



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

Επίκαιρα Θέματα Ψηφιακής Τηλεόρασης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Κ. Παπαγεωργίου

Κωνσταντίνος Γ. Κούλαλης

Επιβλέπων : Χρήστος Ν. Καψάλης
Καθηγητής

Αθήνα , Φεβρουάριος 2017



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

Επίκαιρα Θέματα Ψηφιακής Τηλεόρασης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Κ. Παπαγεωργίου

Κωνσταντίνος Γ. Κούλαλης

Επιβλέπων : Χρήστος Ν. Καψάλης
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από τη διμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Φεβρουαρίου 2017

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα , Φεβρουάριος 2017

.....
Γεώργιος Κ. Παπαγεωργίου

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

.....
Κωνσταντίνος Γ. Κούλαλης

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

Copyright © Γεώργιος Κ. Παπαγεωργίου, 2017

Copyright © Κωνσταντίνος Γ. Κούλαλης, 2017

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 τους συγγραφείς.

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

Στους γονείς μου Ανδρονίκη και Κώστα

Γιώργος Παπαγεωργίου

Στον αδικοχαμένο αδερφό μου Γιάννη

Κώστας Κούλαλης

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	9
Abstract.....	11
Ευχαριστίες.....	13
1. Διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).....	15
1.1 Εισαγωγή.....	15
1.2 Ιστορικό.....	17
1.3 Ψηφιακή διαμόρφωση.....	18
1.4 Συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις - Διασυμβολική παρεμβολή.....	20
1.5 Υλοποίηση.....	24
1.6 Προβλήματα.....	30
2. Επίγεια Ψηφιακή Ευρυεκπομπή.....	32
2.1 Πρότυπο DVB-T/T2 (Digital Video Broadcasting – Terrestrial).....	32
2.2 Μονοσυχνοτικά δίκτυα (Single Frequency Networks, SFN).....	39
2.3 Ψηφιακό μέρισμα (digital dividend).....	42
2.4 Διεθνής συντονισμός συχνοτήτων.....	43
3. Τηλεοπτικά κενά διαστήματα (TV White Spaces, TVWS).....	49
3.1 Εισαγωγή.....	49
3.2 Γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες (Cognitive Radio, CR).....	51
3.3 Εφαρμογές.....	54
3.4 TVWS στην Ελλάδα.....	57
4. Μελέτη περίπτωσης ραδιοκάλυψης ψηφιακής τηλεόρασης.....	67
5. Επίλογος.....	79

6. Βιβλιογραφία.....80

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ανάλυση όλων των επίκαιρων θεμάτων της Ψηφιακής Τηλεόρασης.

Το πρώτο κεφάλαιο είναι μια εκτενής ανάλυση της Ορθογωνικής Πολυπλεξίας Διάρθρωσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Η OFDM είναι ένα σχήμα πολυδιαυλικής διαμόρφωσης, όπου ένας μεγάλος αριθμός αλληλοεπικαλυπτόμενων ορθογώνιων υποφερόντων χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν δεδομένα σε πολλαπλές παράλληλες ροές πληροφορίας. Κάθε υποφέρον είναι διαμορφωμένο με ένα απ' τα γνωστά σχήματα διαμόρφωσης MQAM ή MPSK, σε χαμηλό ρυθμό μετάδοσης συμβόλων, διατηρώντας το συνολικό ρυθμό δεδομένων ίσο με αυτόν του συμβατικού σχήματος διαμόρφωσης μοναδικού φέροντος, στο ίδιο εύρος ζώνης. Το κύριο πλεονέκτημα της OFDM συγκριτικά με τα συστήματα μοναδικού φέροντος είναι η ικανότητά της να αντιμετωπίζει τις δυσμενείς συνθήκες του καναλιού, όπως είναι οι συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης, χωρίς πολύπλοκη διαδικασία ισοστάθμισης στο δέκτη. Ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης συμβόλων καθιστά τη χρήση διαστημάτων φύλαξης (Guard Interval, GI) μεταξύ συμβόλων εφικτή, επιτυγχάνοντας έτσι την εξάλειψη της διασυμβολικής παρεμβολής (Inter-Symbol Interference, ISI). Η OFDM υιοθετείται από όλα τα σύγχρονα πρότυπα τηλεπικοινωνιών.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται σε όλες τις πτυχές της επίγειας ψηφιακής ευρυεκπομπής. Αρχικά, δίνουμε μια περιγραφή του προτύπου Digital Video Broadcasting-Terrestrial (DVB-T). Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία συμπίεσης MPEG-2/4 (Moving Picture Experts Group), το DVB-T δύναται να μεταδίδει πολλαπλά ψηφιακά κανάλια χρησιμοποιώντας ίσο φάσμα με αυτό που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση ενός αναλογικού τηλεοπτικού καναλιού. Η εξέλιξη του DVB-T είναι το DVB-T2. Κάνουμε σύγκριση μεταξύ DVB-T και DVB-T2. Το DVB-T2 είναι το πιο προηγμένο σύστημα επίγειας ψηφιακής ευρυεκπομπής παγκοσμίως, προσφέροντας μεγαλύτερη ανθεκτικότητα, ευελιξία και φασματική απόδοση από οποιοδήποτε άλλο. DVB-T / T2 κάνουν χρήση OFDM διαμόρφωσης. Στη συνέχεια, περιγράφουμε το Μονοσυχνοτικό Δίκτυο (Single Frequency Network, SFN). Το SFN είναι ένα δίκτυο ευρυεκπομπής, όπου πολλοί γειτονικοί πομποί στέλνουν το ίδιο σήμα ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα χωρίς να αλληλοπαρεμβάλλουν. Σε σύγκριση με τα πολυσυχνοτικά δίκτυα, το SFN προσφέρει μεγαλύτερη φασματική απόδοση και ευκολότερο σχεδιασμό του δικτύου. Η χρήση του διαστήματος φύλαξης, εγγενής στο πλαίσιο της διαμόρφωσης OFDM, είναι αυτή που κάνει εφικτή τη διάρθρωση σε SFN. Έτσι λοιπόν, λόγω της μετάβασης από αναλογική σε ψηφιακή τηλεόραση χρησιμοποιώντας OFDM, MPEG-2/4, DVB-T / T2 και SFN, ραδιοφάσμα απελευθερώνεται - γνωστό ως Ψηφιακό Μέρισμα (Digital Dividend). Η ζώνη 790-862 MHz των UHF (Ultra High Frequencies) έχει ήδη απελευθερωθεί και αποδοθεί για υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας. Αναμένεται η απελευθέρωση της ζώνης 694-790 MHz επίσης. Τέλος, συζητάμε για την Περιφερειακή Διάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών

για το σχεδιασμό των επίγειων ψηφιακών ραδιοτηλεοπτικών υπηρεσιών, σε τμήματα των περιφερειών 1 και 3, στις ζώνες συχνοτήτων 174-230MHz και 471-862MHz, που πραγματοποιήθηκε στη Γενεύη το 2006.

Το τρίτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στα Τηλεοπτικά Κενά Διαστήματα (TV White Spaces, TVWS). Το TVWS αναφέρεται στα αχρησιμοποίητα κανάλια μεταξύ των ενεργών και αδειοδοτημένων καναλιών της ζώνης των UHF. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι ένας πολύ πολύτιμος, περιορισμένος φυσικός πόρος. Η ανάγκη για όλο και περισσότερες ευρυζωνικές υπηρεσίες είναι μία πραγματικότητα και τα TVWS φαντάζουν ως μία πραγματική πρόκληση. Μία White Space συσκευή (White Space Device, WSD) είναι μια "έξυπνη" συσκευή που χρησιμοποιεί τεχνολογίες Γνωστικών Ραδιοεπικοινωνιών (Cognitive Radio, CR), προκειμένου να χρησιμοποιήσει τα TVWS. Υπάρχουν δύο βασικές τεχνολογίες CR. Σύμφωνα με την πρώτη, η WSD χρησιμοποιεί το Global Positioning System (GPS) για τον γεωεντοπισμό της και, στη συνέχεια, αποκτά πρόσβαση σε μια βάση δεδομένων όπου είναι καταγεγραμμένα τα TVWS στην περιοχή της. Η δεύτερη προσέγγιση τεχνολογίας CR είναι γνωστή ως spectrum sensing. Το κύριο ζήτημα για συσκευές WSD που θα χρησιμοποιούν τεχνολογίες CR για να εκμεταλλευτούν TVWS, είναι η αποφυγή παρεμβολής σε υπάρχοντα δίκτυα. Το πρότυπο IEEE 802.22 αναφέρεται σε δικτύωση Wireless Regional Area Networking (WRAN) χρησιμοποιώντας TVWS. Το IEEE 802.11af αναφέρεται σε δικτύωση Wireless Local Area Networking (WLAN) χρησιμοποιώντας TVWS. Επίσης, μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή των TVWS είναι πάνω στο «ευφυές» ηλεκτρικό δίκτυο Smart Grid και το Smart Metering σύστημα για τηλεμετρία και παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας και όλης της ενεργειακής δραστηριότητας. Τέλος, μελετάμε τα TVWS στην Ελλάδα. Λαμβάνουμε υπόψη και τις γειτονικές χώρες της Ελλάδας.

Το τελευταίο κεφάλαιο είναι μια μελέτη δύο περιπτώσεων δικτύων ψηφιακής τηλεόρασης. Το συμπέρασμα είναι ότι με χρήση του DVB-T2 αντί του DVB-T μπορούμε να επιτύχουμε την επιθυμητή ραδιοκάλυψη.

Λέξεις-κλειδιά : Ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας, Διασυμβολική παρεμβολή, Διάστημα φύλαξης, Πρότυπο επίγειας ψηφιακής ευρυεκπομπής Digital Video Broadcasting-Terrestrial, Μονοσυχνотικό δίκτυο, Ψηφιακό μέρισμα, Τηλεοπτικά κενά διαστήματα, Γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες

Abstract

The object of the present diploma thesis is the study and analysis of all prevailing issues of Digital Television.

The first chapter is an extended analysis of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). OFDM is a multi-carrier modulation scheme where a large number of overlapping orthogonal sub-carrier signals are used to carry data on several parallel data streams. Each sub-carrier is modulated with a conventional modulation scheme, such as Multiple Quadrature Amplitude Modulation or Multiple Phase Shift Keying, at a low symbol rate, maintaining total data rate equal to conventional single-carrier modulation scheme, in the same bandwidth. The primary advantage of OFDM over single-carrier schemes is its ability to cope with severe channel conditions, such as frequency-selective fading due to multipath propagation, without complex equalization filters at the receiver. The low symbol rate makes the use of a Guard Interval (GI) between symbols affordable, making it possible to eliminate Inter-Symbol Interference (ISI). OFDM is being adopted by all current telecommunications' standards.

The second chapter refers to all aspects of digital terrestrial broadcasting. Initially, we give a description of Digital Video Broadcasting-Terrestrial (DVB-T) standard. Using the compression technology of MPEG-2/4 (Moving Picture Experts Group), DVB-T can transmit numerous digital channels using the same amount of spectrum used to transmit one analogue TV channel. The evolution of DVB-T is DVB-T2. We make a comparison between DVB-T and DVB-T2. DVB-T2 is the world's most advanced digital terrestrial broadcasting system, offering more robustness, flexibility and spectral efficiency than any other. DVB-T/T2 use OFDM modulation. Next, we describe Single Frequency Network (SFN). SFN is a broadcast network where several adjacent transmitters send the same signal simultaneously at the same frequency without interfering each other. In comparison with multi-frequency networks, SFN offers more spectral efficiency and easier network designing. The mechanism of using guard interval within OFDM modulation facilitates the Single Frequency Networking. So, due to analogue-to-digital transition using OFDM, MPEG-2/4, DVB-T/T2 and SFN, radio spectrum is released – known as Digital Dividend. The 790–862 MHz Ultra High Frequency band has been already freed-up and allocated for mobile services. We expect the release of the 694-790 MHz band, too. Finally, we discuss about the Regional Radiocommunication Conference for planning of the digital terrestrial broadcasting service, in parts of Regions 1 and 3, in the frequency bands 174-230MHz and 471-862MHz, that took place in Geneva, 2006.

The third chapter is devoted to TV White Spaces (TVWS). TVWS refers to the unused TV channels between the active and licensee ones in the Very High Frequency and Ultra High Frequency spectrum. The electromagnetic spectrum is a very precious, limited natural resource. The need for more and more broadband services is a reality and so TVWS is a real challenge. A White Space Device (WSD) is a “smart” device that

uses Cognitive Radio technologies (CR) in order to use TVWS. There are two basic CR technologies. According to the first one, the WSD uses the Global Positioning System (GPS) for itself geo-location and then accesses a data base where the local TVWS are recorded. The second approach of CR technology is known as spectrum sensing. The main issue for a WSD which will use CR technologies to take advantage of the TVWS is the avoidance of interfering to existing networks. The IEEE 802.22 standard refers to Wireless Regional Area Networking (WRAN) using TVWS. The IEEE 802.11af refers to Wireless Local Area Networking (WLAN) using TVWS. Also, a very interesting application of TVWS is on Smart Grid and Smart Metering system for telemetry and monitoring of the energy consumption and all the energy activity. Finally, we study the TVWS in Greece. We take into account Greece's neighbour countries.

The last chapter is a study of two cases of digital television networking. The conclusion is that using DVB-T2 instead of DVB-T we can achieve the desirable radio-coverage.

Key-words : Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Inter-Symbol Interference, Guard Interval, Digital Video Broadcasting-Terrestrial, Single Frequency Network, Digital Dividend, TV White Spaces, Cognitive Radio

Ευχαριστίες

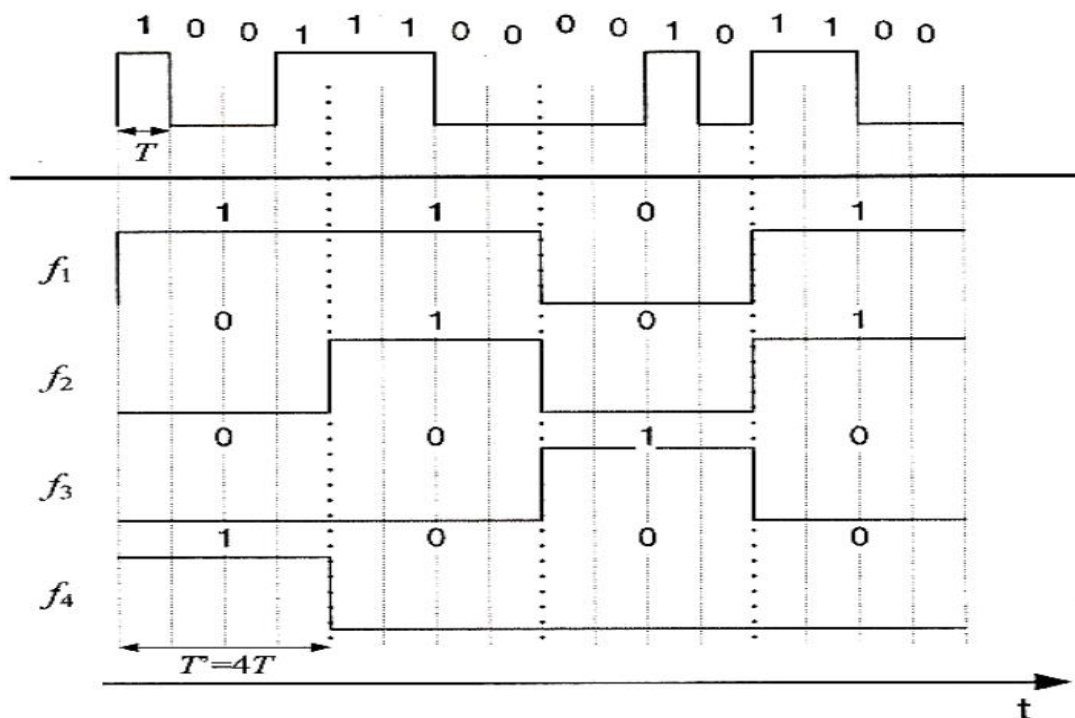
Η διπλωματική μας εργασία ολοκληρώνει τον κύκλο σπουδών μας στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστούμε θερμά τον καθηγητή μας κ. Χρήστο Καψάλη για την καθοδήγησή του και το διδακτορικό φοιτητή Αδριανό Κατσούρη για τη συναδελφικότητά του.

1. Διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

1.1 Εισαγωγή

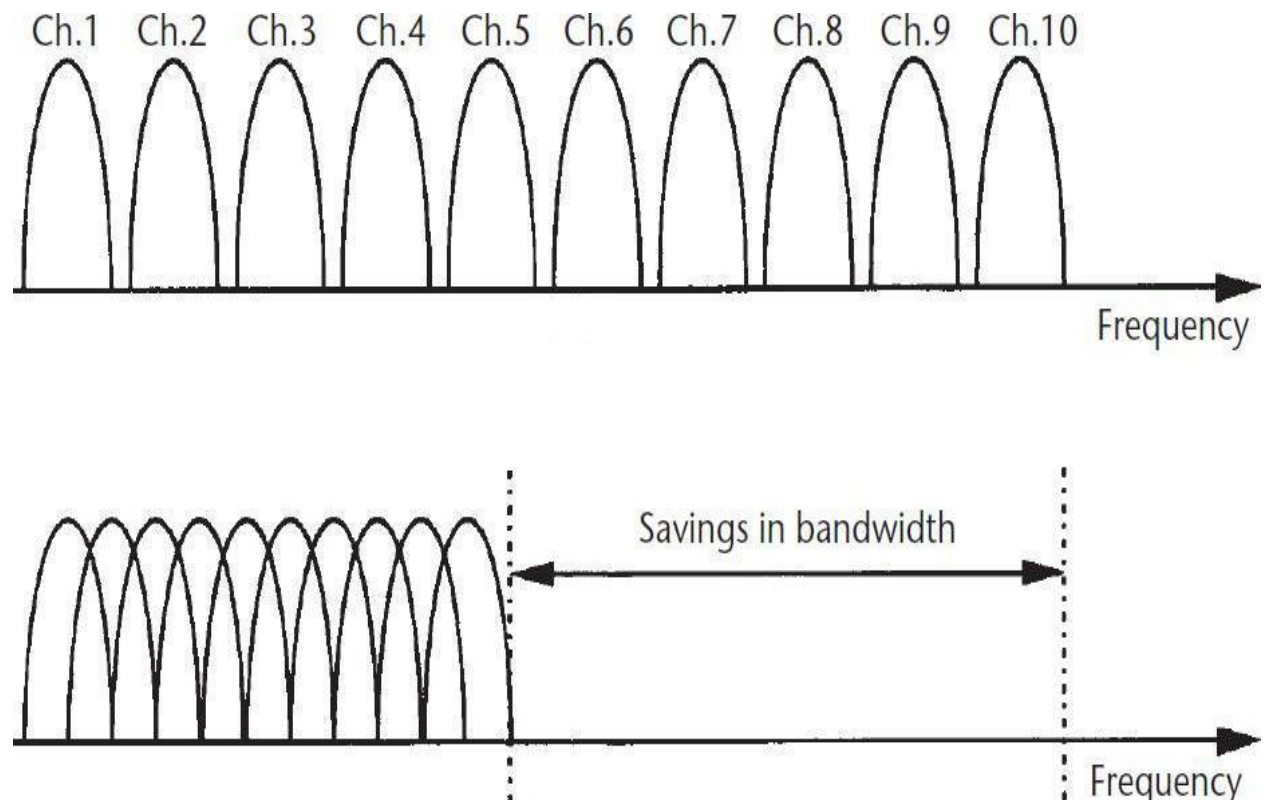
Στις σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές υπάρχουν τρεις βασικές απαιτήσεις – στόχοι : υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, αντιμετώπιση των συνθηκών διάδοσης και φασματική απόδοση. Για την επίτευξή τους η τεχνική της παράλληλης μετάδοσης σε πολλαπλά υποφέροντα (multi-carrier transmission) είναι αυτή που υιοθετείται πλέον από όλα τα πρότυπα. Η ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) είναι μία τέτοια τεχνική και μπορεί να θεωρηθεί ως διαδικασία διαμόρφωσης και πολυπλεξίας ταυτόχρονα. Στη διαμόρφωση μοναδικού φέροντος (single-carrier transmission) η προς μετάδοση ροή ψηφίων πληροφορίας καταλαμβάνει όλο το διαθέσιμο φάσμα, χρησιμοποιώντας παλμούς μικρής διάρκειας για κάθε σύμβολο, έχοντας έτσι υψηλό ρυθμό μετάδοσης. Στην OFDM έχουμε διαίρεση της ροής σε πολλές επιμέρους ροές και παράλληλη μετάδοση αυτών σε αντίστοιχο πλήθος υποκαναλιών. Κάθε μία απ' τις επιμέρους παράλληλες ροές έχει πολύ χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης και η διάρκεια συμβόλου της είναι ισοδύναμα πολύ μεγαλύτερη, που είναι και η διάρκεια του συνολικού συμβόλου OFDM. Έχουμε για παράδειγμα την απλή περίπτωση με 4 υποφέροντα :



Σχήμα 1.1 : Διαίρεση της πληροφορίας σε επιμέρους ροές που μεταδίδονται παράλληλα

Έχουμε λοιπόν πολλά συστήματα τα οποία μεταδίδουν ταυτόχρονα το καθένα ένα μικρό μέρος της πληροφορίας και ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης παραμένει ίδιος με αυτόν της single-carrier μετάδοσης.

Κάθε μία απ' τις επιμέρους παράλληλες ροές ψηφίων πληροφορίας διαμορφώνει το αντίστοιχο υποφέρον κατά μία απ' τις γνωστές τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης, MPSK (multiple phase shift keying) ή MQAM (multiple quadrature amplitude modulation). Τα υποκανάλια στα οποία χωρίζεται το ευρυζωνικό φάσμα δεν είναι διαχωρισμένα με διαστήματα φύλαξης όπως στην κλασική FDM. Είναι αλληλοεπικαλυπτόμενα, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλη εξοικονόμηση φάσματος :



Σχήμα 1.2 : FDM , OFDM – εξοικονόμηση φάσματος

Το κλειδί για να μην αποτελεί πρόβλημα αυτή η αλληλοεπικάλυψη (overlapping) είναι η ορθογωνιότητα (orthogonality) – γι' αυτό και ορθογωνική FDM. Τα υποκανάλια είναι ορθογώνια μεταξύ τους όταν η απόσταση μεταξύ των κεντρικών τους συχνοτήτων, μεταξύ των υποφερόντων, είναι ίση με το αντίστροφο της διάρκειας συμβόλου OFDM – της ωφέλιμης διάρκειας χωρίς το διάστημα φύλαξης που θα δούμε παρακάτω. Ισοδύναμα, τα υποφέροντα είναι ακέραια πολλαπλάσια ενός βασικού υποφέροντος, ισχύει δηλαδή $f_2 = 2 \cdot f_1$, $f_3 = 3 \cdot f_1$, $f_4 = 4 \cdot f_1$ κλπ.

Στο σημείο του κάθε υποφέροντος, όπου ο κύριος λοβός του αντίστοιχου υποκαναλιού παρουσιάζει μέγιστο, οι κύριοι λοβοί των γειτονικών καναλιών μηδενίζονται, όπως μηδενίζονται και οι δευτερεύοντες λοβοί και οι ουρές, αν υπάρχουν, των υποκαναλιών που γειτονεύουν με τα γειτονικά. Τότε η παρεμβολή

μεταξύ των υποκαναλιών, η ενδοσυμβολική παρεμβολή (inter-carrier interference, ICI), είναι μηδενική και ο δέκτης μπορεί να ανακτήσει την πληροφορία κάθε υποκαναλιού εύκολα και χωρίς λάθη.

1.2 Ιστορικό

Η ιδέα της παράλληλης πολυδιαυλικής, πολυτονικής μετάδοσης δεν είναι καινούρια. Ένα από τα πρώτα συστήματα, που περιγράφεται από τον Doeltz το 1957 και καλείται Kineplex, χρησιμοποιήθηκε για ψηφιακή μετάδοση στη ραδιοζώνη υψηλών συχνοτήτων. Μία άλλη πρώιμη εργασία στο σχεδιασμό συστήματος πολλαπλών υποφερόντων δημοσιεύτηκε το 1966 από τον Chang. Ακολούθησε ο Saltzberg το 1967.

Η δυσκολία στην υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος είναι προφανής. Ο μεγάλος αριθμός υποκαναλιών, που μπορεί να είναι από 52 μέχρι και 32.000, απαιτεί τεράστιο αριθμό μικτών, φίλτρων, ταλαντωτών κλπ. Το πρόβλημα λύνεται με τη χρήση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (discrete Fourier transform, DFT) και μάλιστα του ταχέως μετασχηματισμού Fourier (fast Fourier transform, FFT) για τον υπολογισμό του DFT και του αντιστρόφου του (inverse FFT, IFFT). Η χρήση του DFT στη διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση συστημάτων OFDM προτάθηκε από τους Weinstein και Ebert το 1971. Ένα άλλο ορόσημο στην ιστορία του OFDM ήταν όταν οι Peled και Ruiz εισήγαγαν το κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix, CP) το 1980. Την τεχνική OFDM έχουν υιοθετήσει πλέον όλα τα σύγχρονα πρότυπα :

Ασύρματη μετάδοση :

- IEEE 802.11a, g, j, n (WiFi) Wireless LANs
- IEEE 802.15.3a Ultra Wideband (UWB) Wireless PAN
- IEEE 802.16d, e (WiMAX), WiBro και HiperMAN Wireless MANs
- IEEE 802.20 Mobile Broadband Wireless Access (MBWA)
- Επίγεια ψηφιακή τηλεόραση, Digital Video Broadcasting : DVB-T/T2, DVB-H, ISDB-T κλπ
- DAB (Digital Audio Broadcasting) συστήματα
- Flash-OFDM κυψελωτά συστήματα
- 3GPP UMTS και 4G LTE (Long-Term Evolution)

Ενσύρματη μετάδοση :

- ADSL and VDSL
- PLC (Power Line Communication)

1.3 Ψηφιακή διαμόρφωση

Στην ψηφιακή διαμόρφωση το σήμα παριστάνεται σε μιγαδικό επίπεδο ως διάνυσμα – συμφασική συνιστώσα (in-phase, I), ορθογώνια συνιστώσα (quadrature, Q), σε συμφωνία και με τη ζωνοπερατή έκφρασή του. Στο πλάτος (MQAM) ή τη φάση (MPSK) του διανύσματος είναι κωδικοποιημένα τα σύμβολα πληροφορίας. Προκύπτει έτσι ένα σύνολο σημείων, τοποθετημένα σύμφωνα συνήθως με την κωδικοποίηση Gray – όπου αμέσως γειτονικά σύμβολα διαφέρουν κατά ένα μόνο ψηφίο - που αντιστοιχούν στα δυνατά σύμβολα που μπορούν να αποσταλούν. Είναι ο λεγόμενος σηματοστερισμός (constellation map) του ψηφιακού σήματος, όπου επιπροσθέτως υπάρχουν και οι περιοχές απόφασης γύρω από κάθε σύμβολο για τον ορισμό της πιθανότητας λανθασμένης αποκωδικοποίησης στο δέκτη.

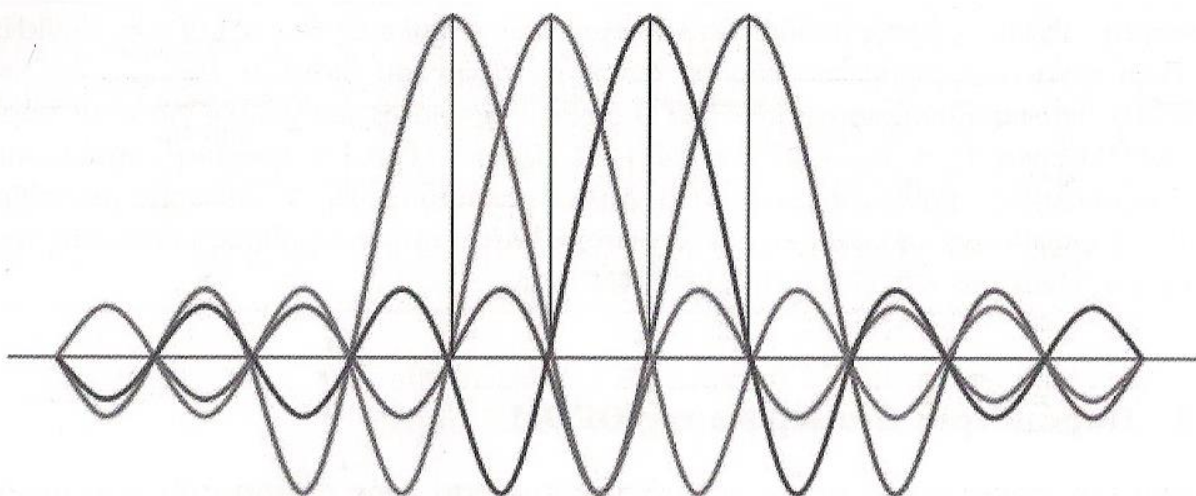
Υπάρχει ένα trade-off (συμβιβασμός) στην επιλογή του μεγέθους του σηματοστερισμού. Περισσότερα ψηφία ανά σύμβολο σημαίνουν υψηλότερη φασματική απόδοση (spectral efficiency, σε bits/second/Hz). Τότε όμως είμαστε και περισσότερο ευάλωτοι στο θόρυβο, τις διαλείψεις και τις ατέλειες του εξοπλισμού και χρειαζόμαστε μεγαλύτερο σηματοθορυβικό λόγο (SNR) στο δέκτη για να αποδιαμορφώσουμε.

Στην OFDM κάθε υποκανάλι μπορεί να έχει διαφορετικό σχήμα διαμόρφωσης. Στα υποκανάλια με υψηλό SNR μεταδίδουμε περισσότερα bits/σύμβολο χρησιμοποιώντας μεγαλύτερους MPSK, MQAM σηματοστερισμούς, ενώ σε κανάλια χαμηλότερου SNR θα χρησιμοποιήσουμε ως πούμε QPSK. Επομένως το σύστημα OFDM μπορεί να λειτουργεί προσαρμοστικά για αύξηση της φασματικής απόδοσης, βελτιστοποίηση (optimization). Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης μπορεί να βελτιστοποιηθεί κατανέμοντας κατάλληλα τη μέση μεταδιδόμενη ισχύ και τον αριθμό των προς μετάδοση bits ανάλογα με τις συνθήκες σε κάθε επίπεδο – όπως θα δούμε αργότερα – ως προς τις συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις και τα χαρακτηριστικά της διάδοσής του υποκανάλι, αφού πρώτα έχουμε κάνει εκτίμηση καναλιού, με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε ρυθμό σφαλμάτων (bit error rate, BER) σε κάθε υποκανάλι σύμφωνα με τις επιθυμητές προδιαγραφές για την ποιότητα της υπηρεσίας (quality of service, QoS).

Για τη δημιουργία των σημάτων βασικής ζώνης χρησιμοποιούμε το λεγόμενο μορφοποιητικό παλμό. Τα μιγαδικά σημεία που παίρνουμε απ' το constellation mapping πολλαπλασιάζονται με το μορφοποιητικό παλμό και αυτά τα σήματα στη συνέχεια πολλαπλασιάζονται με τα αντίστοιχα υποφέροντα. Ο μορφοποιητικός παλμός «κόβει» το διαμορφωμένο κατά πλάτος ή φάση ημίτονο, ώστε αυτό να αποστέλλεται κάθε περίοδο ίση με τη διάρκεια συμβόλου και αυτό συμβαίνει για κάθε υποφέρον παράλληλα. Η διάρκεια του μορφοποιητικού παλμού λοιπόν είναι

αυτή που καθορίζει τη διάρκεια του κάθε διαμορφωμένου υποφέροντος, δηλαδή τη διάρκεια συμβόλου.

Μεγάλη σημασία έχει το γεγονός ότι το φάσμα του μορφοποιητικού παλμού είναι αυτό που περνάει και στο σήμα που εκπέμπεται. Εδώ υποθέτουμε ότι χρησιμοποιούμε τετραγωνικό μορφοποιητικό παλμό του οποίου το φάσμα είναι η γνωστή συνάρτηση sinc ή συνάρτηση δειγματοληψίας. Αυτό λοιπόν είναι και το φάσμα του κάθε υποκαναλιού. Οπότε το φάσμα του OFDM σήματος θα έχει τη μορφή αλληλοεπικαλυπτόμενων και ορθογώνιων sinc συναρτήσεων :



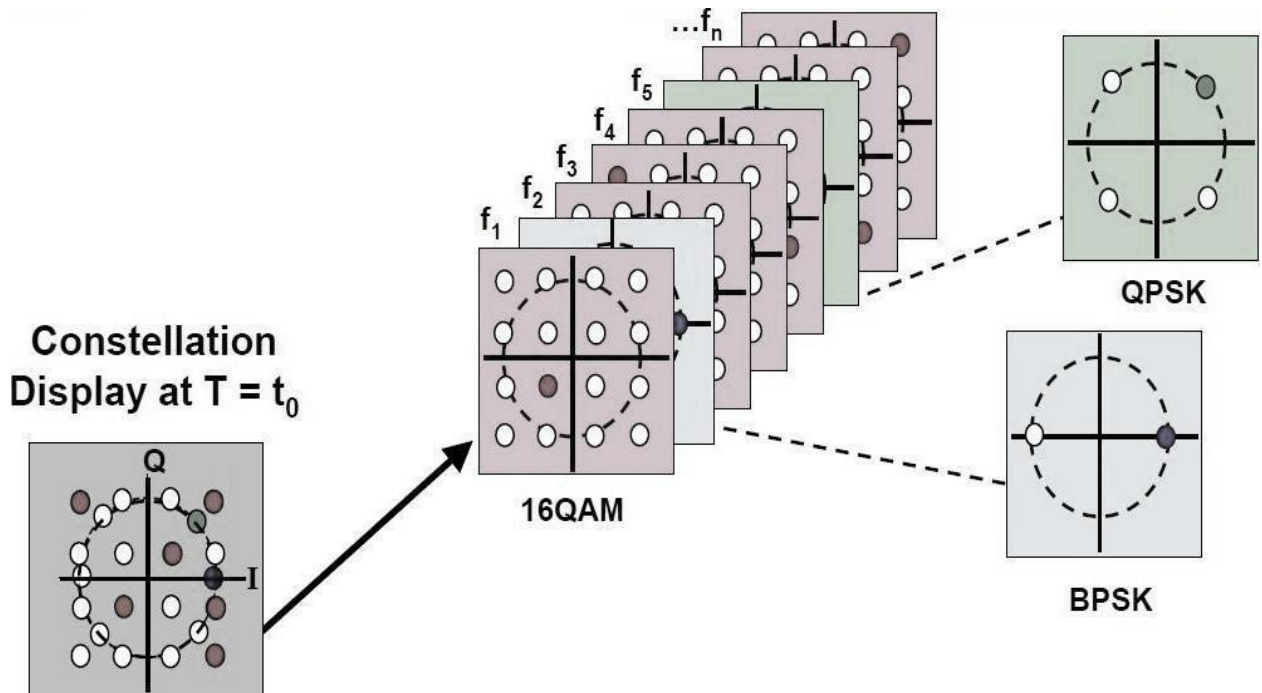
Σχήμα 1.4 : Φάσμα OFDM σήματος με τετραγωνικό μορφοποιητικό παλμό στην ψηφιακή διαμόρφωση

Το πρόβλημα που ανακύπτει εδώ είναι η φασματική διαπλάτυνση, οι φασματικές ουρές εκατέρωθεν του συνολικού OFDM. Απ' την στιγμή που έχει επιτευχθεί η φασματική εξοικονόμηση στο αρχικό ευρυζωνικό σήμα όπως είδαμε στην εισαγωγή και την εικόνα 1.2, το φάσμα που περισσεύει μπορεί να καταληφθεί από άλλη υπηρεσία – που δεν αποκλείεται φυσικά να χρησιμοποιεί και αυτή την τεχνική OFDM στο φυσικό επίπεδο. Οπότε λόγω της μορφής του αυτής το OFDM φάσμα μας μπορεί να παρεμβάλλει σε γειτονικά ευρυζωνικά κανάλια άλλων υπηρεσιών. Άλλωστε η ενέργεια του σήματος βρίσκεται συγκεντρωμένη στην αλληλουχία των κύριων λοβών, οι φασματικές ουρές είναι σχετικά «άχρηστες».

Για να έχουμε μία φασματική μορφή χωρίς δευτερεύοντες λοβούς και διαπλάτυνση πρέπει να χρησιμοποιήσουμε άλλον μορφοποιητικό παλμό, πιο ομαλό σε σχέση με τον τετραγωνικό, όπως είναι ο παλμός ανυψωμένου συνημιτόνου, αλλά εκεί έχουμε το trade-off ότι μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα η χρονική του μορφή. Το ζήτημα αυτό είναι σημαντικό και αναπτύσσονται τεχνικές για την αντιμετώπισή του.

Ανακεφαλαιώνοντας, η ψηφιακή διαμόρφωση μεταφράζεται σε αντιστοίχιση των συμβόλων πληροφορίας σε συγκεκριμένες διακριτές μιγαδικές τιμές. Στην OFDM

ένα σύνολο από μιγαδικά σημεία, λοιπόν, κωδικοποιημένα σε πολλαπλά ορθογώνια υποφέροντα είναι η είσοδος στο σύστημα του αντίστροφου ταχέως μετασχηματισμού Fourier, όπως θα δούμε στη συνέχεια, ένα σύνολο από constellation maps που δημιουργούν ένα συνολικό constellation map και αποστέλλονται κάθε περίοδο ίση με τη διάρκεια συμβόλου OFDM :



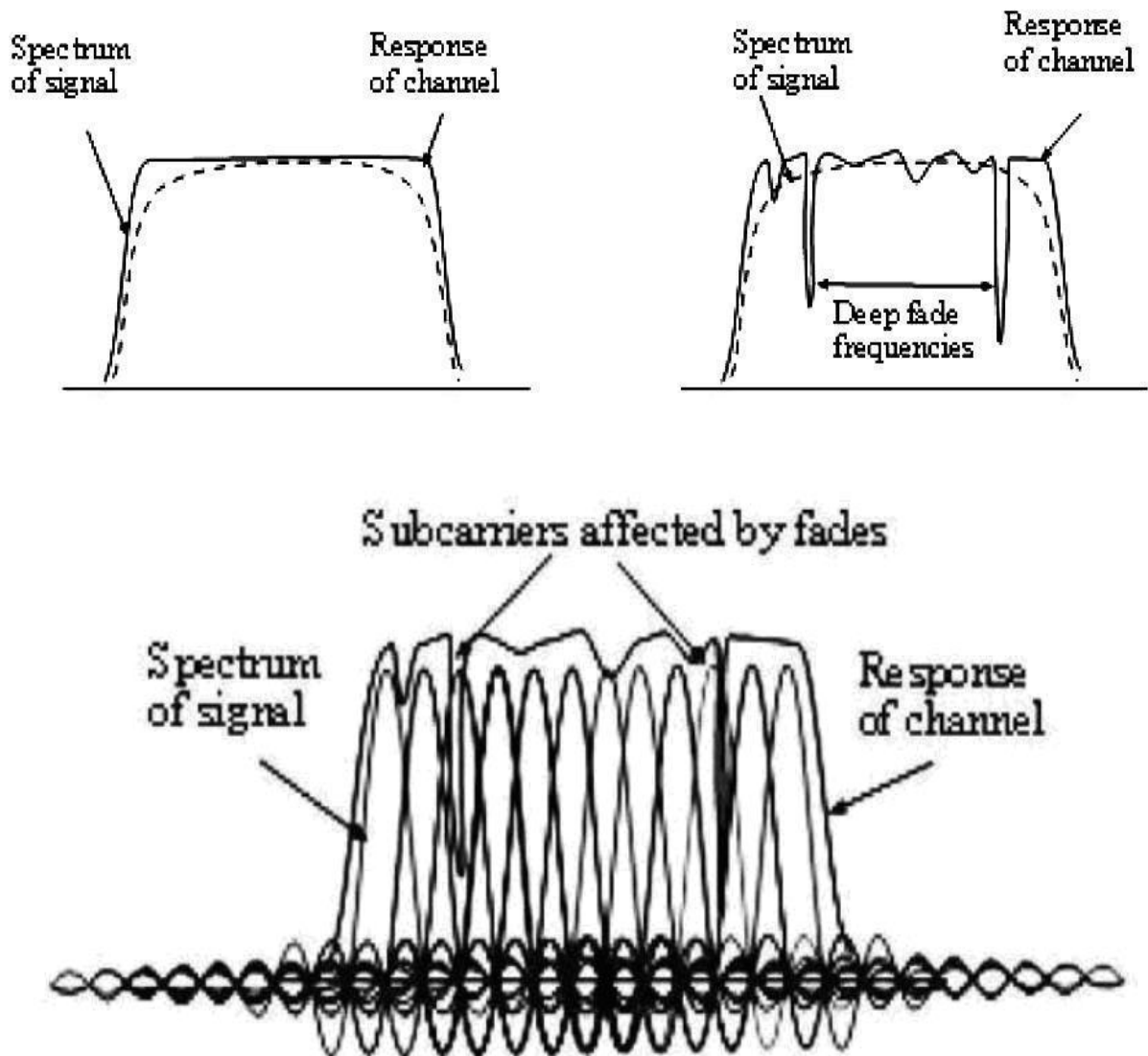
Σχήμα 1.3 : Ψηφιακή διαμόρφωση με δυνατότητα χρησιμοποίησης διαφορετικού σχήματος σε κάθε υποκάνάλι

1.4 Συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις - Διασυμβολική παρεμβολή

Είπαμε στην εισαγωγή ότι οι τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης με φασματική αποδοτικότητα, αλλά και ταυτόχρονη αντιμετώπιση των συνθηκών διάδοσης και της τυχαιότητας και μεταβλητότητας του διαύλου επικοινωνίας. Απ' τις βασικές λοιπόν αιτίες υιοθέτησης της παράλληλης πολυδιαυλικής μετάδοσης, και συγκεκριμένα της OFDM, είναι η δυνατότητα αντιμετώπισης των συχνοεπιλεκτικών διαλείψεων (frequency-selective fading) και της διασυμβολικής παρεμβολής (inter-symbol interference, ISI).

Στις τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης έχουμε ένα ευρυζωνικό σήμα που διαμορφώνει ένα μοναδικό φέρον. Αυτό εκπέμπεται σε ένα περιβάλλον όπου έχουμε πολυδιαδρομική διάδοση (multi-path propagation). Το σήμα λήψης είναι μία υπέρθεση πολλαπλών εκδοχών του σήματος που εκπέμφθηκε. Εκδοχές που υπόκεινται σε διαφορετικές αποσβέσεις και χρονικές καθυστερήσεις με αποτέλεσμα η υπέρθεσή τους να οδηγεί σε παραμόρφωση.

Το μέτρο της χρονικής διασποράς του σήματος λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι το εύρος ζώνης συνοχής (coherence bandwidth), στο πεδίο της συχνότητας. Έχουμε διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα όταν το μεγάλο εύρος ζώνης του σήματος υπερβαίνει το εύρος ζώνης συνοχής του διαύλου. Οι διάφορες φασματικές συνιστώσες υφίστανται διαφορετική μεταχείριση κατά τη μετάδοσή τους μέσω του επιλεκτικού ευρυζωνικού διαύλου. Η ανάκτηση της πληροφορίας στο δέκτη σ' αυτή την περίπτωση, η εξίσωση ή ισοστάθμιση (equalization) όπως λέγεται, είναι μία δύσκολη διαδικασία με υπολογιστική πολυπλοκότητα και κόστος.



Σχήμα 1.5 : Αντιμετώπιση των συχνοεπιλεκτικών διαλείψεων έχοντας ένα σύνολο από flat ως προς τα χαρακτηριστικά διάδοσής τους υποκανάλια γεγονός που απλοποιεί την ισοστάθμιση στο δέκτη

Στην OFDM όπου το ευρυζωνικό κανάλι διαιρείται σε έναν μεγάλο αριθμό υποκαναλιών στενής ζώνης, με εύρος ζώνης του καθενός μικρότερο από το εύρος ζώνης συνοχής του διαύλου μετάδοσης διασφαλίζουμε ότι το κάθε υποκανάλι υπόκειται σε μη επιλεκτικές διαλείψεις ως προς τη συχνότητα. Μετατρέπουμε

δηλαδή νοητά το συχνοεπιλεκτικό διάυλο σε ένα σύνολο flat, επίπεδων υποδιαύλων, με σταθερό κέρδος και γραμμική φάση, με αποτέλεσμα η διέλευση, μέσω αυτών, των αντίστοιχων υποκαναλιών της OFDM να μην αλλοιώνει τα φασματικά χαρακτηριστικά των τελευταίων.

Όσο αυξάνεται ο αριθμός των υποκαναλιών τόσο πιο επίπεδα καθίστανται τα χαρακτηριστικά διάδοσης του διαύλου για κάθε υποκανάλι, πράγμα που δε σημαίνει βέβαια ότι επιλέγουμε υπερβολικά μεγάλο αριθμό υποκαναλιών γιατί τότε δημιουργούνται άλλα προβλήματα όπως θα δούμε παρακάτω – trade-off. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε να επηρεάζονται μόνο ελάχιστα από τα υποκανάλια από τις συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις, όπως βλέπουμε και στην παραπάνω εικόνα 1.5.

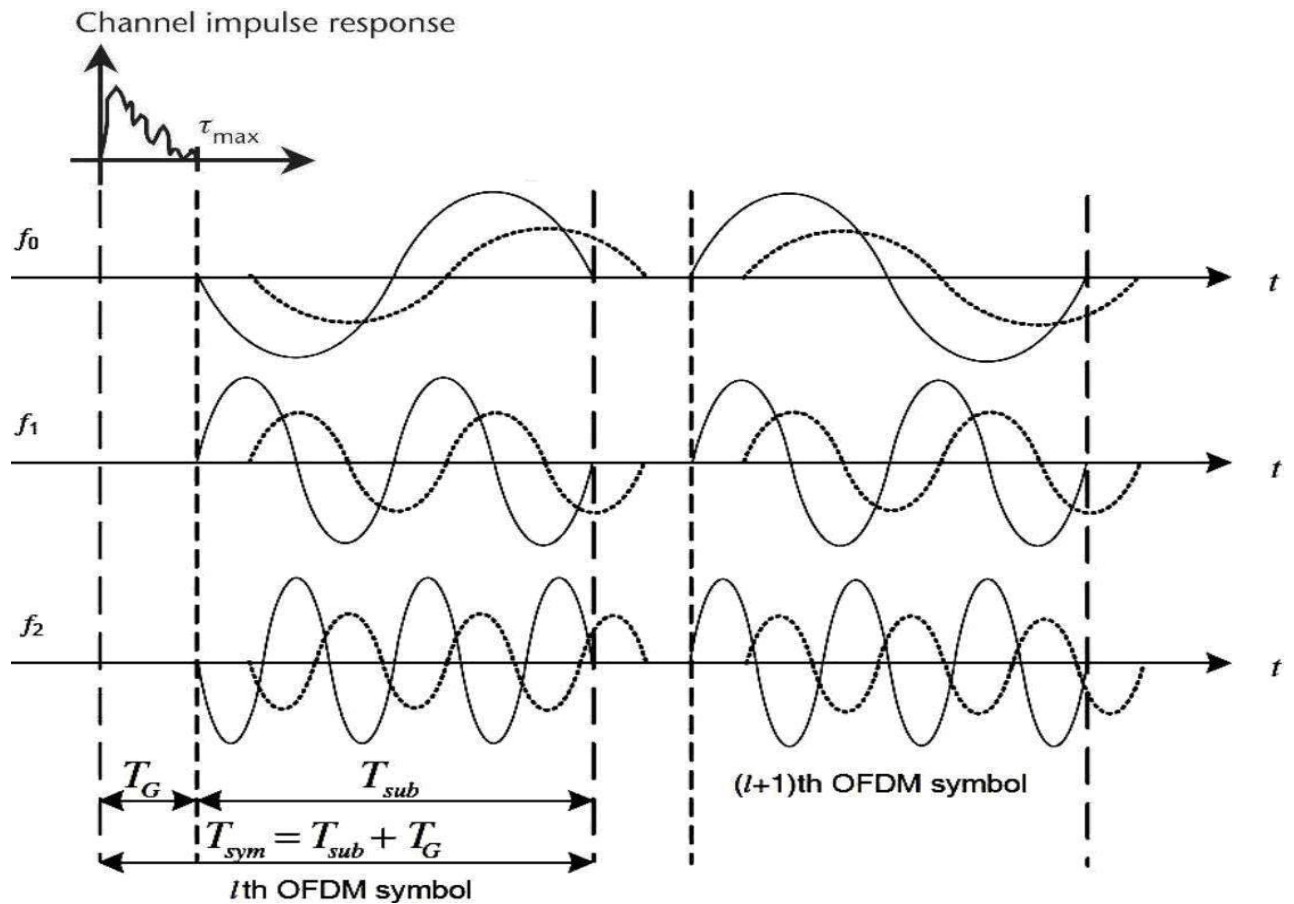
Η ισοστάθμιση σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ πιο εύκολη. Αυτό προϋποθέτει βέβαια ότι έχει με κάποιο τρόπο γίνει εκτίμηση του καναλιού επικοινωνίας. Η εκτίμηση του καναλιού μπορεί να επιτευχθεί με επιπρόσθετα πιλοτικά σύμβολα (pilots) που χρησιμοποιούνται ακριβώς μόνο γι' αυτό το σκοπό και δε φέρουν πληροφορία. Έτσι έχουμε καταλήξει στη μορφή της κρουστικής απόκρισης του διαύλου ή ισοδύναμα της συνάρτησης μεταφοράς του και γνωρίζουμε τους συντελεστές καναλιού, δηλαδή τις μιγαδικές τιμές της συνάρτησης μεταφοράς που αντιστοιχούν στο κάθε υποφέρον και εκφράζουν την επίπεδη μεταβολή στο πλάτος και τη φάση του. Με μία απλή διαίρεση, στο πεδίο της συχνότητας, της λαμβανόμενης πληροφορίας με τον αντίστοιχο συντελεστή κάνουμε την ισοστάθμιση στο δέκτη.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο για την ψηφιακή διαμόρφωση το σύστημα OFDM μπορεί να λειτουργεί προσαρμοστικά, οπότε είναι προφανές ότι στα υποκανάλια που πλήττονται από τις συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις θα χρησιμοποιήσουμε QPSK διαμόρφωση κι όχι μεγαλύτερους σηματοαστερισμούς.

Επανερχόμενοι στο αρχικό ευρυζωνικό σήμα, ως αποτέλεσμα της χρονικής διασποράς των συμβόλων που μεταδίδονται, οι επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις προκαλούν διασυμβολική παρεμβολή. Το μέτρο της χρονικής διασποράς του σήματος λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης στο πεδίο του χρόνου είναι η διασπορά καθυστέρησης (delay spread), μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο του εύρους ζώνης συνοχής. Η διασπορά καθυστέρησης είναι μεγαλύτερη απ' την μικρή διάρκεια συμβόλου, κι ως εκ τούτου η χρήση διαστημάτων φύλαξης (guard intervals) οδηγεί σε σημαντικό υποβιβασμό του ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.

Στην OFDM, αντιστρόφως, έχουμε πολύ μεγαλύτερη διάρκεια συμβόλου, μεγαλύτερη απ' τη διασπορά καθυστέρησης, κι έτσι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διαστήματα φύλαξης μεταξύ διαδοχικών συμβόλων για να αντιμετωπίσουμε τη διασυμβολική παρεμβολή. Προφανώς επιλέγουμε το διάστημα φύλαξης (T_g στο επερχόμενο σχήμα) να είναι τουλάχιστον ίσο με τη μέγιστη εκτιμώμενη διασπορά καθυστέρησης (maximum excess delay, τ_{max} στο σχήμα), θυμίζοντας ξανά ότι προηγουμένως έχουμε κάνει εκτίμηση του διαύλου και της κρουστικής απόκρισής του (channel impulse response). Βάσει και αυτών, το μήκος

του διαστήματος φύλαξης επιλέγεται στην πράξη ίσο με το 1/4 το πολύ – είναι δυνατά, όπως θα δούμε στο DVB-T2, πολύ μικρότερα κλάσματα - της ωφέλιμης διάρκειας συμβόλου OFDM (T_{sub} στο σχήμα) :



Σχήμα 1.6 : Διασυμβολική παρεμβολή – διάστημα φύλαξης

Η μείωση του ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης από τη χρήση του διαστήματος φύλαξης αντισταθμίζεται φυσικά από την αναγκαιότητα για αναίρεση της διασυμβολικής παρεμβολής. Η χρήση του διαστήματος φύλαξης αντιμετωπίζει τη διασυμβολική παρεμβολή μεταξύ γειτονικών συμβόλων, αλλά όχι και μέσα στο ίδιο το σύμβολο. Αυτό δημιουργεί πρόβλημα στην εκτίμηση της ωφέλιμης διάρκειας συμβόλου, το αντίστροφο της οποίας είναι η απόσταση μεταξύ των υποφερόντων και είναι το κλειδί για την ορθογωνιότητα. Έτσι έχουμε πιθανότητας ενδοσυμβολικής παρεμβολής.

Το διάστημα φύλαξης λοιπόν δεν αφήνεται κενό – κάτι που επιπροσθέτως είναι και φυσικά αντιληπτό καθότι ο πομπός εκπέμπει, και πρέπει να εκπέμπει, συνεχόμενα. Καταλαμβάνεται από το λεγόμενο κυκλικό πρόθεμα όπως θα δούμε στη συνέχεια, οπότε και θα αναδυθούν και θα αναδειχθούν όλα τα οφέλη από τη χρήση του και θα καταστεί σαφές ότι το κυκλικό πρόθεμα είναι το πιο βασικό συστατικό στοιχείο της τεχνικής OFDM.

Τέλος απλά να αναφέρουμε κάτι που θα δούμε παρακάτω στα μονοσυχνотικά δίκτυα (single frequency networks – SFN). Το μέγεθος του διαστήματος φύλαξης είναι μία σημαντική παράμετρος γιατί επιπροσθέτως περιορίζει τη μέγιστη επιτρεπτή απόσταση μεταξύ των αναμεταδοτών του δικτύου.

1.5 Υλοποίηση

Ο αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier (inverse discrete Fourier transform, IDFT) N σημείων επί της ακολουθίας \mathbf{X}_k , $k = 0, 1, \dots, N - 1$ εκφράζεται από τη σχέση :

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp(j2\pi kn/N) \quad (1)$$

όπου $n = 0, 1, \dots, N - 1$ και $\frac{1}{\sqrt{N}}$ απλά ένας παράγοντας κλίμακας.

Μετατρέπει έναν αριθμό N μιγαδικών σημείων \mathbf{X}_k - στο πεδίο της συχνότητας - σε έναν ίσο αριθμό από μιγαδικά σημεία \mathbf{x}_n στο πεδίο του χρόνου.

Οπότε καταλαβαίνουμε το λόγο που ο IDFT - και μάλιστα ο υπολογισμός αυτού με τον αλγόριθμο του αντίστροφου ταχέως μετασχηματισμού Fourier (inverse fast Fourier transform, IFFT) για μεγάλο αριθμό υποφερόντων – χρησιμοποιείται για την υλοποίηση της τεχνικής OFDM. Τα N μιγαδικά σημεία \mathbf{X}_k είναι τα σημεία που παίρνουμε από την ψηφιακή διαμόρφωση κάθε υποκαναλιού και το constellation mapping και κωδικοποιούν τα προς μετάδοση σύμβολα. Καθένα απ' τα X_k διαμορφώνει το αντίστοιχο υποφέρον $\exp(j2\pi kt/T_N)$, $k = 0, 1, \dots, N - 1$, όπου T_N η ωφέλιμη διάρκεια συμβόλου χωρίς το διάστημα φύλαξης δηλαδή, και $1/T_N$ η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών υποφερόντων – ορθογωνιότητα.

Η ύπαρξη επίσης του τετραγωνικού μορφοποιητικού παλμού στην εξίσωση μπορεί να υπονοηθεί, με πλάτος 1 και βέβαια διάρκεια T_N , για κάθε υποφέρον. Έτσι, τα διαμορφωμένα υποφέροντα αποκτούν διάρκεια T_N το καθένα – που είναι και η διάρκεια συμβόλου OFDM – προστίθενται και μεταδίδονται παράλληλα, όπως έχουμε αναφέρει, και με διαδικασία που υλοποιείται με τον τρόπο που θα δούμε στη συνέχεια.

Πρώτα όμως πρέπει να δούμε ένα άλλο ζήτημα. Έστω ότι έχουμε μία ακολουθία χρονικών δειγμάτων $\mathbf{x}[n]$ που διέρχεται μέσω γραμμικού διαύλου διακριτού χρόνου με κρουστική απόκριση $\mathbf{h}[n]$. Η Φύση μας «παρέχει» γραμμική συνέλιξη. Οπότε η έξοδος του διαύλου θα είναι η ακολουθία $\mathbf{y}[n]$:

$y[n] = x[n] * h[n]$ (2), όπου το $*$ συμβολίζει τη γραμμική συνέλιξη.

Ας φανταστούμε τώρα ότι υπολογίζουμε το $y[n]$ σε όρους κυκλικής συνέλιξης :

$$y[n] = x[n] \otimes h[n] = h[n] \otimes x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} h[k] x[n-k]_N \quad (3)$$

όπου το \otimes συμβολίζει την κυκλική συνέλιξη.

Το $[n-k]_N = (n-k) \bmod N$ είναι το υπόλοιπο της διαίρεσης του $(n-k)$ με το N . Δηλαδή το $x[n-k]_N$ αποτελεί περιοδική επανάληψη του $x[n-k]$ με περίοδο N . Απ' τις ιδιότητες της πράξης της συνέλιξης αποδεικνύεται ότι και η ακολουθία $y[n]$ είναι επίσης περιοδική με περίοδο N . Μία μοναδική ιδιότητα του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) είναι ο δυϊσμός μεταξύ της κυκλικής συνέλιξης στο πεδίο του χρόνου και του απλού πολλαπλασιασμού στο πεδίο της συχνότητας. Οπότε σ' αυτή την περίπτωση μπορούμε να πάρουμε :

$$DFT\{y[n]\} = DFT\{x[n] \otimes h[n]\} \quad (4)$$

το οποίο στο πεδίο της συχνότητας γίνεται :

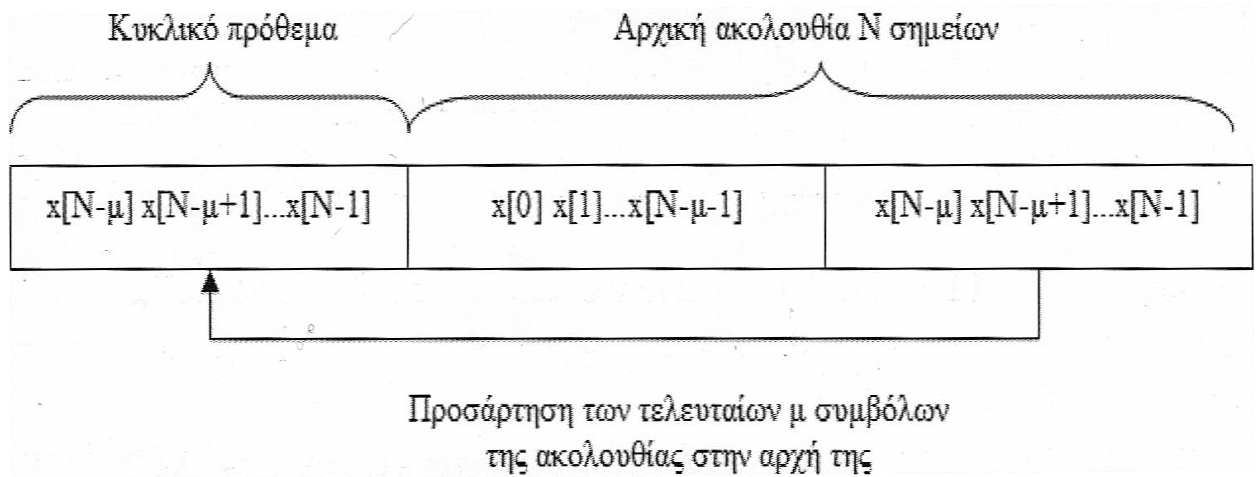
$$Y = X \bullet H \quad (5)$$

όπου το \bullet συμβολίζει τον απλό πολλαπλασιασμό

και $Y = DFT\{y[n]\}$, $X = DFT\{x[n]\}$, $H = DFT\{h[n]\}$.

Με την προϋπόθεση ότι έχουμε κάνει εκτίμηση διαύλου, γνωρίζουμε τους συντελεστές καναλιού, τις τιμές της συνάρτησης μεταφοράς, για κάθε υποκανάλι. Γνωρίζουμε δηλαδή το H . Οπότε διαιρώντας, στην παραπάνω εξίσωση (5), το Y με το H παίρνουμε το X . Έχοντας αναιρέσει τις συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις, όπως εκτενώς έχουμε αναλύσει, η διαίρεση αυτή αναφέρεται και ως σημείου-προς-σημείο. Ανακτούμε δηλαδή την πληροφορία κάθε υποκαναλιού, το X , ξεχωριστά, διαιρώντας το Y με τον αντίστοιχο συντελεστή καναλιού H και πετυχαίνουμε ισοστάθμιση.

Ωστόσο θυμίζουμε ότι η έξοδος του διαύλου είναι στην πραγματικότητα γραμμική συνέλιξη και όχι κυκλική. Προκειμένου να αξιοποιηθούν όλες οι πολύ χρήσιμες προαναφερθείσες ιδιότητες, απαιτείται η προσθήκη μιας επιπλέον ακολουθίας στην αρχή του μηνύματος $x[n]$. Συγκεκριμένα τα τελευταία μ δείγματα της ακολουθίας διακριτού χρόνου $x[n]$ προσαρτώνται στην αρχή της. Αυτή η κυκλική επέκταση της ουράς της ακολουθίας στην αρχή της είναι το κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix, CP), όπως βλέπουμε και στο σχήμα που ακολουθεί :



Σχήμα 1.7 : Κυκλικό πρόθεμα

Η νέα ακολουθία $x_{CP}[n]$ έχει μήκος $N+\mu$. Αν αντί της ακολουθίας $x[n]$ εισαχθεί στο διάλυο κρουστικής απόκρισης $h[n]$ η ακολουθία $x_{CP}[n]$, η έξοδος του διαύλου $y[n]$, $0 \leq n \leq N - 1$, είναι :

$$y[n] = x_{CP}[n] * h[n] = \sum_{k=0}^{\mu-1} h[k] x_{CP}[n-k] = \sum_{k=0}^{\mu-1} h[k] x[n-k]_N = x[n] \otimes h[n] \quad (6)$$

Η ακολουθία $x_{CP}[n]$ είναι περιοδική. Έχουμε τα ίδια μ δείγματα τα οποία συναντάμε στην αρχή και στο τέλος της ακολουθίας μήκους $N+\mu$. Έτσι, σύμφωνα και με τις ιδιότητες της πράξης της συνέλιξης, παίρνουμε στην εξίσωση (6) τα αθροίσματα για $0 \leq k \leq \mu - 1$ και την ισότητα ($0 \leq k \leq \mu - 1$) $x_{CP}[n - k] = x[n - k]_N$ ($0 \leq n \leq N - 1$). Το αποτέλεσμα είναι αυτό που επιδιώκουμε, δηλαδή η μετατροπή της γραμμικής συνέλιξης στο διάλυο σε κυκλική.

Το κυκλικό πρόθεμα καταλαμβάνει, όπως έχουμε αναφέρει, το διάστημα φύλαξης που δεν πρέπει να μείνει κενό. Δηλαδή το μήκος της ακολουθίας των μ χρονικών δειγμάτων ισούται με τη μέγιστη εκτιμώμενη διασπορά καθυστέρησης της κρουστικής απόκρισης του διαύλου. Στο δέκτη το κυκλικό πρόθεμα απορρίπτεται και μένουν μόνο τα N δείγματα που απαιτούνται για την αποδιαμόρφωση.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι το κυκλικό πρόθεμα είναι δομικό στοιχείο της τεχνικής OFDM το οποίο ανακεφαλαιώνοντας :

- Εξαλείφει τη διασυμβολική παρεμβολή (ISI)
- Διατηρεί την ορθογωνιότητα μεταξύ των υποφερόντων και προστατεύει απ' την ενδοσυμβολική παρεμβολή (ICI)
- Είναι μία βοηθητική προσθήκη, μία περιοδική επανάληψη, μία κυκλική επέκταση που στο δέκτη απορρίπτεται. Βοηθητική και απορριπτόμενη αλλά απαραίτητη,

καθότι μετατρέπει τη γραμμική συνέλιξη στο δίαυλο σε κυκλική. Έτσι γίνεται δυνατή η αποδιαμόρφωση με DFT – υλοποίηση αυτού με τον αλγόριθμο FFT – στο δέκτη και η αξιοποίηση των χρήσιμων ιδιοτήτων του DFT. Επιτυγχάνεται ισοστάθμιση και ανάκτηση της πληροφορίας του κάθε υποκαναλιού ξεχωριστά.

- Συμβάλλει στο χρονικό συγχρονισμό στο δέκτη και στην εκτίμηση της έναρξης και της διάρκειας συμβόλου, καθώς έχουμε δείγματα που επαναλαμβάνονται κι έτσι αναγνωρίζονται.

Τώρα μπορούμε να προχωρήσουμε στην βήμα-προς-βήμα περιγραφή της διαδικασίας υλοποίησης του συστήματος εκπομπής OFDM. Η ενιαία ροή ψηφίων πληροφορίας εισέρχεται στον πομπό του συστήματος OFDM. Το πρώτο βήμα είναι η κωδικοποίηση του καναλιού για ανίχνευση και διόρθωση λαθών (forward error correction, FEC). Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται κάποιος απ' τους γνωστούς σχετικούς κώδικες – γραμμικοί, block, Reed-Solomon, συνελκτικοί (convolutional), αλυσιδωτοί, turbo, LDPC (low density parity check), κλπ.

Η διάδοση, ως γνωστόν, γίνεται σ' ένα περιβάλλον όπου, εκτός απ' την πρόσθεση θορύβου, έχουμε έντονες και βαθιές διαλείψεις, που προκαλούν λάθη καταϊγιστικού τύπου που εμφανίζονται κατά ομάδες (burst errors). Ως εκ τούτου, οι προαναφερθέντες κώδικες συνδυάζονται απαραίτητα με την τεχνική της αναδιάταξης ή ανάδευσης ή διεμπλοκής (interleaving).

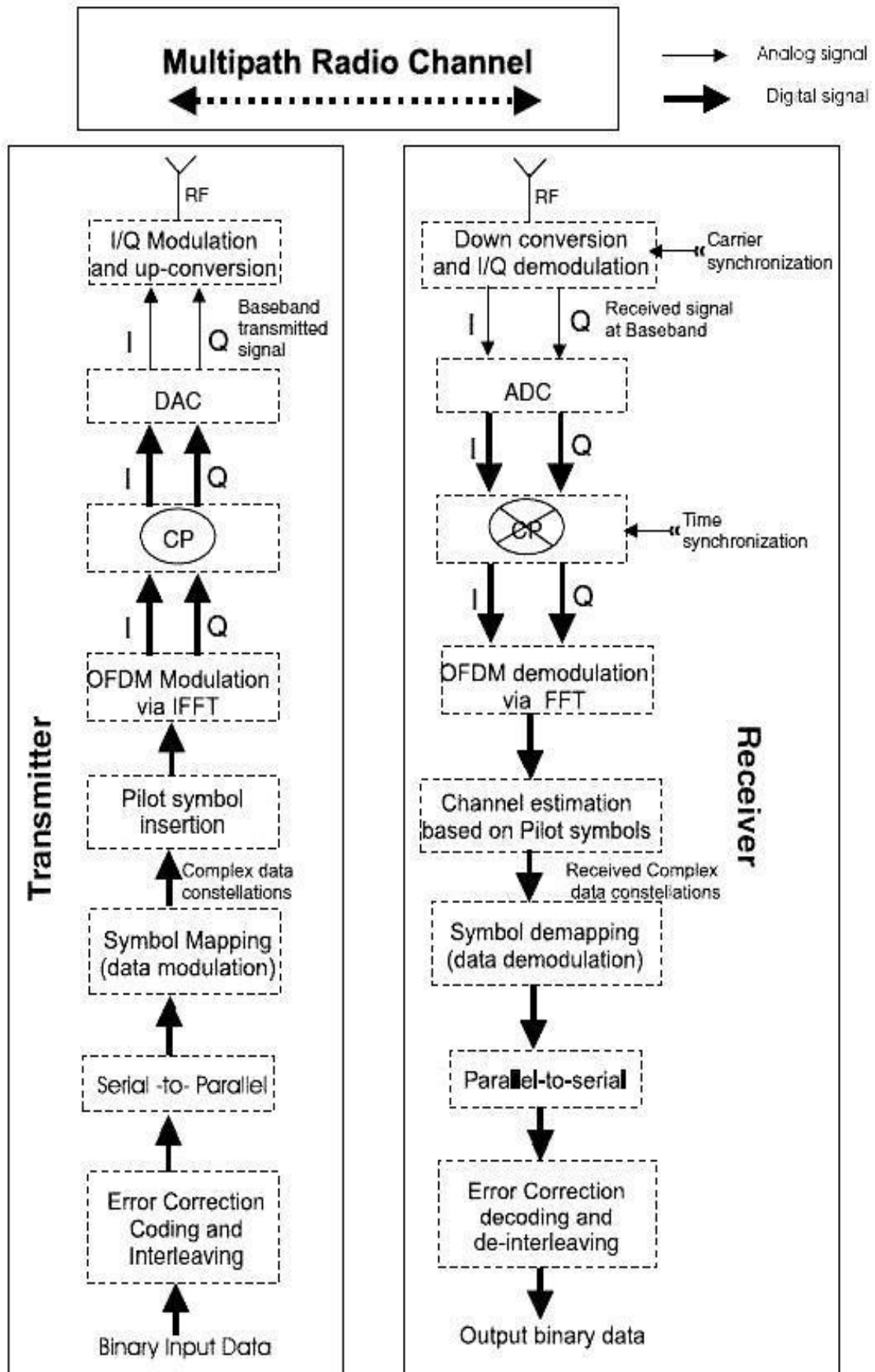
Στη συνέχεια έχουμε διαίρεση της ενιαίας ροής ψηφίων πληροφορίας σε επιμέρους παράλληλες ροές, όπως είδαμε στο σχήμα 1.1, με έναν μετατροπέα σειριακού-σε-παράλληλο (serial-to-parallel). Το επόμενο βήμα είναι η ψηφιακή διαμόρφωση και το constellation mapping. Στο σημείο αυτό μπορεί να εισαχθεί το πιλοτικό σύμβολο για την εκτίμηση του καναλιού. Τα N μιγαδικά σημεία στο πεδίο της συχνότητας που προκύπτουν, όπως έχουμε αναλύσει, εισάγονται στον IFFT.

Η έξοδος του IFFT είναι μία ακολουθία ισάριθμων μιγαδικών σημείων στο πεδίο του χρόνου. Χωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη μπορούμε να πούμε, ισοδύναμα, ότι στην έξοδο του IFFT έχουμε δύο ακολουθίες πραγματικών σημείων. Η ακολουθία των πραγματικών μερών αποτελεί τη συμφασική συνιστώσα (in-phase, I) και η ακολουθία των φανταστικών την ορθογώνια (quadrature, Q). Και οι δύο έχουν από N χρονικά δείγματα με περίοδο δειγματοληψίας T_N/N .

Κάθε μία απ' τις δύο αυτές ακολουθίες I και Q μπορεί να θεωρηθεί σαν η ακολουθία διακριτού χρόνου $\mathbf{x}[n]$ με την οποία ασχοληθήκαμε στις αμέσως προηγούμενες παραγράφους για το κυκλικό πρόθεμα και τη συνέλιξη. Σε κάθε μία λοιπόν εισάγεται το κυκλικό της πρόθεμα με τον τρόπο που είδαμε.

Μετά την κυκλική τους επέκταση οι δύο ακολουθίες εισέρχονται σε έναν μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό (digital-to-analog converter, DAC). Στην έξοδο του έχουμε δύο σήματα βασικής ζώνης που είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Το τελευταίο στάδιο προφανώς είναι ο ορθογώνιος διαμορφωτής (I/Q modulation) με άνω μετατροπή (up conversion) συχνότητας κατά τη φέρουσα συχνότητα εκπομπής.

Στο δέκτη ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία : κάτω μετατροπή συχνότητας - ορθογώνια αποδιαμόρφωση (σημείο στο οποίο έχουμε και τον πολύ βασικό συχνοτικό συγχρονισμό, carrier synchronization), μετατροπές αναλογικού-σε-ψηφιακό (με περίοδο δειγματοληψίας T_N/N ή ισοδύναμα τη συνολική διάρκεια συμβόλου διά τα συνολικά δείγματα μαζί με το κυκλικό πρόθεμα), αφαίρεση κυκλικού προθέματος (το οποίο μας βοηθάει και στο χρονικό συγχρονισμό, time synchronization), FFT, εκτίμηση του καναλιού βάσει του πιλοτικού συμβόλου, constellation demapping - ψηφιακή αποδιαμόρφωση κάθε υποκαναλιού ξεχωριστά, μετατροπές παράλληλου-σε-σειριακό, αποκωδικοποίηση λαθών. Ακολουθεί η απεικόνιση όλης της προαναφερθείσας διαδικασίας υλοποίησης της τεχνικής OFDM:

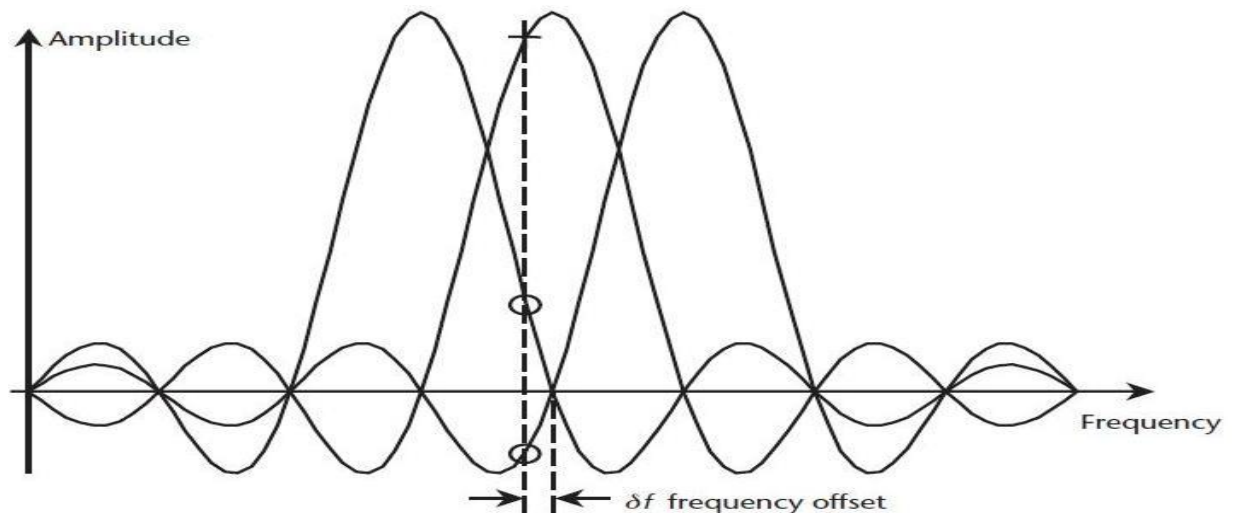


Σχήμα 1.8 : Διαδικασία υλοποίησης συστήματος εκπομπής OFDM

1.6 Προβλήματα

Έχουμε μιλήσει για τη συχνοεπιλεκτική συμπεριφορά του διαύλου, το εύρος ζώνης συνοχής, τη διασπορά καθυστέρησης και τη διασυμβολική παρεμβολή. Υπάρχει όμως και η χρονική μεταβολή του διαύλου, με μέτρο το χρόνο συνοχής, που χαρακτηρίζεται από την ολίσθηση συχνότητας που προκαλείται στο σήμα λόγω του φαινομένου Doppler, και από την κίνηση ακόμα του περιβάλλοντος αν δεν έχουμε κίνηση του δέκτη. Ο συγχρονισμός επίσης μεταξύ των ταλαντωτών πομπού και δέκτη (carrier frequency offset, CFO) είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα.

Ενώ λοιπόν ο χρονικός συγχρονισμός και η αντιμετώπιση των σφαλμάτων στην εκτίμηση της έναρξης συμβόλου (timing offset) είναι σχετικά εύκολη υπόθεση στην τεχνική OFDM λόγω της χρήσης του κυκλικού προθέματος, δεν ισχύει το ίδιο και για το συγχρονισμό στη συχνότητα. Μία μικρή απόκλιση στη συχνότητα λόγω CFO ή Doppler μπορεί να οδηγήσει σε ενδοσυμβολική παρεμβολή. Αυτό γίνεται σαφές αν θυμηθούμε τη μορφή του φάσματος του OFDM σήματος :



Σχήμα 1.9 : Απόκλιση συχνότητας, ενδοσυμβολική παρεμβολή

Τα αλληλοεπικαλυπτόμενα φάσματα των υποκαναλιών μορφής sinc είναι πολύ στενά τοποθετημένα μεταξύ τους και η διατήρηση της ορθογωνιότητας και ο συχνοτικός συγχρονισμός είναι ένα πολύ κρίσιμο ζήτημα. Έχουμε λοιπόν ένα trade-off, έναν συμβιβασμό, μία ανταλλαγή. Μεγάλος αριθμός υποκαναλιών σημαίνει μεγαλύτερη φασματική απόδοση και εξάλειψη της διασυμβολικής παρεμβολής, αλλά τότε έχουμε και μεγαλύτερη πιθανότητα για ενδοσυμβολική παρεμβολή. Απώλεια της ορθογωνιότητας μπορεί να έχουμε και λόγω του θορύβου φάσης των ταλαντωτών (phase noise) αλλά και των αποκλίσεων μεταξύ των κυκλωμάτων δειγματοληψίας πομπού και δέκτη (sampling clock offset). Υπάρχουν και αναπτύσσονται τεχνικές για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων που είναι σύμφυτα με τη χρήση της OFDM.

Ο λόγος της μέγιστης ισχύος προς τη μέση ισχύ (peak to average power ratio, PAPR) στην τεχνική OFDM είναι ένα άλλο πρόβλημα. Έχει τιμή μεγαλύτερη απ' ό,τι στα συστήματα μοναδικού φέροντος. Ο λόγος είναι ότι στο πεδίο του χρόνου ένα σήμα πολλαπλών υποφερόντων, όπως έχουμε δει, είναι το άθροισμα πολλών σημάτων στενής ζώνης.

Πιο συγκεκριμένα οι μεγάλες κορυφές σήματος προκύπτουν όταν τα σήματα των N υποκαναλιών συμβάλλουν προσθετικά σε φάση. Σε κάποιες χρονικές στιγμές αυτό το άθροισμα είναι μεγάλο και σε άλλες είναι μικρό, το οποίο σημαίνει ότι η μέγιστη τιμή του σήματος είναι αρκετά μεγαλύτερη από την μέση τιμή. Οι μεγάλες αυτές κορυφές μπορούν να φέρουν σε κόρο τον ενισχυτή ισχύος στον πομπό και να προκαλέσουν παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης στο μεταδιδόμενο σήμα.

Με την αύξηση μάλιστα του αριθμού των υποφερόντων ο PAPR αυξάνεται γραμμικά και επιβάλλει προληπτικά τη λειτουργία του ενισχυτή του πομπού με μεγάλο περιθώριο ισχύος ώστε να παραμένει στη γραμμική περιοχή ακόμα και όταν μεγιστοποιείται η ισχύς εκπομπής. Έχουμε έτσι αύξηση του κόστους του ενισχυτή του πομπού που έτσι κι αλλιώς είναι ένα από τα πιο ακριβά μέρη του συστήματος.

Η παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης μπορεί να μετριαστεί μειώνοντας την ισχύ εκπομπής, μείωση που απ' την άλλη όμως έχει ως αποτέλεσμα τη μη αποδοτική λειτουργία του OFDM συστήματος – trade-off. Συνήθως για την ελάττωση του PAPR αυτό που γίνεται είναι ότι εισάγονται διαφορετικές ολισθήσεις φάσης στα υποφέροντα, ολισθήσεις φάσης που επιλέγονται ψευδοτυχαία ή με τη χρήση κάποιου αλγορίθμου.

2. Επίγεια Ψηφιακή Ευρυεκπομπή

2.1 Πρότυπο DVB-T/T2 (Digital Video Broadcasting – Terrestrial)

Η μετάβαση (switchover/transition) απ' την αναλογική στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση (digital terrestrial television, DTT) στην Ευρώπη είναι συνδεδεμένη με το πρότυπο DVB (Digital Video Broadcasting). Το 1993 ιδρύεται μία κοινοπραξία από κρατικούς και ιδιωτικούς φορείς που δραστηριοποιούνται στον τομέα της εκπομπής τηλεοπτικών προγραμμάτων. Διανομείς υπηρεσιών ευρυεκπομπής (broadcasting), παροχείς δικτυακών υπηρεσιών, εταιρίες ανάπτυξης λογισμικού, βιομηχανίες, κατασκευαστές, κ.ά. συστήνουν μία ομάδα εργασίας με σκοπό την προτυποποίηση ενός συστήματος που θα εξασφαλίζει :

- Μετάδοση τηλεοπτικής εικόνας υψηλής ευκρίνειας (high definition TV, HDTV)
- Μετάδοση τηλεοπτικής εικόνας τυπικής ευκρίνειας (standard definition TV, SDTV) σε διαύλους στενής ζώνης
- Λήψη τηλεοπτικού προγράμματος από φορητούς, χαμηλού κόστους δέκτες
- Λήψη τηλεοπτικού προγράμματος από δέκτες τοποθετημένους σε οχήματα, ακόμα κι αν αυτά κινούνται με υψηλή ταχύτητα
- Σταθερή ποιότητα υπηρεσίας ακόμα και σε διαύλους με έντονες διαλείψεις και υπό την παρουσία παρεμβολών
- Σταθερή ποιότητα υπηρεσίας σε μία καλά ορισμένη περιοχή κάλυψης
- Δυνατότητα διανομής του περιεχομένου από υφιστάμενα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα

Το αποτέλεσμα των εργασιών αυτών είναι η δημιουργία του προτύπου DVB και η καθιέρωσή του μέσω επίσημων οργανισμών, όπως το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute, ETSI), η Ένωση Ευρωπαίων Παρόχων (European Broadcasting Union, EBU) και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνικής Τυποποίησης (Comité Européen de Normalisation ELECTrotechnique, CENELEC). Οι οργανισμοί αυτοί με από κοινού επιτροπές (joint technical committee, JTC) πιστοποιούν και τις επικαιροποιήσεις του DVB.

Ήδη απ' τα τέλη της δεκαετίας του 1990 οι νέοι στόχοι που έθεσε το DVB ήταν :

- Πολλαπλασιασμός των τηλεοπτικών προγραμμάτων που θα μπορούν να μεταδοθούν, στο ίδιο εύρος συχνοτήτων που διατίθεται για εκπομπή ενός

προγράμματος αναλογικής τηλεόρασης

- Υποστήριξη εκπομπής ραδιοφωνικού προγράμματος
- Υποστήριξη δυνατότητας μεταφοράς δεδομένων
- Υποστήριξη δυνατότητας μεταβαλλόμενης ποιότητας ήχου και εικόνας
- Υποστήριξη συνδρομητικών υπηρεσιών
- Υποστήριξη διαδραστικών υπηρεσιών
- Πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω της τηλεοπτικής συσκευής

Έτσι το DVB μετεξελίσσεται σε ένα ολοκληρωμένο πρότυπο επίγειας τηλεοπτικής ευρυεκπομπής ψηφιακού πολυμεσικού περιεχομένου, που καθορίζει ποιοτικά χαρακτηριστικά για το εκπεμπόμενο σήμα, τεχνικές παραμέτρους πομποδεκτών και προδιαγραφές συμβατότητας των πομπών, ενώ τα λεπτομερή τεχνικά χαρακτηριστικά των δεκτών καθορίζονται απ' τους κατασκευαστές. Ανάλογα με το μέσο μετάδοσης έχουμε το DVB-T (terrestrial) για την επίγεια ασύρματη μετάδοση, το DVB-C (cable) για την καλωδιακή, το DVB-S (satellite) για τη δορυφορική, ενώ για τη μετάδοση σε τερματικές συσκευές χειρός έχουμε το DVB-H (handheld).

Για το DVB και τα παράγωγα πρότυπά του, αποφασίστηκε ότι για την κωδικοποίηση των τηλεοπτικών και ηχητικών σημάτων καθώς και για την πολυπλεξία τους θα χρησιμοποιείτο το ήδη παγκοσμίως αποδεκτό πρότυπο MPEG-2 (Moving Picture Experts Group), όπως προδιαγράφεται από την Παγκόσμια Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union, ITU). Πρόκειται ουσιαστικά για αποδοτική τεχνική συμπίεσης που αποσκοπεί στη μετάδοση μόνον της ωφέλιμης πληροφορίας η οποία απαιτείται για την παρουσίαση εικόνας και ήχου στο δέκτη. Η αποτελεσματική χρήση της συμπίεσης προσδίδει την ικανότητα στο κανάλι να μεταδίδει επιπλέον υπηρεσίες.

Ως αποτέλεσμα της χρήσης των τεχνικών συμπίεσης αυτών, εξοικονομείται αισθητά μεγάλη χωρητικότητα σε κάθε δίαυλο εκπομπής, γεγονός το οποίο επιτρέπει τη μετάδοση πλήθους τηλεοπτικών προγραμμάτων και υπηρεσιών οι οποίες κάνουν χρήση του εύρους ζώνης το οποίο θα καταλάμβανε μόνη της η εκπομπή ενός αναλογικού τηλεοπτικού σήματος. Στη χρήση του προτύπου αυτού, οφείλεται η απόλυτη ευκρίνεια των μεταδιδόμενων εικόνων συνοδευόμενη από ήχο άριστης ποιότητας. Οι εικόνες μπορούν να είναι ορατές στην τυποποίηση που έχει αναλογία ανάλυσης εικόνας ίση με 4x3 και στην τυποποίηση ευρείας οθόνης, η οποία έχει αντίστοιχη αναλογία ανάλυσης ίση με 16x9, ενώ ο ήχος μπορεί να είναι μονοφωνικός, πολυφωνικός ή στερεοφωνικός. Επιπροσθέτως, η καθιέρωση του προτύπου MPEG-2 σε παγκόσμιο επίπεδο συνέβαλε στη αβίαστη μετάδοση των σημάτων DVB ανάμεσα σε διαφορετικά μέσα, ανάγκη επιτακτική στο σημερινό περιβάλλον τηλεπικοινωνιών.

Χάρη στη χρήση των πακέτων μεταφοράς MPEG-2 ως γενικευμένων «μεταφορέων δεδομένων» (data containers), ένας MPEG-2 συρμός μεταφοράς (transport stream, TS) – και συνεπώς ένα σύστημα DVB - μπορεί να μεταφέρει σχεδόν οτιδήποτε ψηφιοποιείται, από τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV) και πολλαπλά κανάλια SDTV μέχρι υψηλής ταχύτητας υπηρεσίες πολυμέσων και δεδομένων.

Το σύστημα μετάδοσης του DVB-T ορίζεται ως η διαδικασία που προσαρμόζει το σήμα βασικής ζώνης που προέρχεται από την έξοδο του MPEG-2 πολυπλέκτη στα χαρακτηριστικά του επίγειου καναλιού. Πιο πρόσφατα έχουμε την καθιέρωση και χρήση της τεχνικής συμπίεσης H.264/MPEG-4 AVC, καθώς και νέες κωδικοποιήσεις ήχου. Το πρότυπο DVB-T προδιαγράφει μία συγκεκριμένη δομή πλαισίου (frame), κωδικοποίηση διαύλου για διόρθωση λαθών και διαμόρφωση του σήματος για την επίγεια τηλεοπτική ψηφιακή ευρυεκπομπή. Στα δεδομένα εφαρμόζονται οι παρακάτω διεργασίες :

- αναδιάταξη των bits του ψηφιακού ρεύματος και τυχαιοποίηση για διασπορά ενέργειας (transport multiplex adaption and randomization for energy dispersal)
- εξωτερική κωδικοποίηση (αλγόριθμος Reed – Solomon, outer coding)
- εξωτερική αναδιάταξη των bytes για προστασία από ριπές λανθασμένων bytes (convolutional interleaving)
- εσωτερική κωδικοποίηση (συνελικτική, inner coding)
- εσωτερική αναδιάταξη των bytes
- διαμόρφωση βασικής ζώνης
- διαμόρφωση OFDM και μετάδοση

Οι διαφορετικοί ρυθμοί κώδικα (code rates) που μπορούν να επιτευχθούν είναι $1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$ και $7/8$. Ανάλογα με το μέγεθος του FFT/IFFT της OFDM διαμόρφωσης, δηλαδή των αριθμό των υποφερόντων, έχουμε δύο τρόπους (modes) μετάδοσης. Τον 2k-mode που αντιστοιχεί σε χρήση 1705 υποφερόντων και τον 8k-mode που αντιστοιχεί σε χρήση 6817 υποφερόντων. Η ψηφιακή διαμόρφωση κάθε υποκαναλιού της OFDM μπορεί να είναι QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Η διάρκεια του διαστήματος φύλαξης εκφράζεται ως ποσοστό της ωφέλιμης διάρκειας συμβόλου και οι πιθανές τιμές είναι $1/4$, $1/8$, $1/16$, $1/32$.

Ανάλογα με τον mode μετάδοσης (8k ή 2k), το σχήμα ψηφιακής διαμόρφωσης, το ρυθμό κώδικα και τη διάρκεια του διαστήματος φύλαξης ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μεταβάλλεται. Το σύστημα λειτουργεί προσαρμοστικά ως προς τις εκάστοτε συνθήκες του καναλιού, λαμβάνοντας υπόψη επίπεδα παρεμβολών, διαλείψεων και θορύβου, ώστε στο δέκτη να έχουμε την απαραίτητη τιμή σηματοθορυβικού λόγου για αποδιαμόρφωση.

Ως γενικός κανόνας ισχύει ότι ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας και η “ευρωστία” του σήματος είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη. Βελτίωση της επίδοσης στον ένα τομέα αποβαίνει αναγκαστικά σε βάρος του άλλου. Σε δυσμενείς συνθήκες, οπότε και θα πρέπει να θωρακίσουμε το σήμα, δεν μπορούμε να έχουμε υψηλό ρυθμό μετάδοσης. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί είναι 31,67 Mbps.

Στο σύστημα DVB-T προβλέπεται επίσης η υποστήριξη ιεραρχικής διαμόρφωσης με την οποία δύο ανεξάρτητες ροές δεδομένων διαμορφώνονται από κοινού. Η μία καλείται ροή δεδομένων υψηλής προτεραιότητας (high priority, HP) και ενσωματώνεται στην άλλη, που καλείται χαμηλής προτεραιότητας (low priority, LP). Όταν οι συνθήκες λήψης του DVB-T είναι καλές, ο δέκτης μπορεί να αποδιαμορφώσει και να αποκωδικοποιήσει και τις δύο ροές. Σε δυσμενείς όμως συνθήκες λήψης, μόνο η HP λαμβάνεται επιτυχώς. Οι δύο ροές μπορεί να αντιστοιχούν σε διαφορετικές υπηρεσίες ή στην ίδια. Για παράδειγμα μπορεί ένας σταθμός να εκπέμπει HDTV στην LP και SDTV, με το ίδιο περιεχόμενο, στην HP, οπότε, όταν οι συνθήκες λήψης το επιτρέπουν, ο τηλεθεατής παρακολουθεί το πρόγραμμα σε HDTV, ενώ σε δυσμενείς συνθήκες λήψης, παρακολουθεί το ίδιο πρόγραμμα σε SDTV. Η LP έχει προφανώς υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης αλλά μεγαλύτερη ευαισθησία σε σφάλματα και παρεμβολές, ενώ η HP μεταδίδεται με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης είναι όμως περισσότερο ανθεκτική.

Εκτός από τα δεδομένα, ένα πλαίσιο DVB-T περιλαμβάνει σύμβολα πιλότους που χρησιμοποιούνται για το συγχρονισμό και την εκτίμηση διαύλου και μπορεί να είναι συνεχόμενα ή διασπαρμένα, καθώς και πληροφορίες για τις παραμέτρους μετάδοσης (transmission parameter signaling, TPS).

Η εξέλιξη του DVB-T είναι η δεύτερη γενιά, το DVB-T2. Το DVB-T2 αποτελεί ένα παγκόσμιο πρότυπο που έχει ήδη υιοθετηθεί σχεδόν σε όλη την υφήλιο – 166 χώρες – εκτός απ’ την Κίνα όπου το αντίστοιχο πρότυπο επίγειας ψηφιακής τηλεοπτικής ευρυεκπομπής είναι το DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcast), τη βόρεια Αμερική όπου έχουμε το ATSC (Advanced Television Systems Committee), και την Ιαπωνία και τη Λατινική Αμερική όπου έχουμε το ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial).

Η κωδικοποίηση διαύλου για διόρθωση λαθών πραγματοποιείται σε δύο στάδια όπως και στο DVB-T. Η εξωτερική κωδικοποίηση είναι BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquengham) και η εσωτερική LDPC (Low Density Parity Check). Ο συνδυασμός τους προσφέρει μεγαλύτερη προστασία απ’ το συνδυασμό Reed-Solomon – συνελικτική κωδικοποίηση του DVB-T. Σε σχέση με το DVB-T έχουμε επίσης δυνατότητα επιλογής :

- Από περισσότερους ρυθμούς κωδικοποίησης : 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6
- Από περισσότερες τιμές διαστημάτων φύλαξης : 1/4, 19/128, 1/8, 19/256, 1/16, 1/32, 1/128

- Από περισσότερα μεγέθη FFT, πλήθος υποφερόντων, modes : 1k, 2k, 4k, 8k, 16k, 32k
- Από περισσότερα σχήματα ψηφιακής διαμόρφωσης κάθε υποκαναλιού της OFDM : QPSK, 16-QAM, 64-QAM και 256-QAM
- Το DVB-T καταλαμβάνει ολόκληρη την κλασσική μπάντα των 8 MHz (ή 6 ή 7) του αναλογικού τηλεοπτικού σήματος. Στο DVB-T2 υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί μπάντα 1,7 , 5, 6, 7, 8 ή 10 MHz

Έχουμε επιπροσθέτως κάποιες νέες τεχνικές που εισάγονται στο DVB-T2 :

- Multiple Physical Layer Pipes
Τεχνική που επιτρέπει ξεχωριστή προσαρμοστικότητα της ευρωστίας κάθε μεταδιδόμενης υπηρεσίας μέσα στο ίδιο κανάλι, ικανοποιώντας τις απαιτούμενες συνθήκες λήψης (για παράδειγμα εσωτερική κεραία ή όχι). Επιτρέπει επίσης στους δέκτες να εξοικονομήσουν ενέργεια αποκωδικοποιώντας μόνο μία συγκεκριμένη υπηρεσία που είναι επιθυμητή και όχι ολόκληρη την πολυπλεγμένη υπηρεσία.
- Κωδικοποίηση Alamouti
Διαφορική μέθοδος εκπομπής που βελτιώνει την κάλυψη σε μικρής κλίμακας μονοσυχνοτικά δίκτυα (single frequency networks, SFN)
- Constellation Rotation
Τεχνική που για χαμηλής τάξης σηματοστερισμούς παρέχει επιπρόσθετη ευρωστία στο σήμα
- Extended interleaving
Τεχνικής διεμπλοκής πολλαπλών επιπέδων – διεμπλοκή σε επίπεδο bit, σε επίπεδο OFDM συμβόλου, σε επίπεδο χρόνου, σε επίπεδο συχνότητας
- Future Extension Frames
Για μελλοντική εξέλιξη και συμβατότητα του DVB-T2
- Τεχνικές μείωσης του λόγου PAPR

Αποτέλεσμα αυτών των νέων δυνατοτήτων είναι μεγαλύτερη ευελιξία και ικανότητα προσαρμοστικότητας στις συνθήκες του καναλιού, σήμα πιο εύρωστο και ανθεκτικό στις διαλείψεις, το θόρυβο και τις παρεμβολές και δυνατότητα επίτευξης ακόμα μεγαλύτερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, μέχρι τα 50 Mbps. Στη θέση δε του ενός αναλογικού τηλεοπτικού προγράμματος μπορούμε να έχουμε ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών προγραμμάτων SDTV (ή HDTV), πολύ περισσότερα σε σχέση με το DVB-T.

Ανάλογα με τις συνθήκες διάδοσης επιλέγουμε το σχήμα διαμόρφωσης, το μέγεθος του FFT, το ρυθμό κώδικα, το διάστημα φύλαξης και ρυθμίζουμε τη χωρητικότητα

και τη μετάδοση πολλαπλών SDTV ή HDTV προγραμμάτων. Για παράδειγμα με σχήμα διαμόρφωσης 256-QAM, μέγεθος FFT 32k, ρυθμό κώδικα 2/3, διάστημα φύλαξης 1/16, μπορούμε να πετύχουμε χωρητικότητα 37 Mbps και μετάδοση 20 SDTV ή 4 HDTV προγραμμάτων, χρησιμοποιώντας MPEG-4 πολυπλέκτη.

Αν χρησιμοποιήσουμε το DVB-T2 στον 32k mode μετάδοσης σημαίνει ότι έχουμε περίπου 32.000 υποφέροντα OFDM. Αυτό μεταφράζεται σε μεγάλη – τη μεγαλύτερη δυνατή – διάρκεια συμβόλου OFDM. Το διάστημα φύλαξης ως γνωστόν μετριέται ως ποσοστό επί της διάρκειας συμβόλου OFDM. Αυτό σημαίνει ότι με μεγάλη διάρκεια συμβόλου θα έχουμε και μεγάλο διάστημα φύλαξης που μεταφράζεται σε δυνατότητα κάλυψης μίας περιοχής – όπως θα δούμε και παρακάτω - από κέντρα εκπομπής ενός SFN με μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Μάλιστα θα αρκεί, σε αυτή την περίπτωση, να πάρουμε διάστημα φύλαξης 1/8 πχ και όχι 1/4, γιατί έχουμε και το trade-off ότι το διάστημα φύλαξης μειώνει τον ωφέλιμο ρυθμό μετάδοσης. Με DVB-T2 λοιπόν και παραμέτρους 32k mode και διάστημα φύλαξης 1/8 το διάστημα που έχουμε για αντιμετώπιση της διασυμβολικής παρεμβολής είναι σίγουρα μεγαλύτερο απ' την περίπτωση χρήσης του DVB-T με διάστημα φύλαξης 1/4.

	DVB-T	DVB-T2 same E _{min}	DVB-T2 same data rate
Modulation	16-QAM	64-QAM	16-QAM
FFT Size	8K	16K	16K
Guard Interval	1/4	1/8	1/8
Code Rate	2/3	2/3	3/5
Carrier Mode	Normal	Extended	Extended
Capacity	13.3 Mbit/s	25.0 Mbit/s	15.0 Mbit/s
Number of Programs (MPEG4)	6 SD 1 HD	14 SD 2 HD	6 SD 1 HD
E _{min} (500 MHz; 1.5 m)	68.4 dBμV/m	68.6 dBμV/m ¹	62.4 dBμV/m ¹
	DVB-T	DVB-T2	
Modulation	64-QAM	256-QAM	
FFT Size	8K	32K	
Guard Interval	1/4	1/16	
Code Rate	2/3	2/3	
Carrier Mode	Normal	Extended	
Capacity	19.9 Mbit/s	37.0 Mbit/s	
Number of Programs (MPEG4)	9 SD 2 HD	20 SD 4 HD	
E _{min} (500 MHz; 10 m)	52.5 dBμV/m	51.8 dBμV/m ¹	
	DVB-T	DVB-T2	
Modulation	16-QAM	64-QAM	
FFT Size	8K	16K	
Guard Interval	1/4	1/8	
Code Rate	2/3	2/3	
Carrier Mode	Normal	Extended	
Capacity	13.3 Mbit/s	25.0 Mbit/s	
Number of Programs (MPEG4)	6 SD 1 HD	14 SD 2 HD	
E _{min} (500 MHz; 1.5 m)	56.4 dBμV/m	56.8 dBμV/m ¹	

Σχήμα 2.1 : Σύγκριση DVB-T και DVB-T2

2.2 Μονοσυχνοτικά δίκτυα (Single Frequency Networks, SFN)

Προκειμένου να καλύψουν την περιοχή ενδιαφέροντός τους, τα συμβατικά – αναλογικά – δίκτυα ευρυεκπομπής χρησιμοποιούν πολλούς πομπούς με διαφορετικές συχνότητες. Τα δίκτυα αυτά αναφέρονται ως δίκτυα πολλών συχνοτήτων (Multi Frequency Networks, MFN). Για την εγκατάσταση ενός τέτοιου δικτύου και αφού γίνουν οι αρχικές μελέτες ραδιοκάλυψης, επιλέγονται οι κατάλληλες θέσεις για την εγκατάσταση των σταθμών εκπομπής, με στόχο να εξασφαλίζεται η όσο το δυνατό καλύτερη κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος. Στο πλαίσιο της MFN λειτουργίας, γειτονικοί σταθμοί εκπέμπουν σε διαφορετικές συχνότητες, ώστε σε κοινές περιοχές κάλυψης να μην προκαλούνται παρεμβολές.

Απαιτείται, λοιπόν, μελέτη για την ορθή αξιοποίηση του ραδιοφάσματος, ώστε οι συχνότητες που χρησιμοποιεί ο σταθμός εκπομπής κάθε δικτύου να είναι εναρμονισμένες με τις συχνότητες των σταθμών εκπομπής των άλλων δικτύων που λειτουργούν στην ίδια γεωγραφική περιοχή, αλλά και με σταθμούς του ίδιου δικτύου που λειτουργούν σε τηλεπικοινωνιακά όμορους νομούς. Αυτό καθιστά τη σχεδίαση και ανάπτυξη των MFN δικτύων μία πολύπλοκη διαδικασία, αφού προϋποθέτει από κοινού σχεδιασμό και διαχείριση συχνοτήτων για όλα τα δίκτυα που συνυπάρχουν σε μια περιοχή.

Επιπλέον, προκειμένου να επεκταθεί το δίκτυο ή να βελτιωθούν οι συνθήκες λήψης του ραδιοσήματος σε περιοχές όπου υπάρχουν έντονα φαινόμενα σκίασης, απαιτείται η εγκατάσταση πρόσθετων πομπών και επανασχεδιασμός απόδοσης συχνοτήτων. Επίσης, όσον αφορά τη λήψη σήματος από κινητά τερματικά ή δέκτες προκειμένου να λαμβάνουν το ίδιο πρόγραμμα από εναλλακτικούς πομπούς του ίδιου δικτύου που, όμως, εκπέμπουν σε διαφορετική συχνότητα, οι κινούμενοι δέκτες πρέπει να επανασυντονίζονται κάθε φορά σε διαφορετική συχνότητα.

Στη σύγχρονη ψηφιακή ευρυεκπομπή, τα προβλήματα του από κοινού σχεδιασμού και διαχείρισης συχνοτήτων για όλα τα δίκτυα που συνυπάρχουν σε μια περιοχή αντιμετωπίζονται με τη χρήση δικτύων απλής συχνότητας, μονοσυχνοτικών δικτύων (Single Frequency Networks, SFN), στα οποία όλοι οι πομποί ενός δικτύου εκπέμπουν στην ίδια φέρουσα ραδιοσυχνότητα σε όλη την περιοχή κάλυψης.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, δεν υπάρχουν απαιτήσεις κοινού σχεδιασμού και εναρμόνισης συχνοτήτων, αφού εκχωρείται μόνο ένα κανάλι σε ένα δίκτυο για όλη την περιοχή κάλυψης, οπότε όλοι οι δέκτες εντός της περιοχής κάλυψης παραμένουν συντονισμένοι σε μία μόνο συχνότητα. Για την απρόσκοπτη λειτουργία των δικτύων αυτών επιβάλλονται συγκεκριμένες προδιαγραφές στο στρώμα δικτύου, που αντιμετωπίζονται με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών.

Σε ένα SFN δίκτυο όλοι οι πομποί εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα. Λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης σήματα από διαφορετικούς πομπούς που εκπέμπουν το ίδιο περιεχόμενο και καταφθάνουν στην κεραία λήψης, συναποτελούν το συνολικό σήμα λήψης. Η προσέγγιση της χρήσης μονοσυχνοτικών δικτύων έχει το

σχεδιαστικό πλεονέκτημα ότι χρειάζεται τα λιγότερα σε πλήθος κανάλια συχνοτήτων από οποιαδήποτε άλλη προσέγγιση, χαρακτηριστικό που την καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική για χώρες όπως η Ελλάδα που εμφανίζουν μεγάλο βαθμό πληρότητας του τηλεοπτικού φάσματος.

Τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός δικτύου SFN είναι:

- Η αποδοτικότητα του φάσματος
- Η μικρότερη απόσταση αναχρησιμοποίησης συχνότητας
- Η δυνατότητα επέκτασης της περιοχής κάλυψης

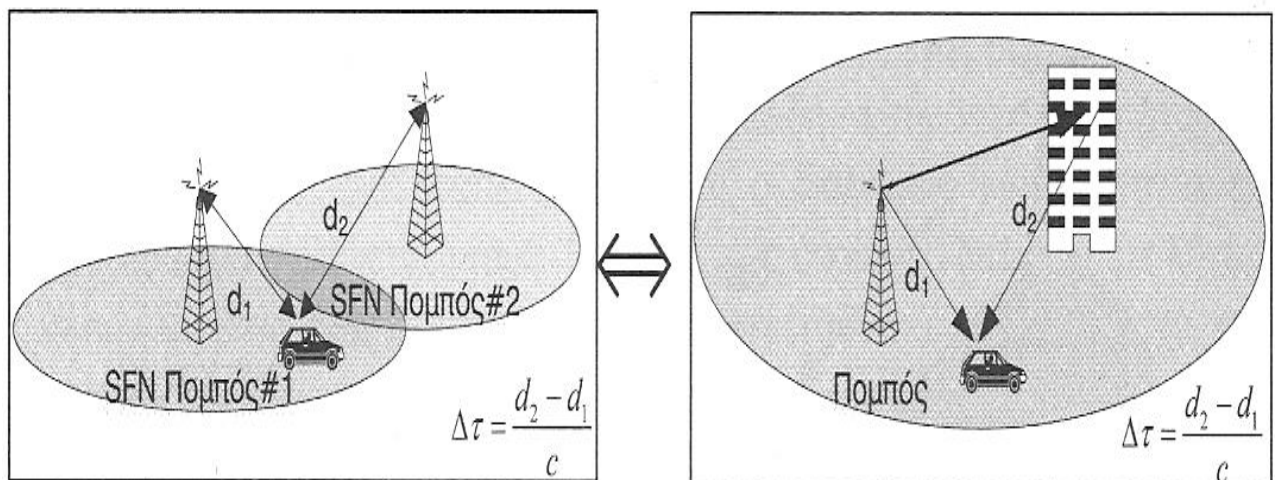
Η υψηλή αξιοποίηση του ραδιοφάσματος αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης SFN δικτύων σε σύγκριση με τα MFN δίκτυα. Με χρήση SFN δικτύων, ευρείες περιοχές μπορούν να εξυπηρετηθούν με χρήση ενός πολυπλέκτη σε κοινή φέρουσα συχνότητα. Τα οποιαδήποτε κενά κάλυψης που προκύπτουν στη περιοχή κάλυψης καλύπτονται εύκολα με την προσθήκη ενός πρόσθετου πομπού χωρίς την ανάγκη για νέα κανάλια. Η αποδοτικότητα φάσματος είναι ιδιαίτερα επιθυμητό χαρακτηριστικό όταν το φάσμα είναι περιορισμένο.

Τα SFN δίκτυα δεν είναι μόνο αποδοτικά ως προς τη συχνότητα αλλά και ως προς την αξιοποίηση της ισχύος εκπομπής. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό αν ληφθούν υπόψη οι έντονες διακυμάνσεις της ισχύος λήψης ενός οποιουδήποτε σταθμού. Όπως συμβαίνει συνήθως, προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική κάλυψη σε υψηλό γεωγραφικό ποσοστό, αυξάνεται σημαντικά η ισχύς εκπομπής. Στα SFN δίκτυα με ομοιοκατευθυντική λήψη δεν απαιτείται η αύξηση της ισχύος, καθώς στο σήμα λήψης συμβάλλουν επιμέρους σήματα που καταφθάνουν από διαφορετικούς πομπούς, οι διακυμάνσεις ισχύος των οποίων είναι ελάχιστα συσχετισμένες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η εξασθένηση του σήματος από κάποιο πομπό να αντισταθμίζεται από το σήμα λήψης από άλλο πομπό. Έτσι τα SFN δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιούν πομπούς χαμηλής ισχύος εκπομπής. Η αποδοτικότητα ισχύος αυτή των SFN δικτύων καλείται κέρδος δικτύου (network gain) και είναι πολύ σημαντική, ιδιαίτερα στα όρια γεωγραφικής κάλυψης των πομπών.

Όταν ένας δέκτης βρίσκεται μεταξύ δύο σταθμών εκπομπής, τότε λαμβάνει ένα ισχυρό σήμα από τον κοντινότερο πομπό και εξασθενημένα σήματα που φθάνουν στο δέκτη από πιο απομακρυσμένους πομπούς. Τα εξασθενημένα αυτά σήματα, επειδή έχουν διανύσει μεγαλύτερες αποστάσεις, φθάνουν στο δέκτη με καθυστέρηση σε σχέση με το πρώτο, η οποία εξαρτάται από τις αποστάσεις μεταξύ των πομπών του SFN. Επειδή το σήμα που εκπέμπουν όλοι οι πομποί είναι ακριβώς το ίδιο, το εξασθενημένο και καθυστερημένο σήμα που φτάνει στο δέκτη από τον πιο απομακρυσμένο πομπό, ο δέκτης το αντιλαμβάνεται σαν echo του πρώτου σήματος που έφτασε σε αυτόν μέσω πολυδιαδρομικής διάδοσης.

Έτσι λοιπόν, υπάρχει η κατάσταση που απεικονίζεται στο σχήμα 2.1 (για απλούστευση θεωρούμε την ύπαρξη μόνο δύο πομπών) και αντιστοιχεί σε ένα

μοντέλο διαύλου πολυδιαδρομικής διάδοσης δύο ακτίνων, με διασπορά καθυστέρησης $\Delta\tau = (d_2 - d_1)/c$, όπου c η ταχύτητα του φωτός. Η χρονική αυτή διασπορά καθυστέρησης διάδοσης παίρνει αρκετά μεγάλες τιμές, αφού οι αποστάσεις μεταξύ των πομπών είναι της τάξης των μερικών δεκάδων χιλιομέτρων. Αυτό που προκαλείται είναι ισχυρή διασυμβολική παρεμβολή, γι' αυτό σε ένα δίκτυο SFN κάνουμε χρήση της τεχνικής OFDM, που, όπως έχουμε πει, με τη χρήση του διαστήματος φύλαξης, λειτουργεί αποδοτικά σε περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης και απλοποιεί τη διαδικασία ισοστάθμισης στο δέκτη. Καθίσταται σαφές ότι το μέγεθος του διαστήματος φύλαξης είναι μία σημαντική παράμετρος γιατί περιορίζει τη μέγιστη επιτρεπτή απόσταση μεταξύ των πομπών του δικτύου SFN.



Σχήμα 2.2 : Ισοδύναμο μοντέλο πολυδιαδρομικής διάδοσης για SFN

Όπως προαναφέρθηκε, όλοι οι πομποί ενός SFN θα πρέπει να εκπέμπουν το ίδιο σήμα, στην ίδια συχνότητα, την ίδια χρονική στιγμή, άρα θα πρέπει να είναι τέλεια συγχρονισμένοι. Συνήθως, ένα SFN χρησιμοποιεί τεχνική OFDM, οπότε αποκλίσεις στις ραδιοσυχνότητες που εκπέμπουν οι πομποί δημιουργούν απώλεια ορθογωνιότητας μεταξύ των OFDM υποκαναλιών και μειώνουν την ανοχή του συστήματος σε φαινόμενα ολίσθησης συχνότητας, λόγω φαινομένου Doppler πχ.

Συνήθως, σε ένα SFN θα πρέπει οι ραδιοσυχνότητες εκπομπής να μην αποκλίνουν από την ονομαστική τους τιμή περισσότερο από 1% του εύρους των OFDM υποκαναλιών, ενώ το μέγιστο χρονικό σφάλμα δε θα πρέπει να υπερβαίνει το 3-5% της διάρκειας του διαστήματος φύλαξης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πιθανή χρονική απόκλιση μεταξύ των πομπών υπερτίθεται στην καθυστέρηση διάδοσης και – ισοδύναμα – επιμηκύνεται η φαινομενική μέγιστη χρονική διασπορά καθυστέρησης διάδοσης. Έτσι, ουσιαστικά είναι σαν να μειώνεται το μήκος του διαστήματος φύλαξης, άρα και η μέγιστη επιτρεπτή απόσταση μεταξύ των πομπών του SFN.

Επομένως, το σφάλμα συγχρονισμού των πομπών, χρονικού και συχνοτικού, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό του SFN. Ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται, συνήθως, χρησιμοποιώντας ως αναφορά το δορυφορικό σύστημα πλοήγησης GPS (Global Positioning System), το οποίο παρέχει αρκετή ακρίβεια για το σκοπό αυτό.

2.3 Ψηφιακό μέρισμα (digital dividend)

Η ψηφιακή μετάβαση προσφέρει μία σημαντική ευκαιρία για την επανεξέταση της συνολικής χρήσης της ζώνης Υπερυψηλών Συχνοτήτων (Ultra High Frequency, UHF) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στα 470 – 862MHz. Η ζώνη UHF αποτελείται από 49 κανάλια, έκαστο των οποίων έχει 8 MHz εύρος ζώνης. Δηλαδή τα κανάλια αριθμούνται από το 21 έως το 69. Η συγκεκριμένη ζώνη έχει αποδοθεί στην Ευρώπη για την εκπομπή επίγειας αναλογικής τηλεόρασης. Καθώς η ψηφιακή τεχνολογία επιτρέπει οι υπάρχουσες υπηρεσίες ευρυεκπομπής να εξυπηρετούνται αξιοποιώντας λιγότερο φάσμα, προσφέρεται η δυνατότητα χρήσης μέρους του UHF φάσματος για άλλες εφαρμογές.

Το εξοικονομούμενο φάσμα είναι ευρύτερα γνωστό ως Ψηφιακό Μέρισμα (Digital Dividend) και αποκαλείται έτσι λόγω των οφελών που αναμένεται να προσφέρει στην κοινωνία είτε υπό τη μορφή της άμεσης οικονομικής εκμετάλλευσης είτε υπό τη μορφή εμμέσων οφελών συνδεδεμένων με την παροχή νέων υπηρεσιών σε αυτό το φάσμα. Η ύπαρξη Ψηφιακού Μερισίματος οφείλεται στη μείωση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που απαιτείται για την επίγεια τηλεοπτική ευρυεκπομπή όταν αυτή πραγματοποιείται με χρήση ψηφιακής τεχνολογίας. Η μείωση αυτή οφείλεται στη δυνατότητα της ψηφιακής τεχνολογίας να εξυπηρετεί αισθητά μεγαλύτερο πλήθος τηλεοπτικών προγραμμάτων σε δεδομένο εύρος ζώνης σε σύγκριση με την αναλογική τεχνολογία.

Σε αντίθεση με την αναλογική τεχνολογία, που απαιτεί εύρος ζώνης 8MHz για τη μετάδοση ενός τηλεοπτικού προγράμματος, περισσότερα τηλεοπτικά προγράμματα μπορούν να μεταδοθούν στο ίδιο εύρος αξιοποιώντας τη δυνατότητα πολύπλεξης που προσφέρει η ψηφιακή μετάδοση. Όπως είδαμε και στην περιγραφή του προτύπου DVB-T/T2, ένας πολυπλέκτης επίγειας τηλεόρασης μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλά προγράμματα υψηλής ευκρίνειας (high definition, HD) και ακόμα περισσότερα προγράμματα κανονικής ευκρίνειας (standard definition, SD) που μπορούν να μεταδοθούν ταυτόχρονα στη θέση του ενός πάλαι ποτέ αναλογικού τηλεοπτικού προγράμματος. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιώντας την ψηφιακή τεχνολογία για κάθε πομπό είναι απαραίτητο μικρότερο εύρος ζώνης για τη μετάδοση συγκεκριμένου πλήθους τηλεοπτικών καναλιών σε σύγκριση με τη χρήση αναλογικής τεχνολογίας.

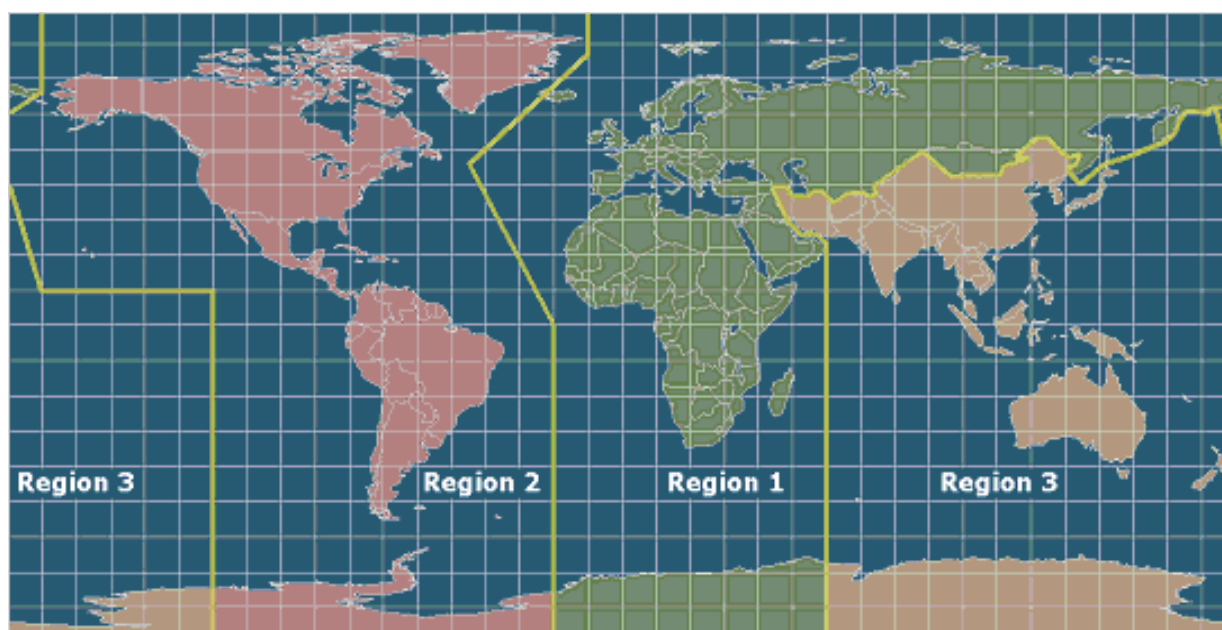
Κατά τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον για χρήση του Ψηφιακού Μερισίματος προς υποστήριξη διαφόρων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών έχει αυξηθεί σημαντικά. Η Ε.Ε. καταβάλλει ιδιαίτερη προσπάθεια για την εναρμόνιση των πολιτικών που υιοθετούν οι διάφορες ευρωπαϊκές χώρες ως προς το Ψηφιακό Μέρισμα με στόχο

να αναπτυχθεί μία πανευρωπαϊκή αγορά που θα επιτρέψει την ελαχιστοποίηση του κόστους για την παροχή των σχετικών υπηρεσιών. Η πρόταση της Ε.Ε. για την εναρμόνιση της πολιτικής μεταξύ των κρατών-μελών αφορά την εκκαθάριση του τμήματος του φάσματος 790–862MHz και την απόδοσή του για τις ανάγκες του Ψηφιακού Μερισίματος. Πράγματι, η ζώνη 790–862MHz (κανάλια 61-69) έχει εκκαθαριστεί και έχει αποδοθεί στις εταιρίες κινητών επικοινωνιών.

Αυτή είναι η πρώτη φάση του Ψηφιακού Μερισίματος και της απελευθέρωσης και ανακατανομής του τηλεοπτικού φάσματος. Αυτή τη στιγμή βρίσκεται σε εξέλιξη η δεύτερη φάση του Ψηφιακού Μερισίματος. Με τη δεύτερη φάση του ψηφιακού μερίσματος θα έχουμε επιπλέον απελευθέρωση φάσματος και συγκεκριμένα της ζώνης 694-790 MHz (κανάλια 49-60), καθώς και πιθανή ανακατανομή (allocation) των υπολοίπων καναλιών της ζώνης UHF.

2.4 Διεθνής συντονισμός συχνοτήτων

Η παγκόσμια περιοχική διάσκεψη (Regional Radiocommunication Conference for planning of the digital terrestrial broadcasting service in parts of Regions 1 and 3, in the frequency bands 174-230MHz and 471-862MHz - RRC06) πραγματοποιήθηκε στη Γενεύη από τις 15 Μαΐου ως τις 16 Ιουνίου του 2006. Μετά το πέρας της διάσκεψης όλες οι χώρες υπέγραψαν τα πρακτικά που καθόρισαν το τελικό κείμενο της συμφωνίας GE06. Τα συντονισμένα πλέον πλάνα των χωρών επισυνάπτονται στο κείμενο της συμφωνίας GE06, η οποία έχει επικυρωθεί από την Παγκόσμια Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union, ITU).



Σχήμα 2.3 : Regions – RRC06

Η Συνθήκη της Γενεύης ορίζει δύο κατηγορίες εγγραφών, καταχωρήσεων για κάθε χώρα. Τα allotments και τα assignments. Allotment (διανομή μίας ραδιοσυχνότητας ή ενός καναλιού ραδιοσυχνοτήτων) είναι η εισαγωγή ενός οριζόμενου καναλιού συχνότητας σε ένα προσυμφωνημένο σχέδιο, το οποίο υιοθετείται από μία ικανή διάσκεψη, με σκοπό τη χρήση από μία ή περισσότερες Αρχές για μία επίγεια ή διαστημική υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας σε μία ή περισσότερες προσδιορισμένες χώρες ή γεωγραφικές περιοχές και υπό συγκεκριμένους όρους. Assignment (ανάθεση μίας ραδιοσυχνότητας ή ενός καναλιού ραδιοσυχνοτήτων) είναι η έγκριση που δίνεται από μία διοίκηση σε έναν ραδιοσταθμό να χρησιμοποιήσει μία ραδιοσυχνότητα ή ένα κανάλι ραδιοσυχνοτήτων υπό συγκεκριμένους όρους.

Σύμφωνα με τη Συνθήκη της Γενεύης η Ελλάδα χωρίζεται σε 34 allotments, περιοχές κάλυψης. Σε κάθε allotment καταχωρείται ένα σύνολο δεσμευμένων καναλιών. Τα κανάλια αυτά είναι προφανώς από τη ζώνη των υπερυψηλών συχνοτήτων (Ultra High Frequency, UHF) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στα 470 – 862MHz (κανάλια 21-69), αλλά και από τη ζώνη των πολύ υψηλών συχνοτήτων (Very High Frequency, VHF - 174-230MHz, κανάλια 7-13). Σε κάθε κανάλι αντιστοιχεί ένα assignment. Το assignment καθορίζει επίσης τεχνικά χαρακτηριστικά όπως ισχύ εκπομπής, όλο το κεραιοσύστημα, ύψος ιστού κλπ. Με την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης του ψηφιακού μερίσματος έχουμε όπως είπαμε απελευθέρωση των καναλιών 61-69 και απόδοσή τους στις εταιρίες κινητών επικοινωνιών. Με τη δεύτερη φάση του ψηφιακού μερίσματος – που είναι σε εξέλιξη – θα έχουμε επιπλέον απελευθέρωση φάσματος και συγκεκριμένα της ζώνης 694-790 MHz (κανάλια 49-60), καθώς και πιθανή ανακατανομή (allocation) των υπολοίπων καναλιών της ζώνης UHF.

Σε κάθε allotment έχουμε ένα μονοσυχνοτικό δίκτυο, ένα SFN, εκτός απ' το allotment “Κυκλάδες” όπου έχουμε δύο SFN. Το SFN δημιουργείται από ένα σύνολο κέντρων εκπομπής. Στο SFN όπως γνωρίζουμε εκπέμπεται κοινό σήμα. Άρα τα κέντρα εκπομπής που συνιστούν το SFN εκπέμπουν κοινό σήμα. Σε κάθε allotment έχουμε όπως είπαμε απόδοση ενός συνόλου καναλιών. Άρα τα κέντρα εκπομπής ουσιαστικά εκπέμπουν ταυτόχρονα ένα σύνολο από συχνότητες, κοινό για κάθε SFN, για κάθε allotment. Δηλαδή ουσιαστικά τα κέντρα εκπομπής του allotment εκπέμπουν ταυτόχρονα τις κεντρικές συχνότητες των αντίστοιχων δεσμευμένων καναλιών που του έχουν αποδοθεί.

Ως προς την επιλογή των κέντρων εκπομπής έχουμε - και σε σχέση με την προηγούμενη πραγματικότητα της αναλογικής τηλεόρασης :

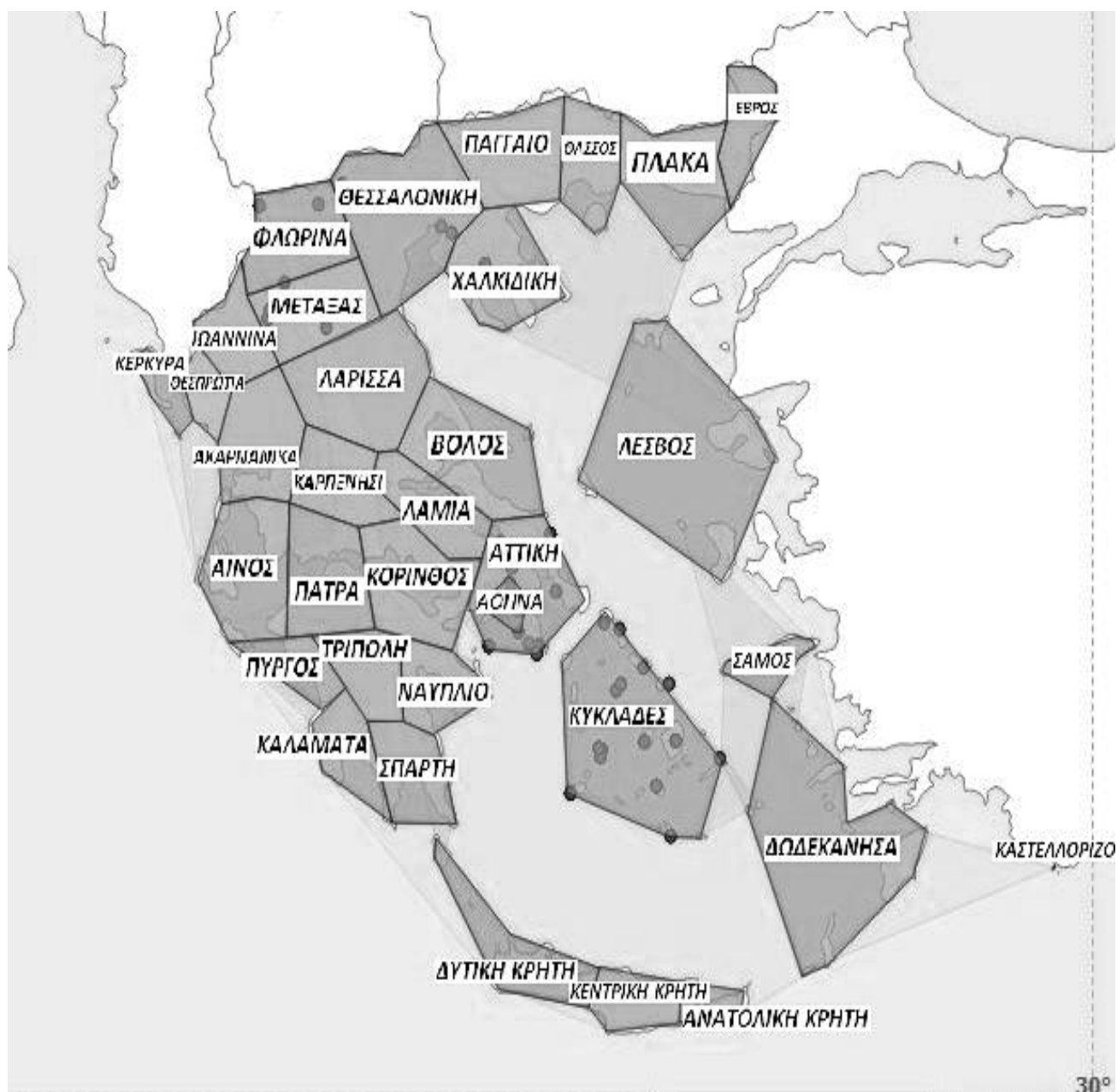
- Θέσεις του αναλογικού πλάνου
- Θέσεις εκπομπής που εξυπηρετούν σημαντική έκταση ή πληθυσμό
- Θέσεις εκπομπής που λόγω χαρακτηριστικών (υψόμετρο, ισχύς) αλληλεπιδρούν με γειτονικές
- Θέσεις εκπομπής που χρησιμοποιούνται από σημαντικό αριθμό τηλεοπτικών

δικτύων σήμερα

- Εξυπηρέτηση περιοχών ειδικού ενδιαφέροντος (σύνορα, τουριστικές περιοχές)
- Θέσεις εκπομπής που έχει κατοχυρώσει η χώρα στην ITU στο παρελθόν
- Απορρίπτονται θέσεις εκπομπής που η λειτουργία τους δημιουργεί προβλήματα παρεμβολών δυσανάλογα με τα οφέλη τους

Να πούμε επίσης ότι η Συνθήκη της Γενεύης ορίζει τα ελάχιστα όρια σηματοθορυβικού λόγου (C/N) και ελάχιστης μέσης έντασης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (E_{min}) που είναι αναγκαία για την επαρκή κάλυψη ενός σημείου με σήμα ψηφιακής τηλεόρασης.

Η διαμόρφωση ως γνωστόν επιλέγεται με βάση τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας. Για την εκπομπή τεσσάρων τηλεοπτικών προγραμμάτων SDTV (DVB-T) είναι απαραίτητο να επιτυγχάνεται ρυθμός μετάδοσης τουλάχιστον 16Mbit/s. Ο πίνακας του σχήματος 2.6 περιέχεται στη συνθήκη GE06 και περιλαμβάνει τους ρυθμούς μετάδοσης για κάθε διάστημα φύλαξης και διαμόρφωση. Σε αυτόν έχουν χρωματιστεί τα κελιά με ρυθμό μετάδοσης μεγαλύτερο από 16Mbit/s και οι διαμορφώσεις που ικανοποιούν αυτήν την απαίτηση είναι οι 16-QAM με ρυθμό κώδικα από 2/3 έως και 7/8 και 64-QAM με ρυθμό κώδικα από 1/2 έως και 7/8.



Σχήμα 2.4 : Τα 34 allotments της Ελλάδας

A/A	ALLOTMENT	Κατοχυρωμένες Συχνότητες στην ITU											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	EVROS	25	27	32	33	35	47	51	56	58	62	63	
2	PLAKA	24	27	30	31	33	36	43	59	66			
3	THASSOS	22	23	37	39	41	47	54	61	64			
4	PAGGAIO	26	32	35	40	52	53	60	63	65			
5	THESSALONIKI	24	27	30	36	43	48	51	55	56	59	62	66
6	XALKIDIKI	25	29	31	34	38	46	49	50	54			
7	FLORINA	23	26	32	34	35	40	44	47	49	52	61	
8	METAKSAS	25	28	29	39	41	50	54	60	64			
9	IOANNINA	24	25	30	31	34	49	52	54	62			
10	THESPROTIA	21	22	33	41	45	59	66					
11	KERKYRA	29	30	34	37	53	54	56	61				
12	LARISSA	22	31	35	38	40	42	52	53	63	65		
13	AKARNANIKA	23	27	28	32	39	43	46	51	64			
14	VOLOS	21	29	37	41	44	47	51	58	62			
15	LAMIA	23	25	32	33	35	49	57	60	63	64		
16	KARPENISI	24	26	29	30	36	37	47	55	61	62		
17	AINOS	21	22	33	36	45	57	59	60	66			
18	PATRA	22	24	25	29	31	34	35	42	44	53	54	61
19	KORINTHOS	38	43	48	51	56	59	63	64	65	66		
20	ATTIKI (SFN 1)	22	27	30	31	34	36	50	52	54	61		
21	ATHINA (SFN 2)	23	24	32	38	49							
22	PYRGOS	26	30	38	40	46	47	49	52	56	64		
23	TRIPOLI	21	23	24	28	41	42	45	50	60	62		
24	NAFPLIO	33	35	37	39	44	46	53	55	57	58		
25	KALAMATA	29	31	32	37	44	48	53	55	58	63		
26	SPARTI	22	25	27	30	33	36	40	52	57	61	64	
27	WEST CRETE	21	24	31	34	35	38	46	49	54	56	59	
28	CENTRAL CRETE	25	37	39	41	44	53	57	61	64			
29	EAST CRETE	27	31	33	35	36	38	46	54				
30	DODEKANISA	21	24	32	39	42	50	52	56	59			
31α	KYKLADES (SFN-1)	26	29	32	43	47	51	59	60	62			
31β	KYKLADES (SFN-2)	26	29	32	43	47	51	59	60	62			
32	SAMOS	27	31	34	35	36	38	44	61	65	67		
33	LESVOS	21	25	33	39	42	46	53	56	64			
34	KASTELLORIZO	25	27	35	41	49	51	53					

Σχήμα 2.5 : Τα 34 allotments με τα αντίστοιχα κανάλια που τους έχουν αποδοθεί, με απεικόνιση επίσης και των δύο φάσεων του ψηφιακού μερίσματος (σκιασμένα κανάλια)

			Net bit rate (Mbit/s) For different guard intervals (GI)			
System variant	Modulation	Code rate	GI = 1/4	GI = 1/8	GI = 1/16	GI = 1/32
A1	QPSK	1/2	4.98	5.53	5.85	6.03
A2	QPSK	2/3	6.64	7.37	7.81	8.04
A3	QPSK	3/4	7.46	8.29	8.78	9.05
A5	QPSK	5/6	8.29	9.22	9.76	10.05
A7	QPSK	7/8	8.71	9.68	10.25	10.56
B1	16-QAM	1/2	9.95	11.06	11.71	12.06
B2	16-QAM	2/3	13.27	14.75	15.61	16.09
B3	16-QAM	3/4	14.93	16.59	17.56	18.10
B5	16-QAM	5/6	16.59	18.43	19.52	20.11
B7	16-QAM	7/8	17.42	19.35	20.49	21.11
C1	64-QAM	1/2	14.93	16.59	17.56	18.10
C2	64-QAM	2/3	19.91	22.12	23.42	24.13
C3	64-QAM	3/4	22.39	24.88	26.35	27.14
C5	64-QAM	5/6	24.88	27.65	29.27	30.16
C7	64-QAM	7/8	26.13	29.03	30.74	31.67

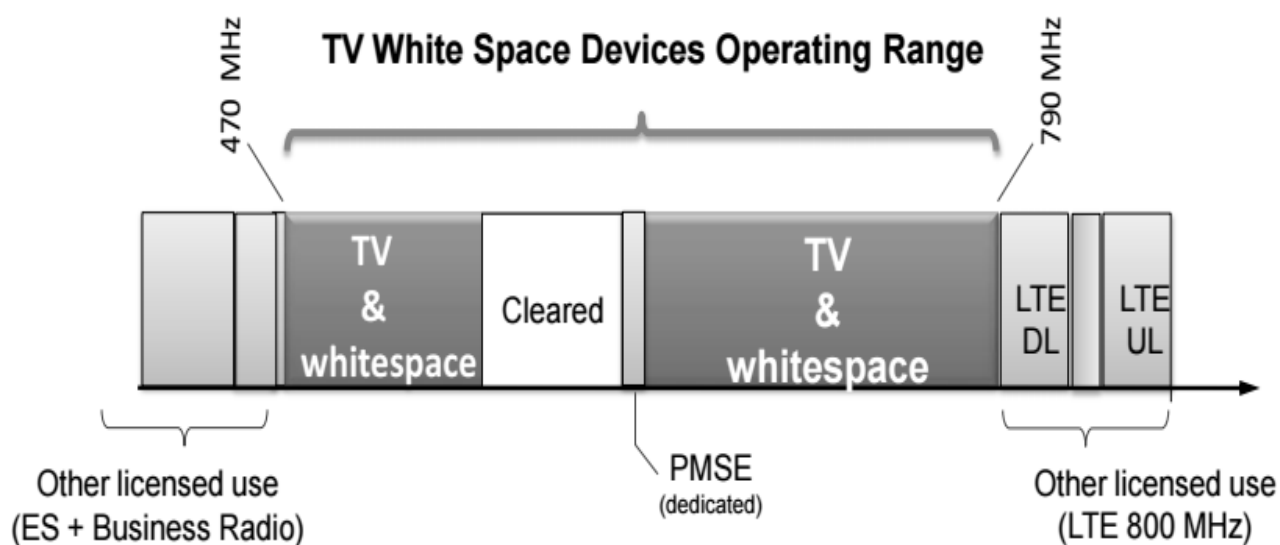
Σχήμα 2.6 : Πίνακας από τη συνθήκη GE06 – τουλάχιστον 16Mbit/s απαιτούνται για εκπομπή 4 SDTV προγραμμάτων με το DVB-T

3. Τηλεοπτικά κενά διαστήματα (TV White Spaces, TVWS)

3.1 Εισαγωγή

Με την ψηφιακή μετάβαση έχουμε εξοικονομούμενο φάσμα ευρύτερα γνωστό ως Ψηφιακό Μέρισμα (Digital Dividend). Το ψηφιακό μέρισμα 1 αφορά στην εκκαθάριση της ζώνης 790–862MHz (κανάλια 61-69) και απόδοσή της στις εταιρίες κινητών επικοινωνιών. Με το ψηφιακό μέρισμα 2 που είναι σε εξέλιξη θα έχουμε επιπλέον απελευθέρωση φάσματος και συγκεκριμένα της ζώνης 694-790 MHz (κανάλια 49-60), καθώς και πιθανή ανακατανομή (allocation) των υπολοίπων καναλιών της ζώνης UHF.

Επιπροσθέτως, με την ψηφιακή μετάβαση ανακύπτουν, διασπαρμένα στη ζώνη UHF, κάποια φασματικά κενά. Αυτά τα τηλεοπτικά κενά διαστήματα είναι γνωστά ως TV White Spaces (TVWS). Αποτελούν τμήματα της τηλεοπτικής ζώνης που δεν χρησιμοποιούνται από αδειοδοτημένες υπηρεσίες. Οι αδειοδοτημένες αυτές υπηρεσίες μπορεί να αναφέρονται είτε σε τηλεοπτικούς σταθμούς είτε άλλες αδειοδοτημένες υπηρεσίες όπως είναι τα ασύρματα μικρόφωνα (Programme Making and Special Events, PMSE).

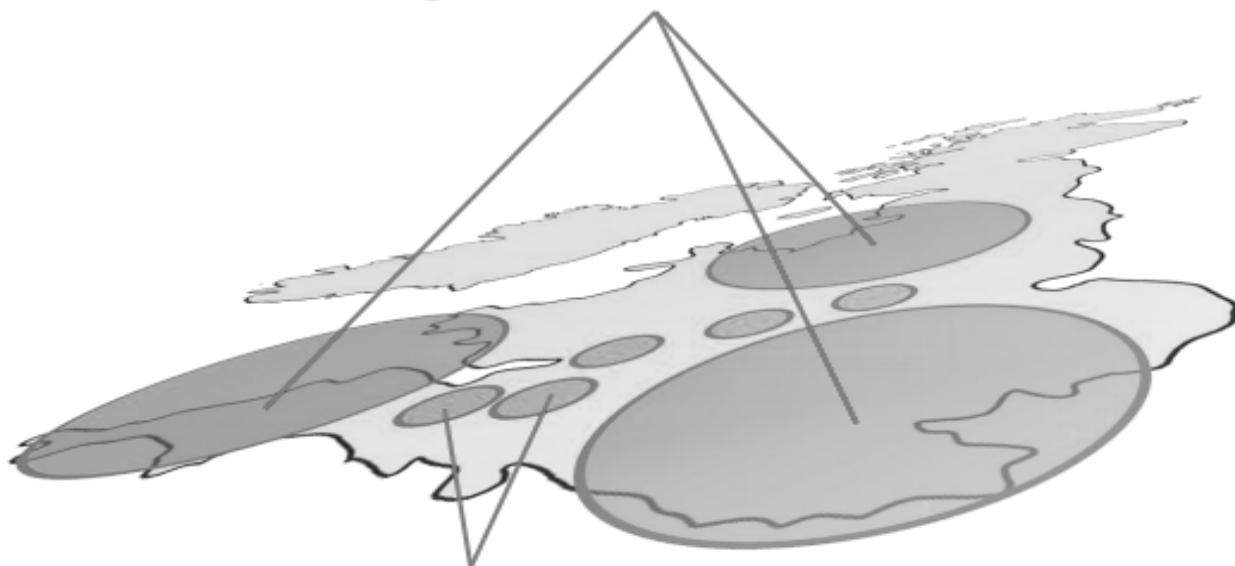


Σχήμα 3.1 : TVWS διασπαρμένα στη ζώνη των UHF

Υπάρχουν πολλά τηλεοπτικά κανάλια στις ζώνες των πολύ υψηλών συχνοτήτων VHF και των υπερυψηλών συχνοτήτων UHF, η χρησιμοποίηση των οποίων σε ορισμένες γεωγραφικές περιοχές δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή. Υπάρχουν γεωγραφικές περιοχές που μένουν κενές από τη ραδιοκάλυψη των τηλεοπτικών πομπών, για αντιμετώπιση

ζητημάτων παρεμβολών. Ένας μη αδειοδοτημένος χρήστης – μία White Space Device (WSD) – μπορεί να ανιχνεύσει το κενό και να εκπέμψει, αυξάνοντας έτσι τη συνολική φασματική απόδοση, με την προϋπόθεση της προστασίας της αδειοδοτημένης τηλεοπτικής υπηρεσίας. Εκπέμπει σε χαμηλή ισχύ.

High power TV broadcasts using the same frequency need to leave spaces between their coverage areas to avoid interference.



These frequencies can be used in the “white spaces” in between by lower-power devices.

Σχήμα 3.2 : Κάλυψη γεωγραφικών κενών από WSDs

Ρυθμιστικοί οργανισμοί, όπως η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communication Commission, FCC) στις ΗΠΑ, αναπτύσσουν κανονισμούς για να επιτρέψουν σε ασύρματα δίκτυα να αποκτήσουν πρόσβαση στις αχρησιμοποίητες φασματικές ζώνες ενώ, παράλληλα, διασφαλίζουν ότι τα ασύρματα αυτά δίκτυα δεν θα προκαλούν επιβλαβείς παρεμβολές στις αδειοδοτημένες υπηρεσίες.

Καθώς το φάσμα των TVWS, τόσο στην VHF όσο και στην UHF, βρίσκεται χαμηλότερα του 1GHz, αναμένεται να προσφέρει πολύ καλή διάδοση ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency, RF) σε σχέση με τα ασύρματα συστήματα που έχουν ήδη αναπτυχθεί στις ζώνες Βιομηχανικών, Επιστημονικών και Ιατρικών (Industrial Scientific and Medical, ISM) εφαρμογών (13.553 έως 13.567 MHz, 26.957 έως 27.283 MHz, 40.660 έως 40.700 MHz, 2.400 έως 2.500 GHz, 5.725 έως 5.875 GHz και 24 έως 24.250 GHz). Αυτό θα επιτρέψει την περισσότερο αξιόπιστη, μικρότερου κόστους και μεγαλύτερης κάλυψης παροχή υπηρεσιών σε αγροτικές

περιοχές όπως η έξυπνη μετακίνηση, διαχείριση εκτάκτων αναγκών και δημόσιας ασφάλειας.

Η ανάγκη για πρόσθετο φάσμα προς παροχή ασύρματων υπηρεσιών αυξάνεται συνεχώς. Η χρήση έξυπνων τηλεφώνων (smartphones) έχει εκτιναχθεί και καταδεικνύει ότι η κάλυψη της ζήτησης για ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες αποτελεί σημαντική πρόκληση. Ένα από τα βασικά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν αποτελεί προφανώς η σπανιότητα του φάσματος προς κάλυψη των υπηρεσιών αυτών. Προς αυτή την κατεύθυνση, τα TVWS που ανακύπτουν απ' την ψηφιακή μετάβαση είναι μία μεγάλη πρόκληση. Οι γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες (Cognitive Radio, CR) αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη νέα τεχνολογία για την αξιοποίηση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος των TVWS.

Δεδομένου ότι η απελευθέρωση φάσματος από υπάρχουσες υπηρεσίες καθίσταται όλο και δυσκολότερος στόχος για τις ρυθμιστικές αρχές, είναι πολύ πιθανό ότι κάθε είδους γνωστικές τεχνολογίες θα χρησιμοποιηθούν εκτενώς στο μέλλον για να επιτρέψουν την αποδοτική χρήση του ραδιοφάσματος από νέα ασύρματα και υπάρχοντα συστήματα ευρυεκπομπής. Τα TVWS αποτελούν ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αντικειμένου της πιθανής ρυθμιστικής πολιτικής και δομής του μέλλοντος. Πρότυπα που αφορούν ακριβώς στη χρήση CR τεχνολογίας για αξιοποίηση των TVWS είναι το IEEE 802.22 (WRAN) και το IEEE 802.11af (WLAN).

3.2 Γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες (Cognitive Radio, CR)

Η λειτουργία στα TVWS αφορά τις συσκευές που δεν προκαλούν επιβλαβείς παρεμβολές στις αδειοδοτημένες υπηρεσίες στις τηλεοπτικές μπάντες. Στις ζώνες TVWS προτείνεται να χρησιμοποιηθεί η CR τεχνολογία για να διασφαλίσει ότι οι TVWS συσκευές δεν προκαλούν επιβλαβείς παρεμβολές σε υπηρεσίες που δραστηριοποιούνται στα ήδη κατειλημμένα αδειοδοτημένα τηλεοπτικά κανάλια. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία CR τεχνολογιών που διασφαλίζουν την προστασία αδειοδοτημένων υπηρεσιών.

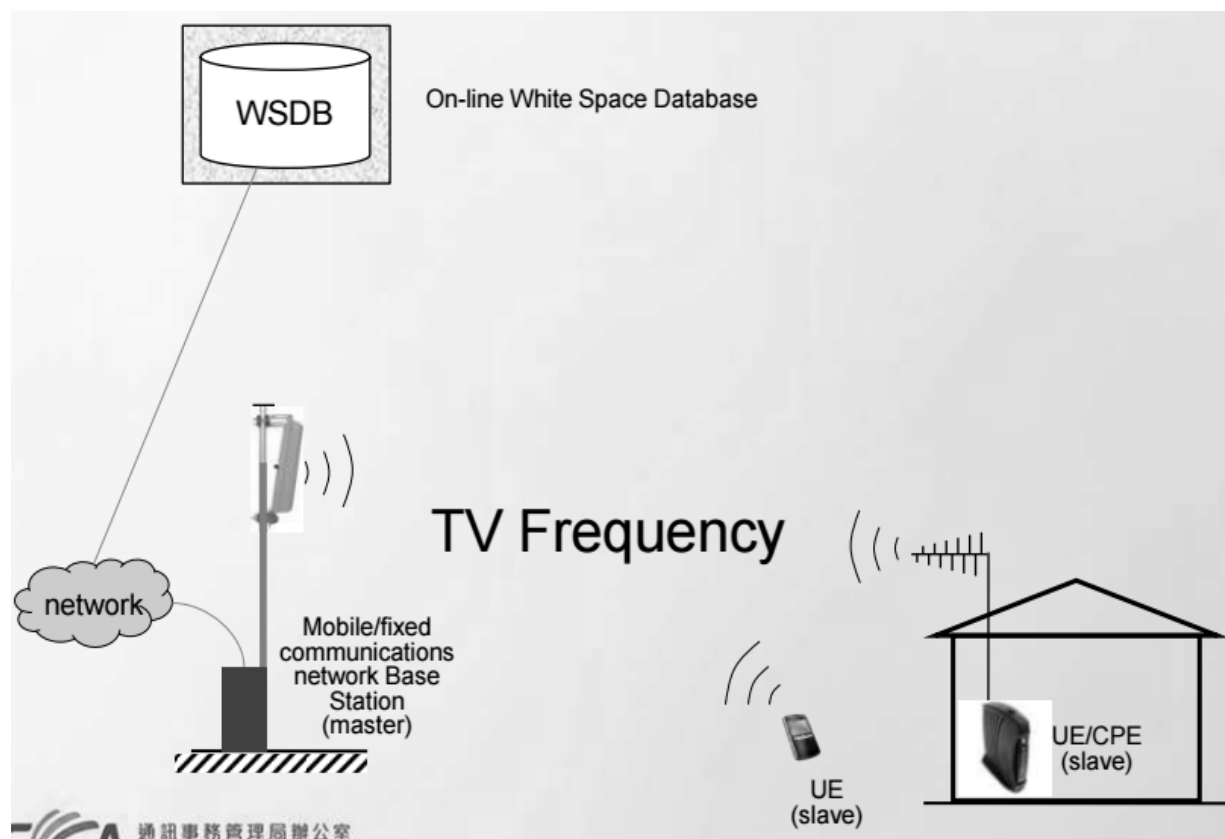
Η πρώτη CR τεχνολογία αξιοποιεί συνδυασμό δύο τεχνολογιών: γεωεντοπισμού (geo-location) και διαχείρισης βάσης δεδομένων υπάρχοντων συστημάτων. Ως γεωεντοπισμός ορίζεται η δυνατότητα μιας συσκευής TVWS να γνωρίζει το γεωγραφικό της μήκος και πλάτος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μίας τεχνολογίας εντοπισμού αποτελεί το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού (Global Positioning System, GPS). Ως βάση δεδομένων των TVWS ορίζεται η βάση δεδομένων όπου καταχωρούνται πληροφορίες για όλες τις αδειοδοτημένες υπηρεσίες στις τηλεοπτικές ζώνες.

Για παράδειγμα, στη βάση δεδομένων καταχωρείται η θέση ενός τηλεοπτικού σταθμού ευρυεκπομπής, η φασματική ζώνη όπου αυτός λειτουργεί και η ισχύς εκπομπής του. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, μπορεί να καθορισθεί η γεωγραφική περιοχή μέσα στην οποία τηλεοπτικοί δέκτες μπορούν να λάβουν το

τηλεοπτικό σήμα κάποιου σταθμού TV. Επομένως, οι δέκτες αυτοί πρέπει να προστατεύονται από παρεμβολές. Αυτού του τύπου βάσεις δεδομένων προσφέρουν πληροφορίες στις TVWS συσκευές ως προς τα κανάλια που μπορεί να χρησιμοποιήσουν στην περιοχή λειτουργίας τους.

Με αυτή την προσέγγιση, οι WSDs προσδιορίζουν τη θέση τους λαμβάνοντας υπόψη μια βάση δεδομένων γεωεντοπισμού και αποφασίζουν ποιες συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Κρίσιμες παράμετροι για αυτό είναι η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης και η συχνότητα ερωτήσεων προς τη βάση δεδομένων. Για τη λειτουργία της τεχνικής αυτής, πριν επιτραπεί η χρήση ενός ελεύθερου καναλιού, όπως π.χ. ενός TVWS είναι απαραίτητη η πρόσβαση, με κάποιο τρόπο, στη βάση δεδομένων.

Σε μία τυπική αρχιτεκτονική για πρόσβαση σε βάση δεδομένων υπάρχουν δύο WSD συσκευές : μία master και μία slave – το laptop ή το smartphone μας με το οποίο θέλουμε να αποκτήσουμε πρόσβαση μέσω TVWS :



Σχήμα 3.3 : Αρχιτεκτονική πρόσβασης σε βάση δεδομένων TVWS

Η Google έχει δημιουργήσει μία εφαρμογή βασιζόμενη σε μία βάση δεδομένων των υπάρχοντων τηλεοπτικών συστημάτων και το GPS για τις Η.Π.Α. Επιλέγοντας μία οποιαδήποτε περιοχή μπορεί κανείς να δει τα διαθέσιμα προς χρήση TVWS στην περιοχή αυτή :

Search for white space spectrum in your area:

Device type What's this?

Fixed Portable

Address

Search for a location

Latitude

Longitude

37

-95.5

Height (m)

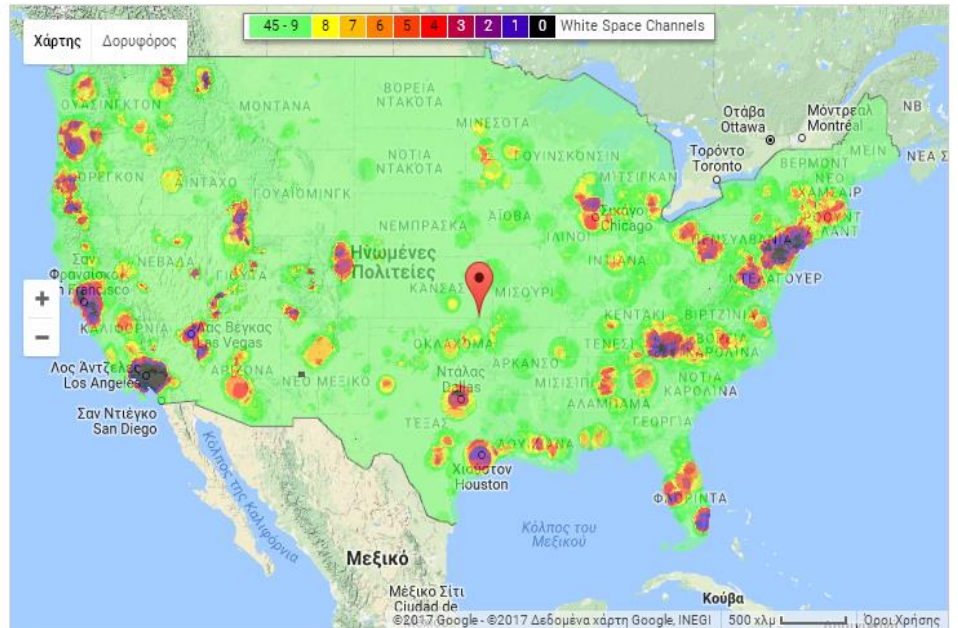
10

Height type

Above ground level

Search

Reset



Spectrum availability (as of February 07, 2017)

Available Spectrum: 20 Channels (120 MHz)

Channel Details																																																							
Channel Number	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51					
Power [dBm]	36			36	36								36	36					36	36	36																																		
Channels 3 and 4		×	×																																																				
KJRH-TV:1317221							×	×	×																																														
KOAM-TV:1296813							×	×																																															
KTUL:1365147								×	×	×	×																																												
KOED-TV:1495672									×	×	×																																												
KFJX:1442205										×	×																																												
KDOR-TV:1631972																×	×	×																																					
KOKI-TV:619048																					×																																		
KOTV-DT:1511590.2																																																							
Wireless mic																																																							
KRSU-TV:1144508																																																							
Radio astronomy																																																							
KZLL-LD:2004053																																																							
KMYT-TV:618058																																																							
KODE-TV:1309742																																																							
KOTV-DT:1318307																																																							
KSNF:1340828																																																							
K5JG:1144962																																																							
Power [dBm]	36			36	36								36	36					36	36	36																																		
Channel Number	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51					

Σχήμα 3.4 : Εφαρμογή βάσης δεδομένων της Google για εντοπισμό διαθέσιμων TVWS σε οποιαδήποτε περιοχή των Η.Π.Α.

Η δεύτερη CR τεχνολογία, που χρησιμοποιείται για την προστασία των υπαρχόντων τηλεοπτικών συστημάτων και αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως ανίχνευση φάσματος (spectrum sensing), βασίζεται σε διαδικασία ενσωματωμένη στις TVWS συσκευές, η οποία πραγματοποιεί μετρήσεις του ραδιοφάσματος. Με βάση τις μετρήσεις αυτές, μία CR συσκευή μπορεί να προσδιορίσει ποιά κανάλια είναι κατειλημμένα από αδειοδοτημένα τηλεοπτικά συστήματα που πρέπει να προστατευθούν. Συνεπώς, προσδιορίζει και ποιά κανάλια είναι ελεύθερα και, επομένως, αποτελούν τηλεοπτικά κενά διαστήματα.

Με την τεχνική αυτή λοιπόν, μέσω της διεξαγωγής μετρήσεων οι WSDs προσπαθούν να ανιχνεύσουν την παρουσία πρωτεύοντων χρηστών ή υπηρεσιών σε πιθανό διαθέσιμο κανάλι. Όταν κάποιο κανάλι αναγνωριστεί ως ελεύθερο (vacant), εξετάζονται τα γειτονικά του για πιθανούς περιορισμούς στην ισχύ εκπομπής. Δεδομένου ότι ορισμένες παθητικές υπηρεσίες (π.χ. Ραδιοαστρονομία, που καταλαμβάνει τη ζώνη 608-614 MHz), δεν είναι δυνατόν να προστατευθούν κατ' αυτό τον τρόπο, συγκεκριμένα κανάλια πρέπει να εξαιρεθούν μόνιμα από την απόδοση σε WSDs.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της ανίχνευσης φάσματος είναι ότι δεν βασίζεται σε ήδη υπάρχουσα υποδομή (π.χ. βάση δεδομένων). Ένα σημαντικό μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι, αν υιοθετηθούν πολύ αυστηρά (χαμηλά) κατώφλια ανίχνευσης θα υπάρξει μείωση των διαθέσιμων καναλιών. Επίσης, στην περίπτωση όπου ανιχνευθεί ελεύθερο κανάλι και αφού η WSD ξεκινήσει τη λειτουργία της, πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να γίνεται επανέλεγχος του φάσματος για να διασφαλισθεί ότι αυτό παραμένει ελεύθερο.

Η τεχνική με χρήση σήματος φάρου αναφέρεται στην αποστολή από φάρους ειδικών σημάτων φάρων (beacons) που χρησιμοποιούνται για να υποδείξουν ποια κανάλια είναι ήδη κατειλημμένα από πρωτεύουσες ή άλλες υπηρεσίες και ποια είναι ελεύθερα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτοτελώς, αλλά συνήθως χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με την τεχνική ανίχνευσης φάσματος για την υποβοήθηση αυτής, αυξάνοντας όμως το κόστος των αντίστοιχων συστημάτων.

Στην πρώτη περίπτωση CR συσκευών, η γνωστική λειτουργία μοιράζεται ανάμεσα στην TVWS συσκευή (γεωεντοπισμός) και σε μία εξωτερική οντότητα (τη βάση δεδομένων των TVWS). Αντιθέτως, στη δεύτερη περίπτωση CR συσκευών, η γνωστική λειτουργία, δηλαδή αυτή της ανίχνευσης φάσματος, είναι πλήρως ενσωματωμένη στην TVWS συσκευή.

3.3 Εφαρμογές

Η παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών σε αγροτικές περιοχές αποτελεί μία από τις σημαντικότερες περιπτώσεις χρήσης του φάσματος των TVWS. Οι τηλεοπτικές ζώνες (κανάλια), ιδιαίτερα στο ανώτερο μέρος της ζώνης VHF και στο

κατώτερο μέρος της ζώνης UHF, εμφανίζουν ιδιαίτερα καλά χαρακτηριστικά διάδοσης, λογικά μεγέθη κεραιών και σχετικά χαμηλά επίπεδα παρεμβολής από ηλεκτρικές συσκευές. Λαμβάνοντας υπόψη το κόστος παροχής ενσύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές με χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, η ασύρματη προσέγγιση φαίνεται προτιμητέα. Επιπλέον, ένα σημαντικό πλεονέκτημα των αγροτικών περιοχών αποτελεί η αυξημένη διαθεσιμότητα κενών τηλεοπτικών καναλιών.

Σε μητροπολιτικές περιοχές το μεγαλύτερο μέρος του τηλεοπτικού φάσματος είναι κατειλημμένο είτε από τηλεοπτικούς σταθμούς είτε από άλλες αδειοδοτημένες υπηρεσίες όπως είναι τα ασύρματα μικρόφωνα (Programme Making and Special Events, PMSE). Αντιθέτως, στις αγροτικές περιοχές η πιθανότητα ύπαρξης αχρησιμοποίητων καναλιών είναι σαφώς μεγαλύτερη.

Προς αυτή την κατεύθυνση, ασύρματης περιφερειακής δικτύωσης (Wireless Regional Area Network, WRAN), η ομάδα εργασίας IEEE 802.22 ξεκίνησε τις εργασίες της τον Οκτώβριο του 2004. Το πρώτο παραδοτέο της ομάδας IEEE 802.22 καθορίζει το στρώμα της πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control layer) και το φυσικό στρώμα (PHYsical layer) ασύρματων περιφερειακών σημείου προς πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint) δικτύων WRAN με σταθερά και κινητά τερματικά χρηστών.

Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.22, τα δίκτυα είναι κυψελωτού τύπου. Η ακτίνα μιας κυψέλης κυμαίνεται μεταξύ 10 και 30km, υποθέτοντας κατευθυντικές κεραιές. Η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας εκτείνεται ανάμεσα στα 54 και 862 MHz. Πολύπλεξη OFDM με μεγάλο κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιείται για να αντιμετωπισθούν καθυστερήσεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης μέχρι 37 μ s. Το φυσικό στρώμα του προτύπου 802.22 προδιαγράφει 2048 κανάλια για μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης του εύρους ζώνης. Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων είναι 22.69Mb/s, ενώ ο ελάχιστος 4.54Mb/s.

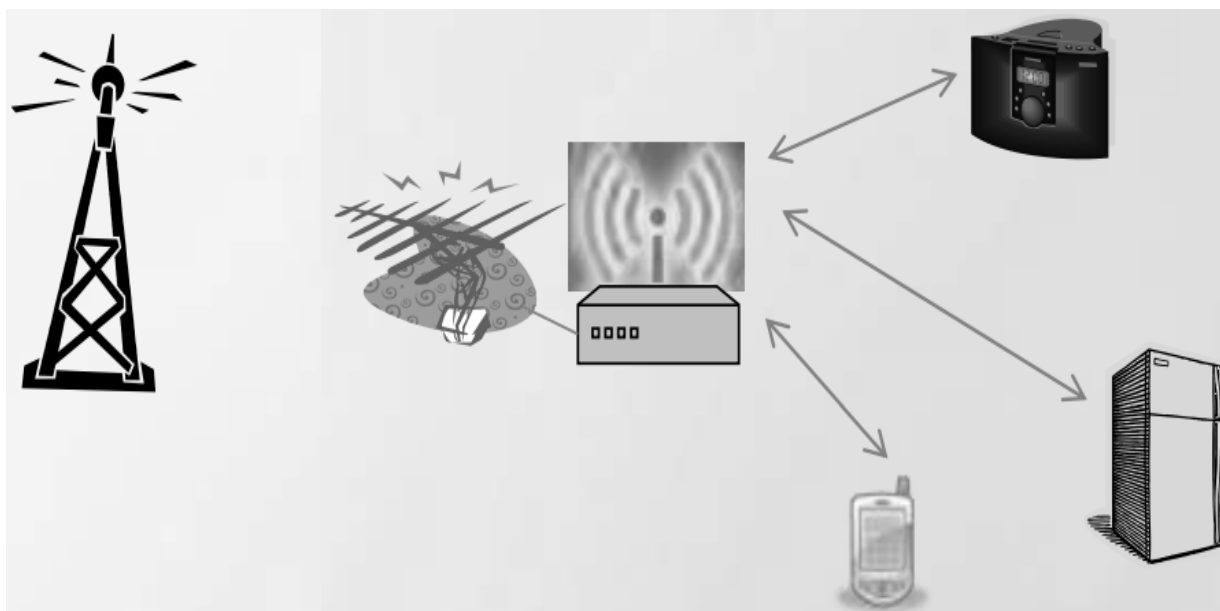
Οι σταθμοί βάσης σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.22 έχουν την ικανότητα να υποστηρίξουν μέχρι και 512 τερματικά χρήστη (Customer Premises Equipment, CPE). Ο συνολικός αριθμός των χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν εξαρτάται από τις ανάγκες κάθε χρήστη σε εύρος ζώνης. Ένας σταθμός βάσης 802.22 μπορεί να εξυπηρετεί μέχρι 512 CPEs όταν οι ανάγκες σε εύρος ζώνης είναι μικρές. Εντούτοις, δεδομένου ότι ένα τηλεοπτικό κανάλι μπορεί να έχει εύρος μόνον 6, 7 ή 8MHz, καθώς, επίσης, και δεδομένου ότι η συγκόλληση καναλιών (channel bonding) δεν επιτρέπεται, ο διαχειριστής του δικτύου ενός ασύρματου παρόχου υπηρεσιών διαδικτύου (Wireless Internet Service Provider, WISP) πρέπει να καταλήξει στο πλήθος των χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν υπό την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) σε δεδομένη γεωγραφική περιοχή.

Το IEEE 802.22 WRAN έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση με ρυθμούς δεδομένων παρόμοιους με το ADSL. Ορίζει ένα ολοκληρωμένο σύνολο CR λειτουργιών. Οι γνωστικές ικανότητες περιλαμβάνουν μηχανισμούς για την προστασία των υπαρχόντων δικτύων (ψηφιακή τηλεόραση,

PMSE) και τη συνύπαρξη μεταξύ των επικαλυπτόμενων σταθμών βάσης του IEEE 802.22 WRAN. Ορίζει την ασύρματη διεπαφή για WSD με ανίχνευση φάσματος και για WSD με πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων και γεωεντοπισμό. Προσφέρει και έναν αριθμό από αλγορίθμους ανίχνευσης. Μερικοί από αυτούς μπορούν να αισθανθούν επίπεδα σήματος εγκατεστημένων χρηστών αδειοδοτημένων υπηρεσιών έως -120 dBm/8MHz. Το πρότυπο ορίζει, επίσης, μια σειρά από μεθόδους για τον προσδιορισμό της γεωγραφικής τοποθεσίας.

Εκτός απ' την WRAN δικτύωση, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης CR τεχνολογίας για ασύρματη τοπική δικτύωση (Wireless Local Area Network, WLAN). Προς αυτή την κατεύθυνση με πρωτοβουλία της FCC έχει αναπτυχθεί το πρότυπο IEEE 802.11af. Είναι γνωστό και ως Super Wi-fi ή White-fi, ακριβώς γιατί αξιοποιεί τα TVWS. Βασίζεται στο γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά διάδοσης στις ζώνες VHF-UHF μεταξύ 54 και 790 MHz είναι πολύ καλύτερα απ' τις ζώνες των 2,4 και 5 GHz. Χαρακτηριστικά, έχουμε πολύ μικρότερη εξασθένηση κατά τη διάδοση μέσω υλικών όπως το τούβλο ή το μπετόν. Η ραδιοκάλυψη επίσης του δικτύου είναι μεγαλύτερη, με μικρότερο κόστος και κατανάλωση ισχύος. Άρα για μία ασύρματη τοπική δικτύωση – και ad-hoc – εμφανίζει προφανώς εξαιρετικό ενδιαφέρον. Το πρώτο σχετικό δίκτυο εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στο πανεπιστήμιο της West Virginia στις 9 Ιουλίου του 2013. Το πρότυπο IEEE 802.11af χρησιμοποιεί OFDM διαμόρφωση και σε ένα κανάλι 8 MHz με διάστημα φύλαξης 2,25 μ s, ρυθμό κώδικα 5/6 και σχήμα 256-QAM, επιτυγχάνεται ρυθμός μετάδοσης 35,6 Mbps.

Μία άλλη εφαρμογή CR τεχνολογιών για αξιοποίηση των TVWS μπορεί να έχουμε στις επικοινωνίες machine-to-machine (M2M). Μία τέτοια περίπτωση είναι το «ευφυές» ηλεκτρικό δίκτυο Smart Grid και το Smart Metering για τηλεμετρία και παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας και όλης της ενεργειακής δραστηριότητας :



Σχήμα 3.5 : Smart Metering μέσω TVWS

3.4 TVWS στην Ελλάδα

Θα παρουσιάσουμε όλα τα τηλεοπτικά κενά διαστήματα (TV White Spaces), τα ελεύθερα κανάλια, που υπάρχουν μέσα στην Ελλάδα ανά allotment - με μαύρα γράμματα είναι τα ελεύθερα προς χρήση κανάλια και με κόκκινα είναι αυτά που είναι ελεύθερα αλλά το ακριβώς επόμενο ή προηγούμενο γειτονικό του είναι δεσμευμένο – όπως τα καταγράψαμε στο εργαστήριο Ασυρμάτων Επικοινωνιών και Επικοινωνιών Μεγάλων Αποστάσεων :

<i>Allotments</i>	<i>TV White Spaces</i>
ΕΒΡΟΣ	21, 22, 23, 26, 28, 29, 34, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 57, 60 συνορεύει με Πλάκα.
ΠΛΑΚΑ	26, 28, 40, 44, 45, 48, 52, 55, 57, 60 συνορεύει με Έβρος, Θάσος, Χαλκιδική, Λέσβος.
ΘΑΣΟΣ	28, 44, 45, 48, 51, 55, 57, 58 συνορεύει με Πλάκα, Παγγαίο, Χαλκιδική, Λέσβος.
ΠΑΓΓΑΙΟ	28, 44, 45, 57, 58 συνορεύει με Θάσος, Θεσσαλονίκη, Χαλκιδική, Λέσβος.
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	33, 45, 57 συνορεύει με Παγγαίο, Χαλκιδική, Φλώρινα, Μεταξάς, Λάρισα, Βόλος.
ΧΑΛΚΙΔΙΚΗ	28, 45, 57 συνορεύει με Πλάκα, Θάσος, Παγγαίο, Θεσσαλονίκη, Λάρισα, Βόλος, Λέσβος.
ΦΛΩΡΙΝΑ	21, 22, 33, 35, 37, 42, 45, 46, 53, 57, 58 συνορεύει με Θεσσαλονίκη, Μεταξάς, Ιωάννινα.
ΜΕΤΑΞΑΣ	21, 33, 37, 45, 57, 58 συνορεύει με Θεσσαλονίκη, Φλώρινα, Ιωάννινα, Λάρισα, Ακαρνανικά.
ΙΩΑΝΝΙΝΑ	36, 37, 48, 55, 56, 57, 58 συνορεύει με Φλώρινα, Μεταξάς, Θεσπρωτία, Λάρισα, Ακαρνανικά.
ΘΕΣΠΡΩΤΙΑ	26, 35, 38, 40, 42, 44, 47, 48, 50, 55, 58 συνορεύει με Ιωάννινα, Κέρκυρα, Ακαρνανικά, Αίνος.
ΚΕΚΡΥΡΑ	24, 25, 26, 31, 35, 38, 40, 42, 44, 47, 48, 49, 50, 52, 55, 58 συνορεύει με Θεσπρωτία, Ακαρνανικά, Αίνος.
ΛΑΡΙΣΑ	45 συνορεύει με Χαλκιδική, Θεσσαλονίκη, Μεταξάς, Ιωάννινα, Ακαρνανικά, Βόλος, Λαμία, Καρπενήσι, Αίνος, Λέσβος.
ΑΚΑΡΝΑΝΙΚΑ	48, 58 συνορεύει με Μεταξάς, Ιωάννινα, Θεσπρωτία, Κέρκυρα, Λάρισα, Καρπενήσι, Αίνος, Πάτρα.
ΒΟΛΟΣ	26, 28, 45 συνορεύει με Χαλκιδική, Λάρισα, Λαμία, Αττική, Αθήνα, Λέσβος, Θεσσαλονίκη.
ΛΑΜΙΑ	28, 39, 45, 46 συνορεύει με Λάρισα, Βόλος, Καρπενήσι, Κόρινθος, Αττική, Αθήνα.
ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ	41, 50, 58 συνορεύει με Λάρισα, Ακαρνανικά, Λαμία, Αίνος, Πάτρα, Κόρινθος.

ΑΙΝΟΣ	48, 50, 58 συνορεύει με Θεσπρωτία, Κέρκυρα, Ακαρνανικά, Καρπενήσι, Πάτρα, Πύργος.
ΠΑΤΡΑ	58 συνορεύει με Ακαρνανικά, Καρπενήσι, Αίνος, Κόρινθος, Πύργος, Τρίπολη.
ΚΟΡΙΝΘΟΣ	40 συνορεύει με Λαμία, Καρπενήσι, Πάτρα, Αττική, Αθήνα, Τρίπολη, Ναύπλιο.
ΑΤΤΙΚΗ	28, 40, 45 συνορεύει με Βόλος, Λαμία, Κόρινθος, Αθήνα, Ναύπλιο, Κυκλάδες, Λέσβος.
ΑΘΗΝΑ	28, 40, 45 συνορεύει με Βόλος, Λαμία, Κόρινθος, Αττική, Ναύπλιο, Κυκλάδες, Λέσβος.
ΠΥΡΓΟΣ	27, 39, 43, 51 συνορεύει με Αίνος, Πάτρα, Τρίπολη, Καλαμάτα.
ΤΡΙΠΟΛΗ	0 συνορεύει με Πάτρα, Κόρινθος, Πύργος, Ναύπλιο, Καλαμάτα, Σπάρτη.
ΝΑΥΠΛΙΟ	0 συνορεύει με Κόρινθος, Αθήνα, Αττική, Τρίπολη, Σπάρτη, Δυτική Κρήτη, Κυκλάδες.
ΚΑΛΑΜΑΤΑ	39, 43, 51 συνορεύει με Αίνος, Τρίπολη, Σπάρτη, Πύργος, Δυτική Κρήτη.
ΣΠΑΡΤΗ	0 συνορεύει με Τρίπολη, Ναύπλιο, Καλαμάτα, Δυτική Κρήτη, Κεντρική Κρήτη, Κυκλάδες.
ΔΥΤΙΚΗ ΚΡΗΤΗ	23, 28, 45 συνορεύει με Ναύπλιο, Σπάρτη, Κεντρική Κρήτη, Ανατολική Κρήτη, Δωδεκάνησα, Κυκλάδες.
ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΚΡΗΤΗ	23, 28, 45, 48, 55, 58 συνορεύει με Σπάρτη, Κεντρική Κρήτη, Ανατολική Κρήτη, Δωδεκάνησα, Κυκλάδες.
ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗ	22, 23, 28, 30, 40, 45, 48, 55, 58 συνορεύει με Κεντρική Κρήτη, Ανατολική Κρήτη, Δωδεκάνησα, Κυκλάδες.
ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	22, 23, 28, 30, 40, 45, 48, 55, 58 συνορεύει με Δυτική Κρήτη, Κεντρική Κρήτη, Ανατολική Κρήτη, Κυκλάδες, Σάμος, Καστελόριζο.
ΚΥΚΛΑΔΕΣ	28, 45, 48 συνορεύει με Αττική, Αθήνα, Σπάρτη, Ναύπλιο, Δυτική Κρήτη, Κεντρική Κρήτη, Ανατολική Κρήτη, Δωδεκάνησα, Σάμος, Λέσβος.
ΣΑΜΟΣ	22, 23, 28, 30, 37, 40, 41, 45, 48, 49, 54, 55, 57, 58 συνορεύει με Δωδεκάνησα, Κυκλάδες, Λέσβος.
ΛΕΣΒΟΣ	28, 45, 48, 55, 57 συνορεύει με Πλάκα, Θάσος, Παγγαίο, Χαλκιδική, Λάρισα, Βόλος, Αττική, Αθήνα, Κυκλάδες, Σάμος.
ΚΑΣΤΕΛΟΡΙΖΟ	22, 23, 26, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 36, 37, 38, 40, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 54, 55, 57, 58, 60 συνορεύει με Δωδεκάνησα.

Πίνακας 3.1 : Ελεύθερα κανάλια (TVWS) της Ελλάδας

Στο εργαστήριο Ασυρμάτων Επικοινωνιών και Επικοινωνιών Μεγάλων Αποστάσεων καταγράψαμε επίσης τα δεσμευμένα κανάλια των γειτονικών χωρών της Ελλάδας σύμφωνα με τη Συνθήκη της Γενεύης :

Allotments	ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΤΟΥΡΚΙΑΣ
REG 1	24, 28, 36, 40, 43, 52, 57
REG 3	44, 55, 60
Assignments	
EDIRNE ENEZ	54
Allotments	
REG 6	26, 28, 40, 45, 48, 57
Assignments	
CANAKKALE BAYRAMICI	25
Allotments	
REG 39	32, 35, 43, 49, 55
Assignments	
BALIKESIR AYVALIK	36
Allotments	
REG 40	23, 28, 37, 40, 45, 48, 58
Assignments	
IZMIR MERKEZ	23
Allotments	
REG 41	22, 24, 30, 33, 41, 42, 46, 54
REG 42	25, 49, 53, 57
Assignments	
AYDIN KUSADASI	41
REG 69	23, 29, 33, 38, 44, 46, 51
Assignments	
MUGLA KOYCEGIZ	30
MUGLA YATAGAN	55
Allotments	
REG 70	22, 28, 30, 45, 48, 55, 58
Assignments	
MUGLA DATCA	40
Allotments	
REG 71	31, 34, 40, 47, 60
REG 72	22, 26, 44, 55, 58
Assignments	
ANTALYA KAS	34

Πίνακας 3.2 : Δεσμευμένα κανάλια Τουρκίας

Allotments	ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΒΟΥΛΓΑΡΙΑΣ
KARDJALI	21, 26, 29, 42, 44, 45, 48, 60
Assignments	
IVAJLOVGRAD	21, 26, 29, 42, 45, 48, 60
KARDJALI	21, 26, 29, 45, 48, 60
MAKAZA	21, 26, 29, 42, 45, 48, 60
SVILENGRAD	21, 26, 29, 42, 45, 48, 60
Allotments	
SMOLYAN	28, 34, 38, 49, 50, 55, 56, 57, 58
Assignments	
MADAN	28, 38, 55, 57
MADAN-1	34, 49, 58
SMOLYAN	28, 34, 38, 49, 55, 57, 58
TRIGRAD	28, 34, 38, 49, 55, 57, 58
ZLATOEVGRAD	28, 34, 38, 49, 55, 57, 58
Allotments	
BLAGOEVGRAD	25, 28, 29, 31, 33, 42, 45, 46
Assignments	
ALABORAN	25, 28, 29, 31, 33, 42, 45
GOZE DELCHEV	25, 28, 29, 31, 33, 42, 45
PETRICH	25, 28, 29, 31, 33, 42, 45
SANDANSKI	25, 28, 29, 31, 33, 42, 45

Πίνακας 3.3 : Δεσμευμένα κανάλια Βουλγαρίας

Allotments	ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΑ ΚΑΝΑΛΙΑ FYROM
BOSKIJA	21, 34, 37, 41, 49, 50, 54, 57
PELISTER	22, 25, 29, 33, 37, 38, 42, 46, 58, 60

Πίνακας 3.4 : Δεσμευμένα κανάλια ΠΓΔΜ

Allotments	ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΑΛΒΑΝΙΑΣ
AL009D	21, 27, 28, 43, 45, 51, 55, 57, 59
Assignments	
CAR1 - CAR10	21, 27, 28, 43, 45, 51, 55, 57, 60
ER1 - ER10	21, 27, 28, 43, 45, 51, 55, 57, 60
Allotments	
AL010D	26, 29, 35, 37, 38, 44, 48, 50, 53, 56, 58, 60
Assignments	
PR1 - PR15	26, 29, 35, 37, 38, 44, 48, 50, 53, 56, 58, 60
KER1 - KER15	26, 29, 35, 37, 38, 44, 48, 50, 53, 56, 58, 60

Allotments	
AL011D	23, 39, 43, 46, 57
Assignments	
SOP1 - SOP7	23, 39, 43, 46, 57
MIL1 - MIL7	23, 39, 43, 46, 57

Πίνακας 3.5 : Δεσμευμένα κανάλια Αλβανίας

Allotments	ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΛΙΒΥΗΣ
DERNA1 - 8	32, 36, 42, 46, 47, 50, 53, 60
Assignments	
DER1 - 8, DERNA	32, 36, 42, 47, 50, 53, 60
Allotments	
BEIDA1 - 7	23, 25, 41, 51, 54, 56
Assignments	
BED1 - 7, BEIDA	23, 25, 41, 51, 54, 56
Allotments	
ALMARJ1 - 7	21, 24, 26, 30, 39, 43, 52
Assignments	
MRJ1 - 7	21, 24, 26, 30, 39, 43, 52
Allotments	
BENGAZI1 - 7	22, 33, 38, 44, 45, 58
Assignments	
BEN1 - 8, BENGAZI	22, 33, 38, 44, 58
Allotments	
AJDABIA1 - 8	23, 25, 41, 51, 54, 56
Assignments	
MSD1 - 6	23, 26, 29, 40, 45, 50
TOB1 - 4, TOBRUK	23, 26, 29, 35, 39, 43
*Τα assignments TOB1-4 και TOBRUK δεν είναι μέσα σε κάποιο allotment.	

Πίνακας 3.6 : Δεσμευμένα κανάλια Λιβύης

Allotments	ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΑΙΓΥΠΤΟΥ
A02	60
Assignments	
BADER	40, 46, 54, 56
BENI EBID	21, 22, 24, 27, 34
HAMMOUL	23, 28, 30, 47, 59
MAHALLA	41, 47, 49, 53, 57
MANSOURA	22, 25
SIDI SALEM	33, 35, 37, 38, 48

TANTA	42
Allotments	
B05	0
Assignments	
ABU HOMOUS	22, 60
ETAI EL BAROUD	25, 29, 39, 55
HAMMAM	39, 42, 49, 51, 57
R8	54, 56, 58
Allotments	
B04	30
Assignments	
ALAMIN	29, 43, 46, 48, 53, 60
BIR NAHED	28, 33, 34, 55
BIR THALIB	50, 52, 59
Allotments	
B03	37
Assignments	
ALAM MARIAM	45, 56, 57
EL DABA	38, 40, 42
R11	38, 40, 51
RAS HEKMA	32, 33, 35, 39, 49
Allotments	
B02	26
Assignments	
MATRUH	27, 30, 41, 44, 47
NEGILA NORTH	22, 25, 28
R603	31, 36, 57, 59
Allotments	
B01	35
Assignments	
ALAM SAMIR	54, 58, 60
BEER KHESMA	24, 30, 33, 34, 37, 39, 43
SALUM	23, 26, 29, 43, 45, 53
SIDI BARANI	49, 52, 55

Πίνακας 3.7 : Δεσμευμένα κανάλια Αιγύπτου

Allotments	ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΙΤΑΛΙΑΣ
LE	24, 25, 26, 32, 36, 38, 40, 42, 44, 47, 48, 49, 50, 52, 55, 58, 60
Assignments	
LECCE	48, 60
PARABITA	44, 48, 50
S.MARIA DI LEUCA	24

SALENTO TURRISI	38, 47, 55
Allotments	
KR	24, 25, 26, 27, 32, 40, 42, 44, 47, 50, 52, 55, 57, 58
Assignments	
CASABONA	35
CROTONE	21, 26, 27, 30, 35, 40, 42, 44, 58
CROTONE STUDI	36, 38, 49, 50, 52, 56
CROTONE VIA MINNITI	47, 48, 60
ISOLA CAPO RIZZUTO	26, 30, 40
M.S.MICHELE	47, 48, 60
MESORACA	36, 42, 44, 49, 52, 56
MONTE SAN MICHELE	42, 44
ROCCABERNARDA	35
SAN NICOLA DELL ALTO	24, 25, 26, 42, 47, 57
SAN NICOLA DELL'ALTO	22, 36, 37, 38, 49, 50, 52, 56
TORRE MELISSA	35, 49
Allotments	
CZ	24, 25, 26, 27, 32, 38, 40, 42, 44, 47, 50, 52, 55, 57, 58
Assignments	
BADOLATO	49
CALABRICATA	35
CROPANI	36, 38, 42, 44, 49, 52, 56
GAGLIATO	34
GUARDAVALLE	32, 35, 36, 42, 44, 49, 52, 56
ISCA SULLO IONIO	35, 49
PETRONA'	35, 47, 48, 60
STALETT	46
STALETT+	42, 44
STALETTI	32, 53
STALETTI'	26, 30, 35, 36, 37, 38, 40, 47, 48, 49, 50, 52, 56, 60
STALETTI9	24, 26, 27, 40
Allotments	
RC	23, 24, 25, 26, 27, 28, 33, 38, 39, 44, 47, 48, 51, 55, 58
Assignments	
ANTONIMINA	49
BRANCALEONE	35
CASIGNANA	33, 35, 48
GIOIOSA IONICA	36, 38, 42, 44, 49, 52, 56
MONASTERACE	32, 49
RIACE	35, 49
ROCCELLA IONICA	36, 37, 38, 42, 44, 47, 48, 49, 50, 52, 56, 60
SIDERNO	32

Πίνακας 3.8 : Δεσμευμένα κανάλια Ιταλίας

Allotments	ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΚΥΠΡΟΥ
	33, 49, 50, 54, 56, 59
	28, 41, 49

Πίνακας 3.9 : Δεσμευμένα κανάλια Κύπρου

Από τα στοιχεία των ως κατά τα άνω πινάκων έχουμε τα ελεύθερα κανάλια της Ελλάδας και τα δεσμευμένα κανάλια των γειτονικών της χωρών - Τουρκία, Βουλγαρία, ΠΓΔΜ, Αλβανία, Λιβύη, Αίγυπτος, Ιταλία, Κύπρος. Οπότε μπορούμε να φτιάξουμε έναν πίνακα με τα TV White Spaces ανά allotment της Ελλάδας συναρτήσει γειτονικών τους allotments και assignments που ανήκουν στις γειτονικές χώρες της Ελλάδας. Έχουμε θεωρήσει σαν γειτονικά τα allotments τα οποία έχουν κάποιο κοινό σημείο επαφής στον χάρτη.

Το τελευταίο αυτό σχήμα είναι λοιπόν πολύ σημαντικό, με προοπτική για το μέλλον και τις πιθανές διμερείς συμφωνίες της Ελλάδας με τις γειτονικές της χώρες – πάλι με μαύρα γράμματα είναι τα ελεύθερα προς χρήση κανάλια και με κόκκινα είναι αυτά που είναι επίσης ελεύθερα αλλά το ακριβώς επόμενο ή προηγούμενο γειτονικό του είναι δεσμευμένο, και ως προς τα τοπωνύμια με μαύρα γράμματα έχουμε τα allotments και με κόκκινα τα assignments :

Allotments	TV White Spaces (Allotments, Assignments)
ΕΒΡΟΣ	22, 23, 34, 37, 38, 39, 41, 46, 49, 50, 53 συνορεύει με Πλάκα, REG1, REG3, EDIRNE-ENEZ, KARDJALI, IVAJLOVGRAD, KARDJALI, MAKAZA, SVILENGRAD.
ΠΛΑΚΑ	52 συνορεύει με Έβρος, Θάσος, Χαλκιδική, Λέσβος, REG3, EDIRNE-ENEZ, REG6, CANAKKALE-BAYRAMICI, KARDJALI, IVAJLOVGRAD, KARDJALI, MAKAZA, SVILENGRAD, SMOLYAN, MADAN, MADAN-1, SMOLYAN, TRIGRAD, ZLATOGRAD.
ΘΑΣΟΣ	44, 51, 55, 58 συνορεύει με Πλάκα, Παγγαίο, Χαλκιδική, Λέσβος, REG6, CANAKKALE-BAYRAMICI, SMOLYAN, MADAN, MADAN-1, SMOLYAN, TRIGRAD, ZLATOGRAD.
ΠΑΓΓΑΙΟ	44 συνορεύει με Θάσος, Θεσσαλονίκη, Χαλκιδική, Λέσβος, SMOLYAN, MADAN, MADAN-1, SMOLYAN, TRIGRAD, ZLATOGRAD, BLADOEVGRAD, ALABORUN, GOZE DELCHEV, PETRICH, SANDANSKI, BOSKIJA.
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	0 συνορεύει με Παγγαίο, Χαλκιδική, Φλώρινα, Μεταξάς, Λάρισα, Βόλος, BLAGOEVGRAD, ALABORUN, GOZE DELCHEV, PETRICH, SANDANSKI, BOSKIJA, PELISTER.
ΧΑΛΚΙΔΙΚΗ	0 συνορεύει με Πλάκα, Θάσος, Παγγαίο, Θεσσαλονίκη, Λάρισα, Βόλος, Λέσβος, REG6, CANAKKALE- BAYRAMICI.
ΦΛΩΡΙΝΑ	35, 53 συνορεύει με Θεσσαλονίκη, Μεταξάς, Ιωάννινα, PELISTER, AL009D, CAR1-CAR10, ER1-ER10.

ΙΩΑΝΝΙΝΑ	36 συνορεύει με Φλώρινα, Μεταξάς, Θεσπρωτία, Λάρισα, Ακαρνανικά, AL009D, CAR1-CAR10, ER1-ER10, AL010D, PR1-PR15, KER1-KER15, AL011D, SOP1-SOP7, MIL1-MIL7.
ΘΕΣΠΡΩΤΙΑ	40, 42, 47, 55 συνορεύει με Ιωάννινα, Κέρκυρα, Ακαρνανικά, Αίνος, AL010D, PR1-PR15, KER1-KER15, AL011D, SOP1-SOP7, MIL1-MIL7.
ΚΕΡΚΥΡΑ	31 συνορεύει με Θεσπρωτία, Αίνος, Ακαρνανικά, LE,LECCE,PARABITA,S.MARIA DI LEUCA,SALENTO TURRISI,KR,CASABONA, CROTONE, CROTONE STUDI, CROTONE VIA MINNITI, ISOLA CAPO RIZZUTO, M.S.MICHELE, MESORACA, MONTE SAN MICHELE, ROCCABERNARDA, SAN NICOLA DELL ALTO, SAN NICOLA DELL'ALTO, TORRE MELISSA.
ΑΚΑΡΝΑΝΙΚΑ	0 συνορεύει με Μεταξάς, Ιωάννινα, Θεσπρωτία, Κέρκυρα, Λάρισα, Καρπενήσι, Αίνος, Πάτρα, , LE,LECCE,PARABITA,S.MARIA DI LEUCA,SALENTO TURRISI,KR,CASABONA, CROTONE, CROTONE STUDI, CROTONE VIA MINNITI, ISOLA CAPO RIZZUTO, M.S.MICHELE, MESORACA, MONTE SAN MICHELE, ROCCABERNARDA, SAN NICOLA DELL ALTO, SAN NICOLA DELL'ALTO, TORRE MELISSA.
ΑΙΝΟΣ	0 συνορεύει με Θεσπρωτία, Κέρκυρα, Ακαρνανικά, Καρπενήσι, Πάτρα, Πύργος, LE,LECCE,PARABITA,S.MARIA DI LEUCA,SALENTO TURRISI,KR,CASABONA, CROTONE, CROTONE STUDI, CROTONE VIA MINNITI, ISOLA CAPO RIZZUTO, M.S.MICHELE, MESORACA, MONTE SAN MICHELE, ROCCABERNARDA, SAN NICOLA DELL ALTO, SAN NICOLA DELL'ALTO, TORRE MELISSA,CZ, BADOLATO, CALABRICATA, CROPANI, GAGLIATO, GUARDAVALLE, ISCA SULLO IONIO, PETRONA', STALETT, STALETT+, STALETTI, STALETTI', STALETTI9,RC, ANTONIMINA, BRANCALEONE, CASIGNANA, GIOIOSA IONICA, MONASTERACE, RIACE, ROCCELLA IONICA, SIDERNO.
ΠΥΡΓΟΣ	43 συνορεύει με Αίνος, Πάτρα, Τρίπολη, Καλαμάτα, RC, ANTONIMINA, BRANCALEONE, CASIGNANA, GIOIOSA IONICA, MONASTERACE, RIACE, ROCCELLA IONICA, SIDERNO.
ΚΑΛΑΜΑΤΑ	51 συνορεύει με Αίνος, Πύργος, Τρίπολη, Σπάρτη, Δυτική Κρήτη, CZ, BADOLATO, CALABRICATA, CROPANI, GAGLIATO, GUARDAVALLE, ISCA SULLO IONIO, PETRONA', STALETT, STALETT+, STALETTI, STALETTI', STALETTI9,RC, ANTONIMINA, BRANCALEONE, CASIGNANA, GIOIOSA IONICA, MONASTERACE, RIACE, ROCCELLA IONICA, SIDERNO.
ΔΥΤΙΚΗ ΚΡΗΤΗ	0 συνορεύει με Ναύπλιο, Σπάρτη, Κεντρική Κρήτη, Ανατολική Κρήτη, Δωδεκάνησα, Κυκλάδες, B01,ALAM

	SAMIR, BEER KHESMA, SALUM, SIDI BARANI, B02, MATRUH, NEGILA NORTH, R603, DERNA1-8, DER1-8, DERNA, BEIDA1-7, BED1-7, BEIDA, ALMARJ1-7, MRJ1-7, MSD1-6, TOB1-4, TOBRUK.
ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΚΡΗΤΗ	48, 58 συνορεύει με Σπάρτη, Κεντρική Κρήτη, Ανατολική Κρήτη, Δωδεκάνησα, Κυκλάδες, B01, ALAM SAMIR, BEER KHESMA, SALUM, SIDI BARANI, B02, MATRUH, NEGILA NORTH, R603, DERNA1-8, DER1-8, DERNA, BEIDA1-7, BED1-7, BEIDA, TOB1-4, TOBRUK.
ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗ	48 συνορεύει με Κεντρική Κρήτη, Ανατολική Κρήτη, Δωδεκάνησα, Κυκλάδες, B01, ALAM SAMIR, BEER KHESMA, SALUM, SIDI BARANI, B02, MATRUH, NEGILA NORTH, R603, B03, ALAM MARIAM, EL DABA, R11, RAS HEKMA, DERNA1-8, DER1-8, DERNA, MSD1-6, TOB1-4, TOBRUK.
ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	0 συνορεύει με Δυτική Κρήτη, Κεντρική Κρήτη, Ανατολική Κρήτη, Κυκλάδες, Σάμος, Καστελλόριζο, REG42, AYDIN-KUSADASI, REG69, MUGLA-KOYCEGIZ, MUGLA-YATAGAN, REG70, MUGLA-DATCA, REG71, REG72, ANTALYA-KAS, ΚΥΠΡΟΣ.
ΚΥΚΛΑΔΕΣ	0 συνορεύει με Αττική, Αθήνα, Σπάρτη, Ναύπλιο, Δυτική Κρήτη, Κεντρική Κρήτη, Ανατολική Κρήτη, Δωδεκάνησα, Σάμος, Λέσβος, REG40, IZMIR-MERKEZ, REG41.
ΣΑΜΟΣ	37, 40 συνορεύει με Δωδεκάνησα, Κυκλάδες, Λέσβος, REG41, REG42, AYDIN-KUSADASI, REG69, MUGLA-KOYCEGIZ, MUGLA-YATAGAN, REG70, MUGLA-DATCA.
ΛΕΣΒΟΣ	0 συνορεύει με Πλάκα, Θάσος, Παγγαίο, Χαλκιδική, Λάρισα, Βόλος, Αττική, Αθήνα, Κυκλάδες, Σάμος,
ΚΑΣΤΕΛΟΡΙΖΟ	23, 28, 29, 30, 36, 37, 38, 43, 45, 46, 48, 57 συνορεύει με Δωδεκάνησα, REG71, REG72, ANTALYA-KAS, ΚΥΠΡΟΣ.

Πίνακας 3.10 : Ελεύθερα κανάλια (TVWS) της Ελλάδας συναρτήσεως των γειτονικών της χωρών

Να σημειώσουμε ότι αναφερόμαστε στη φάση μετά το πέρας του ψηφιακού μερίσματος 1, οπότε και έχει λάβει χώρα εκκαθάριση της ζώνης 790–862MHz (κανάλια 61-69) και απόδοσή της στις εταιρίες κινητών επικοινωνιών. Με το ψηφιακό μείρισμα 2, που είναι σε εξέλιξη, θα έχουμε επιπλέον απελευθέρωση φάσματος και συγκεκριμένα της ζώνης 694-790 MHz (κανάλια 49-60), καθώς και πιθανή ανακατανομή (allocation) των υπολοίπων καναλιών της ζώνης UHF.

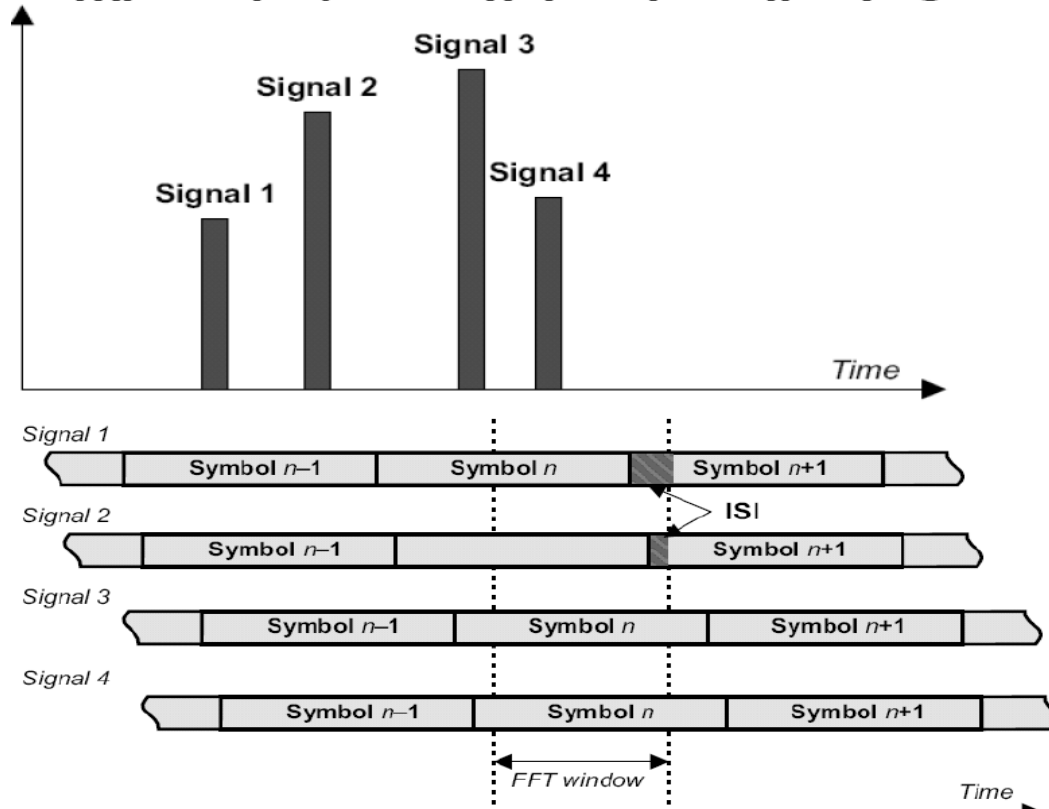
4. Μελέτη περίπτωσης ραδιοκάλυψης ψηφιακής τηλεόρασης

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται στο παρόν έργο είναι το ICS Telecom της ATDI. Οι δυνατότητές του περιλαμβάνουν πρόβλεψη έντασης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο χώρο, με χρήση πληθώρας μοντέλων διάδοσης, απωλειών και περίθλασης σήματος, τόσο στατιστικά όσο και ντετερμινιστικά, καθώς και λεπτομερείς υπολογισμούς παρεμβολών και αλληλεπίδρασης μεταξύ θέσεων εκπομπής. Ειδικότερα για δίκτυα ψηφιακής τηλεόρασης υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης του βαθμού συγχρονισμού όμοιων σημάτων που λαμβάνονται με χρονική καθυστέρηση, για τη διάρθρωση μονοσυχνοτικών δικτύων SFN.

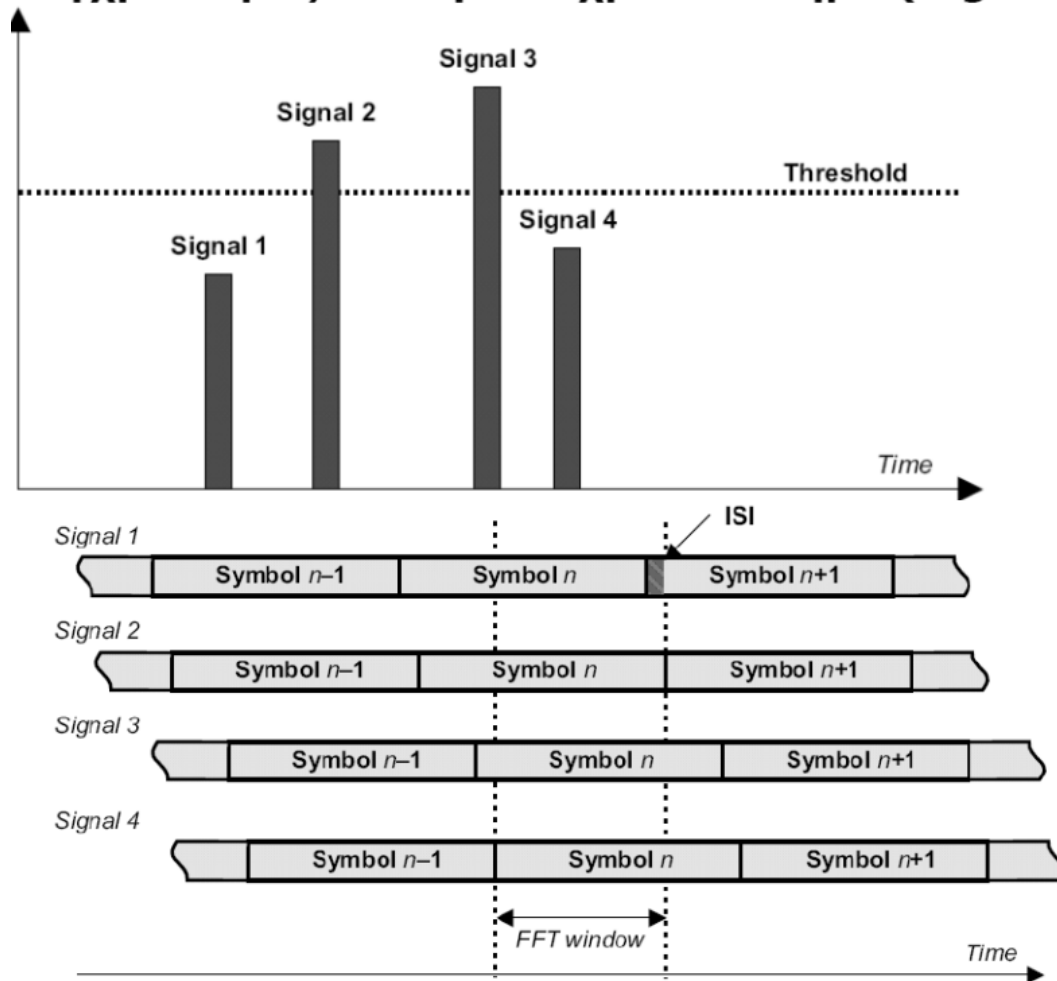
Τα χαρτογραφικά δεδομένα που χρησιμοποιεί το εν λόγω λογισμικό είναι μορφής Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (Digital Terrain Model, DTM), με ανάλυση 50μ. Τα χαρτογραφικά δεδομένα περιλαμβάνουν ολόκληρη την ελληνική επικράτεια, καθώς και τμήματα των όμορων κρατών, για την εκτίμηση παρεμβολών που δύνανται να προκαλέσουν ελληνικές θέσεις εκπομπής στις χώρες αυτές, και αντιστρόφως.

Το λογισμικό έχει τη δυνατότητα να προβλέψει το βαθμό συγχρονισμού δύο ή περισσότερων θέσεων εκπομπής για κάθε σημείο λήψης του χώρου, και να απεικονίσει τα αποτελέσματα στον ψηφιακό χάρτη. Υπάρχουν αλγόριθμοι για να συγχρονίσει κανείς τα όμοια σήματα των κέντρων εκπομπής του SFN που φτάνουν, ως γνωστόν, στο σημείο λήψης μέσω πολυδιαδρομικής διάδοσης σε διαφορετικούς χρόνους και με διαφορετικές εξασθενήσεις :

Συγχρονισμός στο ισχυρότερο σήμα (Signal 3)



Συγχρονισμός στο πρώτο χρονικά σήμα (Signal 1)



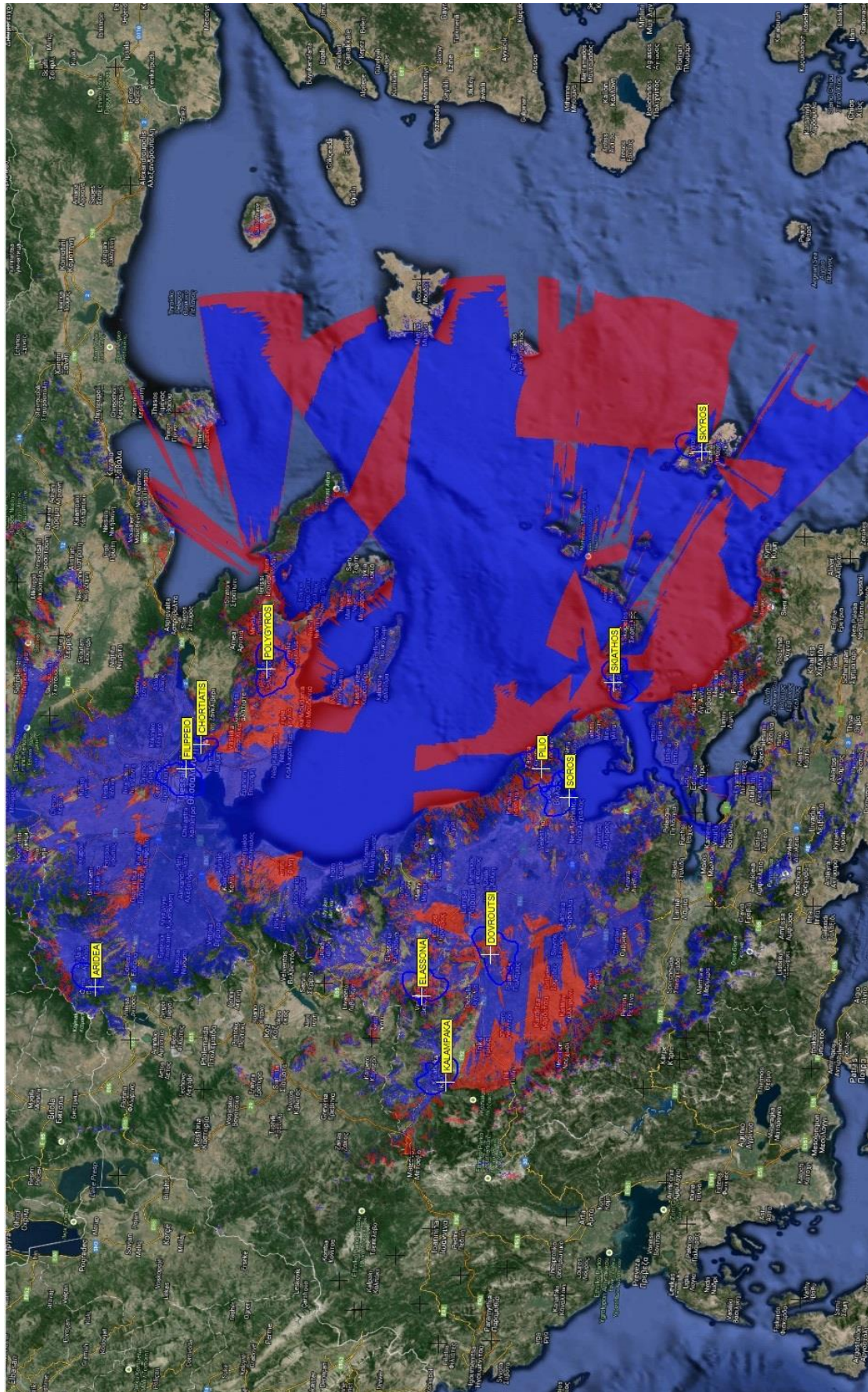
Σχήμα 4.1 : Αλγόριθμοι συγχρονισμού όμοιων σημάτων κέντρων εκπομπής SFN

Συγκρίνοντας τις δύο προαναφερθείσες μεθόδους, αυτή του ισχυρότερου σήματος (Best Server) είναι πιο απαισιόδοξη στις προβλέψεις αποτελεσμάτων, καθώς τα προγενέστερα αφιχθέντα σήματα δημιουργούν μεγαλύτερα προβλήματα συγχρονισμού σε σχέση με τα μεταγενέστερα αφιχθέντα. Οι σύγχρονοι δέκτες ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος είναι σε θέση να επιλέξουν την μέθοδο που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο, ή και ακόμα πιο προηγμένες στρατηγικές. Για την επιλογή του τύπου συγχρονισμού του δέκτη πρέπει να ληφθούν υπόψη μερικές βασικές παράμετροι.

Ο σχεδιασμός δε γίνεται για κάποια ιδιωτική εταιρεία, ούτε για συνδρομητική λήψη, ώστε να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά του δέκτη. Στην περίπτωση του σχεδιασμού ενός δικτύου ελεύθερης τηλεόρασης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι οι φθηνότεροι αποκωδικοποιητές στην αγορά χρησιμοποιούν τη μέθοδο “Best Server”. Είναι αναμενόμενο ο σχεδιαστής του δικτύου να επιλέξει την προαναφερθείσα μέθοδο “Best Server”, καθώς ικανοποιεί το χειρότερο δυνατό σενάριο συνθηκών συγχρονισμού.

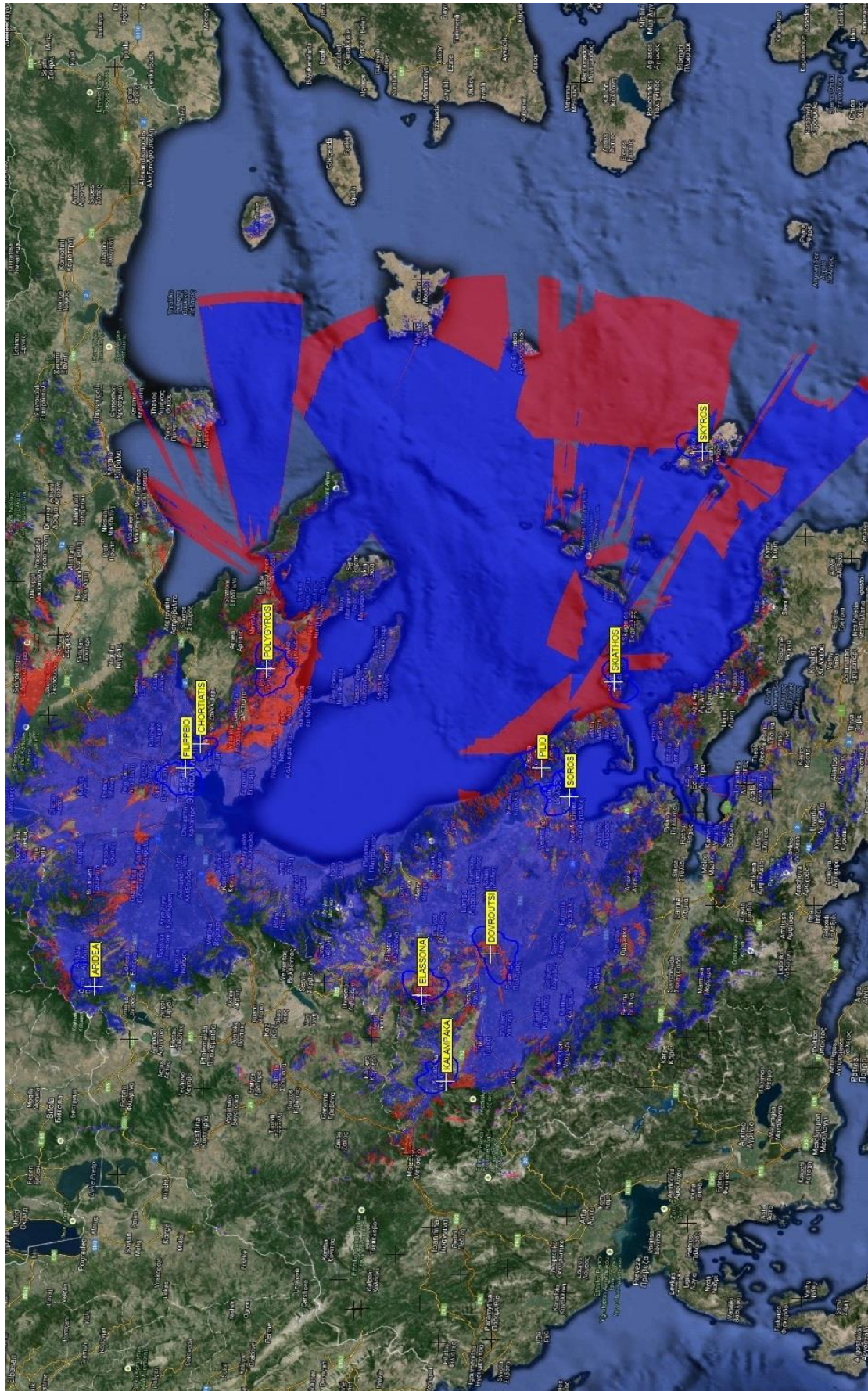
Από το λογισμικό λοιπόν γίνεται προσομοίωση συγχρονισμού με μέθοδο “Best Server”, με στατιστική διακύμανση του λαμβανόμενου σήματος Rayleigh – δεν έχουμε οπτική επαφή πομπού και δέκτη - τυπικής απόκλισης $\sigma=2$, που αντιστοιχεί σε συνθήκες φορητής λήψης (Portable Reception). Οι συνθήκες φορητής λήψης έχουν προφανώς πιο αυστηρές προδιαγραφές από τις συνθήκες σταθερής λήψης οπότε και τις καλύπτουν. Επιτυχή κάλυψη κρίνεται ότι έχουν οι θέσεις λήψης που συγχρονίζουν τα λαμβανόμενα σήματα για ποσοστό χρόνου μεγαλύτερο από 95%.

Θεωρούμε την περίπτωση των 4 allotments : «Λάρισα», «Βόλος», «Θεσσαλονίκη», «Χαλκιδική». Όπως αναλύσαμε και στην παράγραφο «Διεθνής συντονισμός συχνοτήτων», η περιοχή αυτή αντιστοιχεί σε 4 SFN. Θέλουμε εδώ να διερευνήσουμε αν γίνεται η περιοχή αυτή των 4 allotments να καλυφθεί από ένα μόνο SFN. Ως εκ τούτου, απ’ τα κέντρα εκπομπής, που φαίνονται στα σχήματα 3.2, 3.3, 3.4, «Αριδαία», «Φιλίππειο», «Χορτιάτης», «Πολύγυρος», «Ελασσόνα», «Καλαμπάκα», «Δοβρούτσι», «Πήλιο», «Σωρός», «Σκιάθος», «Σκύρος», βάζουμε να εκπέμπεται κοινό σήμα. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούμε το πρότυπο DVB-T με διάστημα φύλαξης 1/8. Έχουμε την παρακάτω εικόνα :



Σχήμα 4.2 : SFN 4 allotments με χρήση DVB-T και διάστημα φύλαξης 1/8

Στις περιοχές με το κόκκινο χρώμα υπάρχει πρόβλημα. Υπάρχει σήμα που φτάνει εκτός του διαστήματος φύλαξης και παρεμβάλλει. Το σύστημα δεν μπορεί να συγχρονίσει τα όμοια σήματα που φτάνουν απ' τα κέντρα εκπομπής στις κόκκινες περιοχές, όπου η ραδιοκάλυψη δεν μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική. Άρα το πλάνο αυτό είναι μη αποδεκτό και μη υλοποιήσιμο. Είναι λογικό να σκεφτούμε στην επόμενη περίπτωση να χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερο διάστημα φύλαξης. Αυτό αντιστοιχεί στη δυνατότητα χρήσης κέντρων εκπομπής με μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους – η απόσταση των κέντρων εκπομπής που έχουμε είναι πράγματι μεγάλη. Αυτό λοιπόν κάνουμε στην επόμενη φάση, χρησιμοποιούμε το DVB-T με διάστημα φύλαξης 1/4. Έχουμε την εξής εικόνα :



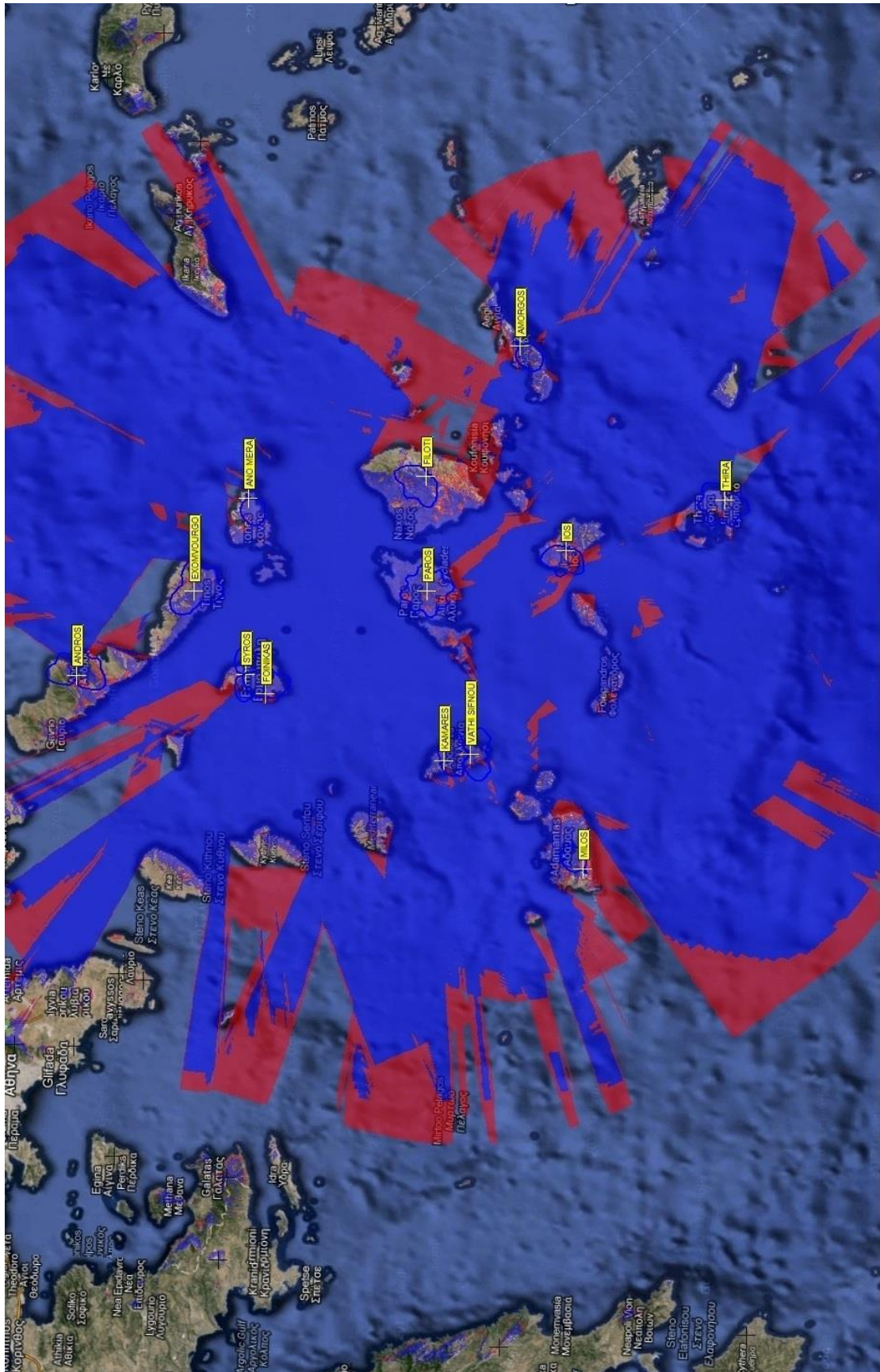
Σχήμα 4.3 : SFN 4 allotments με χρήση DVB-T και διάστημα φύλαξης 1/4

Πράγματι η εικόνα είναι καλύτερη. Οι κόκκινες περιοχές, όπου έχουμε διασυμβολική παρεμβολή και αδυναμία του συστήματος να συγχρονίσει τα όμοια σήματα των κέντρων εκπομπής του προς υλοποίηση SFN, έχουν μειωθεί, ειδικά γύρω από τα κέντρα εκπομπής «Καλαμπάκα», «Ελασσόνα», «Δοβρούτσι». Δεν έχουν όμως εξαλειφθεί. Στην περιοχή του κέντρου εκπομπής «Πολύγυρος», που είναι μία κατοικημένη περιοχή και που θέλουμε ικανοποιητική ραδιοκάλυψη με ανυπαρξία ζητημάτων παρεμβολών και συγχρονισμού, βλέπουμε ότι υπάρχει ιδιαίτερο πρόβλημα. Άρα ούτε αυτό το πλάνο μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό και δε θα το υλοποιούσαμε στην πράξη.

Το τελευταίο που μπορούμε να σκεφτούμε είναι να κάνουμε χρήση της πιο εξελιγμένης τεχνολογικής δυνατότητας που διαθέτουμε. Δηλαδή το DVB-T2. Αν χρησιμοποιήσουμε το DVB-T2 στον 32k mode μετάδοσης σημαίνει ότι έχουμε περίπου 32.000 υποφέροντα OFDM. Αυτό μεταφράζεται σε μεγάλη – τη μεγαλύτερη δυνατή – διάρκεια συμβόλου OFDM. Το διάστημα φύλαξης ως γνωστόν μετριέται ως ποσοστό επί της διάρκειας συμβόλου OFDM. Αυτό σημαίνει ότι με μεγάλη διάρκεια συμβόλου θα έχουμε και μεγάλο διάστημα φύλαξης που μεταφράζεται σε δυνατότητα κάλυψης από κέντρα εκπομπής ενός SFN με μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Μάλιστα θα αρκέσει, σε αυτή την περίπτωση, να πάρουμε διάστημα φύλαξης 1/8 και όχι 1/4, γιατί έχουμε και το trade-off ότι το διάστημα φύλαξης μειώνει τον ωφέλιμο ρυθμό μετάδοσης. Με DVB-T2 λοιπόν και παραμέτρους 32k mode και διάστημα φύλαξης 1/8 το διάστημα που έχουμε για αντιμετώπιση της παρεμβολής και συγχρονισμό είναι σίγουρα μεγαλύτερο απ' τις προηγούμενες περιπτώσεις χρήσης του DVB-T. Έχουμε έτσι την εξής εικόνα :

Βλέπουμε πράγματι μία οριακά τέλεια εικόνα. Οι κόκκινες περιοχές αδυναμίας συγχρονισμού και αντιμετώπισης της διασυμβολικής παρεμβολής έχουν σχεδόν εξαλειφθεί. Το πλάνο αυτό μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό και θα το υλοποιούσαμε στην πράξη. Μπορούμε λοιπόν με χρήση του DVB-T2 και παραμέτρους 32k mode μετάδοσης και διάστημα φύλαξης 1/8 να πετύχουμε ικανοποιητικότερη ραδιοκάλυψη των 4 allotments «Λάρισα», «Βόλος», «Θεσσαλονίκη», «Χαλκιδική» με ένα μόνο μονοσυχνотικό δίκτυο SFN, αξιοποιώντας – και αυτό αρκεί, δε χρειάζεται να προσθέσουμε άλλα – τα υφιστάμενα κέντρα εκπομπής «Αριδαία», «Φιλίππειο», «Χορτιάτης», «Πολύγυρος», «Ελασσόνα», «Καλαμπάκα», «Δοβρούτσι», «Πήλιο», «Σωρός», «Σκιάθος», «Σκύρος». Συγκεντρωτικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι διαπιστώνουμε προφανώς την υπεροχή του DVB-T2 σε σχέση με το DVB-T.

Ας δούμε άλλο ένα παράδειγμα. Θεωρούμε το allotment «Κυκλάδες». Όπως είδαμε στην παράγραφο «Διεθνής συντονισμός συχνοτήτων», το allotment αυτό καλύπτεται από δύο SFN. Θέλουμε να διερευνήσουμε αν γίνεται να πετύχουμε ικανοποιητική ραδιοκάλυψη με ένα μόνο SFN, αξιοποιώντας τα υφιστάμενα κέντρα εκπομπής «Άνδρος», «Εξωμβούργο», «Άνω Μέρα», «Σύρος», «Φοίνικας», «Καμάρες», «Πάρος», «Φιλώτι», «Βαθύ Σίφνου», «Μήλος», «Ίος», «Αμοργός», «Θήρα». Παίρνουμε πάλι δύο περιπτώσεις, χρήση DVB-T και DVB-T2. Με DVB-T και παραμέτρους 8k mode μετάδοσης και διάστημα φύλαξης 1/4 έχουμε την εξής εικόνα :



Σχήμα 4.5 : Allotment «Κυκλάδες» με ένα SFN - DVB-T, 8k-mode, διάστημα φύλαξης 1/4

Καταλήγουμε στο ίδιο συμπέρασμα : υπεροχή του DVB-T2 σε σχέση με το DVB-T. Με 32.000 υποφέροντα OFDM και διάστημα φύλαξης που αρκεί να είναι 1/8 και όχι 1/4, πετυχαίνουμε ικανοποιητικότερη ραδιοκάλυψη με ελάχιστες κόκκινες περιοχές αδυναμίας επίτευξης συγχρονισμού και αντιμετώπισης της διασυμβολικής παρεμβολής και πλάνο αποδεκτό και υλοποιήσιμο, αισθητά καλύτερο σε σχέση με τη χρήση DVB-T με 8k-mode και διάστημα φύλαξης 1/4. Μπορούμε λοιπόν στην πράξη να έχουμε κάλυψη του allotment «Κυκλάδες» με ένα μόνο SFN με χρήση DVB-T2, 32k-mode, διάστημα φύλαξης 1/8, αξιοποιώντας τα υφιστάμενα κέντρα εκπομπής «Άνδρος», «Εξωμβούργο», «Άνω Μέρα», «Σύρος», «Φοίνικας», «Καμάρες», «Πάρος», «Φιλώτι», «Βαθύ Σίφνου», «Μήλος», «Ίος», «Αμοργός», «Θήρα».

5. Επίλογος

Το πρότυπο επίγειας ψηφιακής ευρυεκπομπής DVB-T2 προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον πρόδρομό του DVB-T. Είδαμε ότι με το DVB-T2 μπορούμε να έχουμε ραδιοκάλυψη μίας περιοχής 4 allotments, που έχουν καταχωρηθεί στην Ελλάδα με τη συνθήκη της Γενεύης, με ένα μόνο SFN, χρησιμοποιώντας τα υφιστάμενα κέντρα εκπομπής, με επίτευξη συγχρονισμού του κοινού τους σήματος και αντιμετώπιση της διασυμβολικής παρεμβολής. Αυτό με το DVB-T δεν είναι εφικτό. Ανάλογα με τις συνθήκες διάδοσης, επιλέγουμε τις παραμέτρους σχήμα διαμόρφωσης, μέγεθος FFT, ρυθμό κώδικα και διάστημα φύλαξης και ρυθμίζουμε το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Για παράδειγμα με σχήμα διαμόρφωσης 256-QAM, μέγεθος FFT 32k, ρυθμό κώδικα 2/3, διάστημα φύλαξης 1/16, μπορούμε να πετύχουμε χωρητικότητα 37 Mbps και μετάδοση 20 SDTV ή 4 HDTV προγραμμάτων, χρησιμοποιώντας MPEG-4 πολυπλέκτη. Το κομβικό σημείο στο πρότυπο DVB-T/T2 είναι η χρήση της διαμόρφωσης OFDM. Η OFDM αντιμετωπίζει τη διασυμβολική παρεμβολή, τις συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις, την ενδοσυμβολική παρεμβολή και κάνει δυνατή τη διάρθρωση ενός δικτύου ψηφιακής τηλεόρασης με SFN. Υιοθετείται όχι μόνο στην ψηφιακή τηλεόραση αλλά και σε όλα τα σύγχρονα πρότυπα τηλεπικοινωνιών. Με την μετάβαση στην ψηφιακή τηλεόραση και τη χρήση των OFDM, DVB-T/T2, MPEG-4, SFN έχουμε απελευθέρωση μεγάλου μέρους του φάσματος. Είδαμε προηγουμένως ότι στη θέση ενός αναλογικού τηλεοπτικού προγράμματος τώρα μεταδίδονται παράλληλα 20 SDTV ή 4 HDTV ψηφιακά προγράμματα. Το φάσμα που απελευθερώνεται είναι γνωστό ως ψηφιακό μέρισμα. Έχει ολοκληρωθεί μία πρώτη εκκαθάριση του φάσματος. Συγκεκριμένα η ζώνη 790–862MHz (κανάλια 61-69 των UHF) έχει εκκαθαριστεί από τηλεοπτικές υπηρεσίες και έχει αποδοθεί στις εταιρίες κινητών επικοινωνιών. Είναι σε εξέλιξη η δεύτερη φάση του ψηφιακού μερίσματος οπότε και θα έχουμε επιπλέον απελευθέρωση φάσματος και συγκεκριμένα της ζώνης 694-790 MHz (κανάλια 49-60 των UHF). Επιπροσθέτως, με την ψηφιακή μετάβαση ανακύπτουν, διασπαρμένα στη ζώνη UHF, κάποια φασματικά κενά. Αυτά τα τηλεοπτικά κενά διαστήματα είναι γνωστά ως TV White Spaces (TVWS). Αποτελούν τμήματα της τηλεοπτικής ζώνης που δεν χρησιμοποιούνται από αδειοδοτημένες τηλεοπτικές υπηρεσίες. Η ανάγκη για πρόσθετο φάσμα προς παροχή ασύρματων υπηρεσιών αυξάνεται συνεχώς. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση smartphones που έχει εκτιναχθεί. Ένα από τα βασικά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν αποτελεί προφανώς η σπανιότητα του φάσματος προς κάλυψη των υπηρεσιών αυτών. Προς αυτή την κατεύθυνση, τα TVWS που ανακύπτουν απ' την ψηφιακή μετάβαση είναι λοιπόν μία μεγάλη πρόκληση. Οι γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες (Cognitive Radio, CR) αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη νέα τεχνολογία για την αξιοποίηση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος των TVWS. Σχετικά πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί είναι το IEEE 802.22 (WRAN) και το IEEE 802.11af (WLAN). Τέλος, ένα σημαντικό θέμα είναι τα TVWS στην Ελλάδα συναρτήσει δεσμευμένων – σύμφωνα με τη συνθήκη της Γενεύης – καναλιών γειτονικών της χωρών, ένα θέμα με προοπτική – κι αυτό – για το μέλλον και τις διμερείς συμφωνίες μεταξύ των χωρών.

6. Βιβλιογραφία

1. Ασύρματες Επικοινωνίες – Παναγιώτης Γ. Κωττής , Παντελής-Δανιήλ Μ. Αράπογλου
2. Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών – Αθανάσιος Κανάτας , Φίλιππος Κωνσταντίνου, Γεώργιος Πάντος
3. http://content.schweitzer-online.de/static/catalog_manager/live/media_files/representation/zd_std_orig_zd_schw_orig/014/325/306/9781441906724_foreword_pdf_1.pdf
4. https://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/introduction_to_orthogonal_frequency_division_multiplex.pdf
5. <http://home.iitj.ac.in/~ramana/ofdm-tutorial.pdf>
6. Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications – Ye (Geoffrey) Li , Gordon L. Stüber
7. OFDM for Wireless Communications Systems – Ramjee Prasad
8. MIMO-OFDM Wireless Communications with Matlab – Yong Soo Cho , Jaekwon Kim , Won Young Yang , Chung-Gu Kang
9. www.dvb.org
10. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television - ETSI EN 300 744
11. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2) – ETSI TS 102 831 , v1.2.1 (2012-08)
12. Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2) - ETSI EN 302 755 , v1.4.1 (2015-07)
13. Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2 – EBU-TECH 3348 (Geneva May 2011)
14. http://www.lstelcom.com/fileadmin/content/marketing/news/LS_WhitePaper_DVB-T2_en.pdf
15. Ανάπτυξη Τεχνολογιών Σχεδιασμού και Υλοποίησης Δικτύων Επίγειας Ψηφιακής Τηλεόρασης – Τσιαφάκης Γ. Βασίλειος-Στυλιανός (Διδακτορική Διατριβή)

16.Απόδοση Ραδιοπόρων του Ψηφιακού Μέρισματος σε Ασύρματα Δίκτυα – Νικόλαος Χ. Καψάλης (Διδακτορική Διατριβή)

17.TV White Space Spectrum Technologies – Rashid A. Saeed , Stephen J. Shellhammer

18.<https://www.oecd.org/sti/broadband/49435354.pdf>

19.http://tec.gov.in/pdf/StudyPaper/TVWS_Final.pdf

20.http://www.ofca.gov.hk/filemanager/ofca/en/content_761/tucac_paper2014-04.pdf

21.FINAL ACTS of the Regional Radiocommunication Conference for planning of the digital terrestrial broadcasting service in parts of Regions 1 and 3, in the frequency bands 174-230 MHz and 470-862 MHz – International Telecommunication Union (RRC-06)