτερικού χώρου προκύπτει ζήτημα με το βάθος διείσδυσης του GPS. Τέλος, οι συσκευές χρειάζονται για την σύνδεσή τους μια διαφορετική ζώνη συχνοτήτων, ώστε να είναι δυνατή η πρόσβαση στη βάση δεδομένων πριν την οποιαδήποτε εκπομπή σε ζώνες DTV.

Σημειώνουμε ότι τα τελευταία προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με αρχιτεκτονικές επικοινωνιών τύπου αφέντη-υπηρέτη (master-slave), όπου η συσκευή «αφέντης», για παράδειγμα ένα σημείο πρόσβασης ή ένας σταθμός βάσης, έχει πρόσβαση σε πληροφορίες σχετιζόμενες με την περιοχή και συνδέεται μέσω μιας ασύρματης ή σταθερής σύνδεσης στο Internet. Ο κόμβος του «αφέντη» χρησιμοποιεί τις πληροφορίες σχετικά με την περιοχή ώστε να διερευνήσει την ύπαρξη διαθέσιμων TVWS μέσω της βάσης δεδομένων. Με βάση τα παραπάνω

δίνει εντολή σε ένα σύνολο συσκευών-υπηρετών για το ποιές συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιήσουν.

1.2.2.3. Ανίχνευση (*sensing*)

Τέλος, με τη μέθοδο της ανίχνευσης, μη-αδειοδοτημένες συσκευές ανιχνεύουν αυτόνομα την παρουσία τηλεοπτικών σημάτων και χρησιμοποιούν εκείνα μόνο τα κανάλια που δεν χρησιμοποιούνται για τηλεοπτική εκπομπή.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί το γεγονός πως δεν βασίζεται σε καμία υπάρχουσα τοπική υποδομή, όπως σύνδεση σε μια βάση δεδομένων. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στις περιπτώσεις όπου η πρόσβαση στο διαδίκτυο είναι πιο περιορισμένη, ή όταν οι συσκευές που χρησιμοποιούνται παρέχουν μόνο τοπική διασύνδεση μεταξύ πολλαπλών συσκευών, χωρίς να απαιτείται πρόσβαση για παράδειγμα στο διαδίκτυο. Ωστόσο, αν το κατώφλι ανίχνευσης έχει τεθεί αρκετά χαμηλά με σκοπό την προστασία των υφιστάμενων υπηρεσιών, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας, όπως και τη μείωση του αριθμού των διαθέσιμων καναλιών. Αυτό με τη σειρά του θα οδηγήσει στον περιορισμό της αξίας της παρεχόμενης υπηρεσίας στους τελικούς χρήστες, κυρίως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, και θα εμποδίσει την εμπορικά βιώσιμη ανάπτυξη της τεχνολογίας των λευκών φασματικών κενών.

Πέρα από την αρχική ανίχνευση που θα πραγματοποιηθεί, προβλέπεται πως οι συσκευές ανίχνευσης θα σαρώνουν περιοδικά το κανάλι. Αυτό θα επιτρέψει τον εντοπισμό αλλαγών όσον αφορά την παρουσία υφιστάμενων υπηρεσιών σε ένα κανάλι που προηγουμένως θεωρούνταν κενό ή αλλαγών σε ένα ή περισσότερα γειτονικά κανάλια.

Οι παράμετροι κλειδιά για τη μέθοδο της ανίχνευσης είναι:

- Κατώφλι ανίχνευσης
- Περιοδικότητα της επαν-ανίχνευσης σε κανάλια που είχαν εντοπιστεί ως κενά
- Διάρκεια δειγματοληψίας

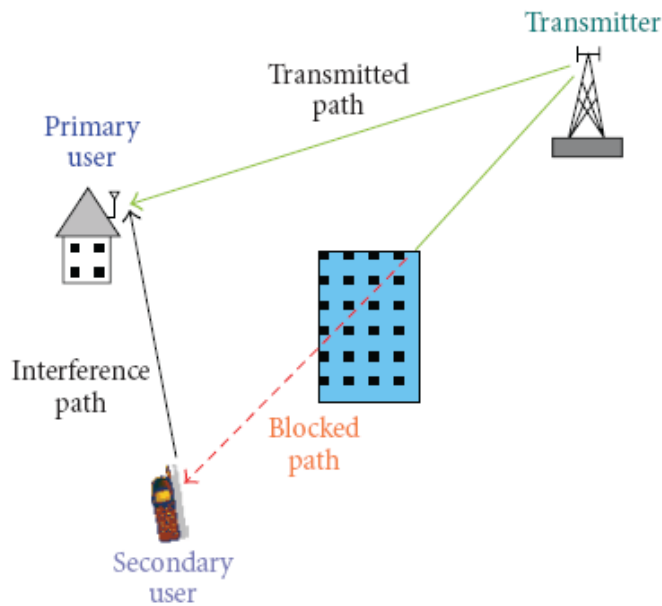
Οι μέθοδοι ανίχνευσης μπορούν γενικά να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες: ανίχνευση ενέργειας και ανίχνευση γνωρισμάτων. Η ανίχνευση ενέργειας χρησιμοποιείται για την εύρεση της ισχύος του σήματος στο υπό μελέτη κανάλι. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι είναι ανεξάρτητη του ασύρματου συστήματος που ανιχνεύεται και ως εκ τούτου παρέχεται διαχρονικότητα και δεκτικότητα στην προσαρμογή σε νέα συστήματα που εισάγονται στη ζώνη. Ένα μειονέκτημα είναι τα χαμηλά επίπεδα ευαισθησίας λόγω

των ορίων θορύβου και της πιθανότητας εσφαλμένων ανιχνεύσεων. Σε περιπτώσεις που απαιτείται πολύ χαμηλό κατώφλι ανίχνευσης, η μέθοδος ανίχνευσης ενέργειας από μόνη της ίσως δεν αποτελεί μια συμφέρουσα λύση, αλλά ίσως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέρος στη διαδικασία ανίχνευσης.

Από την άλλη ο ανιχνευτής γνωρισμάτων χρησιμοποιεί σταθερά γνωστά χαρακτηριστικά του υπό ανίχνευση σήματος. Τέτοια μπορεί να είναι ένα φέρον σήμα-οδηγός, συνεχείς ή διασκορπισμένοι οδηγοί σε ένα OFDM (Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας) σήμα, προκαθορισμένη περιοδικότητα (GI) ή μια ακολουθία μέσα στο σήμα στο πεδίο του χρόνου ή της συχνότητας. Χρησιμοποιώντας αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα προκύπτει κέρδος επεξεργασίας που επιτρέπει την ανίχνευση κάτω από τα επίπεδα θορύβου. Πρέπει να σημειωθεί πως οι εν λόγω ανιχνευτές δεν προσπαθούν γενικά να αποδιαμορφώσουν το σήμα κι έτσι δεν έχουν τη δυνατότητα πρόσβασης στο μεγαλύτερο μέρος των πληροφοριών που περιέχονται στο σήμα. Εντούτοις, μπορούν να αναγνωρίζουν τον τύπο του σήματος, π.χ. DVB-T ή DVB-T2, και κατ' αυτόν τον τρόπο ελαττώνονται οι πιθανότητες εσφαλμένων ειδοποιήσεων. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί η εξάρτησή της από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και κατ' επέκταση η πιθανή δυσκολία στην προσαρμογή με νέα ασύρματα συστήματα που θα εισαχθούν στο μέλλον.

1.2.2.3.1. Το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου

Η ανίχνευση του τηλεοπτικού σήματος μπορεί να επηρεάζεται από το πρόβλημα του «κρυμμένου» κόμβου, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 1 [1]. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να προκύψει όταν υπάρχει ένα εμπόδιο ανάμεσα στη μη-αδειοδοτημένη συσκευή και τον τηλεοπτικό πομπό, αλλά κανένα εμπόδιο μεταξύ του τηλεοπτικού πομπού και της τηλεοπτικής κεραίας λήψης, και κανένα εμπόδιο μεταξύ της μη-αδειοδοτημένης συσκευής και της ίδιας κεραίας. Σε μια τέτοια περίπτωση, ένα γνωστικό ραδιοδίκτυο πιθανόν δεν θα ανιχνεύσει την παρουσία τηλεοπτικού σήματος, και θα ξεκινήσει τη χρήση κατειλημμένου καναλιού, οπότε θα προκληθεί επιβλαβής παρεμβολή στον τηλεοπτικό δέκτη. Είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται το κατάλληλο κατώφλι ανίχνευσης, δηλαδή ένα επαρκώς χαμηλό επίπεδο, με σκοπό να μετριαστεί η επίδραση αυτού του προβλήματος. Τέλος, στην περίπτωση που η γνωστική συσκευή βρίσκεται σε μεγάλο ύψος, π.χ. να έχει ύψος κεραίας τα 10 ή 30 m, τότε το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου περιορίζεται.



Σχήμα 2: Το πρόβλημα 'κρυμμένου' κόμβου.

1.2.3. Εποπτική ανάπτυξη

1.2.3.1. Η.Π.Α.

Στις Η.Π.Α. η FCC πρότεινε να επιτρέπεται η ευκαιριακή πρόσβαση στις τηλεοπτικές ζώνες μόλις από το 2004. Τα πρωτότυπα γνωστικά ραδιοδίκτυα που λειτουργούν κατ' αυτόν τον τρόπο προτάθηκαν στην FCC από τις Adaptrum, I2R, Microsoft, Motorola και Philips το 2008. Μετά από διεξοδικούς ελέγχους η FCC υιοθέτησε το Νοέμβριο του 2008 μια Δεύτερη Αναφορά Οδηγιών που καταρτίζει τους κανόνες που επιτρέπουν τη λειτουργία γνωστικών συσκευών στα TVWS σε μια βάση που εξαιρεί την απαίτηση αδειοδότησης. Συνοπτικά, αυτοί οι κανόνες απαιτούν τη χρήση από τις γνωστικές συσκευές τόσο της ανίχνευσης του φάσματος, όσο και του γεωγραφικού προσδιορισμού. Με στόχο την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας επιβλαβούς παρεμβολής λόγω του προβλήματος «κρυμμένου» κόμβου, η FCC έχει θέσει την απαίτηση οι γνωστικές συσκευές να αντιλαμβάνονται την ύπαρξη τόσο των τηλεοπτικών σημάτων, όσο και των ασύρματων μικροφώνων μέχρι το επίπεδο των -114 dBm. Θα πρέπει επίσης, να μπορούν να εντοπίζουν τη θέση τους εντός μιας περιοχής 50 m και στη συνέχεια να συμβουλευούνται τη βάση δεδομένων που θα τους πληροφορήσει για το διαθέσιμο φάσμα σε αυτή την περιοχή.

Οι κινητές συσκευές μπορούν να εκπέμπουν σε ένα τοπικά κενό τηλεοπτικό κανάλι ως το επίπεδο των 100 mW, εκτός και αν χρησιμοποιούν ένα κανάλι γειτονικό της επίγειας τηλεόρασης. Εν προκειμένω, η ισχύς εκπομπής τους μπορεί

να φτάσει μόνο ως τα 40 mW. Από την άλλη, οι σταθερές συσκευές (σταθμοί βάσης ή εγκαταστάσεις πελατών) μπορούν να εκπέμπουν σε τοπικά κενά κανάλια ως το επίπεδο ισχύος των 4 W (EIRP). Συσκευές που δεν έχουν τη δυνατότητα γεωγραφικού προσδιορισμού, επίσης μπορούν να εκπέμπουν, αρκεί η συσκευή στην οποία εκπέμπουν να έχει προσδιορίσει τη θέση της. Σε αυτή την περίπτωση, η μια συσκευή παίζει το ρόλο του αφέντη για ένα δίκτυο και οι υπόλοιπες συσκευές-υπηρέτες θα λειτουργούν γενικά υπό τις οδηγίες της συσκευής-αφέντη, όσον αφορά το φάσμα που θα χρησιμοποιήσουν. Οι συσκευές που χρησιμοποιούν αποκλειστικά τη μέθοδο της ανίχνευσης, κατ' αρχήν επιτρέπονται. Παρ' όλα αυτά, θα πρέπει να υποβληθούν εκ των προτέρων στην FCC για εργαστηριακούς ελέγχους, ώστε να διαπιστωθεί πιθανός κίνδυνος επιβλαβούς παρεμβολής. Η ακριβής διαδικασία που θα ακολουθηθεί από την FCC προς αυτή την κατεύθυνση δεν έχει ακόμα προσδιοριστεί.

Σημαντικότερο όλων είναι η διεξοδική συζήτηση που συμπεριλαμβάνεται στην αναφορά της FCC για το αν η γνωστική πρόσβαση θα πρέπει να είναι αδειοδοτημένη, μη-αδειοδοτημένη, ή να υπόκειται σε χαλαρή αδειοδότηση. Συμπεραίνεται πως ο καλύτερος τρόπος για να διευκολυνθούν οι νέες καινοτόμες εφαρμογές είναι η μη-αδειοδότηση, μιας και η αδειοδότηση δεν θα ήταν καθόλου πρακτική για πολλές από αυτές τις νέες εφαρμογές. Σημειώνεται επίσης, ότι οι άδειες που εκδίδονται θα ήταν δύσκολο να προσαρμοστούν σε οποιαδήποτε αλλαγή (π.χ. αν επανασχεδιαζόταν η τηλεοπτική κάλυψη), οπότε τα δικαιώματα που θα χορηγούνταν δεν θα είχαν ιδιαίτερη ισχύ.

1.2.3.2. Ηνωμένο Βασίλειο.

Στην Έκθεση Αναθεώρησης Ψηφιακού Μέρισματος που δημοσιεύτηκε τον Δεκέμβριο του 2007, το Ofcom πρότεινε «να επιτρέπεται η μη-αδειοδοτημένη χρήση του παρεμβαλλόμενου φάσματος από γνωστικές συσκευές». Σε ένα φύλλο οδηγιών που δημοσιεύτηκε από το Ofcom στις 16 Φεβρουαρίου του 2009, προτάθηκε ένας αριθμός τεχνικών παραμέτρων για την μη-αδειοδοτημένη γνωστική χρήση αυτού του φάσματος, που ακολουθεί πιστά τα όσα προτάθηκαν από την FCC.

Ακολουθως, σε μια δήλωση που δημοσιεύτηκε την 1^η Ιουλίου του 2009, προτάθηκε να επιτραπεί η αποκλειστική χρήση της μεθόδου της ανίχνευσης, όπως και του γεωγραφικού προσδιορισμού για τον προσδιορισμό υφιστάμενων υπηρεσιών. Ωστόσο, καταλήγει πως βραχυπρόθεσμα ο σημαντικότερος μηχανισμός για ανίχνευση φάσματος θα είναι ο γεωγραφικός προσδιορισμός, με τον οποίο θα πρέπει να ασχοληθούν ενδελεχέστερα.

1.2.3.3. Σε Παγκόσμιο Επίπεδο.

Επί του παρόντος πραγματοποιείται προσπάθεια για πανευρωπαϊκό προσδιορισμό των γνωστικών συσκευών από την ομάδα εργασίας SE43 που ανήκει στον CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations – Ευρωπαϊκή Διάσκεψη των Διοικήσεων Ταχυδρομείων και Τηλεπικοινωνιών). Επιδίωξη αυτής της ομάδας είναι ο προσδιορισμός των τεχνικών και λειτουργικών απαιτήσεων για τη λειτουργία των γνωστικών ραδιοδικτύων στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης, προκειμένου να εξασφαλιστεί η προστασία των υφιστάμενων υπηρεσιών/συστημάτων και να διερευνηθεί το μέγεθος του φάσματος που πιθανόν είναι διαθέσιμο σε όλη την Ευρώπη. Επιπλέον, σε παγκόσμια κλίμακα, στην Παγκόσμια Διάσκεψη των Ραδιοεπικοινωνιών του 2011 (WRC-11) συζητήθηκε η λήψη ρυθμιστικών μέτρων και η συσχέτισή τους, ώστε να καταστεί δυνατή η εισαγωγή των γνωστικών ραδιοσυστημάτων, με βάση τα αποτελέσματα των εν εξελίξει μελετών της ITU-R.

1.2.4. Προσπάθεια τυποποίησης και βιομηχανοποίησης.

Η βιομηχανία πραγματοποιεί έρευνα και πρόοδο στον τομέα της τεχνολογίας των γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών κυρίως στις Η.Π.Α., και σε μεγάλο βαθμό υποκινείται από την επιθυμία σημαντικών νέων παικτών, συμπεριλαμβανομένης της Google και της Microsoft, να αποκτήσουν πρόσβαση στα λευκά φασματικά κενά τηλεόρασης. Ωστόσο, ένας αριθμός εργασιών υποστηριζόμενος από την Ε.Ε. και καθοδηγούμενος από την βιομηχανία, εκπονείται σε αυτή τη φάση με στόχο να φέρει την τεχνολογία των γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών στην Ευρώπη πιο κοντά σε εμπορική αξιοποίηση. Δύο βασικές προσπάθειες τυποποίησης, που βρίσκονται σε στάδιο ανάπτυξης, αναφέρονται ακολούθως. Αξίζει να σημειωθεί πως επιπλέον αυτών, ένας αριθμός νέων τυποποιήσεων βρίσκονται εν εξελίξει, που περιλαμβάνει τα πρότυπα IEEE 802.19 και IEEE 802.11af.

1.2.4.1. Το Πρότυπο Συμμαχίας Γνωστικών Δικτύων (CogNeA – The Cognitive Networking Alliance Standard).

Πρόκειται για μία ανοιχτή ένωση των βιομηχανιών που έχει πρόθεση να εμπορευματοποιήσει τις χαμηλής ισχύος προσωπικές/κινητές γνωστικές συσκευές, επιτρέποντας και προωθώντας τη γρήγορη έγκριση, κανονικοποίηση, τυποποίηση, συμμόρφωση και διαλειτουργικότητα των διαφόρων κατασκευαστών CR παγκοσμίως. Μέλη αυτής της ένωσης αποτελούν οι ETRI, HP, Philips, Samsung Electro-Mechanics, Texas Instruments, και πρόσφατα η BT. Η αρχική γεωγραφική περιοχή εστίασης είναι η Βόρεια Αμερική. Αντίστοιχα, το αρχικό ραδιοφάσμα εστίασης αποτελούν τα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης.

Η παραπάνω ένωση προτίθεται να προωθήσει παγκοσμίως τους κανονισμούς για τα TVWS, και να καθιερώσει ένα αναγνωρίσιμο CogNeA εμπορικό όνομα που θα υποδηλώνει αν μια συσκευή είναι συμβατή με το πρότυπο CogNeA και συνεπώς να είναι εφικτή η διαλειτουργικότητα και με άλλες συσκευές που ακολουθούν αυτό το πρότυπο και προέρχονται από διάφορους κατασκευαστές. Επιπλέον, αναπτύσσονται οι προδιαγραφές για την Κοινή Γνωστική Πλατφόρμα Radio (Common Cognitive Radio Platform - CCRP), που υποστηρίζει πολλαπλές εφαρμογές.

Επιδιώκεται η χρήση αυτού του προτύπου να φτάσει σε διεθνή κλίμακα και να γίνει παγκοσμίως αποδεκτό, σε συνεργασία με τον υπάρχοντα Οργανισμό Ορισμού Προτύπων (SDO). Οι εφαρμογές που αποτελούν τους πρωταρχικούς στόχους για το πρότυπο CogNeA είναι:

- (i) Υψηλής ευκρίνειας οικιακή δικτύωση πολυμέσων και λύσεις διανομής που ξεπερνούν το σύνολο των προβλημάτων οικιακής κάλυψης που προκύπτουν από τη χρήση των ISM ζωνών (Industrial, Scientific and Medical bands),
- (ii) Μη-αδειοδοτημένα ασύρματα ευρυζωνική πρόσβαση για κοινότητες / γειτονιές / πανεπιστημιούπολεις.

Το πρότυπο αναπτύσσει την Κοινή Πλατφόρμα Radio που αποτελείται από το Φυσικό Στρώμα (Physical Layer-PHY) και το Στρώμα Πρόσβασης στα Μέσα (Media Access Layer-MAC). Το PHY, με τη σειρά του, αποτελείται από το σύστημα RF (Radio Front End), το σύστημα Βασικής Ζώνης (Baseband), και τη γνωστική οντότητα (Cognitive Entity), που περιλαμβάνει μπλοκ γεωγραφικού προσδιορισμού (geo-location block), μπλοκ ανίχνευσης (sensing block) και χάρτες σχετικά με την πρόσβαση στο internet και τις παρεμβολές. Το MAC φέρει το πρωτόκολλο Επικοινωνιών/Δικτύωσης, τους κανόνες πρόσβασης στον Αέρα (Air access), και τις διεπαφές για τα ανώτερα στρώματα, όπως για τα στρώματα δικτύου και εφαρμογών.

Σε αυτή τη φάση η ECMA International αναπτύσσει ένα πρότυπο ασύρματης δικτύωσης υψηλής ταχύτητας για χρήση στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης, βασισμένο στη συνεισφορά της CogNeA. Το πρότυπο θα χρησιμοποιεί τεχνολογίες ανίχνευσης και βάσεων δεδομένων για την αποφυγή παρεμβολών σε αδειοδοτημένες υπηρεσίες και στους υπάρχοντες χρήστες, εναρμονισμένες με τους ρυθμιστικούς κανόνες της FCC. Το πρώτο προσχέδιο του προτύπου ECMA/CogNeA PHY and MAC για λειτουργία στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης δημοσιεύτηκε το Δεκέμβριο του 2009. [12]

1.2.4.2. Τα πρότυπα IEEE 802.22.

Η ομάδα εργασίας του IEEE 802.22 [13] έχει ορίσει ένα πρότυπο διεπαφής αέρα (PHY και MAC) βασισμένο σε τεχνικές γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών. Το πρότυπο 802.22 αναπτύσσεται για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WRANs). Η εφαρμογή που αποτελεί πρωταρχικό στόχο του προτύπου είναι η μη-αδειοδοτημένη ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση σε αγροτικές περιοχές στα TVWS. Η Βόρεια Αμερική είναι η γεωγραφική περιοχή στην οποία επικεντρώνονται αρχικά οι προσπάθειες. Το σύστημα 802.22 καθορίζει μια σταθερή 'σημείου-σε-πολλαπλό σημείο' ασύρματη διεπαφή αέρα, μέσω της οποίας ένας σταθμός βάσης (BS) διαχειρίζεται τις δικές του κυψέλες και όλους τους σχετικούς εξοπλισμούς καταναλωτή (CPEs). Η αρχιτεκτονική του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των MAC και PHY, ελήφθη από το IEEE 802.16 WiMAX. Το στρώμα 802.22 PHY σχεδιάζεται ώστε να υποστηρίξει ένα σύστημα που χρησιμοποιεί άδεια κανάλια TVWS και που θα παρέχει ασύρματη επικοινωνία σε αποστάσεις έως και 100 km. Οι προδιαγραφές του PHY βασίζονται στην Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access-OFDMA) τόσο για upstream όσο και για downstream πρόσβαση.

Το πρότυπο IEEE 802.22 υποστηρίζει την αναζήτηση υφιστάμενων υπηρεσιών μέσω της ανίχνευσης φάσματος (η προσέγγιση με τη βάση δεδομένων είναι προαιρετική). Το πρότυπο καθορίζει τις απαραίτητες εισόδους και εξόδους για τη λειτουργία της ανίχνευσης, καθώς και τις απαιτήσεις για την εκτέλεση των αλγορίθμων ανίχνευσης (δηλαδή, πιθανότητα ανίχνευσης, κατώφλι ανίχνευσης και πιθανότητα εσφαλμένων ειδοποιήσεων). Αυτές οι απαιτήσεις περιλαμβάνουν ανιχνευτή ενέργειας, και ανιχνευτές κυκλοστασιμότητας και ανίχνευσης των σημάτων πιλότων για σήματα ATSC DTV, και αλγορίθμους βασισμένους σε FFT για ανίχνευση ασύρματων μικροφωνικών σημάτων.

Το IEEE 802.22 προσδιορίζει μια σύνδεση προσανατολισμένη και επικεντρωμένη στο στρώμα MAC. Δύο σημαντικές δυνατότητες εισάγονται στο 802.22 στρώμα MAC για την υποστήριξη της αξιόπιστης εύρεσης υφιστάμενων υπηρεσιών με τη μέθοδο της ανίχνευσης: 'ήσυχες' περίοδοι σε όλο το δίκτυο που κανονίζονται από κάθε σταθμό βάσης κατά την διάρκεια των οποίων όλες οι εκπομπές αναβάλλονται ώστε να επιτραπεί η αξιόπιστη ανίχνευση, και η πραγματοποίηση όλων των απαραίτητων μετρήσεων στο κανάλι.

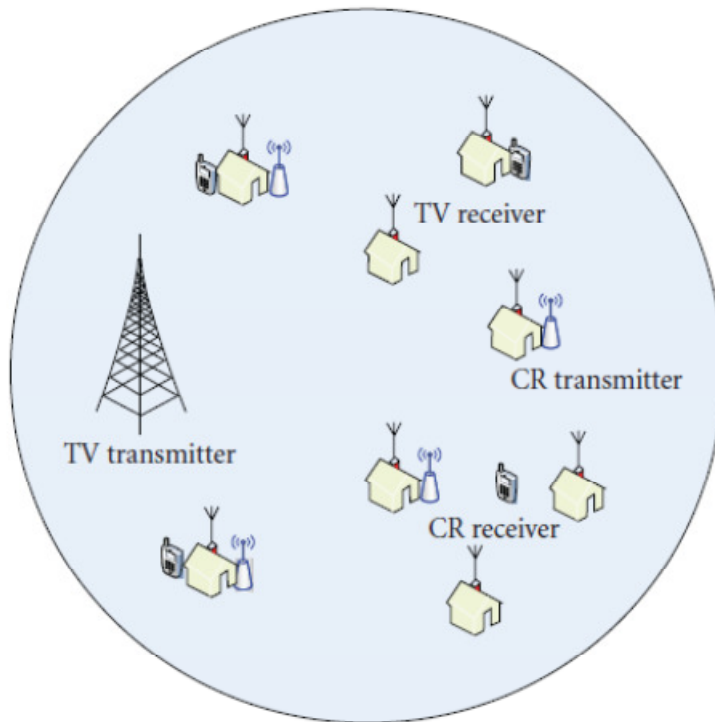
Μετά από μια αρχική φάση ταχείας ανάπτυξης, η εξέλιξη του προτύπου φαίνεται να έχει επιβραδυνθεί κατά τον τελευταίο χρόνο. Σύμφωνα με πηγές του IEEE 802.22, το πρότυπο βρίσκεται στην παρούσα φάση στο στάδιο ψήφισης. Άλλωστε, η τελική ημερομηνία ολοκλήρωσης του προτύπου δεν είναι ακόμη γνωστή, και ως τώρα δεν έχουν βρεθεί εταιρίες πώλησης για την κατασκευή εξοπλισμού βασισμένου στο πρότυπο IEEE 802.22.

1.3. Ερευνητικές Προκλήσεις

1.3.1. Υψηλής Ακρίβειας Ανίχνευση Φάσματος.

Με στόχο την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας επιβλαβούς παρεμβολής εξαιτίας του προβλήματος ‘κρυμμένου’ κόμβου, τόσο η FCC όσο και το Ofcom απαιτούν οι γνωστικές συσκευές να δύνανται να ανιχνεύουν τηλεοπτικά σήματα σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα από ότι οι τηλεοπτικοί δέκτες (114 dBm για κανάλια στα 6 MHz (Η.Π.Α.) και -120 dBm για κανάλια στα 8 MHz (Ηνωμένο Βασίλειο)). Τέτοια ασθενή σήματα είναι πολύ κάτω από το θερμικό θόρυβο, και εξαιτίας της αβεβαιότητας για την παρουσία θορύβου δεν μπορούν να ανιχνευθούν χρησιμοποιώντας αλγορίθμους με βάση το ενεργειακό επίπεδο που εφαρμόζονται στην τωρινή γενιά ασύρματων συσκευών. Πρόσφατες έρευνες, ωστόσο, καταδεικνύουν ότι τέτοια επίπεδα ανίχνευσης μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας πιο εξελιγμένους αλγορίθμους ανίχνευσης, που βασίζονται σε ορισμένα χαρακτηριστικά των υποκείμενων σημάτων τα οποία απουσιάζουν από το θόρυβο.

Ακολουθώς, αναφερόμαστε εν συντομία σε μερικές από τις ‘μη-τυφλές’ (non-blind) τεχνικές ανίχνευσης. Σημειώνουμε ότι εν αντιθέσει με την ανίχνευση με βάση το ενεργειακό επίπεδο, οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι είναι γενικά ανεφάρμοστοι στην ανίχνευση σημάτων προερχόμενα από ασύρματα μικρόφωνα, τα περισσότερα από τα οποία χρησιμοποιούν αναλογική διαμόρφωση συχνότητας (FM).



Σχήμα 3: Στις μελλοντικές εμπορικές εφαρμογές τα ολικά επίπεδα ισχύος από τις γνωστικές συσκευές πρέπει να ελέγχονται ώστε να αποφεύγεται η παρεμβολή στους βασικούς δέκτες.

(i) *Ανίχνευση σήματος πιλότου. (pilot detection)*

Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι ανίχνευσης εφαρμόζονται ειδικά σε σήματα ATSC, τα οποία έχουν έναν πιλότο DC σε χαμηλότερη ζώνη σε μια γνωστή τοποθεσία σχετική με το σήμα. Η ανίχνευση επιτυγχάνεται θέτοντας ένα κατώφλι που αφορά, είτε στο πλάτος, είτε στην τοποθεσία του σήματος πιλότου. Η ανίχνευση που βασίζεται στην τοποθεσία του πιλότου είναι ιδιαίτερα ισχυρή έναντι της τυχαιότητας του θορύβου, καθώς η θέση του πιλότου μπορεί να ευρεθεί με μεγάλη ακρίβεια, ακόμα κι αν το πλάτος είναι μικρό λόγω εξασθένησης.

(ii) *Ανίχνευση κυκλοστάσιμων χαρακτηριστικών. (Cyclostationary feature detection)*

Τόσο τα ATSC, όσο και τα DVB-T σήματα είναι κυκλοστάσιμα, που σημαίνει ότι οι αριθμητικοί μέσοι και οι συνελκτικές ακολουθίες αυτών των σημάτων παρουσιάζουν περιοδικότητα. Οι ανιχνευτές κυκλοστάσιμων χαρακτηριστικών εισήχθησαν ως μια τεχνική επεξεργασίας ενός σύνθετου διδιάστατου σήματος για την αναγνώριση διαμορφωμένων σημάτων κατά την παρουσία θορύβου και παρεμβολών. Πρόσφατα έχουν προταθεί από ένα πλή-

θος εισηγητών για την ανίχνευση ασθενών τηλεοπτικών σημάτων στο πλαίσιο της ανίχνευσης φάσματος για τις γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες.

(iii) *Ανίχνευση κυκλικού προθέματος και αυτοσυσχέτισης. (Cyclic prefix and autocorrelation detection)*

Τα OFDM (ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας) σήματα, συμπεριλαμβανομένων των DVB-T σημάτων, περιέχουν μια ειδική ακολουθία, που ονομάζεται κυκλικό πρόθεμα (CP-cyclic prefix), όπου τα τελευταία D bits του OFDM συμβόλου αντιγράφονται στην αρχή του συμβόλου. Η ανίχνευση κυκλικού προθέματος είναι παρόμοια με την ανίχνευση ενέργειας. Ωστόσο, τα στατιστικά στοιχεία των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν στον αλγόριθμο είναι η ενέργεια που περιέχεται στο κυκλικό πρόθεμα κάθε OFDM συμβόλου, αντί του ολικού συμβόλου. Επιπλέον, λόγω της παρουσίας κυκλικού προθέματος, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης των DVB-T σημάτων καταδεικνύει διακριτές κορυφές σε μη-μηδενικές τιμές των οποίων το πλάτος και η θέση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό και τη διάκριση του σήματος από το θόρυβο.

Ένα ζήτημα σχετικό με τους περισσότερους από τους παραπάνω αλγορίθμους ανίχνευσης είναι ότι απαιτούν σημαντική ισχύ επεξεργασίας, η οποία μπορεί είτε να μην είναι διαθέσιμη, είτε να μην είναι επιθυμητή (λόγω κατανάλωσης ενέργειας) σε φορητές συσκευές. Ένα δεύτερο πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι η ικανότητα των γνωστικών συσκευών να ανιχνεύουν εξαιρετικά ασθενή τηλεοπτικά σήματα μπορεί να εξαλείφει το πρόβλημα 'κρυμμένου' κόμβου (false negatives), αλλά την ίδια στιγμή μπορεί να οδηγήσει σε μια κατάσταση όπου οι γνωστικές συσκευές ανιχνεύουν τηλεοπτικά σήματα προερχόμενα από εκπομπούς που ίσως βρίσκονται εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά (false positive), και συνεπώς κατ' αυτόν τον τρόπο χάνεται σημαντικό μέρος Λευκών Φασματικών Κενών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν. Για παράδειγμα, πρόσφατες μελέτες στις Η.Π.Α. δείχνουν ότι ένα κατώφλι της τάξης των -114 dBm μειώνει τα ανακτώμενα Λευκά Φασματικά Κενά κατά ένα παράγοντα 3 [14]. Και ακόμα χειρότερα, αρχικές μελέτες προσομοίωσης δείχνουν πως σε ορισμένες περιοχές του Ηνωμένου Βασιλείου, μια γνωστική συσκευή με επίπεδο ευαισθησίας τα -114 dBm θα αναγνωρίσει όλα τα DTT κανάλια ως κατειλημμένα, οπότε δεν θα υπάρχουν Λευκά Φασματικά Κενά διαθέσιμα προς χρήση, εάν βασιστεί σε αυτόν τον απλοϊκό τρόπο ανίχνευσης [15].

Πρόσφατα έχει πραγματοποιηθεί αξιοσημείωτη έρευνα στον τομέα των συνεργατικών αλγορίθμων ανίχνευσης, όπου οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται από πολλαπλές συσκευές συνδυάζονται με σκοπό την επίτευξη υψηλότερων κατωφλίων ανίχνευσης απ' ότι είναι δυνατόν από μία συσκευή, ή την αντιμετώπιση του προβλήματος 'κρυμμένου' κόμβου. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το

γεγονός πως η συνεργατική ανίχνευση θεωρήθηκε ως μια πιθανή προσέγγιση για το πρόβλημα της ανίχνευσης, κατά την σύσκεψη του Ofcom.

Ένα πρόβλημα σχετικό με τη συνεργατική ανίχνευση είναι ότι το εφικτό επίπεδο ανίχνευσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων του πλήθους των συνεργατικών γνωστικών συσκευών και της χωρικής τους διάταξης. Κατά συνέπεια, εν γένει θα ήταν δύσκολο να ελεγχθεί και να πιστοποιηθεί η ικανότητα ανίχνευσης τέτοιων συνεργατικών γνωστικών συσκευών σε ατομική βάση για τον έλεγχο της συμβατότητας της συσκευής με τις ρυθμιστικές απαιτήσεις. Επιπλέον, η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί πρόσθετη τηλεπικοινωνιακή επιβάρυνση καθώς οι τοπικές μετρήσεις θα συλλέγονται σε επίπεδο συστήματος για τη λήψη απόφασης, που στη συνέχεια θα εκπέμπεται σε όλες τις εμπλεκόμενες γνωστικές συσκευές.

Εξαιτίας των παραπάνω ζητημάτων, πιστεύουμε πως η περισσότερο υποσχόμενη εφαρμογή συνεργατικής ανίχνευσης θα είναι η προσέγγιση ‘αφέντη-υπηρέτη’, όπου μία υπολογιστικά ισχυρή συσκευή ‘αφέντη’ (π.χ., ένα WiFi σημείο πρόσβασης ή ένας κυψελωτός σταθμός βάσης) θα συντονίζει κεντρικά και θα επεξεργάζεται τις διαδικασίες ανίχνευσης ενός συνόλου συσκευών ‘υπηρετών’ συνδυαστικά και θα χρησιμοποιεί το αποτέλεσμα για τη βελτίωση και τη γεωγραφική επέκταση των αποτελεσμάτων των δικών της εξελιγμένων αλγορίθμων ανίχνευσης.

1.3.2. Ευέλικτες Εκπομπές και Τεχνικές Συγκέντρωσης Φάσματος.

Οι τεχνικές εκπομπής φυσικού στρώματος που δύνανται να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά τον κατακερματισμό των Λευκών Φασματικών Κενών Τηλεόρασης, αποτελούν ένα πολύ σημαντικό στοιχείο των γνωστικών ραδιοδικτύων του μέλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι τεχνικές θα πρέπει να είναι επαρκώς ευέλικτες ώστε να επιτρέπουν σε μη αδειοδοτημένους χρήστες να εκπέμπουν σε (τοπικά) διαθέσιμες ζώνες TVWS, ενώ ταυτόχρονα δεν παρεμβάλλουν σε υπάρχοντες χρήστες που λειτουργούν σε γειτονικές ζώνες. Επιπλέον, για την υποστήριξη εφαρμογών υψηλών απαιτήσεων, οι τεχνικές αυτές θα πρέπει να μπορούν να επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων με τη συγκέντρωση πολλών (όχι απαραίτητα γειτονικών TVWS καναλιών). Μια τεχνική που φαίνεται να ικανοποιεί αυτές τις απαιτήσεις είναι μια παραλλαγή της ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM) που ονομάζεται *μη-συνεχόμενη OFDM* (NC-OFDM) [16], [17]. Η NC-OFDM έχει την ικανότητα της απενεργοποίησης των υπο-φερόντων σημάτων διά μέσου του εύρους ζώνης εκπομπής της, που ενδεχομένως θα προκαλούσαν παρεμβολή στη μετάδοση άλλων χρηστών. Επιπρόσθετα, η NC-OFDM μπορεί να υποστηρίξει έναν υψηλό ολικό ρυθμό δεδομένων με τα υπόλοιπα υπο-

φέροντα σήματα, και ταυτόχρονα να διατηρήσει ένα αποδεκτό επίπεδο ευρωστίας λάθους. Πέραν της NC-OFDM, αρκετές άλλες τεχνικές έχουν προταθεί με στόχο να καταστεί δυνατή η ευελιξία στη μετάδοση μέσω κατακερματισμένου φάσματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση τεχνικών τράπεζας φίλτρων πολλαπλών φερόντων (filterbank multicarrier) για τέτοιες εφαρμογές γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών.

1.3.3. Τεχνολογίες Πολλαπλών Κεραιών για Γνωστικές Ραδιοεπικοινωνίες.

Η χρήση ποικιλίας κεραιών ή αρχιτεκτονικής κεραιών MIMO (πολλαπλής εισόδου-πολλαπλής εξόδου) μπορεί να εξασφαλίσει σημαντική αύξηση της φασματικής απόδοσης των ασύρματων συστημάτων [18], [19]. Ωστόσο, η χρήση πολλαπλών κεραιών στα γνωστικά ραδιοδίκτυα δεν έχει αναπτυχθεί επαρκώς. Μια από τις σημαντικές επιδιώξεις των γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών είναι η βελτίωση της αξιοποίησης του φάσματος. Με τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα συστήματα MIMO, είναι κατά συνέπεια λογικό να αξιοποιηθούν οι δυνατότητες από την εφαρμογή της αρχιτεκτονικής κεραιών MIMO στα γνωστικά ραδιοδίκτυα. Η εισαγωγή τεχνολογιών πολλαπλών κεραιών στις γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες μπορεί να επεκτείνει το μέγεθος των γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών από το τρέχον καθεστώς της ζώνης συχνοτήτων και της χρονοσχισμής στο πεδίο του χώρου. Ένα γνωστικό σύστημα που χρησιμοποιεί MIMO μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ευαισθησία του δέκτη και την κάλυψη, κι έτσι μπορεί επίσης να έχει αντίκτυπο σε παραμέτρους 'κλειδιά' της συσκευής, όπως η ευαισθησία και η ισχύς εκπομπής, δηλαδή σε παραμέτρους που απαιτούνται από τις εποπτικές αρχές.

Ένα ζήτημα που προκύπτει από την χρήση των συστημάτων MIMO στο πλαίσιο της γνωστικής πρόσβασης στα TVWS είναι ότι τα τυπικά μήκη κύματος στην ζώνη UHF ποικίλουν μεταξύ 0.3-0.6 m. Συνεπώς, η βέλτιστη χρήση πολλαπλών κεραιών σε μία και μόνο γνωστική συσκευή μπορεί να μην είναι εφικτή στις περισσότερες εφαρμογές, εξαιτίας των μικρών διαστάσεων. Ωστόσο, σταθερές εφαρμογές BWA (Ευρυζωνική Ασύρματη Πρόσβαση) παρόμοιες με αυτές που θεωρούνται στο IEEE 802.22 που περιλαμβάνουν μεγάλους σταθμούς βάσης και εγκαταστάσεις πελάτη, μπορούν να ωφεληθούν τα μέγιστα από τη χρήση τεχνολογιών πολλαπλών κεραιών.

1.3.4. Ζητήματα σε επίπεδο συστήματος.

Σχεδόν όλη η έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί έως τώρα έχει εστιαστεί στην πρόσβαση στα TVWS από μία και μοναδική γνωστική συσκευή. Ωστόσο, η παραγωγή εμπορικών συσκευών που βασίζονται στην τεχνολογία γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών, για παράδειγμα κινητά ευρυζωνικά δίκτυα ή ασύρματα οικιακά δίκτυα, αναπόφευκτα θα οδηγήσει σε καταστάσεις που θα εμπεριέχονται πολλαπλές γνωστικές συσκευές, οι οποίες θα ανήκουν είτε στον ίδιο, είτε σε

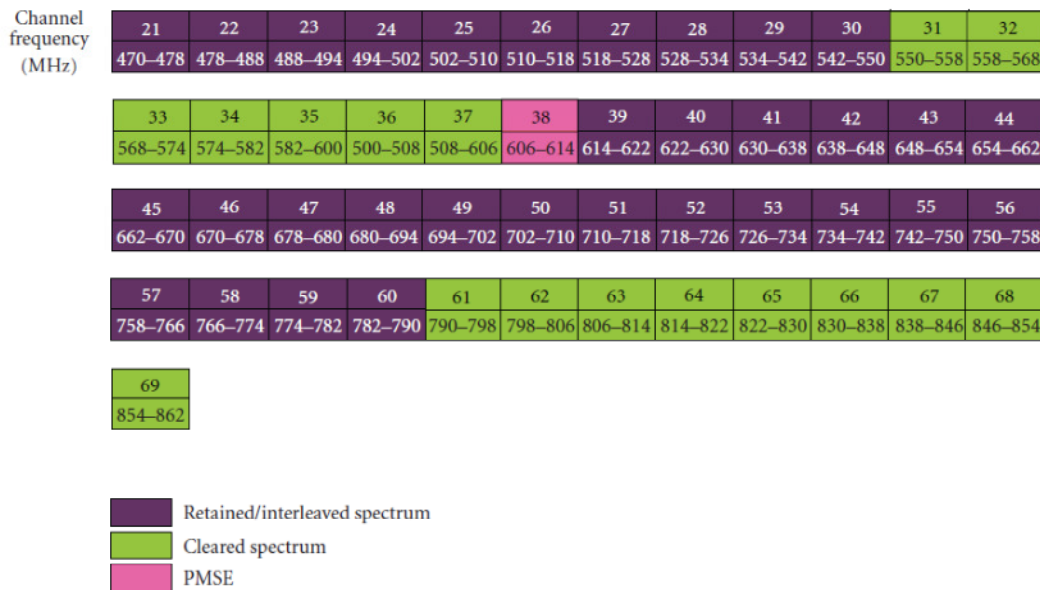
διαφορετικό πάροχο. Ορισμένες ερευνητικές προκλήσεις που σχετίζονται με παρόμοια σενάρια, περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

- (i) Υπολογισμός και έλεγχος της συνολικής παρεμβολής από πολλαπλές γνωστικές συσκευές στους κύριους χρήστες.
- (ii) Κανόνες δεοντολογίας που θα επιτύχουν δίκαιο και αποδοτικό διαμοιρασμό του δευτερεύοντος φάσματος μεταξύ των ανταγωνιστών-γνωστικών ραδιοδικτύων.
- (iii) Ανίχνευση φάσματος υπό συνθήκες ολικής παρεμβολής.
- (iv) Ποσοτική ερμηνεία της δυνατότητας επέκτασης των δικτύων με δευτερογενή πρόσβαση στο φάσμα, που λειτουργούν στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης.

1.4. Διαθεσιμότητα TVWS και Περιπτώσεις Χρήσης

1.4.1. Ποιό είναι το μέγεθος των Λευκών Φασματικών Κενών που είναι διαθέσιμα;

Το σχήμα 3 [1] δείχνει την κατανομή του UHF φάσματος στο Ηνωμένο Βασίλειο μετά την ολοκλήρωση της ψηφιακής μετάβασης. Τα 128 MHz φάσματος που έχουν επισημανθεί με πράσινο χρώμα (16 ζώνες) είναι το 'καθαρό' φάσμα, που το Ofcom σχεδιάζει να αδειοδοτήσει μέσω πλειοδοτικού διαγωνισμού. Τα 256 MHz (32 κανάλια) που έχουν επισημανθεί με μωβ χρώμα είναι το διαστρωματωμένο φάσμα, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε γεωγραφική βάση για μη-αδειοδοτημένη πρόσβαση κάνοντας χρήση της τεχνολογίας των γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών. Τέλος, το κανάλι που έχει επισημανθεί με ροζ χρώμα είναι αδειοδοτημένο από το Ofcom για αποκλειστική πρόσβαση από ασύρματα μικρόφωνα, και εν γένει για PMSE (Programme Making and Special Events).



Σχήμα 4: Οι τηλεοπτικές UHF ζώνες στο Ηνωμένο Βασίλειο μετά την ολοκλήρωση της ψηφιακής μετάβασης.

Το παραπάνω διάγραμμα αποδεικνύει πως υπάρχει σημαντική ποσότητα φάσματος διαθέσιμο για γνωστική πρόσβαση στις UHF ζώνες. Ωστόσο, εξαιτίας της δευτερεύουσας φύσης του, η διαθεσιμότητα και η αποσύνθεση του UHF φάσματος για γνωστική πρόσβαση δεν είναι ίδιες σε όλες τις τοποθεσίες, και εξαρτάται επίσης από τα επίπεδα ισχύος στα οποία λειτουργούν οι γνωστικές συσκευές. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της μη-αδειοδοτημένης γνωστικής πρόσβασης στις τηλεοπτικές ζώνες, που τη διακρίνει, για παράδειγμα, από την WiFi πρόσβαση στις ISM ζώνες (Industrial, Scientific and Medical radio bands).

Ενδεχόμενες εμπορικές εφαρμογές των συσκευών TVWS θα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το πως θα μεταβάλλεται η διαθεσιμότητα του φάσματος. Τόσο από τοποθεσία σε τοποθεσία, όσο και ως συνάρτηση της ισχύος εκπομπής των γνωστικών συσκευών. Ένας αριθμός πρόσφατων μελετών έχει εξετάσει διάφορες πτυχές των TVWS στις Η.Π.Α. Στο Ηνωμένο Βασίλειο έχει αναπτυχθεί ένα σύνολο εργαλείων μοντελοποίησης που μας επιτρέπει να ποσοτικοποιήσουμε τη διαθεσιμότητα των TVWS για γνωστική πρόσβαση και τη μεταβολή τους ως συνάρτηση της τοποθεσίας και της ισχύος εκπομπής.

Το πρώτο σύνολο αυτών των εργαλείων μοντελοποίησης χρησιμοποιεί τους δημοσίως διαθέσιμους χάρτες κάλυψης της ψηφιακής τηλεόρασης στο Ηνωμένο Βασίλειο, που δημιουργήθηκαν μέσω προσομοιώσεων στον υπολογιστή από τη βάση δεδομένων του Ofcom που περιλαμβάνει τις τοποθεσίες, την ισχύ εκπομπής, το ύψος της κεραίας και τη συχνότητα μετάδοσης των αναμεταδοτών ψηφιακής τηλεόρασης, και που αξιολογήθηκαν περαιτέρω και βελτιώθηκαν μέσω απευθείας παρατηρήσεων σε διαφορετικές περιοχές. Συνδυάζει αυτούς τους χάρτες κάλυψης με απλοποιημένους υπολογισμούς μοντελοποίησης της μετάδοσης για να

εξασφαλίσει τα άνω όρια των κενών συχνοτήτων TVWS σε οποιαδήποτε τοποθεσία, όπως και μία εκτίμηση του κάτω ορίου για τις διακυμάνσεις των TVWS ως συνάρτηση της εκπομπής ισχύος των γνωστικών συσκευών.

Το υπολογιστικό μοντέλο που μας εξασφαλίζει τα άνω όρια, λειτουργεί ως εξής. Χρησιμοποιούμε το Βρετανικό Εθνικό Σύστημα Συντεταγμένων με σκοπό τον προσδιορισμό της γεωγραφικής θέσης οποιασδήποτε τοποθεσίας που ανήκει στο Ηνωμένο Βασίλειο. Με γνωστές τις συντεταγμένες μιας τοποθεσίας, στη συνέχεια ο υπολογιστής την αντιστοιχίζει στο πλησιέστερο σημείο του χάρτη κάλυψης της ψηφιακής τηλεόρασης. Για δοσμένο αναμεταδότη ψηφιακής τηλεόρασης, ελέγχεται αν το συγκεκριμένο σημείο βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψης αυτού του αναμεταδότη. Εάν ισχύει κάτι τέτοιο, τότε οι συχνότητες που σχετίζονται με τον αναμεταδότη σημειώνονται ως απασχολημένες σε αυτές τις περιοχές, αλλιώς σημειώνονται ως κενές. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για τους χάρτες κάλυψης όλων των αναμεταδοτών ψηφιακής τηλεόρασης, μπορούμε με αυτόν τον τρόπο να αποκτήσουμε μια λίστα των κενών συχνοτήτων σε μια δοσμένη περιοχή, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από γνωστικές συσκευές χαμηλής ισχύος.

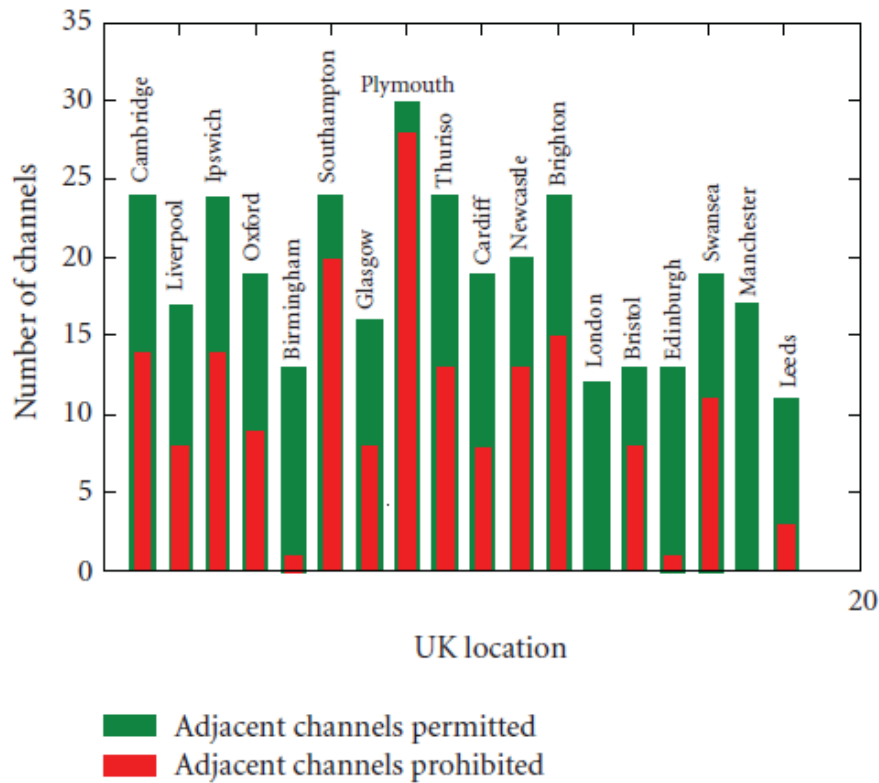
Στην περίπτωση γνωστικών συσκευών υψηλής ισχύος, για παράδειγμα, όπως αυτές που θεωρούνται στο πρότυπο 802.22, οι απαιτούμενοι υπολογισμοί είναι αρκετά διεξοδικοί. Με στόχο τη μείωση της υπολογιστικού κόστους, προσεγγίζουμε τις πραγματικές περιοχές κάλυψης ψηφιακής τηλεόρασης με κυκλικούς δίσκους που σχεδιάζονται έτσι ώστε καθένας από αυτούς να περικλείει ολόκληρη την περιοχή κάλυψης του αντίστοιχου αναμεταδότη, ενώ ταυτόχρονα να καταλαμβάνει την ελάχιστη δυνατή επιφάνεια. Με αυτή την απλοποίηση, είναι υπολογιστικά εύκολο να καθορίσουμε τις κενές συχνότητες ως συνάρτηση τόσο της θέσης, όσο και της ισχύος εκπομπής των γνωστικών συσκευών.

Ένα δεύτερο εργαλείο μοντελοποίησης βρίσκεται τώρα στο τελικό στάδιο υλοποίησης [20]. Το συγκεκριμένο κάνει χρήση των δημοσιευμένων από το Ofcom βάσεων δεδομένων που περιέχουν τους αναμεταδότες ψηφιακής τηλεόρασης, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιεί υψηλής ακρίβειας δεδομένα του εδάφους και πρότυπα μοντέλα μετάδοσης στις UHF συχνότητες για τη δημιουργία χαρτών (contour maps) που θα αποτυπώνουν τη λαμβανόμενη ισχύ από κάθε αναμεταδότη ψηφιακής τηλεόρασης στο Ηνωμένο Βασίλειο. Συνδυάζοντας αυτούς τους χάρτες με τα μοντέλα μετάδοσης των γνωστικών συσκευών, τα διαθέσιμα TVWS για γνωστική πρόσβαση σε οποιαδήποτε δοσμένη τοποθεσία και για αυθαίρετο επίπεδο ισχύος, στη συνέχεια υπολογίζονται με χωρική ανάλυση της τάξης των 100 m. Τα δεδομένα εδάφους που χρησιμοποιούνται σε αυτό το εργαλείο μοντελοποίησης βασίζονται στο STRM v2 που αναφέρεται σε υψομετρικά δεδομένα εδάφους. Το σύνολο δεδομένων του STRM προέκυψε από τη συνεργασία ανάμεσα στη NASA και την US National Geographic Intelligence Agency, καθώς και με τη συμμετοχή των γερμανι-

κών και ιταλικών διαστημικών υπηρεσιών, και μέχρι σήμερα αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη ψηφιακή τοπογραφική βάση δεδομένων υψηλής ακρίβειας στη γη.

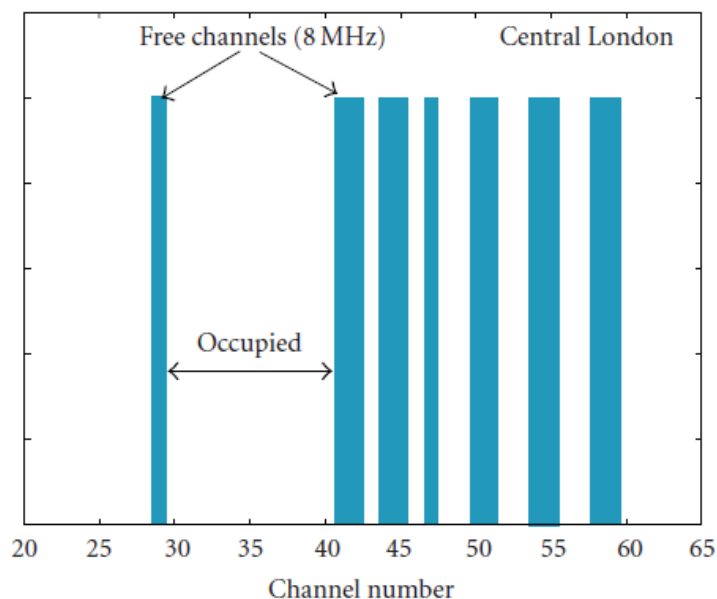
Το πρώτο σύνολο των εργαλείων μοντελοποίησης έχει χρησιμοποιηθεί για την έρευνα των διακυμάνσεων των TVWS ως συνάρτηση της τοποθεσίας και της ισχύος εκπομπής των γνωστικών ραδιοδικτύων, και για να εξετασθεί το πώς τα εμπόδια στις εκπομπές γειτονικών καναλιών από γνωστικά ραδιοδίκτυα μπορούν να επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Αυτού του είδους η ανάλυση παρέχει μια ρεαλιστική εικόνα σχετικά με την πιθανή ευκαιρία για φάσμα που συνδέεται με την πρόσβαση των γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών στα TVWS στο Ηνωμένο Βασίλειο, κι επίσης παρουσιάζει την πρώτη ποσοτική μελέτη για τη διαθεσιμότητα και τη σύνθεση συχνοτήτων των TVWS εκτός των Η.Π.Α. Το σχήμα 4 [1] συνοψίζει σε ένα ραβδόγραμμα τη διαθεσιμότητα των καναλιών TVWS στα 18 πληθυσμιακά μεγαλύτερα κέντρα της Αγγλίας, της Ουαλίας και της Σκωτίας. Ο συνολικός αριθμός διαθέσιμων καναλιών σε κάθε περιοχή δείχνεται με μια πράσινη ράβδο. Αυτά τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι υπάρχουν αξιοσημείωτες μεταβολές στον αριθμό των καναλιών TVWS καθώς κινούμαστε από μια περιοχή του Ηνωμένου Βασιλείου σε μια άλλη. Ωστόσο, για δοσμένη τοποθεσία, ένας ελάχιστος αριθμός 12 καναλιών (96 MHz) είναι προσβάσιμος από γνωστικές συσκευές χαμηλής ισχύος, ενώ η κατά μέσο όρο χωρητικότητα ανά τοποθεσία είναι μόλις πάνω από τα 150 MHz.

Όταν μία γνωστική συσκευή υψηλής ισχύος λειτουργεί σε ένα κενό τηλεοπτικό κανάλι, η ενέργεια που διαφεύγει σε γειτονικά κανάλια μπορεί να προκαλέσει παρεμβολή σε γειτονικές συχνότητες, που πιθανόν να είναι κατειλημμένες. Το Ofcom έχει διατυπώσει την ανησυχία του πως η λειτουργία γνωστικών συσκευών χαμηλής ισχύος σε ένα δοσμένο κανάλι, μπορεί επίσης να προκαλέσει παρεμβολή σε γειτονικό κανάλι σε κινητούς τηλεοπτικούς δέκτες που βρίσκονται εκεί κοντά. Κατά συνέπεια, ακόμη και σε μελλοντικές περιπτώσεις χρήσεως, οι γνωστικές συσκευές θα πρέπει να περιορίζονται να μην χρησιμοποιούν κενά κανάλια των οποίων οι άμεσα γειτονικές συχνότητες χρησιμοποιούνται για κινητή τηλεόραση. Ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων TVWS μετά την επιβολή του παραπάνω περιορισμού δείχνεται στο σχήμα 4 με κόκκινες ράβδους. Διαπιστώνεται ότι με την επιβολή του περιορισμού παρουσιάζεται σημαντική μείωση της ποσότητας του προσβάσιμου φάσματος στις περισσότερες περιοχές που μελετώνται (κατά μέσο όρο η διαθέσιμη χωρητικότητα πέφτει στα 40 MHz ανά τοποθεσία).



Σχήμα 5: Διαθέσιμη χωρητικότητα σε TVWS για γνωστική πρόσβαση χαμηλής ισχύος σε 18 περιοχές του Ηνωμένου Βασιλείου. Τα αποτελέσματα φαίνονται τόσο για την περίπτωση που λαμβάνουμε υπ' όψιν τον περιορισμό για παρεμβολή σε γειτονικά κανάλια (κόκκινες ράβδοι), όσο και χωρίς αυτόν (πράσινες ράβδοι).

Πέρα από τον υπολογισμό των συνολικών διαθέσιμων TVWS, είναι επίσης σημαντικό να ερευνηθεί η καναλική σύνθεση αυτού του φάσματος. Στο σχήμα 5 [1] δείχνουμε ως παράδειγμα, την καναλική σύνθεση των TVWS στο κεντρικό Λονδίνο. Σ' αυτό το σχήμα τα κενά κανάλια φαίνονται με μπλε ράβδους. Όπως φαίνεται από το σχήμα, τα διαθέσιμα κανάλια TVWS μπορεί να είναι μη συνεχόμενα. Τούτο το χαρακτηριστικό μπορεί να περιορίσει σημαντικά την πρόσβαση στα TVWS στις περισσότερες σύγχρονες ασύρματες τεχνολογίες, καθώς τα σχήματα διαμόρφωσης που υλοποιήθηκαν σε αυτές τις τεχνολογίες συχνά απαιτούν συνεχόμενα τμήματα του φάσματος. Στην περίπτωση του Λονδίνου παρόλο που κατ' αρχήν είναι διαθέσιμο συνολικό φάσμα μεγέθους 96 MHz, μόνο τα 16 MHz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πρόσβαση σε συνεχόμενες συχνότητες.



Σχήμα 6: Κανάλια TVWS διαθέσιμα για γνωστική πρόσβαση στο κεντρικό Λονδίνο.

Επισημαίνουμε πως τα παραπάνω αποτελέσματα εξήχθησαν χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό άκρως ρεαλιστικών χαρτών κάλυψης ψηφιακής τηλεόρασης με ένα απλοποιημένο μοντέλο διάδοσης απωλειών (pathloss propagation model), το οποίο είναι αρκετό όταν μελετάμε γνωστικές συσκευές χαμηλής ισχύος. Επιπλέον, με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας των υπολογισμών των TVWS για γνωστικές συσκευές υψηλής ισχύος, όπως αυτές που απαιτούνται σε αγροτικές ευρυζωνικές εφαρμογές, ενσωματώνουμε στους υπολογισμούς μας πρότυπα μοντέλα διάδοσης στις συχνότητες UHF, όπως το ITU-R P.1546-3 (Longley-Rice) μοντέλο.

1.4.2. Περιπτώσεις χρήσεως.

Πέρα από τη σημαντική χωρητικότητα που προσφέρεται, γεγονός που είναι έκδηλο από τα όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, ένας σημαντικός λόγος που εξηγεί γιατί τα TVWS έχουν προσελκύσει τόσο ενδιαφέρον, είναι ότι αποτελούν έναν ιδιαίτερα ελκυστικό συνδυασμό εύρους ζώνης και κάλυψης. Τα σήματα στις τηλεοπτικές ζώνες VHF/UHF ταξιδεύουν πιο μακριά απ' ό,τι τα σήματα WiFi και 3G μαζί, και διαπερνούν τα κτήρια πιο εύκολα. Αυτό με τη σειρά του σημαίνει πως αυτές οι ζώνες συχνοτήτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν από ένα μεγάλο εύρος πιθανών νέων υπηρεσιών. Εκτός της ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης σε περιοχές που ως τώρα δεν διέθεταν, άλλες τεχνολογικά σημαντικές εφαρμογές των TVWS περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- (i) Ασύρματα δίκτυα διανομής για ψηφιακά σπίτια του μέλλοντος και έξυπνα δίκτυα ενέργειας.

- (ii) Μη-αδειοδοτημένες κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες.
- (iii) Τελευταίου μιλίου (last mile) ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες σε αστικά περιβάλλοντα.
- (iv) Γνωστικές κυψελωτές (femtocells/cellular) επικοινωνίες στα TVWS.

Στις επόμενες παραγράφους η προσοχή μας θα επικεντρωθεί σε δύο μελλοντικές περιπτώσεις χρήσης της γνωστικής πρόσβασης στα TVWS, που τον τελευταίο καιρό έχουν προσελκύσει το έντονο ενδιαφέρον τόσο της βιομηχανίας, όσο και της ερευνητικής κοινότητας.

1.4.2.1. Ασύρματα οικιακά δίκτυα του μέλλοντος.

Με έναυσμα την ταχεία ανάπτυξη των ασύρματων τεχνολογιών, και χωρίς το βάρος των αδειών για φάσμα, η οικιακή ασύρματη δικτύωση έχει γίνει τα τελευταία χρόνια μια τεχνολογία με μεγάλη ανταπόκριση. Μεταξύ του 2004 και του 2006, η υιοθέτηση οικιακών δικτύων στην Ευρώπη εκτινάχθηκε, με ρυθμούς ανάπτυξης μεγαλύτερους αυτών της Ασίας και της Βόρειας Αμερικής. Η Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο τριπλασίασαν τον αριθμό των νοικοκυριών με οικιακό δίκτυο ξεπερνώντας ελαφρώς τις Η.Π.Α. Η Ιταλία και η Γερμανία έχουν μείνει πίσω, αλλά έχουν παρουσιάσει αξιοσημείωτη πρόοδο μολαταύτα. Πάνω από το 54% των ευρωπαϊκών νοικοκυριών διαθέτουν υπολογιστή και το 34% έχει ασύρματη σύνδεση στο διαδίκτυο. Το ασύρματο σπίτι του μέλλοντος θα αποτελείται όχι μόνο από PC, λάπτοπς και PDA που θα συνδέονται ασύρματα στο διαδίκτυο, αλλά και από διακομιστές πολυμέσων (media servers) (όπως τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, εικόνας και ήχου), σημεία πρόσβασης, περιφερειακά υπολογιστών, όπως ασύρματες κάμερες και κονσόλες παιχνιδιών. Εξαιτίας της ταχείας μείωσης των τιμών στις ασύρματες επιλογές και της ελαχιστοποίησης των περιορισμών για πρόσβαση στις ISM ζώνες, κι άλλες οικιακές εφαρμογές, όπως μετρητές αερίου, ηλεκτρικού ρεύματος και νερού, θα εξοπλιστούν με ραδιοδέκτες που θα τους επιτρέπουν τον έλεγχο, την παρακολούθηση και την εύκολη διαμόρφωση (τα επονομαζόμενα 'έξυπνα δίκτυα').

Οι περισσότερες αυτών των συσκευών και υπηρεσιών υποστηρίζουν ασύρματη δικτύωση χρησιμοποιώντας έναν αριθμό ασύρματων τεχνολογιών μικρής εμβέλειας, όπως το WiFi (IEEE 802.11), το Zigbee (IEEE 802.15.4), κ.ο.κ., που λειτουργούν χωρίς την ανάγκη αδειοδότησης στις ήδη πλήρεις ISM ζώνες. Τα οικιακά δίκτυα του μέλλοντος που θα λειτουργήσουν αποκλειστικά σε αυτές τις ζώνες αναμένεται να πάσχουν από σοβαρούς περιορισμούς στη χωρητικότητα, ως αποτέλεσμα της παρεμβολής που θα προκαλείται από την υψηλή πυκνότητα σε συσκευές και την περιορισμένη διαθεσιμότητα σε φάσμα στις ζώνες ISM. Επιπλέον,

η συνολική παρεμβολή προερχόμενη από αυτές τις συσκευές θα αποτελέσει μεγάλη επιβάρυνση για την ευρυζωνική οικιακή ασύρματη πρόσβαση.

Η επιπρόσθετη χωρητικότητα που προσφέρεται μέσω της δευτερεύουσας πρόσβασης στα TVWS δίνει τη δυνατότητα της επίλυσης του προβλήματος περιορισμένης χωρητικότητας και ως εκ τούτου συμβάλλει στην αύξηση της απορρόφησης των οικιακών ασύρματων δικτύων και υπηρεσιών, και λειτουργεί ως ερέθισμα για μελλοντικές τεχνολογικές καινοτομίες. Συγκεκριμένα, ορισμένες από τις πιο απαιτητικές σε εύρος ζώνης οικιακές δικτυακές εφαρμογές (όπως multimedia streaming) μπορούν να αποδοθούν στα TVWS, κι έτσι οι ζώνες ISM απελευθερώνονται για χρήση από άλλες εφαρμογές. Πρόσφατες μελέτες προσομοίωσης δείχνουν ότι λόγω των χαμηλότερων συχνοτήτων λειτουργίας, τα οικιακά σημεία πρόσβασης που λειτουργούν στα TVWS στις UHF συχνότητες μπορούν να επιτύχουν επίπεδα απόδοσης που να είναι είτε υψηλότερα, ή συγκρίσιμα με αυτά των σημείων πρόσβασης WiFi, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιούν σημαντικά χαμηλότερα επίπεδα ισχύος εκπομπής (δύο τάξεις μεγέθους σε mW). Επιπλέον πλεονέκτημα αποτελεί η σημαντική εξοικονόμηση κατανάλωσης ενέργειας που πραγματοποιείται στα οικιακά δίκτυα μεταβαίνοντας από τις ISM ζώνες στα TVWS. Ακόμη, σύμφωνα με διάφορες πρόσφατες μελέτες ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών για εκπομπές στα TVWS σε εσωτερικό χώρο, εμφανίζεται να είναι σημαντικός.

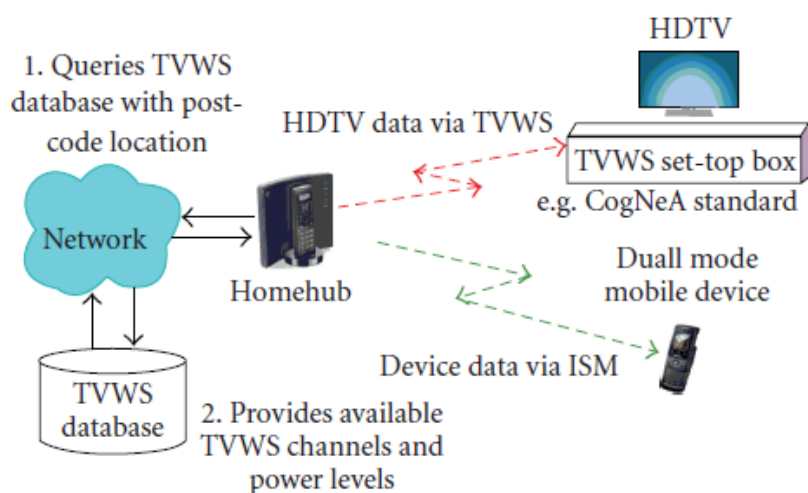
Η προστασία των υφιστάμενων χρηστών σε αυτού του είδους τη δικτύωση μπορεί να διαφυλαχθεί με τη χρήση αρχιτεκτονικής 'αφέντη-υπηρέτη', όπου οι λειτουργίες της ανίχνευσης φάσματος, του γεωγραφικού προσδιορισμού, της πρόσβασης στη βάση δεδομένων και της ανάθεσης φάσματος είναι όλες ενοποιημένες στο οικιακό σημείο πρόσβασης. Το τελευταίο παρακολουθεί τη διαθεσιμότητα σε φάσμα στις ISM και τηλεοπτικές ζώνες, και δίνει εντολή στις συσκευές-πελάτη ποιό φάσμα να χρησιμοποιήσουν με βάση το εύρος ζώνης τους και τις απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας (QoS).

1.4.2.2. Γνωστικά/TVWS Femtocells (πολύ μικρά κελιά).

Το femtocell είναι ένας μικρός σταθμός βάσης για 3G/LTE τεχνολογίες, ή τεχνολογία WiMAX, που ελέγχεται από τον πάροχο και τοποθετείται εντός του σπιτιού ή εντός ενός μικρού γραφείου του πελάτη. Τα femtocells είναι χρήσιμα όταν ένας χρήστης έχει κακή εσωτερική κάλυψη ή οι εφαρμογές του είναι πολύ απαιτητικές σε χωρητικότητα για συνθήκες εσωτερικού χώρου. Ο χρήστης μπορεί να βρίσκεται ήδη εντός του κτηρίου ή να εισέρχεται σε αυτό. Τα femtocells βοηθούν ώστε να διατηρηθεί η κινητή ευρυζωνική σύνδεση ή να επιτραπεί, όπου προηγουμένως δεν ήταν δυνατό. Τα femtocells της συγχρονης γενιάς χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες με τα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών, και κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια ενδεχόμενη πηγή παρεμβολών, η οποία θα

είναι δύσκολο να ελεγχθεί δεδομένου πως ο χρήστης του femtocell δεν ελέγχεται από τον πάροχο.

Τα femtocells που λειτουργούν στα TVWS θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια εναλλακτική λύση απέναντι στα femtocells που υπάρχουν στην αγορά και είναι αποκλειστικά αφιερωμένα σε δίκτυα 3G/LTE [21]. Το κύριο πλεονέκτημα των femtocells που βασίζονται στις γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες σε σύγκριση με τα παραδοσιακά femtocells θα είναι η μειωμένη ή καλύτερα ελεγχόμενη παρεμβολή μέσα στο δίκτυο. Μια άλλη περίπτωση εξέχοντος ενδιαφέροντος είναι η υποστήριξη υπηρεσιών για backhauling των femtocells (είτε τα παραδοσιακά, είτε αυτά που βασίζονται στις γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες). Κάτι τέτοιο επιτρέπει σε έναν πάροχο να αποκτήσει τον έλεγχο μέσα στο σπίτι του χρήστη, ακόμη κι αν βρίσκεται εκτός της περιοχής κάλυψης DSL ή αν ο χρήστης εξυπηρετείται από άλλον πάροχο.



Σχήμα 7: Αρχιτεκτονική για διανομή τηλεοπτικού σήματος υψηλής ευκρίνειας με τη χρήση των Λευκών Φασματικών Κενών Τηλεόρασης.

Ως επίλογο στα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, θα μπορούσαμε να πούμε πως η χρήση γνωστικών ραδιοδικτύων στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης προσφέρει μια σημαντική ευκαιρία για επιπλέον φάσμα για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών και υπηρεσιών εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου. Ωστόσο, για να είναι αποδοτική η αξιοποίηση αυτού του φάσματος για εμπορικές εφαρμογές, θα πρέπει προηγουμένως να έχει αντιμετωπιστεί μια σειρά από σημαντικές τεχνολογικές προκλήσεις. Μια από αυτές αποτελεί η ανίχνευση φάσματος υψηλής ακρίβειας, αντικείμενο με το οποίο έχουν ασχοληθεί αρκετές έρευνες. Η πολλαπλή δευτερεύουσα πρόσβαση, ο έλεγχος της συνολικής παρεμβολής και οι τεχνολογίες ευέλικτης διαμόρφωσης είναι κι αυτά θέματα που απασχολούν την ερευνητική κοινότητα. Επιπλέον, οι ποσοτικές τεchnο-οικονομικές μελέτες που αφορούν τη

δυνατότητα εμπορικής χρήσης και την εξέταση του κόστους έναντι του οφέλους από τη χρήση των γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών θα επηρεάσουν σημαντικά την υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας από τους παρόχους ασύρματων υπηρεσιών.

2. Ορισμοί χρήσιμων όρων των γνωστικών ραδιοδικτύων

2.1. Λευκά Φασματικά Κενά

Από το CEPT Report 24 [23]: Τα 'Λευκά Φασματικά Κενά' αποτελούν έναν όρο που υποδηλώνει τμήμα του φάσματος, το οποίο είναι διαθέσιμο για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές (υπηρεσίες, συστήματα) σε δοσμένο χρόνο και για δοσμένη γεωγραφική περιοχή, πάνω στη βάση της μη-παρεμβολής/μη-προστασίας σε σχέση με άλλες υπηρεσίες που έχουν υψηλότερη προτεραιότητα σε εθνικό επίπεδο.

2.2. Γνωστικό ραδιοσύστημα

Από το ITU-R Report SM.2152 [24]:

Γνωστικό ραδιοσύστημα (CRS): Ένα ραδιοσύστημα που χρησιμοποιεί τέτοια τεχνολογία που να επιτρέπει στο σύστημα να αποκτά γνώση του λειτουργικού και γεωγραφικού περιβάλλοντος, των εγκατεστημένων πολιτικών και της εσωτερικής του κατάστασης. Επίσης, να μπορεί να προσαρμόζει δυναμικά και αυτόνομα τις λειτουργικές του παραμέτρους και πρωτόκολλα με βάση την αποκτηθείσα γνώση για την επίτευξη προκαθορισμένων στόχων, και να μαθαίνει από τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

2.3. Συσκευή Λευκών Φασματικών Κενών (White Space Device-WSD)

Οι συσκευές Λευκών Φασματικών Κενών (WSDs) είναι συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα Λευκά Φασματικά Κενά χωρίς να προκαλούν επιβλαβή παρεμβολή σε προστατευμένες υπηρεσίες, κάνοντας χρήση των απαιτούμενων δυνατοτήτων που προσφέρουν οι γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες.

2.4. Υπάρχουσα (υφιστάμενη) ασύρματη υπηρεσία

Οι υφιστάμενες ασύρματες υπηρεσίες που έχουν λάβει έγκριση για λειτουργία σε συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων με προτεραιότητα, περιλαμβάνουν:

- Υπηρεσίες επίγειας μετάδοσης (BS), συμπεριλαμβανομένου κυρίως του DVB-T.
- Συστήματα δημιουργίας προγραμμάτων και ειδικών εκδηλώσεων (PMSE), συμπεριλαμβανομένων κυρίως των ασύρματων μικροφώνων.
- Υπηρεσίες ασύρματης αστρονομίας (RAS) στη ζώνη 608-614 MHz.
- Υπηρεσίες ασύρματης αεροναυσιπλοΐας (ARNS) στη ζώνη 645-790 MHz.
- Υπηρεσίες κινητών τηλεπικοινωνιών (MS) κάτω από τα 470 MHz και πάνω από τα 790 MHz.

3. Υποθέσεις εργασίας με βάση τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των συσκευών λευκών φασματικών κενών, που προβλέπεται να αναπτυχθούν στη ζώνη 470-790 MHz.

Η συγκεκριμένη ενότητα ασχολείται με ορισμένες πιθανές κατηγορίες συσκευών, σενάρια ανάπτυξης και γνωστικές τεχνικές για χρήση στα Λευκά Φασματικά Κενά, με σκοπό τη διερεύνηση των απαιτήσεων ασφαλείας των υφιστάμενων υπηρεσιών. Οι υποθέσεις που γίνονται δεν έχουν πρόθεση να περιορίσουν τη βιομηχανική ευελιξία στο να εισάγει καινοτομίες όσον αφορά τη χρήση των Λευκών Φασματικών Κενών. Είναι πολύ πιθανό να μπορούν να υπάρξουν και άλλα είδη συσκευών και υλοποιήσεων. Οποσδήποτε, το κίνητρο για καινοτομία αποτελεί έναν σημαντικό λόγο για την εξέταση των Λευκών Φασματικών Κενών. Η χρήση των WSD που εγκαταστάθηκε από έναν διαχειριστή δικτύου μπορεί να διαφέρει σε σχέση με την αντίστοιχη ενός πελάτη ή εν γένει κάποιου ειδικού σκοπού. [22]

3.1. Σενάρια

Τα ακόλουθα αποτελούν επεξηγηματικά σενάρια, που βασίζονται σε παραπλήσιες τεχνολογίες που ήδη χρησιμοποιούνται. Είναι εφικτό να προβλέψουμε τουλάχιστον τρεις μεγάλες κατηγορίες των WSD.

- Προσωπικές/κινητές.
- Οικιακές συσκευές/συσκευές γραφείου.
- Ιδιωτικά και δημόσια σημεία πρόσβασης.

3.1.1. Γενικά

Οι συσκευές των δύο πρώτων κατηγοριών θα χρησιμοποιούνται σε χαμηλό ύψος. Τα 1,5m αποτελούν αντιπροσωπευτικό ύψος που χρησιμοποιείται σε μελέτες προστασίας. Ωστόσο, οι WSD μπορούν να εμφανιστούν και σε άλλα ύψη (π.χ. εντός ενός κτηρίου, ή σε ένα μπαλκόνι). Τα σημεία πρόσβασης, και συγκεκριμένα τα δημόσια σημεία πρόσβασης, αναμένεται να βρίσκονται σε μεγαλύτερα ύψη (π.χ. 10m με 30m).

Η εξειδικευμένη δικτύωση και τα αυτο-ρυθμιζόμενα δίκτυα μπορούν να υποστηριχθούν από προσωπικές/κινητές συσκευές, επιτρέποντας στους χρήστες να απολαμβάνουν την ευκολία στην εγκατάσταση και την ευελιξία που προσφέρει η ασύρματη τεχνολογία. Έτσι, για παράδειγμα, καταναλωτές μπορεί να θέλουν να μετακινήσουν εξοπλισμό εντός της οικίας τους ή του γραφείου, να κάνουν χρήση νέων συσκευών και να αποφασίσουν ποιές συσκευές θα πρέπει να βρίσκονται σε λειτουργία σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

3.1.2. Προσωπικές/Κινητές

Οι προσωπικές/κινητές συσκευές προβλέπεται να έχουν τέτοιο μέγεθος που θα επιτρέπει τη μεταφορά τους από μεμονωμένους χρήστες, όπως συμβαίνει με τα κινητά τηλέφωνα και τα προσωπικά media players. Θα μπορούν επίσης να ενσωματώνονται σε laptops. Η πρόσβαση στο διαδίκτυο θα είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό, αλλά το εύρος των εφαρμογών τους θα είναι ευρύ. Θα περιλαμβάνει την περιήγηση περιεχομένου (π.χ., online video και audio), αλλά και την επικοινωνία μηχανής με μηχανή, όπως ηλεκτρονικές πληρωμές και εφαρμογές παρακολούθησης. Οι προσωπικές/κινητές συσκευές μπορεί να περιέχουν πομπούς και δέκτες που λειτουργούν σε συχνότητες έξω από τη ζώνη 470-790 MHz. Τέλος, είναι προφανές πως πηγαίνουν όπου οι χρήστες τους πηγαίνουν, όπως μέσα στο σπίτι και στο γραφείο, σε δρόμο, σε τρένο, σε λεωφορείο, σε αυτοκίνητο, κ.τ.λ.

3.1.3. Οικιακές συσκευές/συσκευές γραφείου

Όπως περιγράφηκε στην παραπάνω παράγραφο, οι προσωπικές/κινητές συσκευές θα χρησιμοποιηθούν μέσα σε σπίτια, γραφεία και άλλα κτήρια. Ωστόσο, μπορεί να υπάρξουν μη κινητές WSD εγκατεστημένες σε επίπεδες τηλεοράσεις, σε βίντεο και σε άλλες οικιακές συσκευές, που είναι τοποθετημένες σε ένα συγκεκριμένο μέρος.

Η χρήση των Λευκών Φασματικών Κενών καθιστά δυνατή την πρόσβαση σε υπηρεσίες βίντεο υψηλής ποιότητας, όπως διαμοιρασμό/πλοήγηση περιεχομένου που έχει αποθηκευτεί τοπικά εντός του σπιτιού ή του γραφείου. Μια πιθανή εφαρμογή είναι η διανομή υπηρεσιών τηλεόρασης σε δευτερεύοντες τηλεοπτικούς δέκτες, αντισταθμίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την περιορισμένη βιωσιμότητα της φορητής λήψης σε κάποιες περιοχές εξαιτίας της μετάβασης στην ψηφιακή τηλεόραση. Ένα άλλο παράδειγμα εφαρμογής θα μπορούσε να είναι οι απομακρυσμένες μετρήσεις.

3.1.4. Ιδιωτικά και Δημόσια σημεία πρόσβασης

Είναι επίσης πιθανό ότι θα υπάρξουν ιδιωτικά σημεία πρόσβασης που θα λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο όπως τα σημερινά WiFi σημεία πρόσβασης, αλλά θα εκμεταλλεύονται την καλύτερη διάδοση εξαιτίας των χαμηλών συχνοτήτων κι έτσι θα προσφέρεται εκτεταμένη κάλυψη, όπως για παράδειγμα εντός των κτηρίων.

Άλλη μια σημαντική κατηγορία συσκευών αποτελούν τα δημόσια σημεία πρόσβασης ή σταθμοί βάσης, που ουσιαστικά παρέχουν μια πύλη σύνδεσης με το διαδίκτυο. Αυτή η κατηγορία συσκευών απαιτεί υψηλότερες τιμές ισχύος εκπομπής σε σχέση με τις υπόλοιπες και συνήθως τοποθετείται σε αγροτικές περιοχές, ώστε

να επεκτείνεται η γεωγραφική διαθεσιμότητα της ευρυζωνικής πρόσβασης, χωρίς φυσικά να αποκλείεται η τοποθέτηση στα κέντρα των πόλεων.

Εντός της περιοχής κάλυψης ενός σταθμού βάσης ή ενός σημείου πρόσβασης, κι άλλες κατηγορίες WSD μπορεί να χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα, προσωπικές/κινητές συσκευές θα μπορούν να χρησιμοποιούν τα σημεία πρόσβασης ή τους σταθμούς βάσης για να καταφέρουν να έχουν πρόσβαση σε υπηρεσίες και περιεχόμενα διαδικτύου. Ένα ακόμη παράδειγμα αποτελεί ο τοποθετημένος σε σταθερό σημείο εξοπλισμός πελάτη (CPE – Customer Premise Equipments) που θα χρησιμοποιείται ως συσκευή του πελάτη στο πλαίσιο μιας προκαθορισμένης ασύρματης πρόσβασης.

Οι σταθμοί βάσης και τα σημεία πρόσβασης πιθανόν θα βρίσκονται σε σταθερές θέσεις, τυπικά θα εγκαθίστανται εκεί όπου η σύνδεση με το δίκτυο backhaul είναι άμεσα διαθέσιμη. Για παράδειγμα, μια οπτική ίνα θα μπορούσε να υπάρχει σε μία κοινότητα αγροτικής περιοχής και ένας σταθμός βάσης λευκών φασματικών κενών θα μπορούσε να είναι τοποθετημένος στο ίδιο μέρος, με σκοπό να παρέχεται πρόσβαση σε όλη τη γύρω περιοχή. Για να καταστεί δυνατή η αποδοτική κάλυψη σε λιγότερο πυκνοκατοικημένες περιοχές, τέτοιοι σταθμοί βάσης ενδέχεται να χρησιμοποιούν υψηλότερες τιμές ισχύος σε συνδυασμό με ψηλότερες κεραίες. Τη σύνδεση backhaul (backhaul link) που χρησιμοποιείται από ένα σημείο πρόσβασης ή από ένα σταθμό βάσης θα μπορούσαμε να την αντιληφθούμε σαν μια ασύρματη διασύνδεση σημείου σε σημείο. Τέτοιες διασυνδέσεις θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν τις συχνότητες των λευκών φασματικών κενών.

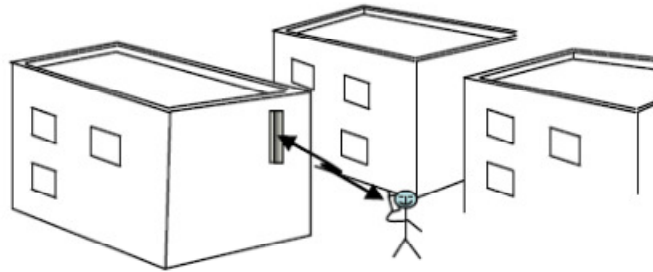
3.2. Σενάρια ανάπτυξης

Οι επόμενες ενότητες περιγράφουν μερικά παραδείγματα σεναρίων ανάπτυξης. Οι συνθήκες διαμοιρασμού και οι ρυθμιστικές απαιτήσεις μπορούν να ληφθούν υπόψη ξεχωριστά για διαφορετικούς τύπους ανάπτυξης που αναφέρονται στην ισχύ εξόδου, το κατώφλι ανίχνευσης, κ.τ.λ. Αυτά τα σενάρια ανάπτυξης αποτελούν παραδείγματα σε σχέση με τις υποθέσεις διάδοσης και διαμοιρασμού και δεν αναπαριστούν απαραίτητα πραγματικές περιπτώσεις χρήσης. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι υπάρχουν και άλλα σενάρια, τα οποία θα τεθούν σε εφαρμογή όταν τα δίκτυα και οι συσκευές θα αναπτυχθούν.

3.2.1. Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – χαμηλό ύψος – εξωτερικός χώρος

Ίσως αποτελεί το πιο πιθανό σενάριο προκειμένου να αξιοποιηθούν τα λευκά φασματικά κενά. Σε αυτή την περίπτωση, τόσο το σημείο πρόσβασης, που ο

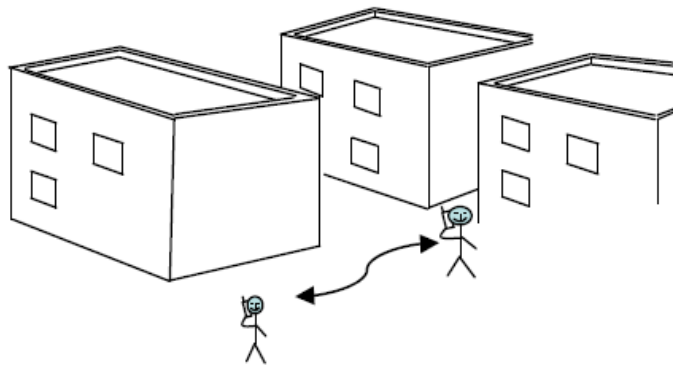
διαχειριστής εγκατέστησε, όσο και οι προσωπικές/κινητές WSD βρίσκονται σε χαμηλό ύψος και εξωτερικά (βλέπε Σχήμα 7 [22]).



Σχήμα 8: Ασύρματες μονάδες σε χαμηλό ύψος.

3.2.2. Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – χαμηλό ύψος – απευθείας λειτουργία – εξωτερικός χώρος

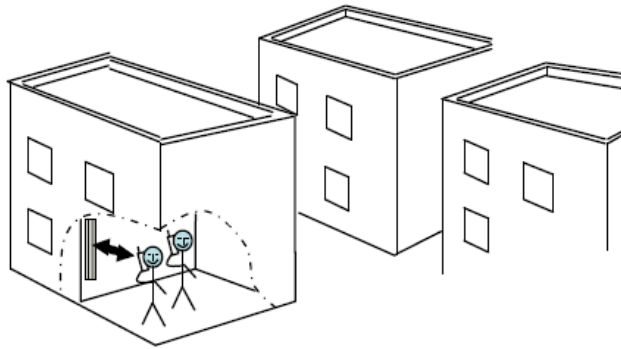
Μια ακόμη περίπτωση αποτελεί η άμεση λειτουργία (διασύνδεση) (βλέπε σχήμα 8 [22]).



Σχήμα 9: Ασύρματες μονάδες σε χαμηλό ύψος και σε άμεση λειτουργία.

3.2.3. Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – χαμηλό ύψος – εσωτερικός χώρος

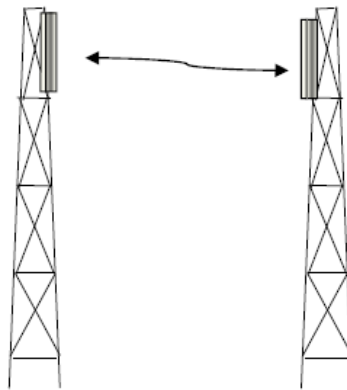
Οι ασύρματες μονάδες ενδέχεται να βρίσκονται εντός κτηρίων, καθιστώντας δυνατή την άμεση χρήση σε εσωτερικούς χώρους. Σε αυτή την περίπτωση οι κινητές WSD συνδέονται με δημόσια ή ιδιωτικά σημεία πρόσβασης που είναι τοποθετημένα μέσα στο κτήριο (βλέπε σχήμα 9 [22]).



Σχήμα 10: Ασύρματες μονάδες σε χαμηλό ύψος, εσωτερικά.

3.2.4. Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – και οι δύο τοποθετημένες ψηλά

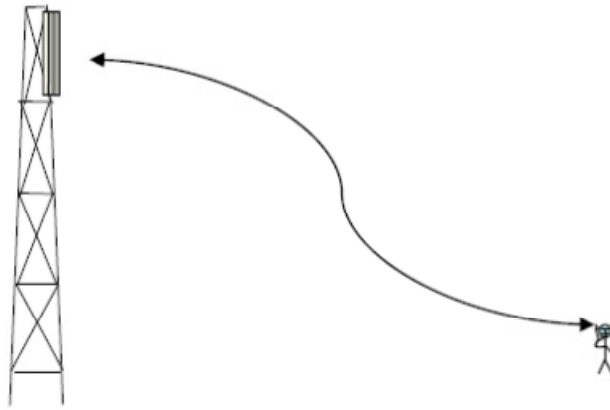
Η συγκεκριμένη περίπτωση μοιάζει με τη χρήση της παραδοσιακής σταθερής υπηρεσίας σημείου σε σημείο. Αλλά, επίσης, μπορούν να υπάρξουν και εφαρμογές σημείου σε πολλαπλό σημείο. Η βασική παραδοχή σε αυτό το σενάριο είναι ότι τόσο οι γνωστικές μονάδες λήψης όσο και εκπομπής βρίσκονται πάνω από τις στέγες/ταράτσες ή τα περιβάλλοντα εμπόδια (βλέπε σχήμα 10 [22]).



Σχήμα 11: Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – και οι δύο τοποθετημένες ψηλά.

3.2.5. Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – η μία βρίσκεται σε ύψος και η άλλη χαμηλά

Σε αυτό το σενάριο, η μία γνωστική μονάδα βρίσκεται χαμηλά, κάτω από τις στέγες/ταράτσες ή τα περιβάλλοντα εμπόδια, και η άλλη, ένα σημείο πρόσβασης, βρίσκεται ψηλά (βλέπε σχήμα 11 [22]). Αυτό το σενάριο μοιάζει με ένα παραδοσιακό δίκτυο κινητών τηλεπικοινωνιών.



Σχήμα 12: Ασύρματη μονάδα σε ασύρματη μονάδα – η μία βρίσκεται ψηλά και η άλλη σε μικρό ύψος.

3.3. Χαρακτηριστικά εκπομπής

Η πιθανότητα παρεμβολής σε προστατευμένες υπηρεσίες εξαρτάται πέραν όλων των άλλων και από τα χαρακτηριστικά εκπομπής των συσκευών λευκών φασματικών κενών. Η συγκεκριμένη ενότητα καθορίζει ένα σύνολο παραμέτρων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό και τον έλεγχο του ενδεχομένου να προκληθεί παρεμβολή.

Η ακριβής τεχνολογία μετάδοσης που θα χρησιμοποιηθεί από τα WSD δεν μπορεί να προσδιοριστεί σε αυτή τη φάση. Κι αυτό διότι βρίσκονται σε εξέλιξη αρκετές προσπάθειες προτυποποίησης και εξετάζονται διάφορες τεχνολογίες. Ωστόσο, μιας και οι τεχνολογίες που σχετίζονται με την OFDM φαίνεται προς το παρόν να αντιπροσωπεύουν την πιο αποδοτική και αξιόπιστη λύση για μετάδοση, είναι εύλογο να θεωρήσουμε αυτόν τον τύπο τεχνολογιών για τους σκοπούς αυτής της μελέτης. Επίσης, δεν μπορούν να γίνουν λεπτομερείς υποθέσεις σε σχέση με το είδος της διπλεξίας, διότι τόσο η TDD όσο και η FDD μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επιπλέον, οι μεταδόσεις μπορεί να είναι συνεχείς ή διακοπτόμενες. Τέλος, κάποιες τεχνολογίες ενδέχεται να μπορούν να συνδυάσουν αρκετά διαθέσιμα κανάλια κατά την ίδια χρονική περίοδο, με στόχο την αύξηση της απόδοσης των WSD.

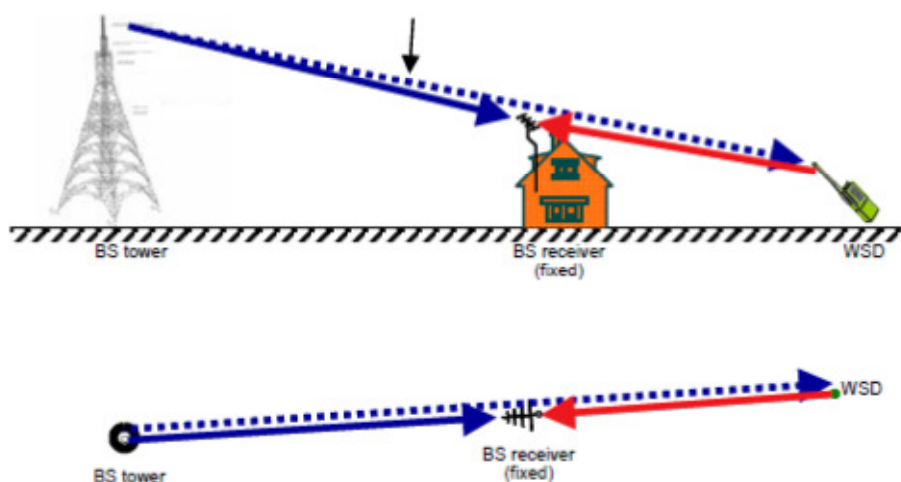
Τα προτεινόμενα επίπεδα ισχύος εκπομπής εξαρτώνται από την κάθε περίπτωση χρήσης, αλλά για τηλεπικοινωνίες μικρής εμβέλειας το εύρος πιθανόν θα είναι από 10 mW ως περίπου τα 50 mW, ενώ για τηλεπικοινωνίες μεγαλύτερης εμβέλειας το εύρος κυμαίνεται από 1 W ως τα 10 W. Οι επιτρεπόμενες παράμετροι εκπομπής προς προσδιορισμό είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν οι υπηρεσίες για την προστασία τους από τις WSD, και πιο συγκεκριμένα με τη λειτουργία των πιθανών δεκτών-θυμάτων. Θα πρέπει να επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι εκπομπές από τις WSD δεν θα προκαλέσουν

επιβλαβή παρεμβολή σε προστατευμένες υπηρεσίες, ούτε μέσα στο ίδιο κανάλι, ούτε σε γειτονικό.

- **Όριο ισχύος εντός του μπλοκ:** Όταν μια WSD λειτουργεί μέσα σε ένα κενό κανάλι, το όριο ισχύος εντός του μπλοκ καθορίζει την ποσότητα της ισχύος που μπορεί να εκπεμφθεί μέσα στο εύρος ζώνης του συγκεκριμένου καναλιού. Όταν ένα κανάλι, γειτονικό σε ένα κενό κανάλι, είναι κατειλημμένο από μια προστατευμένη υπηρεσία, τότε το όριο ισχύος εντός της ζώνης συνδέεται με το επίπεδο του/των σήματος/σημάτων των γειτονικών καναλιών.
- **Όριο ισχύος εκτός του μπλοκ:** Καθορίζει την ποσότητα της ισχύος που είναι ανεκτή από τα κανάλια που γειτνιάζουν με κενά κανάλια. Αυτό το όριο μπορεί επίσης να συνδέεται με το αν και πού υπάρχουν προστατευμένες υπηρεσίες σε γειτονικά κανάλια, και ποιό είναι το επίπεδο των σημάτων τους.
- **Εύρος ζώνης:** Το εύρος ζώνης μέσα στο οποίο συμβαίνει η εκπομπή από τις WSD καθορίζει την πυκνότητα ισχύος, που με τη σειρά της επηρεάζει τον πιθανό αντίκτυπο στις προστατευμένες υπηρεσίες.

4. Προστασία της τηλεοπτικής μετάδοσης στη ζώνη 470-790 MHz από τις εκπομπές των συσκευών λευκών φασματικών κενών.

Η τηλεοπτική λήψη αφορά σταθερές (αγροτικές και αστικές) και κινητές συνθήκες. Το πρόβλημα της παρεμβολής ανάμεσα στην τηλεοπτική μετάδοση και τις WSD απεικονίζεται σχηματικά στο σχήμα 12 [22]. Αν η WSD εκπέμπει κοντά σε κεραία τηλεοπτικής λήψης χρησιμοποιώντας τις ίδιες συχνότητες, ενδέχεται να προκληθεί επιβλαβής παρεμβολή. Ωστόσο, η WSD θα πρέπει να αποφεύγει οποιαδήποτε επιβλαβή παρεμβολή συλλέγοντας πληροφορίες σχετικά με τη χρήση του φάσματος, χρησιμοποιώντας τις τεχνικές ανίχνευσης που έχουν ήδη αναφερθεί. Εάν η WSD δεν εντοπίζει κάποια τηλεοπτική μετάδοση συμπεραίνεται πως δεν υπάρχουν ενεργοί δέκτες εκεί κοντά σε αυτό το φάσμα (διότι δεν υπάρχει τίποτα να λάβουν). [22]



Σχήμα 13: Παράδειγμα περίπτωσης παρεμβολής

Το παρόν κεφάλαιο μελετά τις απαιτήσεις προστασίας των τηλεοπτικών μεταδόσεων έναντι των πιθανών παρεμβολών από τις WSD και σε αυτή τη βάση καταρτίζονται οι τεχνικές και λειτουργικές απαιτήσεις για τη λειτουργία των WSD στη ζώνη 470-790 MHz.

4.1. Χαρακτηριστικά του συστήματος τηλεοπτικής εκπομπής και μετάδοσης και κριτήρια προστασίας

Οι παράμετροι DVB-T που φαίνονται στον πίνακα 1 [22] χρησιμοποιήθηκαν για μελέτες συμβατότητας.

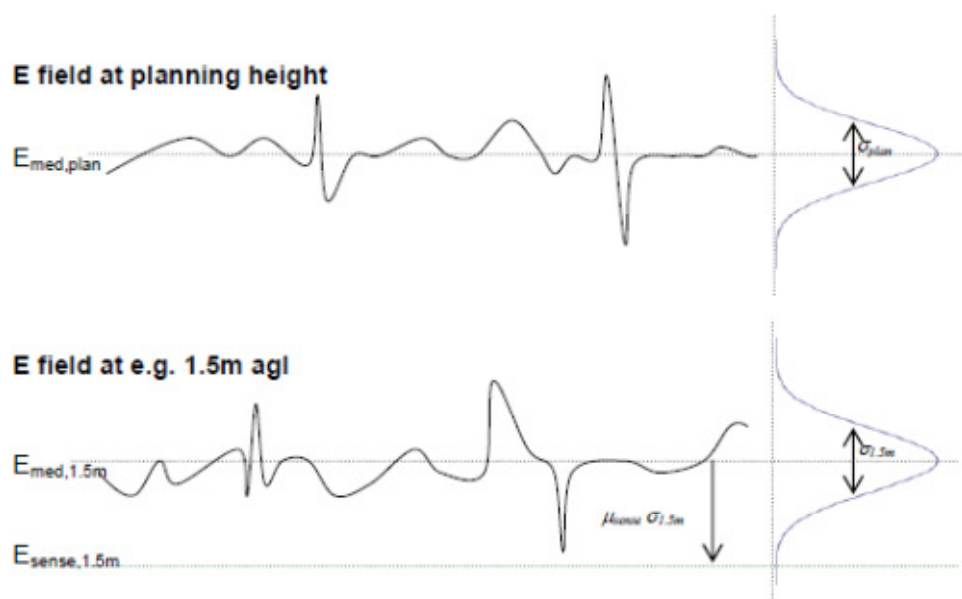
Parameter	Units	Fixed reception rural	Fixed reception urban	Fixed Reception HD TV (DVB-T2) Urban ***	Portable indoor reception urban	Portable outdoor / Mobile Reception urban	Mobile TV (Handheld indoor)* (DVB-H) urban	Mobile TV (DVB-H), handheld outdoor
Calculation of DTT cell size (single transmitter)								
Link BW	MHz	7,60	7,60	7,77	7,60	7,60	7,60	7,60
Thermal noise density	dBm/Hz	-173.98	-173.98	-173.98	-173.98	-173.98	-173.98	-173.98
Receiver noise figure	dB	7	7	7	7	7	6	6
Noise power (inc. NF) over link BW	dBm	-98.17	-98.17	-98.07	-98.17	-98.17	-99.17	-99.17
Cell edge reliability	N/A	95%	95%	95%	95%	95%	95%	90%
Gaussian confidence factor	N/A	1.645	1.645	1.645	1.645	1.645	1.645	1.280
Shadowing loss standard deviation	dB	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5
Wall loss standard deviation	dB	0	0	0	5.5	0	5.5	0
Total loss standard deviation	dB	5.5	5.5	5.5	7.78	5.5	7.78	5
Loss margin	dB	9.05	9.05	9.05	12.79	9.05	12.79	6.4
Minimum SNR at cell-edge*	dB	21	21	21	17	19	15.5	8.5

Σημειώνεται πως όλες αυτές οι παράμετροι βασίζονται σε μεμονωμένους εκπομπούς και ότι δεν λήφθηκαν υπόψη τα δίκτυα ενιαίας συχνότητας (SFN-Single Frequency Network). Επίσης, οι τιμές του πίνακα 1 αποτελούν τιμές αναφοράς και ενδέχεται να διαφέρουν από αυτές που πρόκειται να τεθούν σε εφαρμογή και να είναι υπό προστασία σε εθνική βάση.

4.2. Ανίχνευση (sensing) (συμπεριλαμβάνεται ο υπολογισμός του κατωφλίου ανίχνευσης)

4.2.1. Κατώφλι ανίχνευσης

Η διαθέσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου για την ανίχνευση φάσματος σε μια κεραία μιας WSD δεν θα έχει σταθερή τιμή, αλλά θα παρουσιάζει στατιστική διακύμανση που θα επηρεάζεται από τη θέση της WSD και από τις διακυμάνσεις της διάδοσης στη διάρκεια του χρόνου. Η στατιστική ανάλυση αυτών των διακυμάνσεων νοείται να παρουσιάζει κανονική κατανομή που χαρακτηρίζεται από μια μέση τιμή και μια τυπική απόκλιση. Μια εικόνα του πώς μπορεί να μεταβάλλονται τα σήματα σε σχέση με τη θέση φαίνεται στο σχήμα 13 [22].



Σχήμα 14: Μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Στο ύψος στο οποίο σχεδιάζεται η τηλεοπτική λήψη, η διακύμανση του σήματος χαρακτηρίζεται από μια μέση τιμή έντασης ηλεκτρικού πεδίου, $E_{med,plan}$, και μια τυπική απόκλιση, σ_{plan} . Για ανίχνευση στο ύψος των WSD (H_{WSD}), οι σημαντικές παράμετροι είναι η μέση τιμή έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε αυτό το ύψος, E_{med} , το κατώφλι ανίχνευσης E_{sense} , και η τυπική απόκλιση της διακύμανσης του σήματος,

σ_{sense} . Για τον υπολογισμό του κατωφλίου ανίχνευσης πρέπει να λάβουμε υπόψη την απαιτούμενη αξιοπιστία ανίχνευσης. Αν η συσκευή ανίχνευσης αποτύχει να εντοπίσει την κύρια υπηρεσία, τότε άμεσο επακόλουθο θα είναι η ομοκαναλική παρεμβολή, κάτι που θα επηρεάσει έναν σημαντικό αριθμό δεκτών επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης. Προς αποφυγήν τούτου, απαιτείται πολύ υψηλό ποσοστό αξιοπιστίας, τυπικά 99.99% μέσα στην υπό μελέτη περιοχή. Είναι φανερό πως πρόκειται για την πιο σημαντική παράμετρο όταν επιδιώκουμε την αξιόπιστη ανίχνευση της παρουσίας σημάτων DTT (Digital Terrestrial Television) πάνω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο με στόχο να αποφανθούμε αν το κανάλι χρησιμοποιείται ή όχι.

Για τον υπολογισμό του κατωφλίου ανίχνευσης πρώτα πρέπει να υπολογίσουμε την ένταση πεδίου του τηλεοπτικού σήματος στην κεραία λήψης της WSD " E_{med} ", που βρίσκεται με αφαίρεση των απωλειών λόγω διαφοράς ύψους μεταξύ H_{DTT} και H_{WSD} (" $L_{HDTT-HWSD}$ ") από τη σχεδιασμένη ένταση πεδίου DTT " $E_{med,plan}$ ", οπότε:

$$E_{med}(dB\mu V / m) = E_{med,plan}(dB\mu V / m) - L_{HDTT-HWSD}(dB) \quad (\text{Εξ. 4.2-1})$$

Ο υπολογισμός των απωλειών λόγω διαφοράς ύψους μεταξύ H_{DTT} και H_{WSD} , $L_{HDTT-HWSD}$, γίνεται με βάση τις οδηγίες που δίνονται στην αναφορά ITU-R Rec. P.1546 [27].

Αφού έχουμε βρει το E_{med} , μπορούμε στη συνέχεια να καθορίσουμε το κατώφλι ανίχνευσης E_{sense} ως εξής:

$$E_{sense}(dB\mu V / m) = E_{med}(dB\mu V / m) - \mu_{sense}\sigma_{sense} \quad (\text{Εξ. 4.2-2})$$

Η διαθέσιμη ισχύς προς ανίχνευση στην WSD, P_{sense} , μπορεί να εξαχθεί λαμβάνοντας υπ' όψιν τη συχνότητα, f_{sense} , το κέρδος της κεραίας της συσκευής, G_{sense} , και τις απώλειες πόλωσης, L_{pol} , που προκύπτουν εξαιτίας της έλλειψης ευθυγράμμισης ανάμεσα στην κεραία της WSD και της πόλωσης του κύριου σήματος που ανιχνεύεται. Ακόμα, για κινητές WSD θεωρούμε και τις απώλειες L_{body_loss} . Το αποτέλεσμα δίνεται ως εξής:

$$P_{sense}(dBm) = E_{sense}(dB\mu V / m) - 20\log(f_{sense}(MHz)) - 77.2 + G_{sense}(dB) - L_{pol}(dB) - L_{body_loss}(dB) \quad (\text{Εξ. 4.2-3})$$

Τα ακόλουθα ισχύουν στην περίπτωση μεμονωμένων εκπομπών, μόνο. Τα κατώφλια που προκύπτουν θα είναι χαμηλότερα αν το δίκτυο μετάδοσης βασίζεται σε τοπολογία SFN.

4.2.1.1. Κατώφλι ανίχνευσης για WSD εξωτερικού χώρου

Το κατώφλι ανίχνευσης για διαμορφώσεις αναφοράς υπολογίζεται από την Εξ. 4.2-3. Επισημαίνουμε πως αυτά τα επίπεδα ισχύος θα είναι χαμηλότερα στην

περίπτωση που η υπηρεσία DVB-T της υπό εξέταση περιοχής βασίζεται σε τοπολογία δικτύου SFN. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 2 [22].

DTT	DTT fixed outdoor, planned for SubUrban area		Portable outdoor	Mobile TV (DVB-H) outdoor	
Percentage location in the target detection area:	95%		95%	90%	
DTT receiver antenna height	@10 m		@1.5 m	@1.5 m	
WSD	Mobile Outdoor @1.5m	Fixed Outdoor @30m	Mobile Outdoor @1.5m	Mobile Outdoor @1.5m	
$E_{med,plan}$	56.21	56.21	61.21	56.00	dBμV/m
$L_{HDTT-HWSD}$	17.01	-9.84	0.00	0.00	dB
E_{med}	39.20	66.05	61.21	56.00	dBμV/m
Sensing reliability	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	%
$\sigma_{1.5m}$	5.50	5.50	5.50	5.50	dB
μ_{sense}	3.72	3.72	3.72	3.72	dB
$\mu_{sense-\sigma_{1.5m}}$	20.46	20.46	20.46	20.46	dB
f_{sense}	650.00	650.00	650.00	650.00	MHz
G_{sense} (Note 1)	0.00	0.00	0.00	0.00	dB
L_{pot} (Note 2)	3.00	3.00	3.00	3.00	dB
L_{body_loss}	3.00	0.00	3.00	3.00	dB
E_{sense}	18.74	45.59	40.75	35.54	dBμV/m
$P_{sense_1.5m}$	-120.71	-90.86	-98.70	-103.91	dBm

Πίνακας 2: Κατώφλι ανίχνευσης για WSD εξωτερικού χώρου

4.2.1.2. Κατώφλι ανίχνευσης για WSD εσωτερικού χώρου

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις απώλειες λόγω κτηριακής διαπέρασης, **BPL**, και την αντίστοιχη τυπική απόκλισή τους, σ_{BPL} , μπορούμε να εξαγάγουμε μια τροποποιημένη έκφραση για το κατώφλι ανίχνευσης.

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί πως η διακύμανση του DTT σήματος σε εσωτερικούς χώρους είναι αποτέλεσμα τριών παραγόντων:

- Της διακύμανσης του σήματος εξωτερικά εξαιτίας των ανακλάσεων σε εξωτερικά αντικείμενα.
- Της διακύμανσης των απωλειών λόγω κτηριακής διαπέρασης.
- Της διακύμανσης του σήματος εσωτερικά εξαιτίας των ανακλάσεων σε εσωτερικά αντικείμενα.

Η ισχύς ανίχνευσης στην WSD μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$P_{sense} (dB) = (E_{med,plan} - L_{plan,HWS}D) - BPL - \mu_{sense} \sqrt{(\sigma_{HWS}^2 + \sigma_{BPL}^2 + \sigma_{indoor}^2)} - 20 \log f_{sense} - 77.2 + G_{sense} - L_{pol} - L_{body_loss} \quad (\text{Εξ. 4.2-4})$$

Για τυπική τιμή του BPL (=8dB) με αντίστοιχη τυπική απόκλιση σ_{BPL} (= 5.5dB) και με επιπρόσθετη τυπική απόκλιση λόγω της διακύμανσης του σήματος εσωτερικά σ_{indoor} (= 3.5dB), το κατώφλι ανίχνευσης παίρνει τις τιμές που φαίνονται στον πίνακα 3 [22]. Οι τιμές του πίνακα υποδηλώνουν ότι οι απαιτήσεις ανίχνευσης στην περίπτωση της λειτουργίας WSD σε εσωτερικό χώρο είναι αρκετά αυστηρές.

DTT deployment	DTT fixed outdoor, at SubUrban area	Portable outdoor		Mobile TV (handheld outdoor)	
Percentage location in the target detection area:	95%	95%	70%	90%	
DTT receiver antenna height	@10m	@1.5 m	@1.5 m	@1.5 m	
WSD deployment	Mobile indoor @1.5m	Mobile indoor @1.5m	Mobile indoor @1.5m	Mobile indoor @1.5m	
$E_{med,plan}$	56.21	61.21	47.00	56.21	dBμV/m
$L_{HDTT-HWS}$	17.01	0.00	0.00	0.00	dB
E_{med}	39.20	61.21	47.00	56.21	dBμV/m
$\sigma_{1.5m}$	5.50	5.50	5.50	5.50	dB
BPL	8.00	8.00	8.00	8.00	dB
σ_{BPL}	5.50	5.50	5.50	5.50	dB
σ_{indoor}	3.50	3.50	3.50	3.50	dB
Sensing reliability	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	%
μ_{sense}	3.72	3.72	3.72	3.72	dB
$\mu_{sense} \sqrt{(\sigma_{1.5m}^2 + \sigma_{BPL}^2 + \sigma_{indoor}^2)}$	31.72	31.72	31.72	31.72	dB
f_{sense}	650.00	650.00	650.00	650.00	MHz
G_{sense}	0.00	0.00	0.00	0.00	dB
L_{pol}	3.00	3.00	3.00	3.00	dB
L_{body_loss}	3.00	3.00	3.00	3.00	dB
E_{sense}	-0.52	21.49	7.28	16.49	dBμV/m
$P_{sense_1.5m}$	-140.0	-118.0	-132.2	-123.0	dBm

Πίνακας 3: Κατώφλι ανίχνευσης για WSD εσωτερικού χώρου

Από τους πίνακες που παρουσιάστηκαν στις παραπάνω ενότητες συμπεραίνεται πως δεν είναι εφικτό να λάβουμε μία μοναδική τιμή για το κατώφλι ανίχνευσης, μιας και εξαρτάται από τις σχεδιαστικές υποθέσεις των προστατευμένων υπηρεσιών μετάδοσης, αλλά κυμαίνεται ως εξής:

Για σταθερή WSD με ύψος κεραίας 30 m το κατώφλι ανίχνευσης ποικίλλει μεταξύ:

- -91 dBm (για ανίχνευση της λήψης κεραίας DTT που βρίσκεται σε ύψος 10 m, σχεδιασμένης για το 95% των τοποθεσιών)
- -101 dBm (για ανίχνευση της λήψης κεραίας DTT που βρίσκεται σε ύψος 30 m, σχεδιασμένης για το 95% των τοποθεσιών).

Σημειώνεται ότι η περίπτωση της ανίχνευσης DTT που βρίσκεται σε ύψος 30 m, σχεδιασμένης για το 70% των τοποθεσιών, δίνει κατώφλι ανίχνευσης -107 dBm, αλλά θεωρείται λιγότερο σχετική διότι τα 30 m ύψος της κεραίας λήψης αντιστοιχούν σε αστικό περιβάλλον, ενώ η πιθανότητα 70% αντιστοιχεί σε αγροτικές περιοχές.

Για κινητές/φορητές WSD στα 1.5 m (θεωρώντας την περίπτωση του εσωτερικού χώρου ως την πιο ακραία) το κατώφλι ανίχνευσης ποικίλλει μεταξύ:

- -140 dBm (για ανίχνευση της λήψης κεραίας DTT που βρίσκεται σε ύψος 10 m, σχεδιασμένης για το 95% των τοποθεσιών – ημιαστικές περιοχές)
- -155 dBm (για ανίχνευση της λήψης κεραίας DTT που βρίσκεται σε ύψος 10 m, σχεδιασμένης για το 70% των τοποθεσιών).

Σημειώνεται ότι η περίπτωση της ανίχνευσης DTT που βρίσκεται σε ύψος 30 m, σχεδιασμένης για το 70% των τοποθεσιών, δίνει κατώφλι ανίχνευσης -165 dBm, αλλά θεωρείται λιγότερο σχετική διότι τα 30 m ύψος της κεραίας λήψης αντιστοιχούν σε αστικό περιβάλλον, ενώ η πιθανότητα 70% αντιστοιχεί σε αγροτικές περιοχές.

4.3. Όρια εκπομπής των WSD

Υπάρχουν δύο γενικές προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό των επιτρεπόμενων ορίων εκπομπής των WSD:

- Μέγιστη ισχύς εξόδου με βάση την τοποθεσία. Επιτρέπει τον υπολογισμό της μέγιστης ισχύος εξόδου για κάθε περιοχή που δέχεται λήψη τηλεοπτικού σήματος και για κάθε τύπο/κατηγορία συσκευής.
- Σταθερή μέγιστη ισχύς εξόδου. Υπάρχουν μερικοί τύποι συσκευών (όπως φορητές και σταθερές) για τις οποίες τα βασικά χαρακτηριστικά είναι προσδιορισμένα και που τους επιτρέπεται να εκπέμπουν μέχρι

συγκεκριμένων μέγιστων σταθερών ορίων ισχύος εξόδου εκτός των προστατευμένων περιοχών. Αυτά τα όρια μπορεί να είναι διαφορετικά στην περίπτωση χρήσης γειτονικών καναλιών και άλλων καναλιών. Η συγκεκριμένη προσέγγιση έχει προς το παρόν επιλεγεί από την FCC.

Η πρώτη προσέγγιση όπου τα όρια ισχύος υπολογίζονται με βάση την τοποθεσία παρουσιάζεται στις ακόλουθες ενότητες. Είναι κυρίως κατάλληλη για τη μέθοδο του γεωγραφικού προσδιορισμού με πρόσβαση σε βάση δεδομένων. Για τον προσδιορισμό της μέγιστης ισχύος εξόδου για τη μέθοδο της ανίχνευσης, η αβεβαιότητα της πραγματικής μετρημένης ισχύος της τηλεοπτικής μετάδοσης πρέπει να λαμβάνεται επιπλέον υπ' όψιν, δηλαδή ένα περιθώριο κρυμμένου κόμβου. Οι μελέτες έχουν δείξει ότι ένας τέτοιος προσδιορισμός της μέγιστης ισχύος εξόδου με βάση την τοποθεσία που χρησιμοποιεί μόνο τη μέθοδο της ανίχνευσης δεν είναι ακριβής, και δεν θα παρέχει επαρκή προστασία στην υπηρεσία τηλεοπτικής μετάδοσης. Επίσης, οι μελέτες έχουν δείξει πως οι πληροφορίες που λαμβάνονται από την αυτόνομη ανίχνευση φάσματος δεν είναι αρκετές ώστε η WSD να προσδιορίσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη e.i.r.p. (equivalent isotropically radiated power).

4.3.1. Όρια e.i.r.p. στην περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας (τεχνική ανίχνευσης)

4.3.1.1. Μεθοδολογία

Η μέγιστη επιτρεπόμενη εντός του μπλοκ e.i.r.p. μιας μεμονωμένης WSD που θα διασφαλίζει ένα καθορισμένο επίπεδο προστασίας μέσα στο ίδιο κανάλι αλλά και σε γειτονικά, προκύπτει από την ελάχιστη ισχύ της υπηρεσίας τηλεοπτικής μετάδοσης. Γενικά, μπορεί να γραφεί με τους παρακάτω τρόπους:

$$P_{IB}^{WSD}(f_{WSD}) = P_{min}^{BS}(f_{BS}) + \mu\sigma_{BS} - PR(f_{WSD} - f_{BS}) - q\sqrt{(\sigma_{BS}^2 + \sigma_{WSD}^2)} - MI - SM + D_{dir} + D_{pol} - G_i + L_f + L_{WSD(HWSD)-BS(HD TT)}(d_{WSD-BS}) \quad (\text{Εξ. 4.3-1})$$

Στην περίπτωση της μη-ομοκαναλικής μετάδοσης, η επιτρεπόμενη εντός του μπλοκ e.i.r.p. μιας μεμονωμένης WSD εκφράζεται με χρήση των όρων ACS και ACLR:

$$P_{IB}^{WSD}(f_{WSD}) = P_{min}^{BS}(f_{BS}) + \mu\sigma_{BS} - PR(0) - 10\log_{10}\left(10^{\frac{-ACS^{BS}(f_{WSD}-f_{BS})}{10}} + 10^{\frac{-ACLR^{WSD}(f_{WSD}-f_{BS})}{10}}\right) - q\sqrt{(\sigma_{BS}^2 + \sigma_{WSD}^2)} - MI - SM + D_{dir} + D_{pol} - G_i + L_f + L_{WSD(HWSD)-BS(HD TT)}(d_{WSD-BS}) \quad (\text{Εξ. 4.3-1'})$$

Όπου:

f_{BS} : η ανιχνευόμενη συχνότητα λειτουργίας ενός τηλεοπτικού πομπού (MHz)

f_{WSD} : η επιδιωκόμενη συχνότητα λειτουργίας μιας WSD (MHz)

$P_{IB}^{WSD}(f_{WSD})$: η μέγιστη επιτρεπόμενη εντός του μπλοκ e.i.r.p. μιας WSD στη συχνότητα f_{CR} (dBm)

$P_{min}^{BS}(f_{BS})$: η ελάχιστη ισχύς του τηλεοπτικού σήματος που λαμβάνεται στην είσοδο της κεραίας τηλεοπτικής λήψης στη συχνότητα f_{BS} (dBm)

$PR(f_{WSD} - f_{BS})$: ο κατάλληλος λόγος προστασίας της τηλεοπτικής μετάδοσης για ένα όφσσετ συχνότητας $f_{CR} - f_{BS}$, με σκοπό την προστασία της τηλεοπτικής λήψης από παρεμβολή προερχόμενη από μια WSD (dB). Σε περιπτώσεις που το επίπεδο του προστατευμένου σήματος είναι κοντά στο επίπεδο ευαισθησίας του δέκτη (δηλαδή, όταν η WSD λειτουργεί κοντά στα όρια της τηλεοπτικής κάλυψης), αυτός ο λόγος προστασίας θα πρέπει να περιλαμβάνει ένα περιθώριο των 3 dB ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν η υποβάθμιση της ευαισθησίας του δέκτη. [25]

$PR(0)$: λόγος προστασίας για ομοκαναλική μετάδοση

d_{WSD-BS} : απόσταση μεταξύ της WSD και της κεραίας τηλεοπτικής λήψης (m)

$L_{CR(HWSD)-BS(HDTT)}(d_{WSD-BS})$: απώλειες διάδοσης σε απόσταση d_{CR-BS} ανάμεσα στην WSD με ύψος κεραίας HWSD και την κεραία τηλεοπτικής λήψης με ύψος κεραίας HDTT (dB)

σ_{BS} : τυπική απόκλιση της σκίασης ανάμεσα στον τηλεοπτικό πομπό και την κεραία τηλεοπτικής λήψης (dB)

σ_{WSD} : τυπική απόκλιση της σκίασης ανάμεσα στην WSD και την κεραία τηλεοπτικής λήψης (dB)

μ : γκαουσιανός παράγοντας εμπιστοσύνης σχετιζόμενος με το ποσοστό της τοποθεσίας-στόχου όπου ζητείται τηλεοπτική κάλυψη

q : γκαουσιανός παράγοντας εμπιστοσύνης σχετιζόμενος με το ποσοστό της τοποθεσίας-στόχου όπου ζητείται προστασία

$\mu\sigma_{BS}$: περιθώριο σκίασης (dB) σχετιζόμενο με τη διακύμανση του επιθυμητού σήματος (τηλεοπτικό)

$q\sqrt{(\sigma_{BS}^2 + \sigma_{WSD}^2)}$: περιθώριο σκίασης (dB) σχετιζόμενο με τη διακύμανση της διαφοράς μεταξύ του παρεμβαλλόμενου σήματος (WSD) και του επιθυμητού σήματος (τηλεοπτικό)

$P_{min}^{BS}(f_{BS}) + \mu_{BS}$: ελάχιστη μέση ισχύς τηλεοπτικού σήματος που λαμβάνεται στην είσοδο της κεραίας τηλεοπτικής λήψης σε συχνότητα f_{BS} (dBm)

MI : περιθώριο πολλαπλής παρεμβολής των 3-6 dB (εξαρτάται από τον αριθμό των παρεμβολών) που λαμβάνει υπόψη τη συνολική παρεμβολή από πολλαπλές (στο ίδιο και σε γειτονικό κανάλι) WSD, οι οποίες λειτουργούν σε δεδομένη περιοχή ταυτόχρονα (3 dB αντιστοιχούν σε 2 παρεμβολές, 5dB σε 3 παρεμβολές, 6 dB σε 4 παρεμβολές)

SM : περιθώριο ασφαλείας (dB). Αυτό το περιθώριο απαιτείται για να παρέχεται προστασία απέναντι σε υπάρχουσες πηγές παρεμβολών, συμπεριλαμβανομένων των παρεμβολών από DTT μεγάλης εμβέλειας, αυθαίρετες παρεμβολές και άλλες κύριες υπηρεσίες. Μπορεί να θεωρηθεί ένα εύρος τιμών (π.χ. 3 με 20 dB). Ορισμένοι διαχειριστές θεωρούν περιθώριο ασφαλείας των 0 dB.

D_{dir} : διαχωρισμός κατευθυντικότητας της κεραίας τηλεοπτικής λήψης σε σχέση με το WSD σήμα (dB)

D_{pol} : διαχωρισμός πόλωσης της κεραίας τηλεοπτικής λήψης σε σχέση με το WSD σήμα (dB)

G_i : ιστροπικό κέρδος κεραίας της εγκατάστασης τηλεοπτικής λήψης

L_f : απώλειες τροφοδοσίας της εγκατάστασης τηλεοπτικής λήψης

$ACS^{BS}(f_{WSD} - f_{BS})$: επιλεκτικότητα γειτονικού καναλιού της κεραίας τηλεοπτικής λήψης για ένα όφσετ συχνότητας $f_{CR} - f_{BS}$ (dB). Είναι $ACS(0) = 0$ dB.

$ACLR^{WSD}(f_{WSD} - f_{BS})$: λόγος διαρροής γειτονικού καναλιού της WSD για ένα όφσετ συχνότητας $f_{CR} - f_{BS}$ (dB). Είναι $ACLR(0) = \infty$ dB.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη εκτός του μπλοκ e.i.r.p. μιας WSD υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{OOB}^{CR} = P_{IB}^{CR}(f_{CR}) - ACLR^{CR} \quad (\text{Εξ. 4.3-2})$$

Όπου:

P_{OOB}^{CR} : η μέγιστη επιτρεπόμενη εκτός του μπλοκ e.i.r.p. μιας WSD (dBm)

$P_{IB}^{CR}(f_{CR})$: η μέγιστη επιτρεπόμενη εντός του μπλοκ e.i.r.p. μιας WSD στη συχνότητα f_{CR} (dBm)

$ACLR^{WSD}$: λόγος διαρροής γειτονικού καναλιού της WSD (dB).

Η ACS αποτελεί ένα εγγενές γνώρισμα της κεραίας τηλεοπτικής λήψης. Μπορεί να εξαχθεί από μετρήσεις του λόγου προστασίας (π.χ. για LTE παρεμβολή σε DVB-T ή για UMTS παρεμβολή σε DVB-T, κ.τ.λ.) εφόσον ο ACLR του παρεμβολέα καθώς και της πηγής αναφοράς που χρησιμοποιείται στις μετρήσεις είναι γνωστοί. Υπάρχουν δύο απόψεις για αυτό το θέμα:

- 1) Η ACS είναι ανεξάρτητη της πηγής παρεμβολών, δηλαδή οι τιμές της ACS που λαμβάνονται από διαφορετικές μετρήσεις προστασίας είναι ίδιες.
- 2) Η ACS εξαρτάται από την πηγή παρεμβολών. Κατά συνέπεια, είναι σημαντική η σωστή επιλογή των μετρήσεων αναφοράς.

Με στόχο τον περιορισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης εντός του μπλοκ e.i.r.p. μιας WSD, ώστε να αποφευχθεί η υπερφόρτωση της κεραίας τηλεοπτικής λήψης, σύμφωνα με την οποία ο δέκτης χάνει την ικανότητά του να διακρίνει παρεμβαλλόμενα σήματα σε συχνότητες διαφορετικές από το επιθυμητό σήμα, εφαρμόζεται η παρακάτω σχέση:

$$P_{IB}^{WSD}(f_{WSD}) = O_{th}^{BS}(f_{WSD} - f_{BS}) + D_{dir} + D_{pol} - G_i + L_f + L_{WSD(HWSD)-BS(HDTT)}(d_{WSD-BS})$$

(Εξ. 4.3-3)

Όπου:

$$O_{th}^{BS}(f_{WSD} - f_{BS}): \text{κατάλληλο κατώφλι υπερφόρτωσης για ένα όφσετ συχνότητας } f_{CR} - f_{BS} \text{ (dBm)}$$

Γενικά, η μέγιστη επιτρεπόμενη εντός του μπλοκ e.i.r.p. μιας μεμονωμένης WSD ώστε να εξασφαλίζεται οποιοδήποτε δοσμένο επίπεδο προστασίας της τηλεοπτικής λήψης από εκπομπές στο ίδιο ή γειτονικό κανάλι, ορίζεται ως η ελάχιστη εντός του μπλοκ e.i.r.p. υπολογισμένης με βάση τους λόγους προστασίας/επιλεκτικότητας γειτονικού καναλιού και του κατωφλίου υπερφόρτωσης για διαφορετικά όφσετ συχνοτήτων.

4.3.1.2. Παραδοχές

Κατά την εφαρμογή της (Εξ. 4.3-1) πρέπει να κάνουμε μια παραδοχή σε σχέση με τους λόγους προστασίας σε γειτονικά κανάλια επισημαίνοντας την

απουσία μετρήσεων για λόγους προστασίας μεταξύ των WSD και των δεκτών τηλεοπτικού σήματος. Βασιζόμενοι σε πληροφορίες που αποκτήθηκαν έως τώρα, οι WSD που ενδεχομένως θα αναπτυχθούν στη ζώνη UHF, αρχικά προορίζονται για να παρέχουν ευρυζωνική σύνδεση στο internet. Είναι, συνεπώς, εύλογο να υποθέσουμε ότι η τεχνολογία μετάδοσης που θα χρησιμοποιηθεί θα βασίζεται σε OFDM, δηλαδή παρόμοια με τεχνολογίες LTE με χαρακτηριστικά θορυβώδους σήματος. Αυτό θα μας επιτρέψει να χρησιμοποιήσουμε, σε μια πρώτη προσέγγιση, τα αποτελέσματα των μελετών που παρουσιάζονται στο [25].

Κατά την εφαρμογή των (Εξ. 4.3-1') και (Εξ. 4.3-2) πρέπει να κάνουμε μια παραδοχή σε σχέση με την τιμή του ACLR για τις WSD. Μια δυνατότητα θα ήταν να υποθέσουμε πως η επιβάρυνση από την επιλεκτικότητα συχνότητας είναι εξίσου κατανεμημένη μεταξύ του τηλεοπτικού δέκτη και της WSD. Σε αυτή την περίπτωση η (Εξ. 4.3-1') γίνεται:

$$P_{IB}^{WSD}(f_{WSD}) = P_{min}^{BS}(f_{BS}) + \mu_{BS} - PR(0) - 3 + ACS^{BS}(f_{WSD} - f_{BS}) - q\sqrt{(\sigma_{BS}^2 + \sigma_{WSD}^2)} - MI - SM + D_{dir} + D_{pol} - G_i + L_f + L_{WSD(HWSD)-BS(HDTT)}(d_{WSD-BS}) \quad (\text{Εξ. 4.3-1''})$$

Και η (Εξ. 4.3-2) γίνεται:

$$P_{OOB}^{CR} = P_{IB}^{CR}(f_{CR}) - ACS^{BS} \quad (\text{Εξ. 4.3-2'})$$

Ωστόσο, απαιτούνται βάσιμες αιτιολογήσεις πριν προχωρήσουμε περαιτέρω με αυτή την πρόταση. Στην περίπτωση που ο ACLR της WSD είναι μικρότερος από την ACS της κεραίας τηλεοπτικής λήψης, η επιτρεπόμενη e.i.r.p. της WSD θα πρέπει να μειωθεί. Σημειώνεται πως τυπικές τιμές της ACS των δεκτών τηλεοπτικού σήματος είναι περίπου τα 60 dB ή παραπάνω.

Μια άλλη δυνατότητα θα ήταν να θέσουμε τον ACLR ίσο με μια κατάλληλη, μεγάλη τιμή αναφοράς ACLR, τον $ACLR_{Const}$, που λαμβάνεται με βάση αριθμητικούς υπολογισμούς και προκύπτουσες τιμές ACS:

$$P_{OOB}^{CR} = P_{IB}^{CR}(f_{CR}) - Const \quad (\text{Εξ. 4.3-2''})$$

4.3.1.3. Όρια e.i.r.p.

Μια αυτόνομη WSD θα πρέπει να ανιχνεύει αξιόπιστα την απουσία τηλεοπτικής λήψης τόσο στην άμεσα γειτονική της περιοχή, όσο και σε ορισμένη απόσταση από την περιοχή της, ώστε να μην παρεμβάλλει σε ομοκαναλική τηλεοπτική λήψη, που θα ήταν διαθέσιμη σε αυτή την απόσταση (αυτό αντιστοιχεί στην περίπτωση που η WSD βρίσκεται εκτός αλλά αρκετά κοντά στα όρια της τηλεοπτικής κάλυψης σε δεδομένη συχνότητα). Η αξιοπιστία της ανίχνευσης

τηλεοπτικού σήματος σε κοντινή απόσταση από την WSD μπορεί να βελτιωθεί λαμβάνοντας υπ' όψιν τα κατάλληλα περιθώρια κρυμμένου κόμβου, δηλαδή ελαττώνοντας το κατώφλι ανίχνευσης. Ωστόσο, παραμένει ένα ζήτημα ως προς τον τρόπο που θα καθορίζεται αυτόνομα η απουσία τηλεοπτικού σήματος σε οποιαδήποτε απόσταση από την περιοχή κάλυψης DTT.

Από τις (Εξ. 4.3-1) και (Εξ. 4.3-2') έπεται πως η προτεινόμενη προσέγγιση απαιτεί γνώση ενός αριθμού παραμέτρων σχετικών με τη διάδοση. Αυτές οι πληροφορίες δεν είναι εκ των προτέρων διαθέσιμες σε μια WSD που λειτουργεί αυτόνομα. Συγκεκριμένα, στις (Εξ. 4.3-1), (Εξ. 4.3-1') και (Εξ. 4.3-1'') οι αποστάσεις " d_{WSD-BS} " μεταξύ της WSD και του τηλεοπτικού δέκτη, η μορφολογία του εδάφους και οι διαταραχές κατά μήκος της διαδρομής, και συνεπώς οι απώλειες διάδοσης και ο σχετικός διαχωρισμός κατευθυντικότητας " D_{dir} " της κεραίας τηλεοπτικής λήψης δεν μπορούν να είναι γνωστά. Επομένως, εξαιτίας αυτής της εγγενούς έλλειψης των κατάλληλων γεωγραφικών πληροφοριών, είναι αδύνατο για μια WSD να προσδιορίσει αξιόπιστα τα όρια εκπομπής της. Έτσι, η εφαρμογή της προσέγγισης για αυτόνομη λειτουργία μιας WSD απαιτεί τη χρήση των πιο συντηρητικών παραμέτρων εκπομπής/λήψης και χαρακτηριστικών διάδοσης, με σκοπό την κάλυψη εντελώς διαφορετικών καταστάσεων που πιθανόν θα συμβούν στην πραγματικότητα.

Υπάρχουν δύο γενικές λειτουργικές συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται από μια WSD:

1. Η συσκευή δεν επιτρέπεται να λειτουργεί μέσα στην περιοχή κάλυψης ενός ομοκαναλικού τηλεοπτικού πομπού.
2. Η συσκευή μπορεί να λειτουργεί μέσα στην περιοχή κάλυψης ενός μη ομοκαναλικού τηλεοπτικού πομπού, υπό τον όρο πως οποιαδήποτε τηλεοπτική λήψη στο συγκεκριμένο κανάλι – που μπορεί να είναι γειτονικό στο κανάλι της WSD – είναι προστατευμένη.

Αυτές οι συνθήκες υποδηλώνουν διαφορετικές περιοχές παρεμβολής μέσα στην τηλεοπτική λήψη (ζώνες αποκλεισμού) που επιτρέπονται για WSD στο ίδιο ή γειτονικά κανάλια. Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί ότι η ελάχιστη μέση ένταση πεδίου της υπηρεσίας τηλεοπτικής μετάδοσης πρέπει να προστατεύεται ανεξάρτητα από το αν η WSD λειτουργεί εντός ή εκτός της περιοχής κάλυψης της υπηρεσίας τηλεοπτικής μετάδοσης.

Η απόσταση ανάμεσα στην WSD και την κεραία τηλεοπτικής λήψης d_{WSD-BS} καθορίζει την ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση λειτουργίας μιας WSD από μια κεραία λήψης DTT. Αυτή η απόσταση, μαζί με το καθορισμένο κριτήριο προστασίας (π.χ. επιτρεπόμενη υποβάθμιση του DTT LP), επιτρέπουν τον υπολογισμό των ορίων εκπομπής.

Επισημαίνοντας τις δυσκολίες που μπορεί να αντιμετωπίσει μία αυτόνομη WSD στην ανίχνευση DTT σημάτων (βλέπε ενότητα 4.3.1.3.1.), καθώς και τα πολύ χαμηλά επίπεδα εκπομπής της WSD που επιτρέπονται σε συνθήκες αυτόνομης λειτουργίας, η λειτουργία αυτή φαίνεται να μην είναι εύλογη. Επομένως, η λειτουργία μιας αυτόνομης WSD επικουρούμενης από μια βάση δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού ίσως χρειάζεται να μελετηθεί.

Μια συνεργατική τεχνική ανίχνευσης μπορεί επίσης να αναφερθεί, σύμφωνα με την οποία διαφορετικές WSD ανταλλάσσουν κοινές πληροφορίες σχετικά με τη συχνότητα και το χρόνο χρήσης του φάσματος. Αυτή η τεχνική αποτελεί μέχρι σήμερα ένα ανοιχτό θέμα για έρευνα.

4.3.1.3.1. Περιορισμοί

Αυτή η ενότητα δίνει μερικά παραδείγματα που καταδεικνύουν ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να έχει η αυτόνομη λειτουργία μιας WSD:

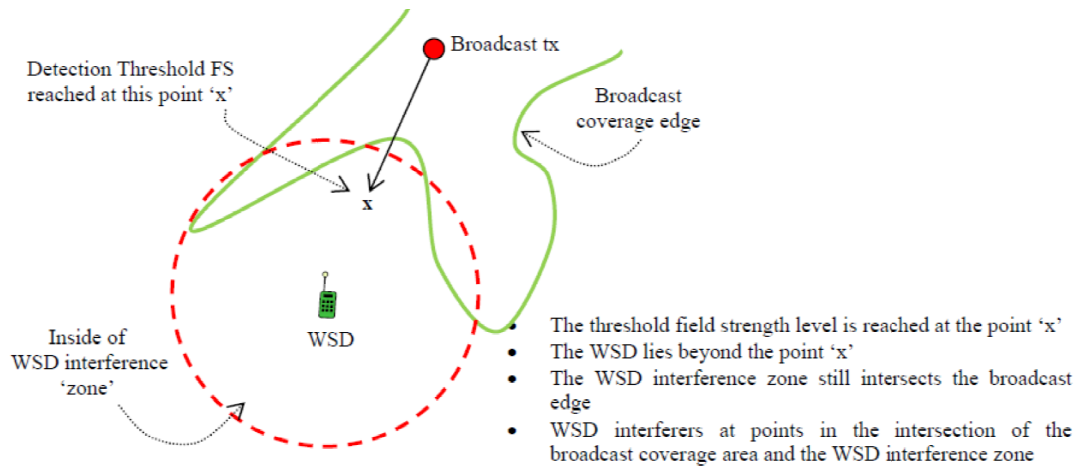
- **Ομοκαναλικές θεωρήσεις**

Εάν η e.i.r.p. μιας WSD είναι 'μεγάλη', τότε και η πιθανή έκταση παρεμβολής θα είναι επίσης 'μεγάλη' απέναντι σε μια υπηρεσία DTT που λειτουργεί στο ίδιο κανάλι. Για παράδειγμα, εάν η έκταση της ομοκαναλικής παρεμβολής μιας WSD είναι της τάξης αρκετών χιλιομέτρων, πιθανόν είναι αναγκαίος ο περιορισμός ή η απαγόρευση της χρήσης του ίδιου καναλιού από μια WSD, και ακόμα σε καθορισμένη απόσταση έξω από την περιοχή κάλυψης DTT (βλέπε σχήμα 14 [22]).

- **Δυσκολίες προσδιορισμού του κατωφλίου ανίχνευσης στο ίδιο κανάλι**

Στην περίπτωση προστασίας μιας περιοχής κάλυψης DTT από ομοκαναλική παρεμβολή WSD προερχόμενης έξω από την περιοχή κάλυψης, το πρόβλημα της ανίχνευσης γίνεται κρίσιμο, διότι η WSD που βρίσκεται εκτός της περιοχής κάλυψης DTT θα αποτελεί εν γένει πιθανό κίνδυνο παρεμβολής σε μεγάλες αποστάσεις. Συνεπώς

- a) Το κατώφλι ανίχνευσης μιας WSD για ανίχνευση DTT σήματος μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερο από το επίπεδο σήματος DTT που απαιτείται για λήψη (όχι μόνο λόγω των 'κρυμμένων κόμβων').
- b) Όπως φαίνεται στο σχήμα 14 [22], ένα σύνθετο περίγραμμα κάλυψης DTT μπορεί να εκμηδενίσει τη χρησιμότητα του κατωφλίου ανίχνευσης DTT σήματος.



Σχήμα 15: Προστασία των περιπλεγμένων περιοχών/ορίων κάλυψης

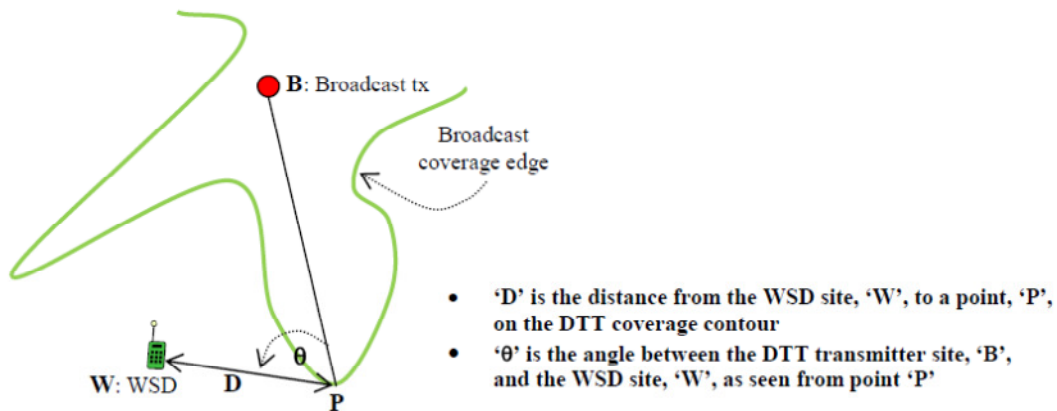
Η κατάσταση που περιγράφηκε στο b) μπορεί να παρουσιαστεί αν η WSD βρίσκεται πέραν του σημείου όπου το επίπεδο του κατωφλίου ανίχνευσης έχει μετρηθεί, αλλά η απόστασή της από τα πιο κοντινά σημεία της γραμμής κάλυψης είναι μικρότερη από την έκταση παρεμβολής της WSD.

Η λύση για να επιτευχθεί προστασία απέναντι σε τέτοιου είδους κίνδυνο παρεμβολής πρέπει να περιλαμβάνει τη δυνατότητα του προσδιορισμού για το αν η WSD είναι

- εντός της περιοχής κάλυψης DTT, όπου σε αυτή την περίπτωση η χρήση αυτής της συχνότητας από την WSD πρέπει να απαγορεύεται, ή
- εκτός της περιοχής κάλυψης DTT, όπου σε αυτή την περίπτωση θα απαιτείται βαθιά γνώση των ορίων κάλυψης και ένα μέσο για τον υπολογισμό της απόστασης από την WSD στα σημεία των ορίων κάλυψης.

Στην τελευταία περίπτωση, πρέπει να επιβληθεί ένας περιορισμός στην e.i.r.p. της WSD ως συνάρτηση της απόστασης και της σχετικής θέσης της WSD, της θέσης του πομπού DTT, και σημείων πάνω στο περίγραμμα κάλυψης DTT. Η γεωμετρική απεικόνιση φαίνεται στο σχήμα 15 [22]. Οι συντεταγμένες της θέσης του πομπού DTT, 'B', και οι συντεταγμένες των σημείων του περιγράμματος κάλυψης DTT, πρέπει να αποθηκευτούν κάπου. Επιπλέον, ένα μέσο υπολογισμού της απόστασης, D, από τη θέση της WSD ως το κάθε σημείο του περιγράμματος, και η σχετική γωνία διαχωρισμού της κεραίας λήψης μεταξύ των διανυσμάτων $\overrightarrow{PB}$ και $\overrightarrow{PW}$ πρέπει να είναι διαθέσιμα.

Ο υπολογισμός της γωνίας μπορεί να γίνει εύκολα με γνώση των συντεταγμένων της θέσης του πομπού DTT, της θέσης της WSD, και εκείνων των σημείων πάνω στο περίγραμμα της κάλυψης DTT.



Σχήμα 16: Γεωμετρία των περιπλεγμένων περιοχών/ορίων κάλυψης

Εφόσον γεωγραφικές πληροφορίες δεν είναι διαθέσιμες σε μία αυτόνομη WSD, φαίνεται πως η συγκεκριμένη, αλλά πολύ σημαντική περίπτωση παρεμβολής μπορεί να επιλυθεί μόνο με τη βοήθεια μιας βάσης δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού, δηλαδή άμεσες μέθοδοι προσδιορισμού κατωφλίων ανίχνευσης δεν μπορούν να θεωρούνται αξιόπιστες.

• Θεωρήσεις γειτονικού καναλιού

Αν η e.i.r.p. μιας WSD είναι ενδεχομένως πολύ μεγάλη, θεωρήσεις παρόμοιες με εκείνες της προηγούμενης υποενότητας πρέπει να γίνουν, αυτή τη φορά σε σχέση με την περιοχή κάλυψης των γειτονικών καναλιών, όταν η WSD βρίσκεται έξω από την περιοχή κάλυψης DTT των γειτονικών καναλιών.

Αν η e.i.r.p. μιας WSD είναι αρκετά μικρή ώστε να μην παρεμβάλλει σε περιοχές κάλυψης DTT γειτονικών καναλιών, τότε ο μόνος περιορισμός στην e.i.r.p. θα βασίζεται στην υπηρεσία DTT που προστατεύεται, στην αντίστοιχη ένταση πεδίου που προστατεύεται, και στην οριζόντια 'απόσταση προστασίας', pd , ως πούμε 1 m ή 2 m. Σε αυτή την περίπτωση, η απόσταση " d_{WSD-BS} " για τον υπολογισμό των απωλειών στις (Εξ. 4.3-1), (Εξ. 4.3-1') και (Εξ. 4.3-1'') είναι:

$$d_{WSD-BS} = \{pd^2 + \Delta h^2\}^{1/2}$$

όπου το Δh είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της WSD (σε ύψος 1.5 m από το επίπεδο του εδάφους, ως πούμε) και της τηλεοπτικής κεραίας λήψης (στα 30 m πάνω από το επίπεδο του εδάφους, ως πούμε). Ο διαχωρισμός της κεραίας

τηλεοπτικής λήψης, στην περίπτωση σταθερής λήψης, D_{dir} , βασίζεται στη γωνία διαχωρισμού:

$$\varphi = \arctan (\Delta h / p d)$$

Από όλους του παραπάνω λόγους μπορούμε να συμπεράνουμε πως η τεχνική της ανίχνευσης που εξετάσαμε, με τη χρήση μιας αυτόνομης WSD (αυτόνομη λειτουργία), δεν εμφανίζεται να είναι επαρκώς αξιόπιστη ώστε να εγγυηθεί τη σωστή ταυτοποίηση των διαθέσιμων καναλιών σε μια δεδομένη περιοχή και την αποφυγή πρόκλησης παρεμβολής σε πιθανές κοντινές ομοκαναλικές περιοχές κάλυψης. Κατά συνέπεια, η χρήση του γεωγραφικού προσδιορισμού με πρόσβαση σε βάση δεδομένων καθίσταται αναγκαία.

4.3.2. Όρια e.i.r.p. στην περίπτωση του γεωγραφικού προσδιορισμού με πρόσβαση σε βάση δεδομένων

4.3.2.1. Βάση δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού

Ο υπολογισμός των κανονικών ορίων εκπομπής μιας αυτόνομης WSD για λειτουργία σε ζώνες DTT αναπόφευκτα πρέπει να βασίζεται σε γεωμετρίες χειρότερης περίπτωσης μεταξύ της παρεμβάλλουσας WSD και του δέκτη DTT. Συνεπώς, η επαρκής προστασία της υπηρεσίας DTT θα έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό των κανονικών ορίων εκπομπής της WSD. Κάτι τέτοιο θα μειώσει τη χρησιμότητα των WSD.

Είναι, ωστόσο, γενικά κατανοητό πως ο βαθμός της επιβλαβούς παρεμβολής σε έναν DTT δέκτη επηρεάζεται σημαντικά από την ποιότητα της κάλυψης DTT στην περιοχή ενδιαφέροντος. Το αποτέλεσμα είναι ότι με τη βοήθεια μιας *βάσης δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού*, τα κανονικά όρια εκπομπής μιας WSD μπορούν να αυξηθούν σημαντικά σε περιοχές όπου η ισχύς του λαμβανόμενου επιθυμητού DTT σήματος είναι υψηλή (δηλαδή, όπου η ποιότητα κάλυψης DTT είναι καλή).

Γι' αυτό το σκοπό, είναι απαραίτητο η βάση δεδομένων να προσδιορίζει τα μέγιστα επιτρεπόμενα επίπεδα εκπομπής μιας WSD προς όλα τα κανάλια DTT και σε όλες τις τοποθεσίες όπου χρησιμοποιείται η υπηρεσία DTT. Για να επιτύχει κάτι τέτοιο, η βάση δεδομένων χρειάζεται να έχει πρόσβαση στις ακόλουθες πληροφορίες:

- 1) Ποιότητα της εθνικής κάλυψης DTT με κατάλληλη χωρική ανάλυση (π.χ. $100\text{m} \times 100\text{m}$).
- 2) Ένα κατάλληλο κριτήριο (ή μέτρο) για ποσοτικοποίηση και προσδιορισμό ενός ανεκτού επιπέδου παρεμβολής στην υπηρεσία DTT.

- 3) Καθορισμένες γεωμετρίες-αναφοράς μεταξύ παρεμβολέα-θύματος για τις οποίες τα κανονικά όρια εκπομπής θα οδηγήσουν στο προσδιορισμένο ανεκτό επίπεδο παρεμβολής.
- 4) Κατάλληλες τιμές λόγων προστασίας WSD σε DTT και κατώφλια υπερφόρτωσης, ορισμένα ως συνάρτηση της συχνότητας διαχωρισμού παρεμβολέα-θύματος ([25] και [26]). Τιμές του C/I (carrier-to-interference ratio) ως συνάρτηση της λαμβανόμενης επιθυμητής DTT ισχύος μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν.
- 5) Μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό των κατάλληλων κανονικών ορίων εκπομπής WSD.

4.3.2.2. Γεωγραφικός προσδιορισμός με βάση δεδομένων και πιθανότητα θέσης (location probability)

Η πιθανότητα θέσης DTT ορίζεται ως η πιθανότητα με την οποία ένας δέκτης DTT θα λειτουργεί σωστά σε συγκεκριμένη θέση, δηλαδή η πιθανότητα με την οποία το μέσο επίπεδο του επιθυμητού σήματος είναι επαρκώς μεγαλύτερο από μια ελάχιστη απαιτούμενη τιμή.

Η πιθανότητα θέσης χρησιμοποιείται ευρέως στο σχεδιασμό των δικτύων DTT με στόχο την ποσοτικοποίηση της ποιότητας κάλυψης, και τυπικά υπολογίζεται για κάθε πίξελ εμβαδού 100m × 100m σε όλη τη χώρα. Η παρουσία οποιουδήποτε παρεμβολέα φυσικά οδηγεί σε μείωση της πιθανότητας θέσης DTT. Αυτή η μείωση είναι, επομένως, ένα ιδιαίτερα κατάλληλο μέτρο για τον προσδιορισμό των κανονικών ορίων εκπομπής των WSD που λειτουργούν σε συχνότητες DTT.

4.3.2.2.1. Ορισμός της πιθανότητας θέσης

Ας θεωρήσουμε ένα πίξελ όπου η πιθανότητα θέσης DTT είναι q_1 κατά την απουσία παρεμβολής από άλλα συστήματα πέρα από το DTT. Τότε μπορούμε να γράψουμε:

$$q_1 = Pr\left\{P_S \geq P_{S,min} + \sum_{i=1}^K r_{U,i} P_{U,i}\right\} = Pr\{P_S \geq U\} \quad (\text{Εξ. 4.3-4})$$

όπου $Pr\{A\}$ είναι η πιθανότητα ενός γεγονότος A, P_S είναι η λαμβανόμενη ισχύς από το επιθυμητό DTT σήμα, $P_{S,min}$ είναι το επίπεδο αναφοράς της ευαισθησίας του δέκτη DTT, $P_{U,k}$ είναι η λαμβανόμενη ισχύς από το k -οστό μη επιθυμητό DTT σήμα, και $r_{U,k}$ είναι ο λόγος προστασίας DTT σε DTT για τον k -οστό DTT παρεμβολέα.

Η παραπάνω εξίσωση είναι άμεσο αποτέλεσμα του ορισμού του λόγου προστασίας, δηλαδή του ελάχιστου λόγου ισχύος του επιθυμητού σήματος προς την ισχύ του σήματος παρεμβολής (όπως μετράται στην είσοδο του δέκτη) που απαιτείται για την ορθή λειτουργία του δέκτη.

Κατά τον σχεδιασμό των DTT δικτύων, το P_S (dBm) και κάθε ξεχωριστό $P_{U,k}$ (dBm) μοντελοποιούνται ως τυχαίες γκαουσιανές μεταβλητές. Σημειώνεται πως στην (Εξ. 4.3-4), οι ισχύες προστίθενται γραμμικά. Γι' αυτόν τον λόγο, ο πιο ακριβής τρόπος υπολογισμού της πιθανότητας q_1 είναι η χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo όπου ένας μεγάλος αριθμός δοκιμών εκτελείται με τιμές για κάθε μεταβλητή, που παράγονται σύμφωνα με την κατανομή Gauss.

4.3.2.2.2. Υπολογισμός του εντός του μπλοκ ορίου εκπομπής μιας WSD για συγκεκριμένη υποβάθμιση της πιθανότητας θέσης.

Στην προηγούμενη ενότητα δείξαμε πώς η πιθανότητα θέσης DTT μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση των μέσων και τυπικών αποκλίσεων της ισχύος ενός DTT σήματος και της ισχύος παρεμβολής DTT σε DTT μέσα σε δοσμένο πίξελ.

Ας θεωρήσουμε τώρα μια WSD που λειτουργεί σε συχνότητα $f_{CR} = f_{DTT} + \Delta f$, και εκπέμπει με μια εντός του μπλοκ e.i.r.p. P_{IB}^{CR} . Επισημαίνουμε πως στην ειδική περίπτωση της ομοκαναλικής παρεμβολής, $\Delta f = 0$.

Η παρουσία παρεμβολής από την WSD αναπόφευκτα θα μειώσει την πιθανότητα θέσης DTT από q_1 σε $q_2 = q_1 - \Delta q$. Υποθέτοντας ένα κέρδος ζεύξης, G , η λαμβανόμενη ισχύς παρεμβολής από την WSD δίνεται από το γινόμενο $G \cdot P_{IB}^{CR}$. Ακολουθώντας το πλαίσιο που περιγράφηκε στην (Εξ. 4.3-3), μπορούμε να γράψουμε:

$$q_2 = Pr \left\{ P_S \geq P_{S,min} + \sum_{i=1}^K r_{U,k} P_{U,k} + r(\Delta f) G P_{IB}^{CR} \right\} \quad (\text{Εξ. 4.3-5})$$

Το κέρδος ζεύξης περιλαμβάνει τις απώλειες διάδοσης, το κέρδος της κεραίας του δέκτη, καθώς επίσης και τον γωνιακό διαχωρισμό και διαχωρισμό πόλωσης της κεραίας του δέκτη. Το κέρδος ζεύξης, G (dB), τυπικά μοντελοποιείται ως τυχαία γκαουσιανή μεταβλητή με μια μέση τιμή, m_G (dB), και μια τυπική απόκλιση σ_G (dB). Σε αυτή την περίπτωση, ωστόσο, θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι υποθέτοντας γκαουσιανή κατανομή για το κέρδος ζεύξης, υπάρχει συμφωνία με το μοντέλο ασύρματης διάδοσης που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του μέσου κέρδους ζεύξης. Το $r(\Delta f)$ είναι ο λόγος προστασίας WSD στην τηλεοπτική εκπομπή για δοσμένο όφσσετ συχνότητας.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η (Εξ. 4.3-5) δεν ισχύει στην περίπτωση αθροιστικής παρεμβολής από πολλαπλές WSD που ενδεχομένως θα παρουσιαστούν σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική τοποθεσία.

Όπως εξηγήθηκε στην περίπτωση της (Εξ. 4.3-4), ο πιο ακριβής υπολογισμός του q_2 μπορεί να γίνει με τη χρήση των προσομοιώσεων Monte Carlo.

4.3.2.2.3. Υπολογισμός του εκτός του μπλοκ ορίου εκπομπής μιας WSD για συγκεκριμένη υποβάθμιση της πιθανότητας θέσης.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη εκτός του μπλοκ e.i.r.p. μιας WSD συνδέεται με την μέγιστη επιτρεπόμενη εντός του μπλοκ e.i.r.p. της WSD μέσω της χρήσης των λόγων προστασίας WSD σε DTT. Αυτό συμβαίνει διότι ο λόγος προστασίας είναι συνάρτηση τόσο της φασματικής διαρροής του πομπού WSD, όσο και της φασματικής επιλεκτικότητας του δέκτη DTT. Συγκεκριμένα, ο λόγος προστασίας $r(\Delta f)$ δίνεται από τη σχέση:

$$r(\Delta f) = \frac{P_S^*}{P_{AC}^*} = \frac{P_S^* P_I^*}{P_I^* P_{AC}^*} = r(0) \frac{1}{ACIR(\Delta f)} = r(0) \{ ACLR_{CR}^{-1}(\Delta f) + ACS_{DTT}^{-1}(\Delta f) \} \quad (\text{Εξ. 4.3-6})$$

όπου το * δηλώνει την τιμή στο σημείο της αποτυχίας δέκτη, P_I είναι η ισχύς παρεμβολής, και P_{AC} είναι η ισχύς του παρεμβολέα γειτονικού καναλιού. ACIR είναι ο λόγος παρεμβολής γειτονικού καναλιού, $ACLR_{WSD}$ είναι ο λόγος διαρροής γειτονικού καναλιού του πομπού WSD, και ACS_{DTT} είναι η επιλεκτικότητα γειτονικού καναλιού του δέκτη DTT.

Αν η επιλεκτικότητα του δέκτη ορίζεται ως συνάρτηση της ισχύος του επιθυμητού σήματος, τότε οι λόγοι προστασίας μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς (υπερφόρτωση) του δέκτη DTT.

Ο λόγος προστασίας $r(\Delta f)$ προσδιορίζει τη φασματική διαρροή της WSD μέσω του λόγου διαρροής γειτονικού καναλιού $ACLR_{WSD}(\Delta f)$.

Τότε, εκ του ορισμού, το μέγιστο επιτρεπόμενο εκτός του μπλοκ επίπεδο εκπομπής της WSD δίνεται (σε λογαριθμικό πεδίο) από τη σχέση:

$$P_{OOb}^{CR}(\Delta f) = P_{IB}^{CR} - ACLR_{CR}(\Delta f) \quad (\text{Εξ. 4.3-7})$$

Φυσικά, το μέγεθος της παρεμβολής που προκαλείται από μια WSD είναι συνάρτηση τόσο του εντός του μπλοκ, όσο και του εκτός του μπλοκ επιπέδου εκπομπής.

Από τη στιγμή που ο ACLR της WSD εμπεριέχεται στους λόγους προστασίας, είναι σημαντικό τεχνικές προτυποποίησης να καθορίζουν τον ACLR των WSD για χρήση στις βάσεις δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού. Διαφορετικά, η βάση

δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού θα πρέπει να δημιουργηθεί με βάση μια τιμή ACLR που είναι αντιπροσωπευτική μόνο στην περίπτωση φασματικής διαρροής μιας WSD.

4.3.2.3. Υπολογισμοί της βάσης δεδομένων

Σε αυτή την ενότητα συνοψίζονται οι τύποι υπολογισμών, που μια βάση δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού πρέπει να εκτελέσει με σκοπό τον προσδιορισμό των κανονικών ορίων εκπομπής μιας WSD σε κάθε θέση, όπως ορίζονται για όλες τις DTT συχνότητες.

Πιο συγκεκριμένα, για ένα δεδομένο γεωγραφικό πίκσελ, η βάση δεδομένων πρέπει να εξετάσει όλα τα σχετικά σενάρια ομακαναλικής παρεμβολής και παρεμβολής γειτονικού καναλιού σε σχέση με τα DTT κανάλια-θύματα. Κάθε διαχωρισμός συχνότητας WSD σε DTT θα οδηγήσει στα μέγιστα επιτρεπόμενα εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ επίπεδα εκπομπής που απαιτούνται για ένα ανεκτό επίπεδο παρεμβολής σε υπηρεσίες DTT. Αυτοί οι υπολογισμοί περιγράφονται περαιτέρω στην ενότητα 4.3.2.3.1.

Συνεπώς, φαίνεται πως η βάση δεδομένων θα πρέπει να προσαρμόσει όλα τα υπολογισμένα εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ επίπεδα εκπομπής μιας WSD για ένα δεδομένο πίκσελ, ώστε να εξάγει τα κανονικά επίπεδα εκπομπής της WSD προς όλες τις συχνότητες DTT. Αυτό επεξηγείται με ένα απλό παράδειγμα στην ενότητα 4.3.2.3.2.

4.3.2.3.1. Υπολογισμός των εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ επιπέδων για συγκεκριμένη θέση, για δεδομένο διαχωρισμό συχνότητας μεταξύ μιας WSD και ενός DTT καναλιού θύματος.

Οι ακόλουθοι υπολογισμοί πρέπει να εκτελούνται για οποιοδήποτε πίκσελ όπου η WSD λειτουργεί, και για όλους τους διαχωρισμούς συχνότητας μεταξύ του καναλιού λειτουργίας WSD και των DTT καναλιών-θυμάτων:

- 1) Η βάση δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού πρέπει να γνωρίζει τις συχνότητες, τη μέση τιμή $m_{S(dBm)}$ και την τυπική απόκλιση $\sigma_{S(dB)}$ της ισχύος/πεδιακής έντασης του λαμβανόμενου DTT σήματος, τη μέση τιμή $m_{U(dBm)}$ και την τυπική απόκλιση $\sigma_{U(dB)}$ της ισχύος/πεδιακής έντασης του παρεμβολέα DTT, όπως και την προκύπτουσα πιθανότητα θέσης q_1 σε κάθε γεωγραφικό πίκσελ. Οι παραπάνω παράμετροι μπορούν να ληφθούν από το εθνικό μοντέλο σχεδιασμού των DTT δικτύων. Στην περίπτωση απουσίας ενός τέτοιου μοντέλου, οι παραπάνω παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν

με σαφήνεια με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις τοποθεσίες των πομπών DTT, όπως περιγράφεται στην (Εξ. 4.3-4).

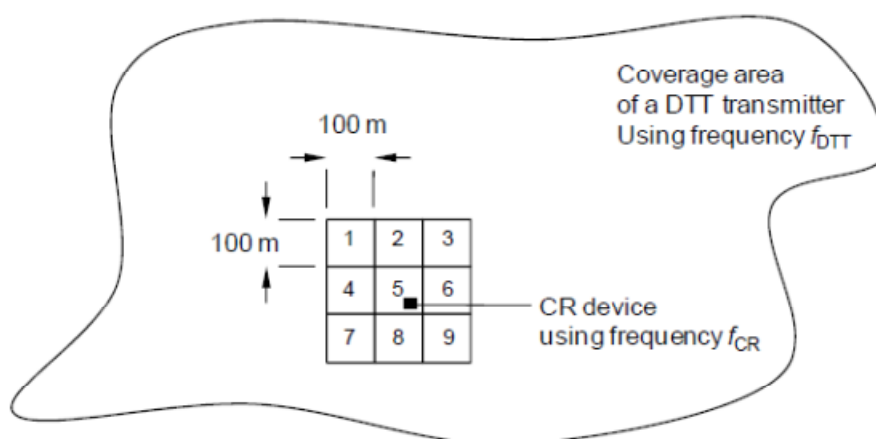
- 2) Η βάση δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού πρέπει στη συνέχεια να υπολογίσει τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των απωλειών ζεύξης μεταξύ του παρεμβολέα-WSD και του θύματος-δέκτη DTT. Αυτό απαιτεί τη χρήση κατάλληλων μοντέλων διάδοσης και γεωμετρικών παρεμβολέα-θύματος. Η επιλογή τέτοιων γεωμετρικών θα μπορούσε να υποστηρίζεται από πληροφορίες που παρέχονται από την WSD από ερωτήσεις προς τη βάση δεδομένων (π.χ. κατεύθυνση στόχευσης της κεραίας, τύπος της κεραίας που χρησιμοποιείται, κ.τ.λ.). Για θύματα-κανάλια DTT που χρησιμοποιούνται από την υπηρεσία DTT στο ίδιο πίκσελ με την WSD, το κέρδος ζεύξης πρέπει να βασίζεται σε μια γεωμετρία συνύπαρξης αναφοράς που θεωρείται κατάλληλη στο πλαίσιο της προστασίας της πλατφόρμας DTT. Μια τέτοια γεωμετρία αναφοράς είναι απαραίτητη επειδή ο ακριβής χωρικός διαχωρισμός ανάμεσα στην WSD και το θύμα-δέκτη DTT μέσα στο συγκεκριμένο πίκσελ δεν μπορεί να είναι γνωστός από τη βάση δεδομένων. Για θύματα-κανάλια DTT που δεν χρησιμοποιούνται από την υπηρεσία DTT στο ίδιο πίκσελ με την WSD, το κέρδος ζεύξης μπορεί να βασίζεται στον πραγματικό χωρικό διαχωρισμό ανάμεσα στο πίκσελ όπου λειτουργεί η WSD και στο πίκσελ όπου το κανάλι DTT χρησιμοποιείται από την υπηρεσία DTT.
- 3) Η βάση δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού πρέπει επίσης να υποθέσει μια ανεκτή υποβάθμιση, $\Delta q = q_1 - q_2$, της πιθανότητας θέσης DTT στα πίκσελ όπου χρησιμοποιούνται οι υπηρεσίες DTT.
- 4) Η βάση δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού πρέπει να υποθέσει έναν κατάλληλο $ACLR$ για την WSD. Αυτός ο $ACLR$ θα είναι συνάρτηση του διαχωρισμού συχνότητας Δf μεταξύ της WSD και του θύματος-καναλιού DTT. Σε συνδυασμό με τις τιμές ACS του δέκτη DTT (προερχόμενες από μετρημένες τιμές PR και $ACLR$), η βάση δεδομένων πρέπει να υπολογίσει τους κατάλληλους λόγους προστασίας WSD σε DTT $r(\Delta f)$, όπως περιγράφεται στην (Εξ. 4.3-6).
- 5) Με υπολογισμένες τις παραπάνω παραμέτρους, η βάση δεδομένων μπορεί άμεσα να υπολογίσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ e.i.r.p. της WSD, που δίνονται:

$$P_{IB}^{CR} (dBm) \leq m_Z (dBm) - m_G (dB) - r(\Delta f)_{(dB)} - \mu(q_2) \sqrt{\sigma_Z^2 (dB) + \sigma_G^2 (dB)} + IM_{(dB)}$$

$$P_{OoB}^{CR}(\Delta f) \leq P_{IB}^{CR} - ACLR_{CR}(\Delta f)$$

Είναι αυτονόητο πως ο υπολογισμός της εκτός του μπλοκ e.i.r.p. δεν εφαρμόζεται στην περίπτωση της ομοκαναλικής παρεμβολής.

Εξαιτίας των πιθανών ανακρίβειών (ή σφαλμάτων εκτίμησης) στις αναφερθείσες θέσεις εντός ενός πίκσελ, θα ήταν συνετό τα παραπάνω επίπεδα μέγιστης επιτρεπόμενης εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ e.i.r.p. για τη λειτουργία μιας WSD εντός ενός πίκσελ, να ορίζονται ως τα ελάχιστα εκείνων που υπολογίστηκαν για τα M περιβάλλοντα πίκσελ. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 16 [22] για $M = 8$. Η προσέγγιση αυτή αντιπροσωπεύει επίσης τις περιπτώσεις όπου μια WSD μέσα σε ένα πίκσελ είναι στην πραγματικότητα κοντά σε ένα θύμα σε γειτονικό πίκσελ ή στην περίπτωση όπου μια WSD-αφέντης ρωτά τη βάση δεδομένων για ολόκληρη την περιοχή εξυπηρέτησης (σε αυτή την περίπτωση το M θα συμπεριλαμβανόταν στις ερωτήσεις βάσης δεδομένων).



Σχήμα 17: Υπολογισμοί στα περιβάλλοντα πίκσελ ώστε να συνεκτιμηθούν τα σφάλματα θέσης της WSD.

4.3.2.3.2. *Εναρμόνιση των υπολογισμένων εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ επιπέδων μιας WSD για την εξαγωγή των κανονικών ορίων εκπομπής προς όλα τα κανάλια DTT.*

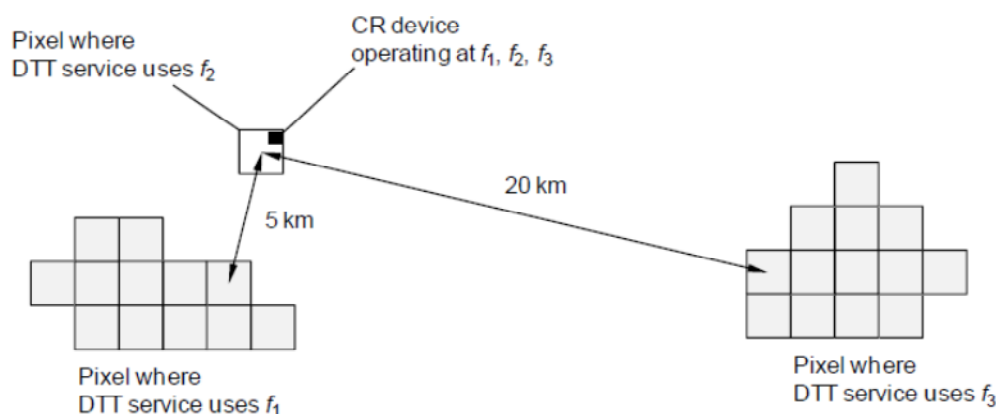
Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως όλα τα κανάλια DTT μπορούν να είναι πιθανά θύματα της λειτουργίας μιας WSD σε δεδομένο πίκσελ. Ωστόσο, οι επικίνδυνες περιπτώσεις αντιστοιχούν σε εκείνα τα κανάλια DTT που είναι κοντά σε συχνότητα με τις εντός του μπλοκ εκπομπές μιας WSD (π.χ. μέχρι και $N \pm 9$) και/ή σε εκείνα τα κανάλια DTT που χρησιμοποιούνται από την υπηρεσία DTT σε περιοχές κοντά στο πίκσελ όπου λειτουργεί η WSD. Είναι, συνεπώς, σημαντικό όλες οι περιπτώσεις (ή τουλάχιστον οι επικίνδυνες περιπτώσεις) να εξετάζονται από τη βάση δεδομένων, και τα κατάλληλα επίπεδα εκπομπής εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ μιας WSD να υπολογίζονται για κάθε περίπτωση.

Αφού έχουν εκτελεστεί οι υπολογισμοί, είναι σημαντικό τα εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ όρια να προσαρμόζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχεται ένα σταθερό σύνολο των κανονικών ορίων εκπομπής WSD προς όλα τα κανάλια DTT

(και για την ταυτόχρονη προστασία αυτών). Επεξηγούμε αυτό το λεπτό σημείο μέσω ενός απλού παραδείγματος.

Ας θεωρήσουμε μια τεχνητή περίπτωση όπου υπάρχουν συνολικά 3 DTT κανάλια σε συχνότητες f_1 , f_2 και f_3 . Ας εστιάσουμε, επίσης, σε ένα συγκεκριμένο πίξελ όπου λειτουργεί η WSD. Για να απλοποιήσουμε την περιγραφή, και για επεξηγηματικούς λόγους μόνο, αγνοούμε τις τυπικές αποκλίσεις όλων των επιθυμητών και παρεμβαλλόμενων σημάτων και υποθέτουμε ότι ένας δέκτης-θύμα DTT είναι προστατευμένος όσο η λαμβανόμενη ισχύς του παρεμβαλλόμενου σήματος είναι μικρότερη από τη λαμβανόμενη ισχύ σήματος DTT μείον τον σχετικό λόγο προστασίας.

Το σχήμα 17 [22] παρουσιάζει το χωρικό πρότυπο που έχει υποθεθεί για τη χρήση των τριών καναλιών DTT. Όπως φαίνεται, η WSD λειτουργεί σε συγκεκριμένο πίξελ μέσα στο οποίο το δίκτυο DTT χρησιμοποιεί τη συχνότητα f_2 (γι' αυτό το λόγο ένας διαχωρισμός αναφοράς μόλις 22 m), ενώ οι συχνότητες f_1 και f_3 χρησιμοποιούνται σε άλλα απομακρυσμένα πίξελ, εκ των οποίων τα πιο κοντινά (ή πιο συγκεκριμένα, τα πιο ευάλωτα σε παρεμβολή) απέχουν 5 και 20 km από το πίξελ ενδιαφέροντος, αντίστοιχως.



Σχήμα 18: Χρήση των συχνοτήτων f_1 , f_2 και f_3 από την WSD και την υπηρεσία DTT. Τα πιο κοντινά πίξελ όπου χρησιμοποιούνται οι f_1 και f_3 από την υπηρεσία DTT βρίσκονται 5 και 20 km μακριά, αντίστοιχα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για κάθε συνδυασμό συχνότητας λειτουργίας της WSD και της συχνότητας του θύματος DTT, η βάση δεδομένων μπορεί να υπολογίσει τις μέγιστες επιτρεπόμενες εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ e.i.r.p. για μια WSD που εκπέμπει μέσα στο συγκεκριμένο πίξελ. Η βάση δεδομένων πρέπει στη συνέχεια να δημιουργήσει τους παρακάτω τρεις πίνακες για το συγκεκριμένο πίξελ. Ο πίνακας 4 [22] περιγράφει τα υπολογισμένα μέγιστα επιτρεπόμενα επίπεδα

e.i.r.p. για μια WSD που λειτουργεί σε συχνότητα f_1 μέσα στο πίκσελ. Ο πίνακας 5 [22] και ο πίνακας 6 [22] περιγράφουν τα επιτρεπόμενα επίπεδα e.i.r.p. για μια WSD που λειτουργεί σε συχνότητες f_2 και f_3 , αντίστοιχα.

Ας σημειωθεί πως οι αριθμητικές τιμές στους πίνακες έχουν επιλεγεί ως παραδείγματα και προορίζονται μόνο για την επεξήγηση των χειρισμών που πρέπει να πραγματοποιήσει η βάση δεδομένων. Για λόγους απλότητας, υποθέτουμε ότι η ισχύς σήματος DTT στο δέκτη-θύμα DTT είναι -70 dBm σε κάθε πίκσελ ενδιαφέροντος. Επίσης, υποθέτουμε $ACLR$ των WSD στα 33 και 36 dB στο πρώτο και δεύτερο γειτονικό κανάλι. Σε συνδυασμό με τις ACS των 56 και 61 dB, και με έναν ομοκαναλικό λόγο προστασίας των 16 dB, συνεπάγονται λόγοι προστασίας των -17 και -20 dB στο πρώτο και δεύτερο γειτονικό κανάλι. Να σημειωθεί επίσης, ότι ενώ για απλότητα ο διαχωρισμός θύματος-παρεμβολέα χρησιμοποιείται ως δείκτης του ενδεχόμενου παρεμβολής, στην πραγματικότητα το κέρδος ζεύξης (ενσωματώνοντας το κέρδος διάδοσης στα 650 MHz από το μοντέλο Hata για ημιαστικές περιοχές, το κέρδος της κεραίας τηλεοπτικής λήψης στα 9.15 dBi, και τον διαχωρισμό γωνίας/πόλωσης στα 3 dB) είναι ο σημαντικός παράγοντας. Τα μέγιστα επιτρεπόμενα εντός του μπλοκ επίπεδα e.i.r.p. μιας WSD στη συνέχεια υπολογίζονται ως η ισχύς σήματος DTT μείον το λόγο προστασίας συν το κέρδος ζεύξης.

WSD operating frequency $f_{WSD} = f_1$				
Victim DTT channel frequency f_{DTT}	WSD-to-TV separation (coupling gain)	Protection ratio (dB)	WSD in-block e.i.r.p. over $f_{WSD} = f_1$ (dBm)	WSD out-of-block e.i.r.p. over f_{DTT} (dBm)
f_1	5 km (-142 dB)	+16	56	N/A
f_2	22 m (-50 dB)	-17	-3	-36
f_3	20 km (-165 dB)	-20	115	79

Πίνακας 4: Εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ όρια εκπομπής υπολογισμένα για μια WSD που λειτουργεί σε συχνότητα f_1 .

WSD operating frequency $f_{WSD} = f_2$				
Victim DTT channel frequency f_{DTT}	WSD-to-TV separation (coupling gain)	Protection ratio (dB)	WSD in-block e.i.r.p. over $f_{WSD} = f_2$ (dBm)	WSD out-of-block e.i.r.p. over f_{DTT} (dBm)
f_1	5 km (-142 dB)	-17	89	56
f_2	22 m (-50 dB)	+16	-36	N/A
f_3	20 km (-165 dB)	-17	112	79

Πίνακας 5: Εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ όρια εκπομπής υπολογισμένα για μια WSD που λειτουργεί σε συχνότητα f_2 .

WSD operating frequency $f_{\text{WSD}} = f_3$				
Victim DTT channel frequency f_{DTT}	WSD-to-TV separation (coupling gain)	Protection ratio (dB)	WSD in-block e.i.r.p. over $f_{\text{WSD}} = f_3$ (dBm)	WSD out-of-block e.i.r.p. over f_{DTT} (dBm)
f_1	5 km (-142 dB)	-20	92	56
f_2	22 m (-50 dB)	-17	-3	-36
f_3	20 km (-165 dB)	+16	79	N/A

Πίνακας 6: Εντός του μπλοκ και εκτός του μπλοκ όρια εκπομπής υπολογισμένα για μια WSD που λειτουργεί σε συχνότητα f_3 .

Ο πίνακας 4 δείχνει ότι, εάν μια WSD θέλει να λειτουργήσει σε συχνότητα f_1 μέσα στο πίκσελ ενδιαφέροντος, τότε η προστασία του καναλιού DTT με συχνότητα f_2 είναι η πιο δύσκολη περίπτωση. Και αυτό διότι η f_2 χρησιμοποιείται από την υπηρεσία DTT στο ίδιο πίκσελ όπου λειτουργεί και η WSD. Γι' αυτό το λόγο, η WSD επιτρέπεται να εκπέμπει το πολύ έως -3 dBm σε συχνότητα f_1 . Ο πίνακας 4 δείχνει επίσης, ότι το μέγιστο επιτρεπόμενο εκτός του μπλοκ επίπεδο εκπομπής της WSD είναι -36 dBm για f_2 (33 dBm λιγότερο από ότι το εντός του μπλοκ επίπεδο των -3 dBm).

Στο επόμενο βήμα η βάση δεδομένων θα πρέπει να συνθέσει τα μέγιστα επιτρεπόμενα εντός του μπλοκ επίπεδα εκπομπής της WSD που απεικονίστηκαν στους πίνακες 4, 5 και 6 σε ένα σταθερό σύνολο κανονικών ορίων εκπομπής σε συχνότητες f_1 , f_2 και f_3 .

Ο πίνακας 7 παρουσιάζει αυτή την απαιτούμενη σύνθεση. Τα κανονικά όρια εκπομπής, που εφαρμόζονται για εκπομπή της WSD προς όλα τα κανάλια DTT, είναι τα ελάχιστα των υπολογισμένων μέγιστων επιτρεπόμενων εντός του μπλοκ επιπέδων εκπομπής που εξήχθησαν από τους πίνακες 4, 5 και 6.

Frequency of emission, f	Regulatory emission limit (dBm)
f_1	-3
f_2	-36
f_3	-3

Πίνακας 7: Κανονικά όρια εκπομπής

Στον πραγματικό κόσμο όπου πρέπει να καταρτίσουμε τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπής WSD προς όλα τα UHF DTT κανάλια από το 21 έως το 60, η βάση δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού πρέπει να δημιουργήσει 40 τέτοιους πίνακες για κάθε πίκσελ μέσα στο οποίο μπορεί να βρεθεί η WSD. Είναι, επίσης, αξιοσημείωτο πως κάθε πίνακας θα πρέπει να εξετάζει τα πίκσελ-θύματα που είναι πιο ευάλωτα σε παρεμβολή για κάθε κανάλι DTT. Φυσικά, τέτοιοι υπολογισμοί δεν

απαιτείται να εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο, και παρά τον μεγάλο όγκο των υπολογισμών, δεν είναι απαγορευτικά πολύπλοκοι.

4.4. Συμπεράσματα σχετικά με την προστασία της τηλεοπτικής μετάδοσης

Το κεφάλαιο 4 ασχολήθηκε με τη μέθοδο υπολογισμού του κατωφλίου ανίχνευσης και των ορίων εκπομπής WSD για διάφορους σχηματισμούς. Τα κατώφλια ανίχνευσης προέκυψαν για περιορισμένο αριθμό περιπτώσεων με τη χρήση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε παραπάνω. Μερικές από τις τιμές που προέκυψαν (μέσα στο εύρος από -91 ως -155 dBm ανάλογα με το σενάριο σχεδιασμού DTT) εμφανίζονται να είναι πολύ χαμηλές για να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας υπάρχουσες τεχνολογίες. Επιπλέον, σε κάποιες περιπτώσεις, ακόμα και αυτές οι χαμηλές τιμές του κατωφλίου ανίχνευσης δεν εγγυώνται μια αξιόπιστη ανίχνευση της παρουσίας/απουσίας των τηλεοπτικών σημάτων στην απόσταση που αντιστοιχεί το ενδεχόμενο παρεμβολής μιας WSD.

Το κατά πόσο μπορεί να είναι εφικτή η αξιόπιστη αυτόνομη λειτουργία των WSD που χρησιμοποιούν τη μέθοδο της ανίχνευσης, θα πρέπει να εξεταστεί περαιτέρω λαμβάνοντας υπ' όψιν τις δυνατότητες που προσφέρονται από τεχνικές συνεργατικής ανίχνευσης και από την εμπειρία που θα αποκομισθεί από δοκιμές ανίχνευσης πεδίου. Επιπλέον, οι μελλοντικές εργασίες πάνω στην ανίχνευση θα πρέπει να αντιμετωπίζουν τις λειτουργικές απαιτήσεις των WSD και την επίδραση των αρχιτεκτονικών WSD στο κατώφλι ανίχνευσης.

Στην ενότητα 4.3.2.3. παρουσιάστηκαν οι τύποι των υπολογισμών που μια βάση δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού θα πρέπει να εκτελέσει, ώστε να υπολογίσει τα συγκεκριμένα για κάθε θέση μέγιστα επιτρεπόμενα επίπεδα e.i.r.p. των WSD σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Εξετάστηκε επίσης, το πώς αυτές οι τιμές μπορούν να προσαρμοστούν για την εξαγωγή σταθερών κανονικών ορίων εκπομπής των WSD για την ταυτόχρονη προστασία πολλαπλών καναλιών DTT. Επιπλέον, αναφέρθηκε το πώς τα μοντέλα σχεδιασμού DTT μπορούν να χρησιμοποιηθούν γι' αυτούς τους σκοπούς.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως οποιαδήποτε επιβλαβής παρεμβολή που προκαλείται στη λήψη DTT είναι συνάρτηση τόσο των εντός του μπλοκ, όσο και εκτός του μπλοκ εκπομπών των WSD. Ο υπολογισμός του μέγιστου επιτρεπόμενου εντός του μπλοκ ορίου e.i.r.p. απαιτεί μια υπόθεση σε σχέση με τη φασματική διαρροή της WSD.

Συνιστάται η βάση δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού να παρέχει σε μια WSD τη λίστα των διαθέσιμων συχνοτήτων, αλλά και τις σχετικές τιμές των μέγιστων επιτρεπόμενων e.i.r.p. Θα είναι απαραίτητο να καθοριστεί ή να υποτεθεί ένας ελάχιστος απαιτούμενος λόγος διαρροής γειτονικού καναλιού (ACLR) των WSD για χρήση από τις βάσεις δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού. Οι ρυθμιστικές αρχές που προτίθενται να εγκρίνουν τη χρήση των WSD με πρόσβαση σε βάση δεδομένων μπορούν να αποφασίσουν για τις πιο κατάλληλες παραμέτρους/αλγορίθμους ανάλογα με τις συγκεκριμένες περιστάσεις.

Δεν είναι αναγκαίο να εκτελούνται οι υπολογισμοί με βάση μια προκαθορισμένη σταθερή τιμή για τη μέγιστη επιτρεπόμενη e.i.r.p. των WSD όταν λειτουργούν με τη βοήθεια της βάσης δεδομένων γεωγραφικού προσδιορισμού. Ωστόσο, οι ρυθμιστικές αρχές θα μπορούν να αποφασίζουν τον προσδιορισμό των μέγιστων επιτρεπόμενων e.i.r.p. των WSD λαμβάνοντας υπ' όψιν τις υλοποιήσεις DTT. Σε ορισμένες περιπτώσεις ίσως υπάρχει ανάγκη να περιοριστεί η e.i.r.p. των WSD ώστε να αποφευχθούν ζητήματα σχετιζόμενα με πιθανή παρεμβολή εντός της τηλεοπτικής μετάδοσης.

Αναμένεται πως οργανισμοί προτυποποίησης, όπως ο ETSI, είναι πιθανό να προσδιορίσουν τη μέγιστη ισχύ εξόδου για τις WSD με βάση τους τεχνολογικούς περιορισμούς ή λαμβάνοντας υπ' όψιν συγκεκριμένα μοντέλα χρήσης.

5. Μη αδειοδοτημένες εκπομπές στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης και η επίδρασή τους στις υφιστάμενες υπηρεσίες.

5.1. Εισαγωγή

Για την προώθηση της πιο αποδοτικής και αποτελεσματικής χρήσης του τηλεοπτικού φάσματος, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC), και οι διαχειριστές φάσματος σε άλλα μέρη του κόσμου, έχουν θεσπίσει κανόνες που επιτρέπουν τη λειτουργία των μη-αδειοδοτημένων συσκευών (Unlicensed Devices – UD) στα Λευκά Φασματικά Κενά Τηλεόρασης (δηλαδή, στο τηλεοπτικό φάσμα που δεν χρησιμοποιείται), υπό την προϋπόθεση πως οι υφιστάμενες υπηρεσίες δεν θα παρενοχλούνται. Κάτι τέτοιο δίνει τη δυνατότητα για τη δημιουργία νέων και καινοτόμων προϊόντων, π.χ. την τροφοδότηση των καταναλωτών και των επιχειρήσεων με ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες δεδομένων. [28]

Οι UD κατηγοριοποιούνται σε δύο τύπους: σταθερές συσκευές υψηλής ισχύος (π.χ. σταθμοί βάσης για ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση) και προσωπικές / φορητές συσκευές χαμηλής ισχύος (που αποτελούν μέρη ενός εσωτερικού ασύρματου δικτύου, για παράδειγμα). Όλες οι UD θα πρέπει να διαθέτουν την ικανότητα ανίχνευσης φάσματος (εξ ου και ο όρος «γνωστικές ραδιο-συσκευές») που θα επιτρέπει την ανίχνευση της παρουσίας υφιστάμενων υπηρεσιών (π.χ. τηλεοπτικών εκπομπών και ασύρματων μικροφώνων), προκειμένου να αποφευχθεί η ομοκαναλική λειτουργία με τις τελευταίες.

Αν και οι σταθερές UD περιορίζονται, επίσης, στο να λειτουργούν σε κανάλια άμεσα γειτονικά σε ένα κατειλημμένο τηλεοπτικό κανάλι, η λειτουργία σε γειτονικό κανάλι επιτρέπεται στην περίπτωση των προσωπικών/φορητών UD [29] και το γεγονός αυτό αποτελεί το κίνητρο της παρούσας μελέτης. Κύριο μέλημά μας είναι η παρεμβολή γειτονικού καναλιού (Adjacent Channel Interference - ACI) προς τις υφιστάμενες υπηρεσίες λόγω των εκτός-ζώνης εκπομπών των προσωπικών/φορητών UD. *Σε ποιο βαθμό οι υφιστάμενες υπηρεσίες μπορούν να παρενοχλούνται ως αποτέλεσμα των μη αδειοδοτημένων μεταδόσεων;* Για να απαντήσουμε στο παραπάνω ερώτημα θα λάβουμε την ακόλουθη προσέγγιση.

Πρώτα μοντελοποιούμε την ύπαρξη μιας ομάδας προσωπικών UD οι οποίες είναι συντονισμένες, υπό την έννοια ότι καθεμιά έχει γνώση για την παρουσία των υπολοίπων κι έτσι να διατηρούν μια απόσταση διαχωρισμού από τους κοντινότερους γείτονές τους, έτσι ώστε η χωρική επαναχρησιμοποίηση του καναλιού να είναι δυνατή. Μια αδειοδοτημένη συσκευή (Licensed Device - LD) βρίσκεται ανάμεσα σε αυτές τις UD, και επηρεάζεται από τις εκτός-ζώνης εκπομπές των UD. Στη συνέχεια διατυπώνουμε τις θεωρίες που μας επιτρέπουν να αναλύσουμε την πιθανότητα διακοπής της παρεχόμενης υπηρεσίας την οποία βιώνει η LD, ως αποτέλεσμα: (i) της ACI που προκαλείται από μη-αδειοδοτημένες εφαρμογές, και

(ii) των διαλείψεων λόγω του φαινομένου της πολλαπλής διάδοσης, και/ή (iii) του φαινομένου της σκίασης (ως αποτέλεσμα της ύπαρξης εμποδίων στη διαδρομή ασύρματης διάδοσης). Συνήθως οι διακυμάνσεις του σήματος που προκαλούνται από τις διαλείψεις λόγω του φαινομένου της πολλαπλής διάδοσης μοντελοποιούνται με την κατανομή Rayleigh [30][31][32] [33]. Η σκίαση, από την άλλη πλευρά, προκαλεί διακυμάνσεις στην τοπική μέση τιμή της στάθμης του σήματος, και συνήθως αναπαριστάται με την λογαριθμοκανονική κατανομή [30] [31] [34]. Το συνδυασμένο αποτέλεσμα από την ύπαρξη και των δύο μοντελοποιείται με την κατανομή Suzuki [31] [35] [36]. Από την άλλη πλευρά, η διακοπή της λειτουργίας της παρεχόμενης υπηρεσίας λαμβάνει χώρα όταν το επίπεδο του λαμβανόμενου σήματος βρίσκεται κάτω από ένα απαιτούμενο κατώφλι. Η μέτρηση της πιθανότητας διακοπής της λειτουργίας αποτελεί ένα μέσο αξιολόγησης της ποιότητας του σήματος ενός ραδιο-συστήματος. Αυτή η τεχνική αξιολόγησης δεν έχει βρεθεί χρήσιμη μόνο στην περίπτωση του σχεδιασμού κυψελωτών συστημάτων, αλλά πρόσφατα έχει χρησιμοποιηθεί και στον σχεδιασμό των ασύρματων συστημάτων διαμοιρασμού φάσματος [36] [37] [38].

Στο παρόν κεφάλαιο διατυπώνουμε ένα θεωρητικό πλαίσιο που μας επιτρέπει να αξιολογούμε την ποιότητα της λήψης του σήματος σε μια LD, ενώ ταυτόχρονα λειτουργούν συντονισμένες UD σε γειτονικό κανάλι της LD. Συγκεκριμένα, έχουν εξαχθεί ακριβείς εκφράσεις για τις πιθανότητες διακοπής για το αδειοδοτημένο σήμα που υποφέρει, πέρα από την ACI, (i) από διαλείψεις Rayleigh μόνο, (ii) από λογαριθμοκανονική σκίαση μόνο, και (iii) από διαλείψεις Rayleigh και λογαριθμοκανονική σκίαση μαζί. Άλλες βασικές παράμετροι που ελήφθησαν υπόψη είναι οι εξής: η απόσταση διαχωρισμού μεταξύ της LD και του αδειοδοτημένου πομπού (π.χ. σταθμός τηλεοπτικής εκπομπής), και η ομοκαναλική απόσταση επαναχρησιμοποίησης μεταξύ δύο UD. Έχουμε, επίσης, επεξεργαστεί τα αποτελέσματα για διάφορα σενάρια για να δείξουμε πώς η πιθανότητα διακοπής θα μπορούσε ενδεχομένως να μεταβληθεί με τις παραπάνω παραμέτρους. Τα αποτελέσματα αυτά μας δίνουν μια εικόνα των συνθηκών με τις οποίες η επίδραση των UD μπορεί να περιοριστεί, π.χ. με το κατάλληλο μέγεθος ή πυκνότητα του δικτύου των UD, την ισχύ εκπομπής των UD, το σχέδιο συντονισμού που απαιτείται, κλπ.

5.2. Σχετικές εργασίες

Απ' όσο γνωρίζουμε, η επίδραση της μη αδειοδοτημένης λειτουργίας στα γειτονικά κανάλια δεν έχει συζητηθεί στη βιβλιογραφία, εκτός από το [39]. Στο [39], ομάδες UD υπό τη μορφή των WiFi hotspots είναι διάσπαρτες γύρω από μια LD και έγινε ανάλυση της πιθανότητας διακοπής, όπου ελήφθη υπόψη μόνο η λογαριθμοκανονική σκίαση. Οι ομάδες των UD είναι ασυντόνιστες, δηλαδή

οποιαδήποτε από αυτές μπορεί να αποκτήσει πρόσβαση σε ένα κενό κανάλι ανά πάσα στιγμή. Για την μοντελοποίηση της σποραδικής κατανομής των ομάδων UD, χρησιμοποιήθηκε η σημειακή ανέλιξη Poisson (Poisson point process).

Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας που πραγματοποιείται στο πεδίο του διαμοιρασμού φάσματος των ασύρματων συστημάτων επικεντρώνεται στις ομοκαναλικές λειτουργίες των UD και LD, όπου συνήθως ορίζεται μια περιοχή αποκλεισμού γύρω από μια LD, μέσα στην οποία οι UD αποφεύγουν τη μετάδοση. Για παράδειγμα, στο [36], έξω από την περιοχή αποκλεισμού θεωρήθηκε ένα πεδίο Poisson (Poisson field) για τις UD, και οι πιθανότητες διακοπής υπολογίστηκαν για τα τρία διαφορετικά μοντέλα καναλιού που εξετάζονται παρακάτω.

Στη βιβλιογραφία, βασικό ερευνητικό ενδιαφέρον αποτελεί η μοντελοποίηση της συνολικής (ομοκαναλικής) παρεμβολής στην LD εξαιτίας των πολλαπλών UD, ορίζοντας τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) των ολικών παρεμβολών. Σε αυτές τις εργασίες, και πάλι θεωρήθηκε ένα πεδίο Poisson για τις UD.

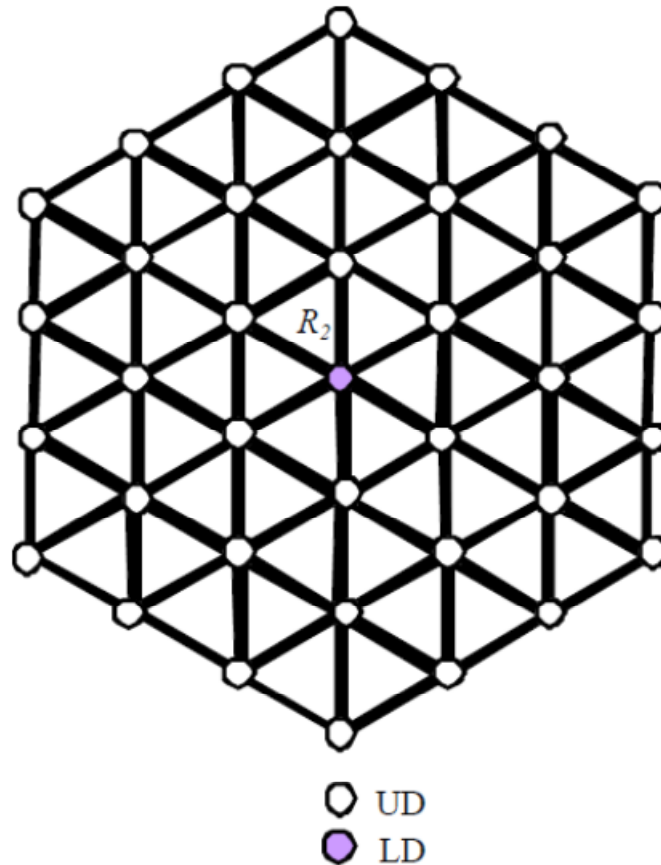
Άλλες πλευρές της έρευνας διαμοιρασμού φάσματος που έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον περιλαμβάνουν: το απαραίτητο μέγεθος προκειμένου η περιοχή αποκλεισμού να είναι αποτελεσματική στην προστασία της LD, την κλιμάκωση της ισχύος των UD και οι επιπτώσεις της, κ.λπ.

Καμία από τις παραπάνω εργασίες δεν έχει εξετάσει το συντονισμό μεταξύ των UD, εκτός από την [40]. Ωστόσο, στη [40], θεωρήθηκε η ομοκαναλική παρεμβολή (cochannel interference - CCI) αντί της ACI. Εμείς, στην παρούσα εργασία, θα ασχοληθούμε με τη λειτουργία των συντονισμένων LD σε γειτονικά κανάλια.

5.3. Το μοντέλο του συστήματος

Μια LD, διαχωρισμένη με μια απόσταση R_1 από τον αδειοδοτημένο πομπό, λαμβάνει μια μέση ισχύ σήματος που συμβολίζεται με m_s . Στην ίδια περιοχή, υπάρχει ένας αριθμός προσωπικών/φορητών UD που λειτουργούν σε κανάλι γειτονικό εκείνου της LD. Ως αποτέλεσμα των εκτός-ζώνης εκπομπών, καθεμιά συμβάλλει με ένα ορισμένο επίπεδο παρεμβολής στην LD. Οι UD είναι συντονισμένες στο κανάλι πρόσβασής τους, που σημαίνει ότι δύο UD σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους δεν μπορούν να έχουν πρόσβαση στο ίδιο κανάλι ταυτόχρονα. Παρ' όλα αυτά, ένα κανάλι μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί χωρικά από τις UD. Ως αποτέλεσμα, κάθε UD διανύει ένα ίχνος ορισμένου μεγέθους, και δύο γειτονικές UD διαχωρίζονται με μια ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση ομοκαναλικής επαναχρησιμοποίησης, R_2 . Αυτό θα σχηματίσει μια εξαγωνική τοπολογία όπως

απεικονίζεται στο σχήμα 18 [28], όπου η LD περιβάλλεται από βαθμίδες UD που παρεμβάλλουν. Υποθέτουμε ότι η LD διαχωρίζεται με απόσταση R_2 από καθεμιά από τις έξι UD πρώτης βαθμίδας.



Σχήμα 19: LD που περιβάλλεται από UD (απεικονίζονται μόνο οι τρεις βαθμίδες). Ο αδειοδοτημένος πομπός δεν φαίνεται στο σχήμα.

Στη βαθμίδα i , υπάρχουν $6i$ UD που είναι περίπου iR_2 μακριά από την LD. Ας πούμε ότι το $m_{UD}(d)$ αντιπροσωπεύει τη λαμβανόμενη μέση ισχύ από μία μόνο UD σε d μονάδες απόστασης μακριά. Ακολουθώντας το log-distance μοντέλο απωλειών διάδοσης,

$$m_{UD}(d) = \frac{m_{UD}(d_0)}{(d/d_0)^k} \quad (\text{Εξ. 5-1})$$

όπου k είναι ο εκθέτης των απωλειών διάδοσης, d_0 είναι η απόσταση διαχωρισμού αναφοράς, όπου $d_0 < d$. Ωστόσο, η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται στο γειτονικό κανάλι θα είναι μειωμένη κατά ένα παράγοντα γ , ως αποτέλεσμα του

φιλτραρίσματος στον δέκτη. Γι' αυτό τον λόγο, η LD που βρίσκεται d μονάδες απόστασης μακριά από μια UD λαμβάνει μια μέση ισχύ $\gamma \cdot m_{UD}(d)$.

Ας πούμε ότι το m_I υποδηλώνει τη μέση τιμή της ισχύος συνολικής παρεμβολής, δηλαδή το άθροισμα των εκτός-ζώνης εκπομπών των UD που συσσωρεύονται στην LD. Ας θεωρήσουμε έναν θεωρητικά άπειρο αριθμό από UD. Η έκφραση για το m_I δίνεται ως εξής:

$$m_I = \gamma \sum_{i=1}^{\infty} 6i \cdot m_{UD}(iR_2) = \gamma \sum_{i=1}^{\infty} 6i \cdot \frac{m_{UD}(d_0)}{(iR_2 / d_0)^k} = \frac{6\gamma \cdot m_{UD}(d_0)}{(R_2 / d_0)^k} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^{k-1}} \quad (\text{Εξ. 5-2})$$

Δίνουμε δύο παραδείγματα για τον υπολογισμό του αθροίσματος στην (Εξ. 5-2):

$$k = 3, \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^{k-1}} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} = \frac{\pi^2}{6} = 1.64493407$$

$$k = 4, \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^{k-1}} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^3} = 1.20205690$$

5.4. Μαθηματική ανάλυση

Για να αποφύγουμε το ενδεχόμενο η LD να υποστεί διακοπή της κανονικής της λειτουργίας, πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες απαιτήσεις [31] - [34] [36]:

- (i) Ελάχιστος απαιτούμενος σήματο-θορυβικός λόγος (SNR): Η ισχύς του σήματος πρέπει να είναι μεγαλύτερη από ένα ελάχιστο απαιτούμενο επίπεδο, S_0 .
- (ii) Ελάχιστος απαιτούμενος λόγος σήματος προς παρεμβολή (SIR): $SIR = x / y$, όπου x είναι η ισχύς του αδειοδοτημένου σήματος, και y η ισχύς συνολικής παρεμβολής που προκαλείται από τις UD.

Η πιθανότητα διακοπής, P_{out} , υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση [32][34]:

$$P_{out} = 1 - \int_{S_0}^{\infty} p(x) \int_0^x p(y) dy dx \quad (\text{Εξ. 5-3})$$

όπου $p(x)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (ΣΠΠ- PDF) της ισχύος του αδειοδοτημένου σήματος, και $p(y)$ είναι η ΣΠΠ της ισχύος συνολικής παρεμβολής.

Συνεχίζουμε με τον ορισμό των δύο βασικών παραμέτρων που απαιτούνται για τον καθορισμό της πιθανότητας διακοπής [31]-[34][36]:

(i) α , το περιθώριο με το οποίο το m_s υπερβαίνει το S_0 .

$$\alpha = m_s / S_0 \quad (\text{Εξ. 5-4})$$

(ii) τ , το περιθώριο με το οποίο το m_s υπερβαίνει το m_l .

$$\tau = \frac{m_s}{m_l} = \frac{m_s (R_2 / d_0)^k}{6\gamma \cdot m_{UD} (d_0) \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^{k-1}}} \quad (\text{Εξ. 5-5})$$

A. Διαλείψεις Rayleigh μόνο

Ας θεωρήσουμε την περίπτωση όπου τόσο τα αδειοδοτημένα, όσο και τα μη αδειοδοτημένα σήματα υπόκεινται σε διαλείψεις Rayleigh. Τα στιγμιαία επίπεδα ισχύος τους (δηλαδή x και y) ακολουθούν την εκθετική κατανομή [31]-[33][41].

$$p(x) = \frac{1}{m_s} \exp(-x / m_s) \quad (\text{Εξ. 5-6})$$

$$p(y) = \frac{1}{m_l} \exp(-y / m_l) \quad (\text{Εξ. 5-7})$$

Αντικαθιστώντας τις (Εξ. 5-6) και (Εξ. 5-7) στην (Εξ. 5-3), βρίσκουμε την πιθανότητα διακοπής ως εξής:

$$P_{out} = 1 - \exp\left(-\frac{1}{a}\right) + \left(\frac{1}{1+\tau}\right) \cdot \exp\left(-\frac{1}{a}(1+\tau)\right) \quad (\text{Εξ. 5-8})$$

B. Λογαριθμοκανονική σκίαση μόνο

Όταν λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της σκίασης, η τοπική μέση τιμή της ισχύος του σήματος σε λογαριθμικές (γραμμικές) μονάδες μεταβάλλεται ακολουθώντας μια κανονική (λογαριθμοκανονική) κατανομή. Ας πούμε ότι το $X(\text{dBm})$ αναπαριστά τον τοπικό μέσο της ισχύος του αδειοδοτημένου σήματος, και

το $Y(\text{dBm})$ τον τοπικό μέσο της ισχύος της συνολικής παρεμβολής. Οι αντίστοιχες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας δίνονται ως ακολούθως [31][34][41]:

$$p(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{X-m_s}{\sigma_s}\right)^2\right] \quad (\text{Εξ. 5-9})$$

$$p(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_I} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-m_I}{\sigma_I}\right)^2\right] \quad (\text{Εξ. 5-10})$$

Τα σ_s και σ_I (και τα δύο σε dB) είναι οι τυπικές αποκλίσεις που χαρακτηρίζουν στατιστικά τις διακυμάνσεις των X και Y αντίστοιχα. Σημειώνεται πως τα m_s και m_I δίνονται σε λογαριθμικές μονάδες dBm.

Η πιθανότητα διακοπής εκφράζεται ως:

$$P_{out} = 1 - \int_{S_0(\text{dBm})}^{\infty} p(X) \int_{-\infty}^X p(Y) dY dX \quad (\text{Εξ. 5-11})$$

Το εσωτερικό ολοκλήρωμα υπολογίζεται ως εξής:

$$\int_{-\infty}^X p(Y) dY = 1 - Q\left(\frac{X-m_I}{\sigma_I}\right) = 1 - Q\left(\frac{X-m_s+\tau}{\sigma_I}\right)$$

όπου το $Q(\cdot)$ είναι η συνάρτηση Q . Σημειώνεται: το τ είναι σε λογαριθμικές μονάδες, δηλαδή,

$$\tau(\text{dB}) = m_s(\text{dBm}) - m_I(\text{dBm})$$

Υπολογίζουμε το εξωτερικό ολοκλήρωμα τις (Εξ. 5-11):

$$\int_{S_0}^{\infty} p(X) \int_{-\infty}^X p(Y) dY dX = \int_{S_0}^{\infty} p(X) \left[1 - Q\left(\frac{X-m_s+\tau}{\sigma_I}\right)\right] dX$$

όπου

$$\int_{S_0}^{\infty} p(X) dX = 1 - Q\left(\frac{m_s-S_0}{\sigma_s}\right) = 1 - Q\left(\frac{a}{\sigma_s}\right)$$

και

$$\int_{S_0}^{\infty} p(X) \cdot Q\left(\frac{X-m_s+\tau}{\sigma_I}\right) dX = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{-a}{\sqrt{2}\sigma_s}}^{\infty} \exp(-u^2) \cdot Q\left(\frac{\sqrt{2}\sigma_s u + \tau}{\sigma_I}\right) du$$

$$\text{όπου } u = \frac{X - m_s}{\sqrt{2}\sigma_s}.$$

Σημείωση: το α εκφράζεται σε λογαριθμικές μονάδες, δηλαδή $\alpha(\text{dB}) = m_s(\text{dBm}) - S_0(\text{dBm})$.

Τελικά,

$$\begin{aligned} P_{out} &= 1 - \int_{S_0}^{\infty} p(X) \int_{-\infty}^X p(Y) dY dX = 1 - \int_{S_0}^{\infty} p(X) \left[1 - Q\left(\frac{X - m_s + \tau}{\sigma_I}\right) \right] dX \\ &= 1 - \int_{S_0}^{\infty} p(X) dX + \int_{S_0}^{\infty} p(X) Q\left(\frac{X - m_s + \tau}{\sigma_I}\right) dX \\ &= Q\left(\frac{a}{\sigma_s}\right) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{-a}{\sqrt{2}\sigma_s}}^{\infty} \exp(-u^2) \cdot Q\left(\frac{\sqrt{2}\sigma_s u + \tau}{\sigma_I}\right) du \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 5-12})$$

Γ. Λογαριθμοκανονική σκίαση και διαλείψεις Rayleigh σε υπέρθεση

Σε ένα κανάλι Suzuki όπου είναι παρόντα τόσο το φαινόμενο της σκίασης, όσο και οι επιδράσεις των διαλείψεων, η στιγμιαία στάθμη του σήματος υπόκειται σε διαλείψεις Rayleigh, ενώ η τοπική μέση στάθμη του σήματος υπόκειται σε λογαριθμοκανονική σκίαση. Ως αποτέλεσμα, η ΣΠΠ (συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας) της στιγμιαίας ισχύος του σήματος ακολουθεί εκθετική κατανομή [όπως στις (Εξ. 5-6) και (Εξ. 5-7)], ενώ η ΣΠΠ της τοπικής μέσης ισχύος του σήματος ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή [όπως στις (Εξ. 5-9) και (Εξ. 5-10)].

Οι υπό συνθήκη πιθανότητες που συνδέουν τα στιγμιαία επίπεδα ισχύος (σε γραμμικές μονάδες) με τις τοπικές μέσες τιμές, δίνονται ως ακολούθως:

$$p(x|X) = 10^{-X/10} \cdot \exp(-x \cdot 10^{-X/10}) \quad (\text{Εξ. 5-13})$$

$$p(y|Y) = 10^{-Y/10} \cdot \exp(-y \cdot 10^{-Y/10}) \quad (\text{Εξ. 5-14})$$

Σημείωση: Τα x και y εκφράζονται σε γραμμικές μονάδες ισχύος (π.χ. mW), ενώ τα X και Y εκφράζονται σε λογαριθμικές μονάδες ισχύος (π.χ. dBm).

Συνεχίζουμε με τον υπολογισμό του $p(y)$ ως εξής:

$$p(y) = \int_{-\infty}^{\infty} p(y|Y) p(Y) dY = \int_{-\infty}^{\infty} 10^{-Y/10} \cdot \exp(-y \cdot 10^{-Y/10}) p(Y) dY \quad (\text{Εξ. 5-15})$$

Στη συνέχεια μπορεί να αποδειχτεί ότι:

$$\int_0^x p(y)dy = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x \cdot 10^{-Y/10}) p(Y)d(Y)$$

Με βάση την (Εξ. 5-3),

$$\begin{aligned} P_{out} &= 1 - \int_{S_0}^{\infty} p(x) \int_0^x p(y)dydx \\ &= 1 - \int_{S_0}^{\infty} p(x) \left[1 - \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x \cdot 10^{-Y/10}) p(Y)dY \right] dx \\ &= 1 - \int_{S_0}^{\infty} p(x)dx + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{S_0}^{\infty} p(x) \exp(-x \cdot 10^{-Y/10}) dx \cdot p(Y)d(Y) \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 5-16})$$

Γνωρίζουμε ότι:

$$p(x) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x|X)p(X)dX = \int_{-\infty}^{\infty} 10^{-X/10} \cdot \exp(-x \cdot 10^{-X/10})p(X)dX \quad (\text{Εξ. 5-17})$$

Στη συνέχεια μπορεί να δειχτεί ότι:

$$\int_{S_0}^{\infty} p(x)dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-u^2 - 10^{(-\sqrt{2}\sigma_s u - a)/10}\right) du \quad (\text{Εξ. 5-18})$$

$$\text{όπου } u = \frac{X - m_s}{\sqrt{2}\sigma_s}.$$

Αντικαθιστώντας την (Εξ. 5-17) μέσα στο διπλό ολοκλήρωμα της (Εξ. 5-16), μπορεί να αποδειχτεί ότι:

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{\infty} \int_{S_0}^{\infty} p(x) \exp(-x \cdot 10^{-Y/10}) dx \cdot p(Y)d(Y) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(1 + 10^{(X-Y)/10}\right)^{-1} \exp(-S_0 \cdot 10^{-X/10}) p(X)d(X) \cdot \exp(-S_0 \cdot 10^{-Y/10}) p(Y)d(Y) \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(1 + 10^{(\tau + \sqrt{2}\sigma_s u - \sqrt{2}\sigma_l v)/10}\right)^{-1} \\ &\times \exp\left(-10^{(-\sqrt{2}\sigma_s u - a)/10} - 10^{(-\sqrt{2}\sigma_l v - a + \tau)/10} - u^2 - v^2\right) dudv \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 5-19})$$

$$\text{όπου } u = \frac{X - m_s}{\sqrt{2}\sigma_s} \text{ και } v = \frac{Y - m_l}{\sqrt{2}\sigma_l}.$$

Αντικαθιστώντας τις (Εξ. 5-18) και (Εξ. 5-19) στην (Εξ. 5-16) έχουμε:

$$\begin{aligned}
P_{out} = & 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-u^2 - 10^{(-\sqrt{2}\sigma_S u - a)/10}\right) du \\
& + \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(1 + 10^{(\tau + \sqrt{2}\sigma_S u - \sqrt{2}\sigma_I v)/10}\right)^{-1} \\
& \times \exp\left(-10^{(-\sqrt{2}\sigma_S u - a)/10} - 10^{(-\sqrt{2}\sigma_I v - a + \tau)/10} - u^2 - v^2\right) dudv
\end{aligned} \tag{Εξ. 5-20}$$

5.5. Αποτελέσματα και σχόλια

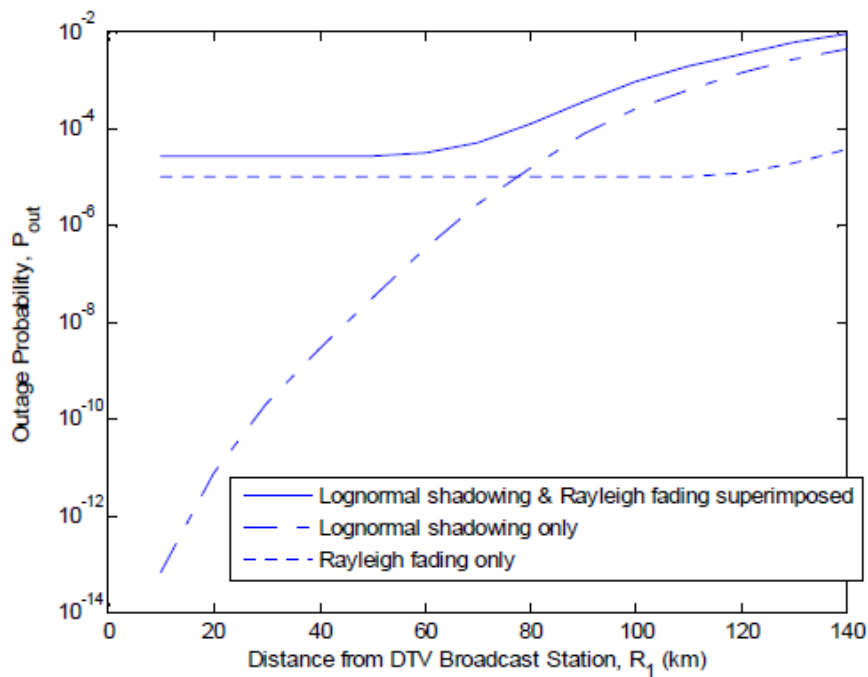
Αποδεικνύουμε την εφαρμογή των τύπων που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα μέσα από το παρακάτω παράδειγμα. Θεωρούμε έναν σταθμό εκπομπής Ψηφιακής Τηλεόρασης (DTV) με ύψος κεραίας πάνω από μέσο έδαφος (HAAT) στα 400 m, και ότι εκπέμπει με ενεργό ακτινοβολούμενη ισχύ (ERP) στα 400 kW. Για τα κανάλια DTV από 14 έως 69, η υπηρεσία DTV ορίζεται ότι υπάρχει εκεί όπου η πεδιακή ένταση υπερβαίνει τα 41 dBu χρησιμοποιώντας τις F(50, 90) καμπύλες διάδοσης (δηλαδή να υπερβαίνεται το κατώφλι για το 50% των θέσεων, στο 90% του χρόνου). Η ένταση του πεδίου, όμως, μειώνεται καθώς αυξάνει η απόσταση από το σταθμό εκπομπής DTV, R_I . Με βάση τις καμπύλες F(50, 90), το άκρο του περιγράμματος, που περικλείει την περιοχή όπου υφίσταται η υπηρεσία DTV στα κανάλια 14 - 69, βρίσκεται στα 97,621 km.

Ας θεωρήσουμε μια LD (η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι ένας δέκτης DTV) με ένα κέρδος κεραίας στα 12,2 dBi και απώλειες καλωδίου στα 4 dB, η οποία συντονίζεται στο κανάλι DTV στα 615 MHz. Η μέση λαμβανόμενη ισχύς (m_s) μπορεί να υπολογιστεί από την τιμή της έντασης πεδίου [30]. Επίσης, ας πούμε ότι το α πρέπει να είναι τουλάχιστον 50 dB.

Η LD περιβάλλεται από πολλαπλές προσωπικές/φορητές UD (όπως φαίνεται στο σχήμα 18) που λειτουργούν στο γειτονικό κανάλι. Κάθε UD υποτίθεται ότι είναι διαχωρισμένη από τον άμεσο γείτονά της με $R_2 = 50$ m. Θεωρούμε ότι $d_0 = 1$ m και $m_{UD}(d_0) = 0$ dBm. Και παίρνουμε το εκτός-ζώνης όριο εκπομπής των $\gamma = -55$ dB που επιβάλλεται από την FCC [29].

Για το κανάλι ασύρματης διάδοσης, υποθέτουμε τον εκθέτη απωλειών διάδοσης, $k = 4$. Για λογαριθμοκανονική σκίαση, υποθέτουμε ότι $\sigma_S = 6$ dB και $\sigma_I = 16$ dB.

Στο πρώτο σενάριο, μεταβάλλουμε το R_I και παρατηρούμε τις μεταβολές του P_{out} υπό διαφορετικές συνθήκες διαλείψεων και σκίασης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 19 [28].

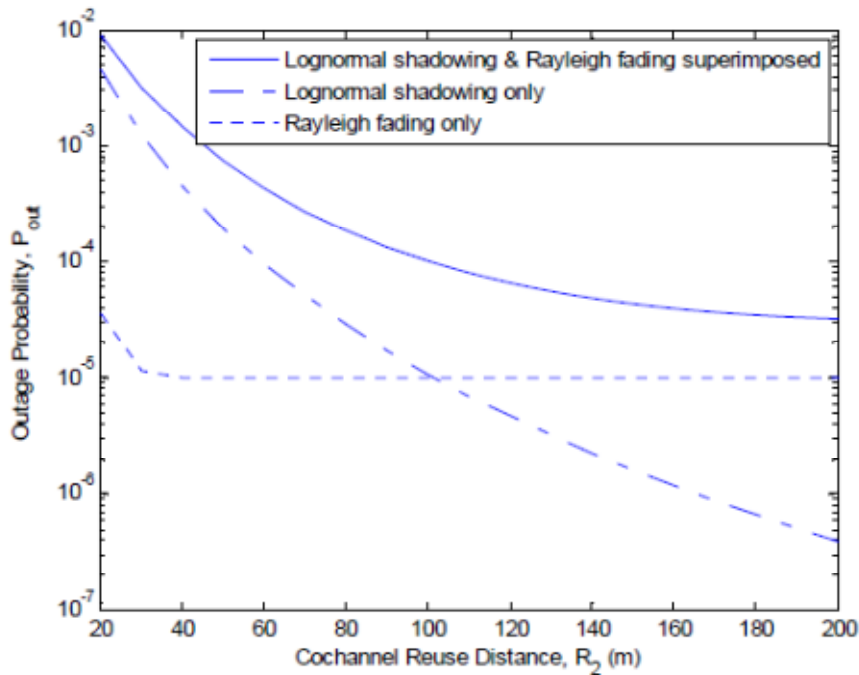


Σχήμα 20: Πιθανότητα διακοπής (P_{out}) σε σχέση με την απόσταση από τον σταθμό εκπομπής DTV (R_1) για τρεις διαφορετικές συνθήκες καναλιού. Απόσταση ομοκαναλικής επαναχρησιμοποίησης, $R_2 = 50$ m.

Φυσικά, το P_{out} αυξάνεται καθώς η LD βρίσκεται πιο μακριά από τον σταθμό εκπομπής DTV. Σημειώνουμε ότι το παραπάνω είναι ιδιαίτερα εμφανές σε κανάλι με σκίαση, όπου η τοπική μέση στάθμη της λαμβανόμενης ισχύος κυμαίνεται λόγω των εμποδίων στο δρόμο ασύρματης διάδοσης. Από την άλλη πλευρά, το P_{out} δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την R_1 σε κανάλια που υπόκεινται μόνο σε διαλείψεις Rayleigh, τουλάχιστον μέχρι να φτάσουμε στο άκρο του περιγράμματος της υπηρεσίας DTV. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν θεωρούμε τη διακύμανση του τοπικού μέσου της λαμβανόμενης ισχύος όταν η διαδικασία της σκίασης θεωρείται ότι δεν λαμβάνει χώρα. Τέλος, σε ένα κανάλι Suzuki, όπου απαντώνται τόσο η λογαριθμοκανονική σκίαση, όσο και οι επιδράσεις των διαλείψεων Rayleigh, όπως ήταν αναμενόμενο το P_{out} προκύπτει το χειρότερο μεταξύ των τριών περιπτώσεων.

Το παραπάνω παράδειγμα δείχνει πώς η ποιότητα υπηρεσίας ενός αδειοδοτημένου συστήματος μεταβάλλεται σε σχέση με τις θέσεις εντός του περιγράμματος της υπηρεσίας, όταν το αδειοδοτημένο σύστημα παρενοχλείται από μη αδειοδοτημένες εκπομπές στο γειτονικό κανάλι.

Στο δεύτερο σενάριο, αναλύεται η επίδραση της μεταβολής του R_2 στο P_{out} μετρημένο στο άκρο του περιγράμματος της υπηρεσίας DTV (97,621 km από το σταθμό εκπομπής), όπου απαντάται η ελάχιστη απαιτούμενη ένταση πεδίου των 41 dBu. Καθώς μεταβάλλουμε την απόσταση ομοκαναλικής επαναχρησιμοποίησης R_2 από 20 m έως 200 m, υπολογίζονται και απεικονίζονται στο σχήμα 20 [28] τα αποτελέσματα για το P_{out} .



Σχήμα 21: Πιθανότητα διακοπής (P_{out}) σε σχέση με την απόσταση ομοκαναλικής επαναχρησιμοποίησης (R_2) για τρεις διαφορετικές συνθήκες καναλιού. Απόσταση από τον σταθμό εκπομπής DTV, $R_1 = 97,621$ km.

Είναι φανερό από το σχήμα 20 ότι το P_{out} μειώνεται όταν αυξάνουμε το R_2 . Αυτό συμβαίνει διότι οι UD αραιώνουν, κι έτσι μειώνεται η ACI στην LD. Η μεταβολή του P_{out} είναι ιδιαίτερα εμφανής στα κανάλια μόνο με σκίαση, αλλά όχι σε εκείνα μόνο με διαλείψεις Rayleigh, εξαιτίας του ίδιου λόγου που περιγράφηκε παραπάνω, στο πρώτο σενάριο. Στο κανάλι Suzuki, όπου απαντώνται τόσο η λογαριθμοκανονική σκίαση, όσο και οι επιδράσεις των διαλείψεων Rayleigh, το P_{out} προκύπτει το χειρότερο μεταξύ των τριών τύπων καναλιού ασύρματης διάδοσης.

Το παραπάνω παράδειγμα δείχνει το βαθμό στον οποίο ο αλγόριθμος συντονισμού των UD, ο οποίος επηρεάζει άμεσα το R_2 , μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμος στην προστασία της ποιότητας υπηρεσίας του αδειοδοτημένου συστήματος.

5.6. Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό, διατυπώσαμε τις θεωρητικές σχέσεις για τις πιθανότητες διακοπής της παρεχόμενης υπηρεσίας, που ενδέχεται να μετρηθούν σε μια LD που υπόκειται σε διαλείψεις Rayleigh και σκίαση, όταν πολλαπλές προσωπικές UD λειτουργούν στο γειτονικό κανάλι του αδειοδοτημένου. Αυτές οι UD συντονίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε καθεμιά από αυτές να διατηρεί μια

απόσταση διαχωρισμού από τους γείτονές της, έτσι ώστε ένα κανάλι να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί χωρικά. Στο μοντέλο μας, οι UD κατανέμονται σε μια εξαγωνική τοπολογία.

Στα αριθμητικά παραδείγματα που δόθηκαν, η πιθανότητα διακοπής αναλύεται πρώτα σε σχέση με τις μεταβολές της απόστασης από τον αδειοδοτημένο εκπομπό. Ακολουθεί η ανάλυση σε σχέση με τη διακύμανση της απόστασης ομοκαναλικής επαναχρησιμοποίησης που έχει υιοθετηθεί από τις UD, στο χειρότερο δυνατό σενάριο, όπου η LD βρίσκεται στο άκρο του περιγράμματος της αδειοδοτημένης υπηρεσίας. Στις αναλύσεις μας, έχουν θεωρηθεί τρεις διαφορετικές συνθήκες ασύρματης διάδοσης, δηλαδή διαλείψεις Rayleigh, λογαριθμοκανονική σκίαση, και ο συνδυασμός των δύο παραπάνω.

Οι αναλύσεις βοηθούν στο να κατανοήσουμε πώς η ποιότητα υπηρεσίας σε διαφορετικές θέσεις εντός του περιγράμματος της αδειοδοτημένης υπηρεσίας επηρεάζεται από τη λειτουργία των UD στο γειτονικό κανάλι, και τον βαθμό στον οποίο η αδειοδοτημένη υπηρεσία μπορεί να προστατευθεί μέσω του αλγορίθμου συντονισμού που θα επιλεγεί για τις UD. Περαιτέρω ερευνητικές προσπάθειες περιλαμβάνουν την επέκταση των αναλύσεων σε διαφορετικά μοντέλα καναλιού, π.χ. κανάλι Nakagami.

Παραπομπές:

- [1] M. Nekovee, "A Survey of Cognitive Radio Access to TVWhite Spaces", Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Digital Multimedia Broadcasting Volume 2010, Article ID 236568, 11 pages
- [2] A. Wyglynski, M. Nekovee, and T. Hou, Eds., Cognitive Radio Communication and Networks: Principle and Practice, Academic Press, London, UK, 2010.
- [3] J. Mitola III and G. Q. Maguire Jr., "Cognitive radio: making software radios more personal," IEEE Personal Communications, vol. 6, no. 4, pp. 13–18, 1999.
- [4] M. Nekovee, "Dynamic spectrumaccess—concepts and future architectures," BT Technology Journal, vol. 24, no. 2, pp. 111–116, 2006.
- [5] Federal Communications Commission, "Spectrum policy task force," Report of the Spectrum Efficiency Working Group, November 2004, <http://www.fcc.gov/sptf/reports.html/>.
- [6] Federal Communications Commission (FCC), "Second report and order and memorandum. Opinion and order," Tech. Rep. 08-260, November 2008.
- [7] Federal Communications Commission (FCC), "Additional spectrum for unlicensed devices below 900MHz and in the3GHz band," ET Docket 02-380, December 2002.
- [8] Federal Communications Commission (FCC), "Unlicensed operation in the TV broadcast bands," ET Docket 04-186, May2004.
- [9] Ofcom, "Digital Dividend Review, A statement on our approach towards awarding the digital dividend," December2007.
- [10] "Ofcom Consultation: Digital Dividend," February 2009, <http://www.ofcom.org.uk/consult/condocs/cognitive/summary/>.
- [11] Ofcom, "Statement on Cognitive Access to Interleaved Spectrum," July 2009.
- [12] "CogNeA," <http://www.cognea.com/>.
- [13] "IEEE 802.22," <http://www.ieee802.org/22/>.
- [14] M. Mishra and A. Sahai, "How much white space is there?" Tech. Rep., Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley, January 2009.
- [15] "BT Response to Ofcom Consultation on Digital Dividend," Cognitive Access.
- [16] R. Rajbanshi, A. M.Wyglynski, and G. J.Minden, "An efficient implementation of NC-OFDM transceivers for cognitive radios," in Proceedings of the 1st International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications(CROWNCOM '06), June 2006.
- [17] R. Rajbanshi, OFDMbased cognitive radio for DSA networks, Ph.D. thesis, University of Kansas, Lawrence, Kan, USA, 2007.
- [18] M. Jankiraman, Space-Time Codes andMIMO Systems, Artech House, Boston, Mass, USA, 2004.
- [19] N. Devroye, P. Mitran, and V. Tarokh, "Limits on communications in a cognitive radio channel," IEEE Communications Magazine, vol. 44, no. 6, pp. 44–49, 2006.
- [20] K. Briggs, "BT innovate and design," Tech. Rep., July 2009.
- [21] D. L'opez-P'erez, A. Valcarce, G. De La Roche, and J. Zhang, "OFDMA femtocells: a roadmap on interference avoidance," IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 9, pp. 41–48, 2009.

- [22] ECC Report 159: Technical and operational requirements for the possible operation of cognitive radio systems in the 'white spaces' of the frequency band 470-790 MHz, Cardiff, January 2011.
- [23] CEPT Report 24: "Technical considerations regarding harmonisation options for the Digital Dividend". A preliminary assessment of the feasibility of fitting new/future applications/services into nonharmonised spectrum of the digital dividend (namely the so-called "white spaces" between allotments).
- [24] ITU-R Report SM.2152: Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS).
- [25] ECC Report 148: Measurements on the performance of DVB-T receivers in the presence of interference from the mobile service (especially from LTE).
- [26] ECC Report 138: Measurements on the performance of DVB-T receivers in the presence of interference from the mobile service (especially from UMTS).
- [27] Rec. ITU-R P.1546: "Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz"
- [28] Y.-L. Foo, "Unlicensed Transmissions in TV White Spaces and Its Impacts on the Incumbent Services", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 57, No. 4, November 2011.
- [29] *In the matter of unlicensed operation in the TV broadcast bands*: ET Docket No. 08-260, Notice of Proposed Rulemaking and Order, FCC OET, Nov. 2008.
- [30] T. S. Rappaport, *Wireless Communications Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice Hall: Upper Saddle River, 2002.
- [31] A. G. Williamson, and J. D. Parsons, "Outage probability in a mobile radio system subject to fading and shadowing," *Electron. Lett.*, vol. 21, no. 14, pp. 622-623, July 1985.
- [32] K. W. Sowerby, and A. G. Williamson, "Outage probability calculations for a mobile radio system having multiple Rayleigh interferers," *Electron. Lett.*, vol. 23, no. 11, pp. 600-601, May 1987.
- [33] K. W. Sowerby, and A. G. Williamson, "Outage probability calculations for multiple cochannel interferers in cellular mobile radio systems," *IEE Proc. F*, vol. 135, no. 3, pp. 208-215, June 1988.
- [34] K. W. Sowerby, and A. G. Williamson, "Outage probability calculations for a mobile radio system having two log-normal interferers," *Electron. Lett.*, vol. 23, no. 25, pp. 1345-1346, Dec. 1987.
- [35] H. Suzuki, "A statistical model for urban radio propagation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-25, no. 7, pp. 673-680, July 1977.
- [36] R. Dahama, K. W. Sowerby, and G. B. Rowe, "Outage probability estimation for licensed systems in the presence of cognitive radio interference," in *Proc. IEEE VTC Spring*, 2009.
- [37] R. Menon, R. M. Buehrer, and J. H. Reed, "On the impact of dynamic spectrum sharing techniques on legacy radio systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 11, pp. 4198-4207, Nov. 2008.
- [38] R. Menon, R. M. Buehrer, and J. H. Reed, "Outage probability based comparison of underlay and overlay spectrum sharing techniques," in *Proc. IEEE DySPAN*, 2005, pp. 101-109.

- [39] R. Dahama, K. W. Sowerby, and G. B. Rowe, "Adjacent channel operation of portable unlicensed devices inside DTV service contours," in *Proc. IEEE WCNC*, 2010.
- [40] Z. Chen, C.-X. Wang, X. Hong, J. Thompson, S. A. Vorobyov, and X. Ge, "Interference modeling for cognitive radio networks with power or contention control," in *Proc. IEEE WCNC*, 2010.
- [41] R. C. French, "The effect of fading and shadowing on channel reuse in mobile radio," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-28, no. 3, pp. 171-181, Aug. 1979.