ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Δημιουργία αναλυτή φάσματος και παρεμβολών σε SDR

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Μουχτή Νίκης

Επιβλέπων : Μαλιάτσος Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: Βουγιούκας Δημοσθένης, Καλλίγερος Εμμανουήλ

Σάμος, Ιανουάριος 2024

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πρόλογος και ευχαριστίες

Με αυτόν τον πρόλογο θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμησή μου στα άτομα των οποίων η συμβολή και η υποστήριξη υπήρξαν πολύτιμες σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αλλά και των σπουδών μου.

Απευθύνω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μαλιάτσο Κωνσταντίνο για την καθοδήγηση, το χρόνο, την τεχνογνωσία και την εμπειρογνωμοσύνη του. Η συμβολή του ήταν καθοριστική για τη διαμόρφωση της εν λόγω εργασίας.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια αλλά και τους φίλους μου, για την αμέριστη υποστήριξή τους. Η ενθάρρυνση, η κατανόηση και η πίστη τους, αποτέλεσαν κίνητρο σε όλη τη διάρκεια του εν λόγω εγχειρήματος.

Η παρούσα διπλωματική σηματοδοτεί το τέλος πέντε πλήρων φοιτητικών ετών από τα οποία αποκόμισα πολλές γνώσεις, οι οποίες θα αποτελέσουν την αφετηρία ενός νέου κεφαλαίου. Πολλές ευχαριστίες σε όσους έπαιξαν ρόλο σε αυτή την περιπέτεια.

© [2024]

της

Μουχτή Νίκης

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1 Εισαγωγή 1

1.1 Software Defined Radio και φάσμα 1

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής 1

1.3 Δομή της διπλωματικής 2

2 Στόχος και Κίνητρο 4

2.1 Απασχόληση Φάσματος 4

2.2 Παρεμβολές 6

2.3 Τήρηση των Service Level Agreements – SLAs 8

3 Ανάλυση Φάσματος και Αναλυτές Φάσματος 10

3.1 Τι είναι η ανάλυση φάσματος 10

3.1.1 Η έννοια του φάσματος 10

3.1.2 Περιοδόγραμμα, μελέτη φασματικής πυκνότητας ισχύος PSD και συναρτήσεις παραθύρου 11

3.2 Αναλυτές Φάσματος 14

3.3 Τα είδη των αναλυτών φάσματος 14

3.3.1 Swept-Tune Αναλυτές 15

3.3.2 Αναλυτές Φάσματος Πραγματικού Χρόνου 17

4 Ανίχνευση Φάσματος 21

4.1 Ανίχνευση Ενέργειας 22

4.2 Θεώρημα Neyman-Pearson 24

4.3 Συνεργατική και Τοπική Ανίχνευση Φάσματος 26

5 SDR και USRP 28

5.1 Software Defined Radio – SDR 28

5.1.1 RF Front End 29

5.1.2 Analog to Digital Converter - ADC 30

5.1.3 Ψηφιακό Front End 31

5.1.4 Ψηφιακοί Επεξεργαστές Σήματος 32

5.2 Πλεονεκτήματα του SDR 32

5.3 Universal Software Radio Peripheral – USRP 33

5.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά 33

5.4.1 USRP B200-mini 33

5.5 Υποστηριζόμενο Λογισμικό 36

5.5.1 GNU Radio ... *36*
5.5.2 Matlab ... *38*
6 Αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν και Polyphase Filters ... **40**
6.1 Polyphase Filter Banks ... 40
6.2 Polyphase Channelizer ... 42
6.3 Modified Discrete Fourier Transform – MDFT Filter Banks ... 43
6.4 Σχήματα διαμόρφωσης και Quadrature Phase Shift Keying - QPSK ... 45
7 Υλοποίηση και Μετρήσεις ... **48**
7.1 Ενεργειακός Ανιχνευτής με Polyphase Channelizer ... 48
7.1.1 Μέτρηση AWGN θορύβου ... *48*
7.1.2 Μέτρηση ενέργειας και εύρεση κατωφλίων ... *52*
7.2 Περιβάλλον εκπομπής-λήψης UDFT βασισμένο σε QPSK ... 55
7.2.1 Πομπός QPSK ... *55*
7.2.2 Ο δέκτης του συστήματος ... *58*
7.2.3 Πιθανότητα Χαμένης Ανίχνευσης ... *59*
7.3 MDFT Filter Banks και τέλεια ανακατασκευή ... 62
7.3.1 Διάγραμμα ροής συστοιχίας MDFT 16 καναλιών ... *63*
7.3.2 Ανακατασκευή του σήματος εισόδου ... *65*
7.4 Υλοποίηση Ενεργειακού Ανιχνευτή και συστήματος εκπομπής-λήψης με τη χρήση των συστοιχιών MDFT ... 66
7.4.1 Μέτρηση ενέργειας των δεκαέξι υπό-καναλιών ... *66*
7.4.2 Πομπός QPSK ... *67*
7.4.3 Ομαδοποίηση των υπό-καναλιών σε πέντε πρωτεύοντα κανάλια όπου το καθένα περιλαμβάνει τρία υπό-κανάλια ... *68*
7.4.4 Worst Case Scenario εκπομπής στο Πρωτεύον Κανάλι 0 επιλέγοντας το μεγαλύτερο κατώφλι για όλα τα υπό-κανάλια ... *70*
7.4.5 Εκπομπή στο Πρωτεύον Κανάλι 1 και Πιθανότητες Χαμένης Ανίχνευσης ... *77*
7.5 Σύγκριση UDFT με MDFT ... 81
7.6 Υβριδικός Αναλυτής Φάσματος με χρήση FFT ... 84
Βιβλιογραφία ... **86**

Λίστα Σχημάτων

Εικόνα 1. Ζώνες Ραδιοσυχνοτήτων 5
Εικόνα 2. Η έννοια των ευκαιριών φάσματος 6
Εικόνα 3. Ομοδιαυλική Παρεμβολή. Εικόνα 4. Παρεμβολή Γειτονικού Καναλιού. 8
Εικόνα 5. Φαινόμενο Gibbs 11
Εικόνα 6. Παράδειγμα από ένα περιοδόγραμμα 12
Εικόνα 7. DTFT μιας τυπικής συνάρτησης παραθύρου 13
Εικόνα 8. Μίκτης κατά τη λήψη 16
Εικόνα 9. Block διάγραμμα ενός superheteroyne αναλυτή 17
Εικόνα 10. Παράδειγμα ανάλυσης FFT 1 kHz - Ψηφιοποίηση ενός σήματος στο πεδίο του χρόνου και χρήση της ανάλυσης FFT για τη μετατροπή του στο πεδίο της συχνότητας. 18
Εικόνα 11. Type I error and Type II error 25
Εικόνα 12. Block diagram ενός SDR δέκτη 29
Εικόνα 13. Downconvertion και Upconvertion 30
Εικόνα 14. Μετατροπέας από Αναλογικό σε Ψηφιακό 31
Εικόνα 15. Ettus Research USRP B200-mini 34
Εικόνα 16. Block διάγραμμα του USRP B200-mini 35
Εικόνα 17. Απλό παράδειγμα ενός διαγράμματος ροής για έναν FM δέκτη στο GRC 38
Εικόνα 18. Παράδειγμα Πολυφασικής Συστοιχίας M-καναλιών 42
Εικόνα 19. M-to-1 Down-Sample, M-Path Polyphase Channelizer 43
Εικόνα 20. Παράδειγμα των σταδίων ανάλυσης και σύνθεσης, από το άρθρο "Modified DFT Filter Banks withPerfect ReconstructionTanja Karp, Member, IEEE, and N. J. Fliege, Senior Member, IEEE" 44
Εικόνα 21. Σηματαστερισμός QPSK 47
Εικόνα 22. Διάγραμμα ροής στο Gnu Radio Companion, στο οποίο χωρίζουμε το εισερχόμενο σήμα σε 6 κανάλια με τη βοήθεια ενός polyphase channelizer 49
Εικόνα 23. Probability Density Function και Κανονική Κατανομή του σήματος σε Matlab 50
Εικόνα 24. Μείωση του αριθμού των bins σε 30 για καλύτερο fitting 51
Εικόνα 25. Μείωση του αριθμού των bins σε 50 για καλύτερο fitting 51
Εικόνα 26. Διάγραμμα ροής Ενεργειακού Ανιχνευτή στο GNURadio Companion 53
Εικόνα 27. Cumulative Probability Function του θορύβου για PFA=3% και threshold=0.092. 53
Εικόνα 28. Probability Density Function του θορύβου η οποία ακολουθεί την κατανομή Γάμμα 53
Εικόνα 29. RRC φίλτρα για διαφορετικούς παράγοντες roll-off 54
Εικόνα 30. Διάγραμμα ροής πομπού QPSK με χρήση USRP 55
Εικόνα 31. Εντολή στο τερματικό η οποία υλοποιεί τον uhd_fft 56

Εικόνα 32. Uhd_fft μετατόπιση φάσης = -250.000 57
Εικόνα 33. : Uhd_fft μετατόπιση φάσης = -125.000 57
Εικόνα 34. Uhd_fft μετατόπιση φάσης = 0 58
Εικόνα 35. Περιβάλλον Πομπού-Δέκτη, Δέκτης με 6 κανάλια 58
Εικόνα 36. UDFT κανάλια και phase shifts 59
Εικόνα 37. Τύπος Εύρεσης Πιθανότητας Χαμένης Ανίχνευσης 60
Εικόνα 38. Διάγραμμα Κέρδους - Χαμένης Ανίχνευσης, Κανάλι 3, Μετατόπιση Φάσης = -250.000 Hz 61
Εικόνα 39. Διάγραμμα Κέρδους - Χαμένης Ανίχνευσης, Κανάλι 4, Μετατόπιση Φάσης = -250.000 Hz 61
Εικόνα 40. Διάγραμμα Κέρδους - Χαμένης Ανίχνευσης, Κανάλι 5, Μετατόπιση Φάσης = -250.000 Hz 61
Εικόνα 41. Χαμμένες Ανιχνεύσεις QT GUI Time Sink Output 62
Εικόνα 42. QT GUI Time Sink Output, όλα τα κανάλια 62
Εικόνα 43. Διάγραμμα ροής τράπεζας φίλτρων ανάλυσης MDFT με 16 υποκανάλια 63
Εικόνα 44. Διάγραμμα ροής τράπεζας φίλτρων σύνθεσης MDFT με 16 υποκανάλια 64
Εικόνα 45. PR για σήμα από δέκτη USRP 65
Εικόνα 46. PR για απλό ημιτονοειδές σήμα εισόδου 65
Εικόνα 47. Διάγραμμα Ροής - Ανίχνευση ενέργειας για τα κανάλια 0 εως 16 66
Εικόνα 48. CDF καναλιού 4 66
Εικόνα 49. PDF των καναλιών 0,1,2,3 66
Εικόνα 50. Πομπός QPSK - MDFT Σύστημα 68
Εικόνα 51. Διάγραμμα συστοιχίας MDFT με 5 πρωτεύοντα κανάλια το καθένα από τα οποία περιλαμβάνει 3 υπό-κανάλια 68
Εικόνα 52. Διάγραμμα Ροής συσήματος MDFT με 5 πρωτεύοντα κανάλια και ενεργειακούς ανιχνευτές AND και OR 69
Εικόνα 53. Παλμός για frequency shift ίσο με 0 kHz 70
Εικόνα 54. Διάγραμμα ροής δέκτη για worst case scenario 71
Εικόνα 55. Έξοδος του ανιχνευτή OR για το γειτονικό κανάλι 1 71
Εικόνα 56. Έξοδος του ανιχνευτή AND για το γειτονικό κανάλι 1 72
Εικόνα 57. Έξοδος των AND και OR ανιχνευτών για τα μη-γειτονικά κανάλια από το κανάλι εκπομπής .. 72
Εικόνα 58. Έξοδος των AND και OR ανιχνευτών για το κανάλι εκπομπής 72
Εικόνα 60. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Γειτονικό Κανάλι 1, OR 74
Εικόνα 59. Διάγραμμα Πιθανότητας Ψευδούς Ανίνχευσης - Κέρδους Πομπού για το Άμεσα Γειτονικό υποκανάλι 2 74
Εικόνα 62. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Γειτονικό Κανάλι 4, OR 75
Εικόνα 61. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Γειτονικό Κανάλι 1, AND 75
Εικόνα 64. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Μη-Γειτονικό Κανάλι 2, AND 75
Εικόνα 63. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Γειτονικό Κανάλι 4, AND 75
Εικόνα 66. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Μη-Γειτονικό Κανάλι 3, AND 76

Εικόνα 65. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Μη-Γειτονικό Κανάλι 3, OR ... 76
Εικόνα 67. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Μη-Γειτονικό Κανάλι 2, OR ... 76
Εικόνα 68. Εκπομπή στο Πρωτεύον Κανάλι 1, οπτική απεικόνιση παλμού ... 77
Εικόνα 69. Διάγραμμα Ροής Πομπού, εκπομπή στα +150kHz ... 77
Εικόνα 70. Διάγραμα Πιθανότητας Χαμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Κανάλι 1, AND ... 79
Εικόνα 71. Διάγραμα Πιθανότητας Χαμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Κανάλι 1, OR ... 79
Εικόνα 72. Διάγραμμα PFA AND0- PMD AND1 ... 81
Εικόνα 73. Διάγραμμα PFA OR0 - PMD OR1 ... 81
Εικόνα 74. Διάγραμμα PFA AND2 - PMD AND1 ... 81
Εικόνα 75. Διάγραμμα PFA OR2 - PMD OR1 ... 81
Εικόνα 76. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδους Πομπού για το γειτονικό κανάλι 3 του UDFT συστήματος ... 83
Εικόνα 77. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδους Πομπού για το γειτονικό κανάλι 4 του UDFT συστήματος ... 83
Εικόνα 78. Διάγραμμα Αναλυτή Φάσματος με συνδυασμό τράπεζας φίλτρων και FFT ... 85

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των superheterodyne αναλυτών 17
Πίνακας 2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της συνεργατικής και της τοπικής ανίχνευσης..... 26
Πίνακας 3. Χαρακτηριστικές παράμετροι της Κανονικής κατανομής 50
Πίνακας 4. Τιμές κατωφλίων - Σύστημα με 6 κανάλια 54
Πίνακας 5. Πιθανότητες Χαμμένης Ανίχνευσης - Κέρδους για τα κανάλια ενδιαφέροντος και Μετατόπιση Φάσης ίση με -250.000Hz 60
Πίνακας 6. Τιμές Κατωφλίου για τα κανάλια 0 εως 16..... 67
Πίνακας 7. Κατώφλια καναλιών για εκπομπή στο Πρωτεύον Κανάλι 0..... 69
Πίνακας 8. Πιθανότητες Ψευδούς Ανίχνευσης για κέρδος πομπού 0:5:90 73
Πίνακας 9. Πιθανότητες Χαμένης Ανίχνευσης 78
Πίνακας 10. PFAs γειτονικών καναλιών για εκπομπή στα +150kHz 80
Πίνακας 11. Πιθανότητες Ψευδούς Ανίχνευσης για κέρδος 0:5:90 82

Ακρωνύμια

ADC	Analog to Digital Converter
AWGN	Additive White Gaussian Noise
CR	Cognitive Radio
DAC	Digital to Analog Converter
DFT	Discrete Fourier Transform
DSA	Dynamic Spectrum Access
DSP	Digital Signal Processing
FB	Filter Bank
FFT	Fast Fourier Transform
FT	Fourier Transform
GRC	Gnu Radio Companion
IF	Intermediate Frequency
MDFT	Modified Discrete Fourier Transform
OSA	Opportunistic Spectrum Access
PDF	Probability Density Function
PFB	Polyphase Filter Bank
PSD	Power Spectral Density
PU	Primary User
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RRC	Root Raised Cosine
SDR	Software Defined Radio
SLA	Service Level Agreement
UDFT	Uniform Discrete Fourier Transform (filterbank)
USRP	Universal Software Radio Peripheral
VSA	Vector Signal Analysis

Περίληψη

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, διερευνώνται μεθοδολογίες επεξεργασίας σήματος στο πεδίο των Software Defined Radios - SDRs με ιδιαίτερη έμφαση στα Universal Software Radio Peripherals - USRPs. Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων επικοινωνιακών συστημάτων απαιτεί ευέλικτες και προσαρμοστικές πλατφόρμες, όπως οι πλατφόρμες USRP. Η ερευνητική εργασία εμβαθύνει σε επιμέρους πτυχές της τεχνολογίας SDR, αξιοποιώντας τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος – DSP, περιορισμού παρεμβολών, ανάλυσης φάσματος και ανίχνευσης φάσματος.

Βασικός στόχος αποτελεί η ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων για την ανάλυση του φάσματος και τον περιορισμό των παρεμβολών. Με την εφαρμογή τεχνικών ελέγχου υποθέσεων Neyman-Pearson, στην εργασία παρουσιάζονται προηγμένοι αλγόριθμοι ανίχνευσης, προσδιορισμού και αντιμετώπισης των πηγών παρεμβολών σε δυναμικά περιβάλλοντα επικοινωνίας. Επιπλέον διερευνώνται οι πολυφασικές συστοιχίες φίλτρων που χρησιμοποιούν διακριτό μετασχηματισμό Fourier – DFT, αλλά και οι συστοιχίες φίλτρων τροποποιημένου διακριτού μετασχηματισμού Fourier – MDFT. Οι συγκεκριμένες τεχνικές καθιστούν δυνατή τη φασματική ανάλυση υψηλής ευκρίνειας, συμβάλλοντας στην κατανόηση των χαρακτηριστικών του σήματος, ειδικά σε συνωστισμένες ζώνες συχνοτήτων.

Τα πειράματα που πραγματοποιούνται αφορούν αρχικά το διαχωρισμό ενός σήματος ευρείας ζώνης σε υποκανάλια με τη βοήθεια ενός polyphase channelizer, και ύστερα την ανίχνευση της παρουσίας ή της απουσίας σήματος. Το δεύτερο πείραμα αφορά τις τράπεζες φίλτρων MDFT και την ικανότητά τους να ανακατασκευάζουν σχεδόν το αρχικό σήμα. Τέλος, θα κατασκευαστεί ένα πομπός με βάση τη διαμόρφωση QPSK από τον οποίον θα λαμβάνουν σήμα οι δέκτες οι οποίοι κατασκευάστηκαν προηγουμένως, με σκοπό την διεξαγωγή διαφορετικών σεναρίων εκπομπής και λήψης, καθώς θα χρησιμοποιηθούν τα MDFT ως αναλυτές φάσματος.

Λέξεις Κλειδιά: *Software Defined Radio, RF, Ασύρματες Επικοινωνίες, Παρεμβολές, Ανάλυση Φάσματος, Ανίχνευση Φάσματος, Πολυφασικές Συστοιχίες Φίλτρων*

Abstract

Within the context of the present study, methodologies regarding signal processing in the field of Software Defined Radios – SDRs especially focusing on Universal Software Radio Peripherals USRPs, are examined. The increasing complexity of modern communication systems require flexible and adaptive platforms, such as the USRP platforms. This research explores the individual aspects of SDR technology, utilizing digital signal processing -DSP techniques, interference mitigation, spectrum analysis and spectrum sensing.

The key objective is the development of effective methods to reduce interference and optimize spectrum analysis. Through the implementation of the Neyman-Pearson approach to hypothesis testing, this paper introduces advanced algorithms used to detect, identify and handle interference within dynamic communication environments. Furthermore Polyphase Filter Banks and Modified Discrete Fourier Transform Filter Banks -MDFTs are also studied. These techniques provide high resolution spectral analysis, contributing to a better understanding of the signal characteristics, especially in congested frequency bands.

The experiments conducted initially involves the separation of a broadband signal into multiple sub-channels using a polyphase channelizer, and subsequently detecting the presence or absence of a signal. The second experiment concerns MDFT filter banks and their ability to almost reconstruct the original signal. Finally, a QPSK based transmitter will be implemented, in order to provide a signal to the previously constructed receivers, so as to carry out different transmission and reception scenarios, while MDFT filter banks will also be used to implement a spectrum analyzer.

Keywords: *Software Defined Radio, RF, Wireless Communications, Interference, Spectrum Analyzing, Spectrum Sensing, Polyphase Filter Banks*

1 Εισαγωγή

1.1 Software Defined Radio και φάσμα

Καθώς οι ασύρματες επικοινωνίες ολοένα και επεκτείνονται, τα Software Defined Radios διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην προσαρμογή των διαρκώς μεταβαλλόμενων απαιτήσεων του φάσματος. Αυτό συμβαίνει λόγω της προσαρμοστικότητας τους, μιας και οποιαδήποτε αλλαγή μπορεί να πραγματοποιηθεί ανά πάσα στιγμή μέσω του προγραμματισμού του λογισμικού τους. Συνεπώς τα SDR προσφέρουν ένα επίπεδο μελλοντικής διασφάλισης. Οι οργανισμοί μπορούν να επενδύσουν στην συγκεκριμένη τεχνολογία σκεπτόμενοι ότι μελλοντικά δε θα χρειαστεί η πλήρης αντικατάσταση του υλικού.

Παρόλα τα θετικά της τεχνολογίας SDR, υπάρχουν και προκλήσεις τις οποίες καλείται να αντιμετωπίσει. Για αρχή, το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων RF είναι ένα δυναμικό και συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Διάφορα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των κυψελωτών δικτύων, του Wi-Fi, του Bluetooth και των συσκευών IoT, μοιράζονται από κοινού το περιορισμένο φάσμα RF. Ως αποτέλεσμα, στο φάσμα επικρατεί όλο και περισσότερη συμφόρηση, γεγονός το οποίο δημιουργεί ανάγκη για εξέλιξη των ήδη υπαρχόντων προτύπων αξιοποίησης του φάσματος. Επιπλέον, εξαιτίας της συμφόρησης αυτής δημιουργούνται παρεμβολές, η διαχείριση και ο μετριασμός των οποίων είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ποιότητας των ασύρματων επικοινωνιών. Τέλος, η συμμόρφωση με τους κανονισμούς και την αδειοδότηση όσον αφορά το φάσμα, είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή νομικών ζητημάτων και τη διασφάλιση αξιόπιστης και χωρίς παρεμβολές λειτουργία.

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής επικεντρώνεται, όπως φανερώνει και ο τίτλος της, στην ανάπτυξη αναλυτών φάσματος και παρεμβολών με τη χρήση του Software Defined Radio - SDR. Συγκεκριμένα, αφορά την λήψη RF σημάτων μέσω ενός embedded συστήματος υλικού βασισμένο σε λογισμικό, την πλατφόρμα Universal Software Radio Peripheral - USRP. Οι

συγκεκριμένες πλατφόρμες διακρίνονται για την ευελιξία τους, καθώς είναι δυνατός ο προγραμματισμός του λογισμικού τους, ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Αυτή η ευελιξία, δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ποικίλων τεχνικών ανάλυσης, όλες με τη χρήση μιας μόνο συσκευής υλικού, γεγονός που αποτελεί αξιοσημείωτο πλεονέκτημα στον τομέα της ανάλυσης ριαδιοσημάτων.

Στόχος της διπλωματικής, είναι η ανάλυση του λαμβανόμενου φάσματος και των επιμέρους χαρακτηριστικών του. Αρχικά, το σύστημα στοχεύει στη διάκριση μεταξύ της παρουσίας ή της απουσίας σημάτων στο λαμβανόμενο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων. Στη συνέχεια, προσπαθεί να εντοπίσει και να ποσοτικοποιήσει τις παρεμβολές, είτε αυτές προέρχονται από εσωτερικές είτε από εξωτερικές πηγές. Αυτή η γνώση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την η εφαρμογή τεχνικών ακύρωσης ή μετριασμού των παρεμβολών αυτών, με σκοπό την ανάκτηση του αρχικού λαμβανόμενου σήματος.

Για την υλοποίηση των παραπάνω στόχων, πραγματοποιούνται διάφορα πειράματα μέσω του λογισμικού GNU Radio, ένα δημοφιλές εργαλείο στον τομέα των SDR. Στα πλαίσια του εν λόγω περιβάλλοντος λογισμικού, διερευνώνται και εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές ανάλυσης και επεξεργασίας σήματος. Μεταξύ αυτών, περιλαμβάνεται η αξιοποίηση των συστοιχιών φίλτρων και των πολυφασικών φίλτρων, τα οποία συμβάλλουν στην απομόνωση και την προετοιμασία των επιθυμητών σημάτων, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τον θόρυβο και τις παρεμβολές. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται τεχνικές ανίχνευσης ενέργειας για τον προσδιορισμό της παρουσίας σήματος, με βάση τα επίπεδα ενέργειας που παρατηρούνται.

Συνοπτικά, η παρούσα εργασία αποτελεί μια εκτενή διερεύνηση των δυνατοτήτων του Software Defined Radio, με τη χρήση μιας πλατφόρμας USRP, για την ανάλυση φάσματος και παρεμβολών, η οποία περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές οι οποίες συμβάλλουν στην βαθύτερη κατανόηση και την καλύτερη αξιοποίηση των RF σημάτων.

1.3 Δομή της διπλωματικής

Η παρούσα εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια στο σύνολο. Το πρώτο κεφάλαιο είναι εισαγωγικό και παρέχει μια επισκόπηση της εργασίας. Το δεύτερο κεφάλαιο, αναλύει τους στόχους και το κίνητρο της εργασίας, τονίζοντας τη συνάφειά της με την αντιμετώπιση προκλήσεων στον πραγματικό κόσμο. Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στην έννοια του φάσματος, τονίζει τους λόγους για τους οποίους είναι σημαντική η αποτελεσματική ανάλυση και κατανόηση του συχνοτικού περιεχομένου των σημάτων, και παρουσιάζει διάφορους τύπους αναλυτών φάσματος. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στην ανίχνευση ενέργειας, κοινώς στον προσδιορισμό της παρουσίας ή της απουσίας σήματος σε κάποιο κανάλι, εμβαθύνοντας στις τεχνικές ανίχνευσης φάσματος. Το πέμπτο κεφάλαιο αφορά το υλικό το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, περιγράφοντας την δομή και τα χαρακτηριστικά των συστημάτων Software Defined Radio και Universal Software Radio Peripheral, καθώς και το λογισμικό το οποίο υποστηρίζει. Το έκτο κεφάλαιο ορίζει τις συστοιχίες φίλτρων και περιγράφει τους τύπους συστοιχιών φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες τις εργασίες. Τέλος, στο

έβδομο κεφάλαιο υπάρχουν τα πειράματα τα οποία υλοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας.

2 *Στόχος και Κίνητρο*

2.1 Απασχόληση Φάσματος

Τα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας βασίζονται στο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων για τη μετάδοση και την λήψη δεδομένων. Ωστόσο το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων δεν είναι απεριόριστο, και η συνεχής αύξηση των ασύρματων συσκευών και συνεπώς των νέων χρηστών, είναι ανάλογη με την αύξηση ζήτησης πόρων φάσματος, η οποία εάν υπερβεί την προσφορά θα δημιουργηθεί έλλειψη διαθέσιμου φάσματος. Η χρήση του φάσματος εξαρτάται από τον αριθμό των χρηστών, το εύρος ζώνης που διατίθεται σε κάθε χρήστη αλλά και τη χρονική διάρκεια για την οποία ο χρήστης θα εκπέμψει.

Η απασχόληση (occupancy) του φάσματος, αναφέρεται στο ποσοστό του διαθέσιμου φάσματος που χρησιμοποιείται μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο από ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας. Υπάρχουν "τμήματα" του φάσματος, τα οποία χρησιμοποιούνται συνέχεια, δεν χρησιμοποιούνται ποτέ ή χρησιμοποιούνται για κάποιο κλάσμα του χρόνου. Με τις κατάλληλες μετρήσεις μπορούμε να κατανοήσουμε πόσο αποτελεσματικά χρησιμοποιείται το φάσμα συχνοτήτων. Αναλύοντας την πληρότητα του φάσματος, μπορούμε να εντοπίσουμε υποαπασχολούμενες ζώνες συχνοτήτων οι οποίες μπορούν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν για άλλες ασύρματες υπηρεσίες, ή αντιθέτως μπορούμε να εντοπίσουμε ζώνες συχνοτήτων οι οποίες είναι υπερφορτωμένες και ενδέχεται να απαιτούν πρόσθετους πόρους.

Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων (RF) διαμοιράζεται σε αδειοδοτημένους και μη-αδειοδοτημένους χρήστες. Οι αδειοδοτημένοι χρήστες φάσματος είναι εξουσιοδοτημένες οντότητες ή οργανισμοί που έχουν λάβει συγκεκριμένες άδειες από τις ρυθμιστικές αρχές για να λειτουργούν εντός καθορισμένων ζωνών συχνοτήτων. Οι άδειες εκδίδονται συνήθως βάσει ορισμένων κριτηρίων, συμπεριλαμβανομένης της γεωγραφικής θέσης, του εύρους συχνοτήτων, των επιπέδων ισχύος και των συνθηκών χρήσης. Στους αδειοδοτημένους χρήστες φάσματος χορηγούνται αποκλειστικά δικαιώματα χρήσης συγκεκριμένων ζωνών συχνοτήτων, εξασφαλίζοντας προστασία από παρεμβολές και επιτρέποντάς τους να λειτουργούν με υψηλότερα επίπεδα ισχύος και μεγαλύτερο έλεγχο της χρήσης του φάσματος. Παραδείγματα αδειοδοτημένων χρηστών φάσματος περιλαμβάνουν αδειοδοτημένους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας, τηλεοπτικούς και ραδιοφωνικούς σταθμούς, οργανισμούς δημόσιας ασφάλειας και κυβερνητικούς φορείς. Απεναντίας, η χρήση φάσματος χωρίς άδεια υπόκειται σε ορισμένους

κανόνες που καθορίζονται από ρυθμιστικές αρχές για να διασφαλίζεται ο δίκαιος και αποτελεσματικός διαμοιρασμός του. Οι χρήστες φάσματος χωρίς άδεια απαιτείται συνήθως να τηρούν τεχνικές απαιτήσεις και περιορισμούς ισχύος εκπομπής για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών προς άλλους χρήστες, ειδικότερα με τους αδειοδοτημένους χρήστες. Παραδείγματα χρηστών μη αδειοδοτημένου φάσματος μπορούν να βρεθούν σε δίκτυα Wi-Fi, συσκευές Bluetooth, ασύρματα τηλέφωνα, ασύρματα μικρόφωνα και διάφορες άλλες ευρείας κατανάλωσης ηλεκτρονικές συσκευές που χρησιμοποιούν μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων.

Radio frequency spectrum bands

DESIGNATION	ABBREVIATION	FREQUENCIES	FREE-SPACE WAVELENGTHS
Very low frequency	VLF	3 kHz to 30 kHz	100 km to 10 km
Low frequency	LF	30 kHz to 300 kHz	10 km to 1 km
Medium frequency	MF	300 kHz to 3 MHz	1 km to 100 m
High frequency	HF	3 MHz to 30 MHz	100 m to 10 m
Very high frequency	VHF	30 MHz to 300 MHz	10 m to 1 m
Ultrahigh frequency	UHF	300 MHz to 3 GHz	1 m to 100 mm
Super-high frequency	SHF	3 GHz to 30 GHz	100 mm to 10 mm
Extremely high frequency	EHF	30 GHz to 300 GHz	10 mm to 1 mm

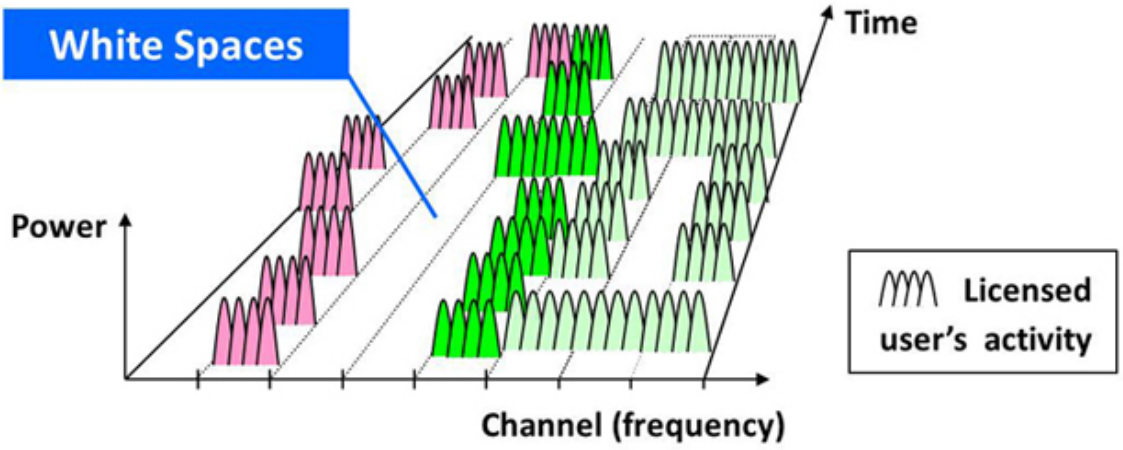
Εικόνα 1. Ζώνες Ραδιοσυχνοτήτων

Η μέτρηση της απασχόλησης του φάσματος είναι σημαντική για τη διαχείριση του, καθώς αφότου έχουμε εντοπίσει μέσω της φασματικής ανάλυσης τις υποαπασχολούμενες και τις υπερφορτωμένες ζώνες, υπάρχει η δυνατότητα δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα (Dynamic Spectrum Access – DSA). Ένας από τους στόχους της δυναμικής κατανομής φάσματος είναι και η διασφάλιση της απουσίας παρεμβολών από μη αδειοδοτημένους χρήστες, σε αδειοδοτημένους. Για να επιτευχθεί αυτό, το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων χωρίζεται σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων, με συγκεκριμένες ζώνες να εκχωρούνται σε αδειοδοτημένους χρήστες και διαφορετικές ζώνες σε χρήστες χωρίς άδεια. Συχνά οι μη αδειοδοτημένες συσκευές χρησιμοποιούν τεχνικές ανίχνευσης φάσματος, για να παρακολουθούν την παρουσία αδειοδοτημένων χρηστών στις εκχωρημένες ζώνες συχνοτήτων και να αποφεύγουν τη μετάδοση σε κατειλημμένα κανάλια (αυτό ισχύει στα γνωστικά ραδιοσυστήματα – cognitive radios). Ακόμη θα πρέπει να χρησιμοποιούν μηχανισμούς ελέγχου ισχύος εκπομπής για να διασφαλίζουν ότι λειτουργούν εντός των καθορισμένων ορίων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση του φάσματος, ενώ παράλληλα διασφαλίζει την προστασία των αδειοδοτημένων υπηρεσιών.

Οι τεχνικές δυναμικής κατανομής φάσματος (DSA) περιλαμβάνουν τη δυναμική και ευέλικτη κατανομή του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων σε διάφορους χρήστες σε πραγματικό χρόνο. Στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της χρήσης του φάσματος, στην προσαρμογή σε διαφορετικές απαιτήσεις και στη διασφάλιση της αποτελεσματικής συνύπαρξης μεταξύ αδειοδοτημένων και μη αδειοδοτημένων χρηστών. Οι τεχνικές DSA περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την ανίχνευση φάσματος, το cognitive radio, το spectrum sharing και την ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα

(Opportunistic Spectrum Access - OSA). Η DSA βασιζόμενη στο Cognitive Radio (CR), το οποίο για να υλοποιηθεί χρειάζεται το Software Defined Radio – SDR, υπόσχεται την αξιοποίηση του υποαπασχολούμενου φάσματος επιτρέποντας την ανίχνευση φάσματος, τον προσδιορισμό των διαθέσιμων συχνοτήτων και την κατανομή τους στα συστήματα σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, ο διαμοιρασμός φάσματος είναι μια τεχνική DSA που επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων, χωρίς να προκαλούν παρεμβολές μεταξύ τους. Μια ακόμη τεχνική η οποία αξιοποιεί τις ζώνες στις οποίες γίνεται υποχρησιμοποίηση, είναι η ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα. Η OSA αναζητά κενά στο φάσμα, με σκοπό να μπορέσει το σύστημα να εκπέμψει σε τμήματα του φάσματος τα οποία δεν χρησιμοποιούνται επί του παρόντος από τους αδειοδοτημένους κύριους χρήστες. Η διάρκεια κατά την οποία δεν υπάρχει δραστηριότητα στις αδειοδοτημένες ζώνες των πρωτευόντων χρηστών ονομάζεται λευκός χώρος ή ευκαιρία φάσματος.

Επομένως η απασχόληση φάσματος και η δυναμική πρόσβαση στο φάσμα είναι σημαντικές έννοιες στις ασύρματες επικοινωνίες, καθώς η απασχόληση φάσματος μετρά τον βαθμό στον οποίο χρησιμοποιείται το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων, ενώ οι τεχνικές DSA επιτρέπουν την προσαρμοστική και ευέλικτη πρόσβαση στο φάσμα.



Εικόνα 2. Η έννοια των ευκαιριών φάσματος

2.2 Παρεμβολές

Τα σήματα RF, γνωστά και ως σήματα ραδιοσυχνοτήτων, είναι ηλεκτρομαγνητικές κυματομορφές που χρησιμοποιούνται σε ασύρματες επικοινωνίες, ευρυεκπομπές (broadcasting), συστήματα ραντάρ και άλλες εφαρμογές. Συγκεκριμένα μια ραδιοσυχνότητα RF είναι το μετρικό που αντιπροσωπεύει τον ρυθμό ταλάντωσης του φάσματος ηλεκτρομαγνητικών ραδιοκυμάτων, και μπορεί να κυμαίνεται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, από περίπου 10 kilohertz (kHz) έως περίπου 300 gigahertz (GHz). Τα σήματα RF (οι φέρουσες συχνότητες) φέρουν πληροφορίες μέσω τεχνικών διαμόρφωσης ενώ μεταδίδονται και λαμβάνονται από συσκευές RF, που

συνίστανται από κεραίες, πομπούς, δέκτες και πομποδέκτες. Καθώς οι ασύρματες επικοινωνίες είναι αρκετά εδραιωμένες πλέον, ο αριθμός των σημάτων που μεταδίδονται στην ζώνη των ραδιοσυχνοτήτων αυξάνεται ολοένα, με αποτέλεσμα να προκαλείται συμφόρηση και κατά συνέπεια παρεμβολές. Οι παρεμβολές στις ασύρματες επικοινωνίες αναφέρονται στην παρουσία ανεπιθύμητων σημάτων ή θορύβου που μπορούν να διαταράξουν ή να υποβαθμίσουν την απόδοση των συστημάτων, να προσθέσουν θόρυβο ή και να μειώσουν την εμβέλεια του σήματος. Οι παρεμβολές μπορεί να οφείλονται σε εσωτερικούς παράγοντες και συνήθως είναι μη σκόπιμες, ή προκύπτουν από εξωτερικούς παράγοντες, όντας σκόπιμες και μη.

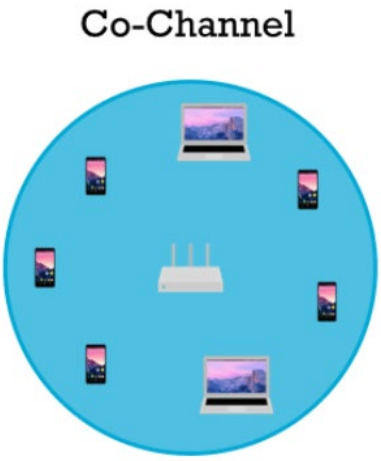
Ένα από τα είδη παρεμβολών οι οποίες οφείλονται σε εσωτερικούς παράγοντες είναι οι ομοδιαυλικές παρεμβολές. Η ομοδιαυλικές παρεμβολές είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας όταν πολλαπλά σήματα που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Σε εσωτερικούς παράγοντες οφείλονται επίσης και οι παρεμβολές γειτονικού καναλιού, οι οποίες μπορεί να συμβούν όταν δύο ή περισσότερες ασύρματες συσκευές εκπέμπουν σε συχνότητες οι οποίες βρίσκονται κοντά μεταξύ τους. Υπάρχουν ακόμη, οι αρμονικές παρεμβολές οι οποίες εμφανίζονται όταν η συχνότητα ενός παρεμβαλλόμενου σήματος είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας του επιθυμητού σήματος. Για παράδειγμα, εάν μια ασύρματη συσκευή εκπέμπει στα 2,4 GHz και μια κοντινή συσκευή εκπέμπει στα 4,8 GHz, η δεύτερη αρμονική του πρώτου σήματος μπορεί να προκαλέσει παρεμβολή στο δεύτερο σήμα. Οι αρμονικές παρεμβολές προκύπτουν από μη-γραμμικά στοιχεία ενός κυκλώματος, όπως για παράδειγμα από μείκτες.

Όσον αφορά τις παρεμβολές οι οποίες οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες, υπάρχουν οι παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων (RFI) οι οποίες προκαλούνται από την παρουσία ραδιοσημάτων που προέρχονται από άλλες πηγές και συστήματα ασύρματης επικοινωνίας. Ορισμένες παρεμβολές μπορεί επίσης να οφείλονται και σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως η βροχή, το χιόνι και η ομίχλη που μπορούν να προκαλέσουν αλλοιώσεις στα σήματα που βρίσκονται κυρίως στις υψηλότερες συχνότητες, όπως τα δορυφορικά. Ακόμη υπάρχουν οι παρεμβολές πολλαπλών διαδρομών οι οποίες οφείλονται στην ανάκλαση, την περίθλαση και την σκέδαση του μεταδιδόμενου σήματος, δημιουργώντας έτσι πολλαπλά αντίγραφα του μεταδιδόμενου σήματος τα οποία φτάνουν στον δέκτη σε διαφορετικούς χρόνους και με διαφορετικές φάσεις. Τέλος, οι παρεμβολές μπορεί να είναι κακόβουλες, όπως για παράδειγμα οι παρεμβολές jamming οι οποίες προκαλούνται με τη μετάδοση ενός ισχυρού σήματος στην ίδια συχνότητα με αυτή του επιθυμητού σήματος, το οποίο και παρεμποδίζει τη μετάδοση του αρχικού.

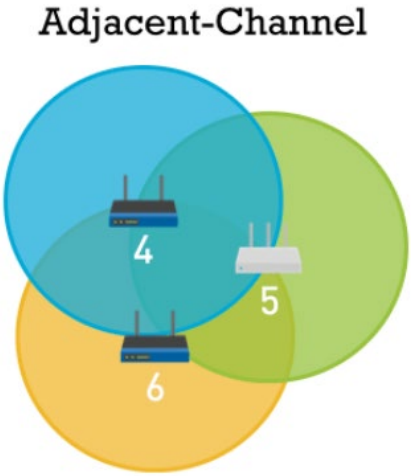
Για τον μετριασμό των παρεμβολών υπάρχουν διάφορες τεχνικές, όπως η μεταπήδηση συχνότητας ή η χρήση κατευθυντικών κεραιών οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν στην απομόνωση του επιθυμητού σήματος. Ακόμη μια τεχνολογία η οποία μπορεί να συμβάλει στον μετριασμό των παρεμβολών στην ασύρματη επικοινωνία, είναι η τεχνολογία SDR, παρέχοντας τη δυνατότητα φιλτραρίσματος των ανεπιθύμητων σημάτων και προσαρμογής διαφόρων παραμέτρων, όπως η συχνότητα, η διαμόρφωση και η ισχύς μετάδοσης, για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Τα SDRs μπορούν επίσης να επιτρέψουν στα γνωστικά ραδιοσυστήματα να κατανέμουν δυναμικά τις διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων για την αποφυγή παρεμβολών και τη βελτιστοποίηση της χρήσης του φάσματος. Συνεπώς, οι λύσεις Software

Defined Radio (SDR) πλεονεκτούν έναντι άλλων λύσεων επειδή επιτρέπουν μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα στην αντιμετώπιση των παρεμβολών.

Στα παρακάτω σχήματα περιγράφονται οι Ομοδιαυλικές Παρεμβολές και οι Παρεμβολές Γειτονικού Καναλιού. Στην πρώτη περίπτωση, κάθε χρήστης και κάθε σημείο πρόσβασης που βρίσκονται στο ίδιο κανάλι (και στην ίδια δηλαδή συχνότητα), ανταγωνίζονται για τον χρόνο που θα το χρησιμοποιήσουν. Στην δεύτερη περίπτωση, κάθε χρήστης και κάθε σημείο πρόσβασης σε γειτονικά αλλά μερικώς αλληλεπικαλυπτόμενα κανάλια «συνομιλούν» το ένα σε βάρος του άλλου.



Εικόνα 3. Ομοδιαυλική Παρεμβολή.



Εικόνα 4. Παρεμβολή Γειτονικού Καναλιού.

2.3 Τήρηση των Service Level Agreements – SLAs

Η συντομογραφία SLA σημαίνει Service Level Agreement (Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσιών), και είναι μια σύμβαση μεταξύ ενός παρόχου υπηρεσιών και ενός πελάτη που περιγράφει το επίπεδο της υπηρεσίας η οποία θα παρέχεται, συμπεριλαμβανομένης της ποιότητας, της διαθεσιμότητας και της απόδοσης της υπηρεσίας. Η σύμβαση καθορίζει επίσης τυχόν διορθωτικά μέτρα ή κυρώσεις σε περίπτωση που δεν τηρηθούν τα συμφωνηθέντα πρότυπα. Η χρήση συμφωνιών επιπέδου υπηρεσιών (SLA) καθώς και η τήρησή τους, είναι πολύ σημαντική καθώς μπορούν να βελτιώσουν την επικοινωνία μεταξύ πελατών και παρόχου, να κάνουν τη διαχείριση των προσδοκιών και των διαθέσιμων πόρων ευκολότερη, να καθορίζουν τους ρόλους και να μειώνουν πιθανές προκλήσεις.

Με την ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας καθίσταται δυνατός ο έλεγχος τήρησης των συμφωνιών SLA, εξετάζοντας τα φασματικά χαρακτηριστικά ενός σήματος ή συστήματος. Πραγματοποιώντας φασματική ανάλυση μπορούν να εξαχθούν σημαντικές μετρήσεις όπως η ισχύς του σήματος, ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR), το εύρος ζώνης και τα επίπεδα παρεμβολών. Συγκρίνοντας αυτές τις τιμές με τις καθορισμένες απαιτήσεις των SLA μπορεί να γίνει έλεγχος συμβατότητας. Ακόμη, η συνεχής παρακολούθηση του φάσματος μπορεί να

βοηθήσει στον εντοπισμό τυχόν ανωμαλιών ή αποκλίσεων από την αναμενόμενη συμπεριφορά. Αναλύοντας την φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD) με την πάροδο του χρόνου, μπορούν να εντοπιστούν διακυμάνσεις ή υπερβολικά επίπεδα θορύβου που ενδέχεται να υποδηλώνουν παραβίαση των SLA.

Συνεπώς η φασματική ανάλυση είναι μια καλή επιλογή για τον έλεγχο συμμόρφωσης με τις συμφωνίες SLA καθώς παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα των χαρακτηριστικών του σήματος, επιτρέποντας την αξιολόγηση της επίδοσης στο πεδίο της συχνότητας. Με αυτή την τεχνική οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να παρακολουθούν και να αντιμετωπίζουν προληπτικά πιθανά προβλήματα, να εντοπίζουν την υποβάθμιση της επίδοσης και να λαμβάνουν τα απαραίτητα διορθωτικά μέτρα για την τήρηση των SLA. Τέλος επιτρέπει την αξιολόγηση της ποιότητας του σήματος σε πραγματικό χρόνο ή περιοδικά, διασφαλίζοντας ότι η υπηρεσία που παρέχεται στους πελάτες πληροί τα συμφωνηθέντα πρότυπα.

3 *Ανάλυση Φάσματος και Αναλυτές Φάσματος*

3.1 Τι είναι η ανάλυση φάσματος

Η φασματική ανάλυση αναφέρεται στην διαδικασία ανάλυσης του συχνοτικού περιεχομένου ενός σήματος. Περιλαμβάνει την αναπαράσταση ενός σήματος στο πεδίο της συχνότητας με σκοπό την κατανόηση των συχνοτικών συνιστωσών, του εύρους ζώνης και της κατανομής ισχύος του, αλλά και την μελέτη της φασματικής πυκνότητας ισχύος (PSD). Υπάρχουν διάφορες τεχνικές φασματικής ανάλυσης, μεταξύ των οποίων είναι ο Μετασχηματισμός Fourier (FT), ο Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier (FFT), οι συστοιχίες φίλτρων, το περιοδόγραμμα και το φασματογράφημα. Οι τεχνικές αυτές χρησιμεύουν στην εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με το συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος , στον εντοπισμό κυρίαρχων συχνοτήτων και στην ανάλυση των χαρακτηριστικών των σημάτων.

3.1.1 Η έννοια του φάσματος

Προτού όμως εμβαθύνουμε στην έννοια της φασματικής ανάλυσης, θα εξετάσουμε την έννοια του φάσματος. Τα σήματα μπορούν να αναπαρασταθούν είτε στο πεδίο του χρόνου όπου ο Χ-άξονας αντιπροσωπεύει τον χρόνο και ο Υ-άξονας το πλάτος, είτε στο πεδίο της συχνότητας όπου ο Χ-άξονας αντιπροσωπεύει την συχνότητα και ο Υ-άξονας το μέτρο ή την ισχύ η οποία συνήθως (σε εμπορικές λύσεις) εκφράζεται λογαριθμικά σε decibels (dB). Παρόλο που το πεδίο του χρόνου και το πεδίο της συχνότητας είναι δύο εναλλακτικοί τρόποι για την αναπαράσταση των ίδιων σημάτων, συνήθως επιλέγουμε την αναπαράσταση στο πεδίο της συχνότητας, καθώς είναι ευκολότερο να εντοπίσουμε τις διάφορες βασικές συχνοτικές συνιστώσες, αλλά διευκολύνεται επίσης και ο εντοπισμός των σημάτων ακόμη και με την παρουσία σχετικά υψηλών επιπέδων θορύβου. Ο τρόπος για να μεταβούμε από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας, είναι με

τη χρήση του θεωρήματος Fourier, το οποίο ισχυρίζεται ότι κάθε ηλεκτρικό σήμα που περιγράφεται στο πεδίο του χρόνου, αποτελείται από ένα ή περισσότερα ημιτονοειδή σήματα κατάλληλης συχνότητας, πλάτους και φάσης.

Εξετάζοντας το φαινόμενο Gibbs, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι αν προστεθούν συγκεκριμένα ημιτονοειδή κύματα με διάφορους συνδυασμούς συχνότητας, φάσης και πλάτους, μπορεί να προσεγγιστεί ένας τετραγωνικός παλμός. Παρατηρούμε επίσης ότι παρόλο που και οι δύο όψεις αναπαριστούν το ίδιο σήμα, μπορούμε να εξετάζουμε μόνο το πεδίο του χρόνου ή μόνο το πεδίο της συχνότητας κάθε φορά, καθώς οι δύο άξονες είναι ορθογώνιοι, και για αυτό τον λόγο χρησιμοποιούμε τους μετασχηματισμούς. Συνεπώς μέσω της παρακάτω εικόνας γίνεται ξεκάθαρο ότι το φάσμα αναφέρεται στην κατανομή των συχνοτικών συνιστωσών ενός σήματος, δηλαδή στα ημίτονα (και συνημίτονα) από τα οποία αποτελείται το σήμα και τα οποία αν συνδυαστούν κατάλληλα παράγουν το σήμα στο πεδίο του χρόνου.

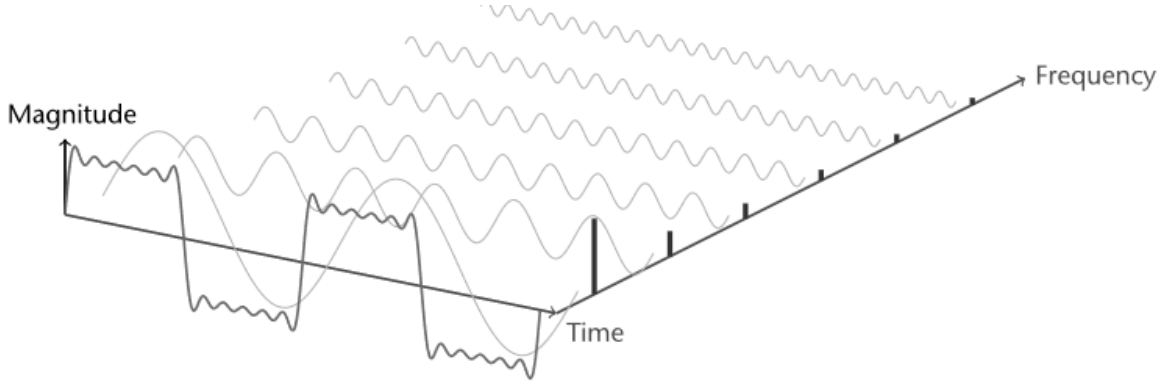


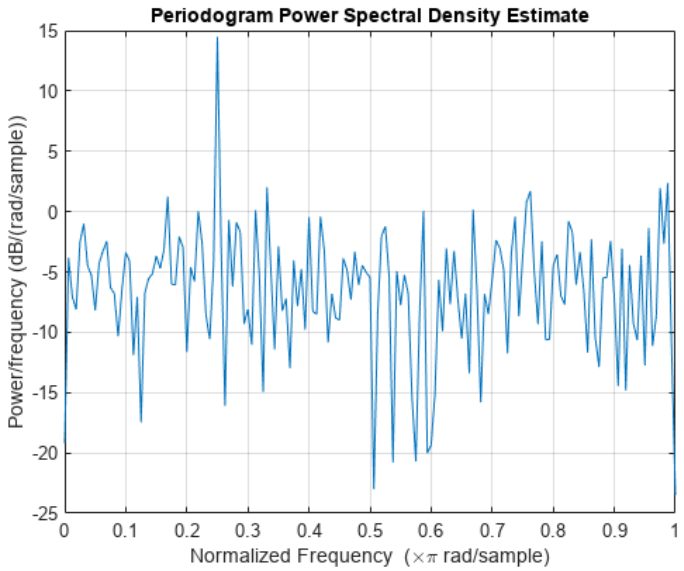
Figure Gibbs phenomenon, looking left, the time domain, looking right, the Fourier domain.

Εικόνα 5. Φαινόμενο Gibbs

3.1.2 Περιοδόγραμμα, μελέτη φασματικής πυκνότητας ισχύος PSD και συναρτήσεις παραθύρου

Το περιοδόγραμμα είναι ένα εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος και στην φασματική ανάλυση για την εκτίμηση της φασματικής πυκνότητας ισχύος – PSD. Η μέθοδος του περιοδογράμματος αναπτύχθηκε από τον Schuster το 1898 με αφορμή το πρόβλημα της ανίχνευσης ημιτονοειδών σημάτων στο θόρυβο. Το όνομα του προκύπτει, καθώς κάθε χρονοσειρά μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα ημίτονων και συνημίτονων με διαφορετικές περιόδους, οι οποίες αντιπροσωπεύουν συνολικά το χρόνο που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί ένας πλήρης κύκλος, και διαφορετικά πλάτη κατά τη διάρκεια του κύκλου. Αυτή η διαπίστωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξεταστεί η περιοδική συμπεριφορά των χρονοσειρών. Το περιοδόγραμμα σκοπεύει στον υπολογισμό της φασματικής πυκνότητας ισχύος (PSD – Power Spectral Density) ενός σήματος. Η φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD), είναι ένα μέγεθος το οποίο περιγράφει την κατανομή της ισχύος ή της ενέργειας ενός στοχαστικού σήματος

(όλα τα σήματα που φέρουν άγνωστη στον δέκτη πληροφορία είναι στοχαστικά) για διάφορες συχνότητες. Παρέχει πληροφορία για τη σχετική ισχύ του σήματος σε διαφορετικές συνιστώσες συχνότητας και έχει ως μονάδα μέτρησης το Watt/Hz ή το dBm/Hz. Τέλος, οι κορυφές στο περιοδόγραμμα υποδεικνύουν τις κυρίαρχες συχνότητες που παρίστανται στο σήμα, επιτρέποντας την ανάλυση του φάσματος και την αναγνώριση των συνιστωσών συχνότητας.



Εικόνα 6. Παράδειγμα από ένα περιοδόγραμμα

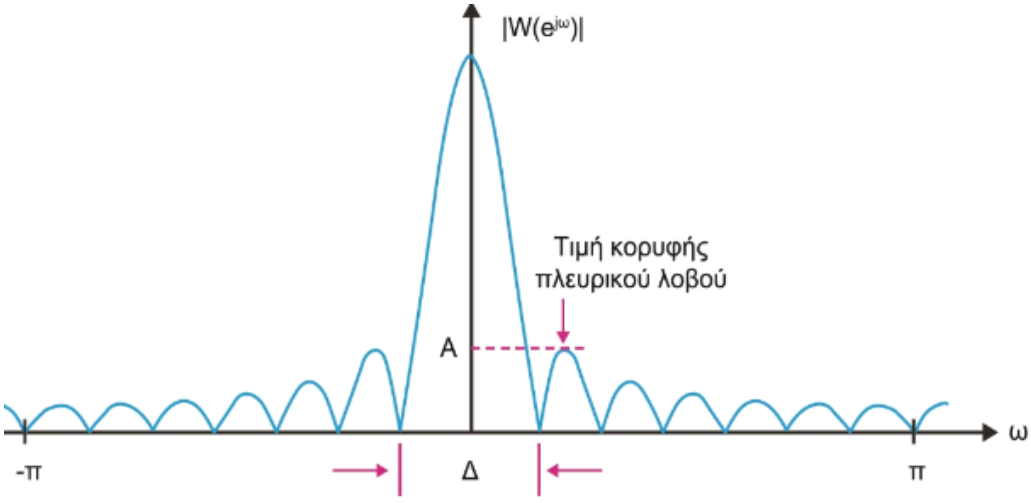
Το περιοδόγραμμα έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Αρχικά, είναι μια απλή και εύκολη μέθοδος υπολογισμού της φασματικής πυκνότητας ισχύος η οποία επιτρέπει την γρήγορη συχνοτική ανάλυση χωρίς να απαιτείται μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα ή περίπλοκοι αλγόριθμοι. Ακόμη η απλή αυτή υλοποίησή του αλλά και η εξάρτησή του από τον αλγόριθμο γρήγορου μετασχηματισμού Fourier, επιτρέπουν αποδοτικούς υπολογισμούς καθιστώντας το περιοδόγραμμα κατάλληλο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου ή περιορισμένων πόρων. Τέλος, το περιοδόγραμμα παρέχει οπτική αναπαράσταση του φασματικού περιεχομένου, επιτρέποντας τη διαισθητική απεικόνιση και ερμηνεία των συνιστωσών συχνότητας. Αυτή η οπτική αναπαράσταση βοηθά στον εντοπισμό κυρίαρχων συχνοτήτων, στην ανίχνευση αρμονικών και στη διερεύνηση των συνολικών συχνοτικών χαρακτηριστικών του σήματος.

Όμως, η τεχνική αυτή εισάγει επίσης περιορισμούς. Το περιοδόγραμμα είναι ευαίσθητο στο θόρυβο που συνυπάρχει με το σήμα, κάτι που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ακρίβεια εκτίμησης της φασματικής πυκνότητας ισχύος, οδηγώντας σε παραμορφώσεις, παραγωγή πλασματικών λοβών ή και απόκρυψη σημαντικών συνιστωσών. Διακυβεύεται επίσης και το ισοζύγιο μεταξύ ανάλυσης στη συχνότητα και διακύμανσης της εκτίμησης. Η ανάλυση σχετίζεται αντιστρόφως ανάλογα με το μήκος του αναλυόμενου σήματος. Τα σήματα μεγαλύτερου μήκους παρέχουν πιο λεπτομερή ανάλυση, ωστόσο η αύξηση του μήκους οδηγεί σε αυξημένη διακύμανση της εκτιμώμενης PSD, μειώνοντας την αξιοπιστία των εκτιμήσεων των επιμέρους συνιστωσών συχνότητας. Τέλος, είναι πιθανό να εμφανιστεί ένα φαινόμενο που ονομάζεται φασματική διαρροή, κατά το οποίο οι συνιστώσες συχνότητας ενός σήματος εξαπλώνονται σε γειτονικά bins συχνότητας, οδηγώντας σε παραμορφώσεις στην εκτιμώμενη PSD (το φαινόμενο

οφείλεται στην εφαρμογή ορθογωνικών παραθύρων για την απομόνωση χρονικού τμήματος ενός σήματος για φασματική ανάλυση).

Μια από τις τεχνικές οι οποίες έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων περιορισμών, είναι οι συναρτήσεις παραθύρου. Ακολουθείται μια διαδικασία γνωστή ως windowing, που αφορά την εφαρμογή συναρτήσεων παραθύρων στο σήμα εισόδου πριν από τον υπολογισμό του περιοδογράμματος, και πριν από τον μετασχηματισμό Fourier. Με την χρήση ενός παραθύρου το οποίο συμβολίζεται ως w[n], και είναι μια μαθηματική συνάρτηση, μπορούμε να περιορίσουμε μια απόκριση απείρου (ή πολύ μεγάλου) μήκους h[n], με αποτέλεσμα μια νέα ακολουθία που εκφράζεται ως $h_w[n]=w[n]*h[n]$. Ιδανικό χαρακτηρίζεται το παράθυρο το οποίο εξασφαλίζει όσο πιο στενό εύρος στον κύριο λοβό και όσο πιο περιορισμένο πλάτος πλευρικών λοβών. Το πλάτος κορυφής του πλευρικού λοβού καθορίζει την κυμάτωση στην απόκριση συχνότητας, ενώ το εύρος του κύριου λοβού καθορίζει το εύρος της ζώνης μετάβασης στην απόκριση συχνότητας, δηλαδή την επιλεκτικότητα του φίλτρου. Η επιλεκτικότητα του φίλτρου αναφέρεται στην ικανότητά του να επιτρέπει τη διέλευση ή την εξασθένιση ορισμένων συχνοτήτων, να ξεχωρίζει δηλαδή ποιες συχνότητες είναι επιθυμητές και ποιες ανεπιθύμητες. Όσο πιο επιλεκτικό είναι ένα φίλτρο, τόσο πιο αποτελεσματικά πραγματοποιεί αυτή την διαδικασία.

Η χρήση των συναρτήσεων παραθύρου διευκολύνει τον μετριασμό της φασματικής διαρροής και την βελτίωση της ανάλυσης της συχνότητας. Η φασματική διαρροή εμφανίζεται όταν οι συνιστώσες συχνότητας ενός σήματος εξαπλώνονται σε γειτονικές θέσεις, οδηγώντας σε παραμόρφωση και μειωμένη ακρίβεια στην εκτίμηση της φασματικής πυκνότητας ισχύος. Οι συναρτήσεις παραθύρου μικραίνουν σταδιακά το σήμα προς τα άκρα του, μειώνοντας τις απότομες ασυνέχειες που μπορεί να προκαλέσουν φασματική διαρροή. Αυτό το φαινόμενο κωνικότητας μειώνει αποτελεσματικά τους πλευρικούς λοβούς των συνιστωσών συχνότητας, συγκεντρώνοντας την ενέργεια του σήματος στον κύριο λοβό κάθε συνιστώσας. Ωστόσο είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η συναρτήσεις αυτές εισάγουν περιορισμό αλλάκαι κάποια παραμόρφωση. Εάν ο κύριος λοβός διευρυνθεί, η συνολική ισχύς που μετράται σε κάθε bin μειώνεται. Αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά την επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης ανάλογα με τις απαιτήσεις ανάλυσης.



Εικόνα 7. DTFT μιας τυπικής συνάρτησης παραθύρου

3.2 Αναλυτές Φάσματος

Οι αναλυτές φάσματος, είναι εξειδικευμένα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση φάσματος, συνήθως με γραφική απεικόνιση του φάσματος ενός σήματος. Μπορούν να υλοποιηθούν είτε με αναλογικά κυκλώματα είτε ψηφιακά, πλέον όμως συχνά προτιμάται η ψηφιακή υλοποίηση. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν τη δοκιμή και την πιστοποίηση της ανάθεσης/απόδοσης ραδιοσυχνοτήτων RF. Καθώς τα σήματα σε διαφορετικές συχνότητες μπορούν να παρατηρηθούν, καθίσταται δυνατή η ανακάλυψη και εμφάνιση των ανεπιθύμητων σημάτων καθώς και του φάσματος των σύγχρονων σύνθετων, πολυφεροντικών κυματομορφών, ώστε να διερευνηθεί κατά πόσον αυτές εμπίπτουν στα προβλεπόμενα όρια (ισχύος και εύρους ζώνης) σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Η κύρια χρήση τους είναι η μέτρηση της ισχύος του φάσματος γνωστών και άγνωστων σημάτων.

Αξίζει να σημειωθεί πως ένας αναλυτής φάσματος δεν είναι αναλυτής ισχύος, παρόλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απευθείας απεικόνισή της συνάρτησης ισχύος ανά συχνότητα. Θεωρώντας ότι γνωρίζουμε κάποια παράμετρο ενός ημιτόνου, όπως τη μέγιστη ή τη ενεργό τιμή, και γνωρίζουμε επίσης την αντίσταση στην οποία μετράμε αυτή την τιμή, μπορούμε να βαθμονομήσουμε το βολτόμετρο μας (ή τον μετατροπέα αναλογικό-σε-ψηφιακό για ψηφιακά συστήματα) ώστε να απεικονίζει την λαμβανόμενη ισχύ. Ο λόγος για τον οποίο πολλές φορές προτιμάται η απεικόνιση της ισχύος είναι απλός. Δεδομένου ότι ένα σήμα το οποίο αποτελείται από μια άπειρη ακολουθία παλμών έχει άπειρη ενέργεια, θα πρέπει να περιγραφεί σύμφωνα με την ισχύ του, η οποία θα είναι πεπερασμένη, δεδομένου ότι κάθε παλμός έχει πεπερασμένη ενέργεια εφόσον οι παλμοί μεταδίδονται σε διακριτά διαστήματα.

3.3 Τα είδη των αναλυτών φάσματος

Οι αναλυτές φάσματος χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Τους αναλυτές σάρωσης, και τους αναλυτές πραγματικού χρόνου. Ενώ οι πρώτοι αναλυτές φάσματος χρησιμοποιούσαν σάρωση και μετρούσαν μόνο το πλάτος, πλέον η μέτρηση της φάσης κρίνεται εξίσου σημαντική. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας το πλάτος αλλά και η φάση μπορούν να παραμείνουν αναλλοίωτα μετά την ψηφιοποίηση ενός σήματος, και επιπλέον οι νεότεροι αναλυτές φάσματος, χρησιμοποιούν ψηφιακή επεξεργασία σήματος για να παρέχουν πρόσθετες δυνατότητες μέτρησης και ευκολότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Τόσο οι αναλυτές σάρωσης, όσο και οι αναλυτές πραγματικού χρόνου, παράγουν ένα διάγραμμα όπου ο άξονας X απεικονίζει τη συχνότητα σε Hz και ο άξονας Y απεικονίζει το πλάτος είτε σε Volt (ή ισχύ σε W/mW) είτε όπως προτιμάται συνήθως σε dBV (ή αντίστοιχα σε dBW/dBm) σύμφωνα με τη λογαριθμική κλίμακα.

Ωστόσο, ο τρόπος με τον οποίο επεξεργάζονται και εμφανίζουν αυτές τις πληροφορίες ποικίλει ανάλογα με τον συγκεκριμένο τύπο αναλυτή. Ένας αναλυτής φάσματος πραγματικού χρόνου εμφανίζει την ενέργεια σε όλες τις συχνοτικές συνιστώσες ταυτόχρονα. Απεναντίας, ένας αναλυτής φάσματος με σάρωση εμφανίζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων διαδοχικά - ήτοι όχι σε "πραγματικό χρόνο". Οι πρώτοι συνήθως προτιμούνται για εφαρμογές χαμηλών συχνοτήτων

και εύρους ζώνης, ενώ οι δεύτεροι προτιμούνται για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων και μεγάλου εύρους. Οι αναλυτές φάσματος με σάρωση, οι οποίοι προέρχονται από τους συντονίσιμου (tunable) ράδιο-δέκτες, είναι είτε αναλυτές συντονισμένων φίλτρων, είτε υπερετερόδυνοι superheterodyne αναλυτές. Όσον αφορά τους αναλυτές πραγματικού χρόνου μπορεί να είναι αναλυτές με παράλληλα φίλτρα, αναλυτές βασισμένοι στον FFT, αλλά και αναλυτές με διανυσματική ανάλυση σήματος (Vector Signal Analyzer – VSA, που δίνουν IQ δείγματα και μπορούν να κάνουν και αποδιαμόρφωση).

3.3.1 Swept-Tune Αναλυτές

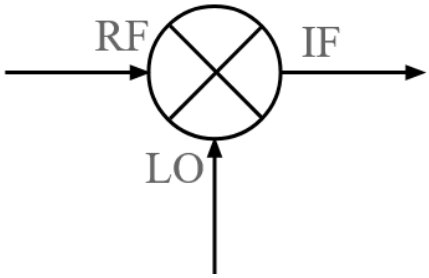
3.3.1.1 Superheterodyne Spectrum Analyzer

Το πρώτο συνθετικό της λέξης superheterodyne αναφέρεται στις υπερηχητικές συχνότητες, πιο συγκεκριμένα, στις συχνότητες οι οποίες ξεπερνούν τα όρια των ακουστικών συχνοτήτων. Το δεύτερο συνθετικό της λέξης αναφέρεται στην heterodyne αρχιτεκτονική, η οποία είναι ένας τύπος αρχιτεκτονικής δέκτη που χρησιμοποιεί έναν τοπικό ταλαντωτή – local oscillator (LO) και έναν μείκτη για να συνδυάσει το σήμα εισόδου με το σήμα ελαφρώς διαφορετικής συχνότητας που προκύπτει από τον τοπικό ταλαντωτή. Οι αρχιτεκτονικές heterodyne και superheterodyne συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται αμφότερες σε ραδιο-δέκτες και σχετίζονται με τη μίξη και τη μετατροπή της συχνότητας. Και στις δύο αρχιτεκτονικές, οι μίκτες αποτελούν βασικό στοιχείο, ωστόσο η κύρια διαφορά τους έγκειται στον αριθμό σταδίων μετατροπής συχνότητας και στην προσέγγιση της επεξεργασίας σήματος. Η superheterodyne αρχιτεκτονική ενσωματώνει πολλαπλά στάδια μετατροπής συχνότητας. Το εισερχόμενο RF σήμα αναμιγνύεται αρχικά με ένα σήμα LO για να μετατραπεί προς τα κάτω σε μια ενδιάμεση συχνότητα IF. Ύστερα, το σήμα που προκύπτει φιλτράρεται και ενισχύεται σε αυτό το σταθερό στάδιο ενδιάμεσης συχνότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότεροι αναλυτές φάσματος χρησιμοποιούν περίπου από δύο έως τέσσερα στάδια για να φτάσουν την επιθυμητή ενδιάμεση συχνότητα.

Προτού αναλύσουμε περαιτέρω τη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική είναι σημαντικό να εξετάσουμε κάποια κρίσιμα στοιχεία όπως είναι οι μίκτες και οι τοπικοί ταλαντωτές. Ένας RF μίκτης είναι μια ενεργή ή παθητική συσκευή τριών θυρών. Η έξοδός του είναι ικανή να αποδώσει συχνοτικά το άθροισμα ή τη διαφορά των τιμών εισόδου. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι μίκτες είναι μη γραμμικές συσκευές, με αποτέλεσμα η έξοδός τους να μην περιέχει μόνο τα δύο σήματα εισόδου, αλλά και τις αρμονικές τους συχνότητες καθώς και τα αθροίσματα και τις διαφορές αυτών. Οι αρμονικές αναφέρονται στα ακέραια πολλαπλάσια της αρχικής συχνότητας οι οποίες εκδηλώνονται στα πραγματικά σήματα. Σκοπός του συγκεκριμένου στοιχείου είναι να αλλάξει τη συχνότητα ενός ηλεκτρομαγνητικού σήματος, διατηρώντας παράλληλα όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του αρχικού σήματος (βασικής ζώνης), όπως την φάση και το πλάτος του. Ένας από τους λόγους για τους οποίους είναι επιθυμητή η αλλαγή της συχνότητας είναι για να επιτραπεί η ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος σε κάποια συχνότητα διαφορετική από την RF, και συγκεκριμένα σε μια σταθερή ενδιάμεση συχνότητα (Intermediate Frequency-IF). Αυτή η τακτική απλοποιεί το σχεδιασμό του δέκτη καθώς επιτρέπει τη χρήση πανομοιότυπων φίλτρων

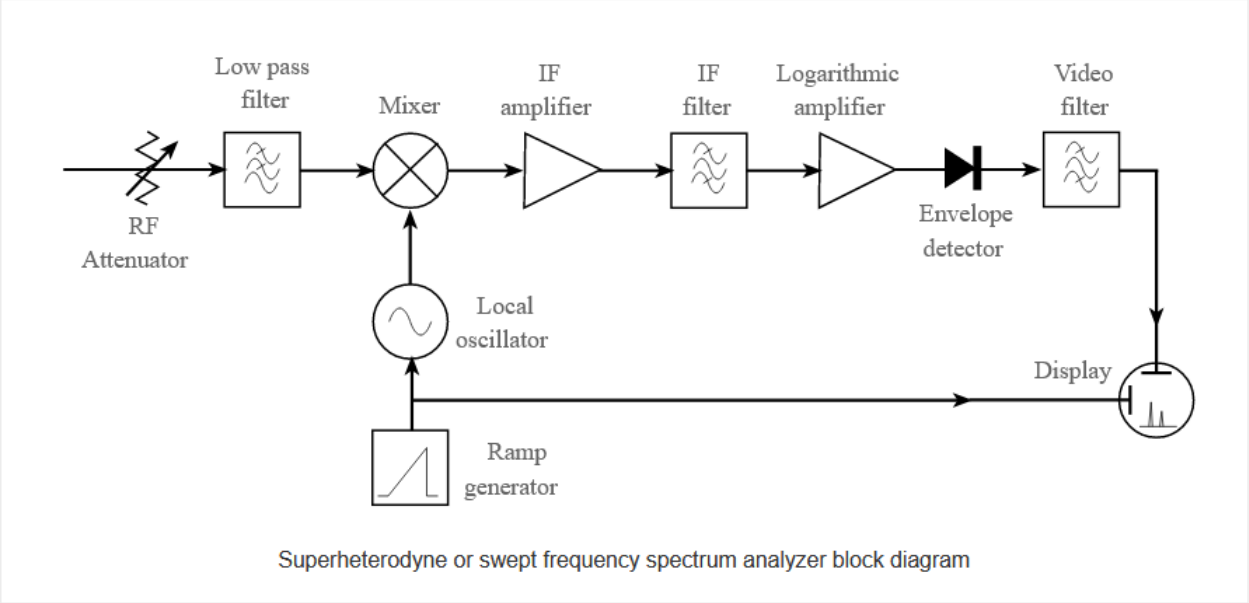
και ενισχυτών για λαμβανόμενα σήματα ανεξάρτητα από την αρχική τους συχνότητα. Κατά συνέπεια, ο δέκτης μπορεί να βελτιστοποιηθεί για την ενδιάμεση συχνότητα, οδηγώντας σε βελτιωμένη απόδοση και μειωμένη πολυπλοκότητα.

Όσον αφορά τον τοπικό ταλαντωτή, αυτό το βασικό στοιχείο παράγει το σήμα που οδηγεί τον μίκτη και διευκολύνει τη διαδικασία μετατροπής συχνότητας. Ο τοπικός ταλαντωτής μπορεί να οδηγείται από ένα συνεχές ημιτονοειδές σήμα ή έναν τετραγωνικό παλμό. Το σήμα του τοπικού ταλαντωτή εισέρχεται στον μίκτη, οποίος βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση όταν το σήμα του τοπικού ταλαντωτή παρουσιάζει υψηλή τάση και ανενεργός όταν η τάση είναι χαμηλή. Αυτή η αλληλεπίδραση μεταξύ του τοπικού ταλαντωτή και του μίκτη διευκολύνει τη διαδικασία ανάμειξης, επιτρέποντας να πραγματοποιηθεί η επιθυμητή μετατροπή συχνότητας.



Εικόνα 8. Μίκτης κατά τη λήψη

Εν συνεχεία, ας εξετάσουμε εκτενέστερα την αρχιτεκτονική superheterodyne, η οποία αποτελεί μια διαδεδομένη προσέγγιση στους σύγχρονους ράδιο-δέκτες. Η αρχιτεκτονική αυτή αξιοποιεί τις αρχές των μικτών και των τοπικών ταλαντωτών για να επιτύχει εξαιρετικές επιδόσεις και ευελιξία στη μετατροπή συχνότητας. Αποτελείται από διάφορα βασικά στάδια, όπως η κεραία, ο ενισχυτής RF, ο μίκτης, το φίλτρο ενδιάμεσης συχνότητας και ο αποδιαμορφωτής. Το πρώτο μέρος του αναλυτή είναι ο εξασθενητής εισόδου RF. Σκοπός του είναι να διασφαλίσει ότι το σήμα εισέρχεται στο μίκτη στη βέλτιστη στάθμη, ώστε να αποφευχθεί η υπερφόρτωση, η συμπίεση κέρδους και η παραμόρφωση. Το χαμηλοπερατό φίλτρο εμποδίζει τα σήματα υψηλής συχνότητας να φτάσουν στον μίκτη, έτσι ώστε να μην υπάρχει ανάμειξη σημάτων εκτός ζώνης. Το σήμα τροφοδοτείται στη συνέχεια στο μίκτη, μαζί με το σήμα του τοπικού ταλαντωτή. Ο μίκτης εκτελεί τη μετατροπή συχνότητας δημιουργώντας το άθροισμα και τη διαφορά συχνοτήτων, μετατοπίζοντας ουσιαστικά το σήμα RF στην ενδιάμεση συχνότητα (IF). Κατόπιν του σταδίου του μίκτη, το σήμα διέρχεται από ένα φίλτρο ενδιάμεσης συχνότητας, το οποίο επιτρέπει επιλεκτικά τη διέλευση του επιθυμητού σήματος IF, ενώ εξασθενεί άλλες ανεπιθύμητες συχνότητες. Αυτό το στάδιο φιλτραρίσματος βοηθά στην περαιτέρω μείωση του θορύβου και βελτιώνει τη συνολική ποιότητα του σήματος. Τέλος, ο αποδιαμορφωτής εξάγει τις αρχικές πληροφορίες βασικής ζώνης από το φιλτραρισμένο σήμα IF, επιτρέποντας την περαιτέρω επεξεργασία ή χρήση των λαμβανόμενων δεδομένων.



Εικόνα 9. Block διάγραμμα ενός superheteroyne αναλυτή

3.3.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Πίνακας 1. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των superheterodyne αναλυτών

Πλεονεκτήματα	**Μειονεκτήματα**
• **Μεγάλο εύρος ζώνης λειτουργίας το οποίο μπορεί να εκτείνεται σε αρκετά GHz**	• Δεν μπορούν να μετρήσουν τη φάση του σήματος
• **Δυνατότητα λειτουργίας σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων**	• Δεν μπορούν να μετρήσουν μεταβατικά γεγονότα

3.3.2 Αναλυτές Φάσματος Πραγματικού Χρόνου

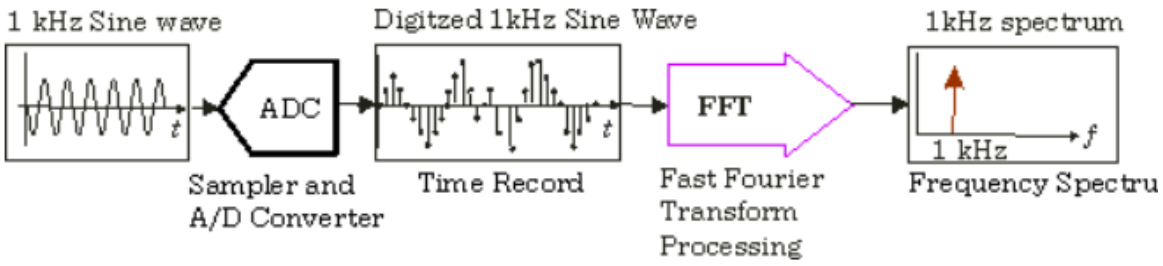
3.3.2.1 Ο FFT αναλυτής

Οι αναλυτές φάσματος FFT είναι ιδιαίτερα χρήσιμα εργαλεία σε διάφορους τομείς λόγω των αξιοσημείωτων δυνατοτήτων επεξεργασίας σήματος που διαθέτουν, οι οποίες τους επιτρέπουν την εξαγωγή ολοκληρωμένων πληροφοριών από τα σήματα εισόδου, που υπερβαίνουν τον απλό προσδιορισμό του πλάτους των επιμέρους συνιστωσών συχνότητας. Έχουν την δυνατότητα μέτρησης τόσο του πλάτους (magnitude) όσο και της φάσης των σημάτων, επιτρέποντας την ομαλή μετάβαση μεταξύ των πεδίων του χρόνου και της συχνότητας. Ο αλγόριθμος FFT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση ενός αναλυτή φάσματος, με την ψηφιοποίηση του σήματος εισόδου με έναν μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC) και την εφαρμογή του αλγορίθμου FFT σε αυτό στο πεδίο του χρόνου έτσι ώστε να ληφθεί η αναπαράσταση στο πεδίο

της συχνότητας. Αυτό επιτρέπει την ενδελεχή ανάλυση του σήματος εισόδου και διευκολύνει την εξαγωγή πολύτιμων πληροφοριών.

Για την ψηφιακή καταγραφή μιας κυματομορφής, είναι απαραίτητη η λήψη μιας ακολουθίας διαδοχικών διακριτών τιμών σε τακτά χρονικά διαστήματα. Για αυτό τον λόγο εφαρμόζεται ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT). Η χρήση διακριτών δειγμάτων στον DFT έχει άμεσο αντίκτυπο στο πεδίο της συχνότητας, προκαλώντας κατάτμησή του σε διακριτές συνιστώσες συχνότητας, που συχνά ονομάζονται “bins”. Ο αριθμός των bins συχνότητας σε ένα δεδομένο εύρος συχνοτήτων αντιπροσωπεύει την ανάλυση στο πεδίο συχνότητας, με την υψηλότερη ανάλυση να απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό bins και κατά συνέπεια μεγαλύτερη ποσότητα δειγμάτων στο πεδίο του χρόνου. Αυτό συνεπάγεται σημαντικά αυξημένο υπολογιστικό φόρτο. Για τη μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων χρησιμοποιείται ο Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier (FFT), ένας γρήγορος και αποτελεσματικός αλγόριθμος που μπορεί να υλοποιήσει τον DFT. Ο αλγόριθμος FFT εκμεταλλεύεται την περιοδικότητα των ημιτονοειδών και καταφέρνει να αποκτήσει σημαντικό πλεονέκτημα όσον αφορά την ταχύτητα σε σχέση με τον DFT, διατηρώντας παράλληλα τα ίδια αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, αν ο αριθμός των δειγμάτων είναι ίσος με N, η πολυπλοκότητα αν γίνει χρήσει του DFT θα είναι ίση με N^2, ενώ αν γίνει χρήση του FFT η πολυπλοκότητα θα γίνει $N\log_2 N$, δηλαδή θα μειωθεί σημαντικά.

Όταν ένας αναλυτής FFT δειγματοληπτεί σήματα με αρκετά υψηλό ρυθμό, αξιολογεί διεξοδικά όλα τα δεδομένα εισόδου, διευκολύνοντας τις μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Λειτουργώντας σε πραγματικό χρόνο οι αναλυτές FFT είναι σε θέση να εκτελούν μετρήσεις που κατά κανόνα πραγματοποιούνται με τη χρήση αναλυτών παράλληλων φίλτρων, ενώ προσφέρουν σημαντικά βελτιωμένη ανάλυση συχνότητας. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και ο κατάλληλος ρυθμός με τον οποίον γίνεται η δειγματοληψία, έτσι ώστε να μην υπάρχουν αλλοιώσεις στο σήμα. Σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist, εφόσον ο ρυθμός δειγματοληψίας υπερβαίνει το διπλάσιο της μέγιστης συνιστώσας συχνότητας του σήματος, τα δεδομένα δειγματοληψίας θα αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια το αρχικό σήμα εισόδου.



Εικόνα 10. Παράδειγμα ανάλυσης FFT 1 kHz - Ψηφιοποίηση ενός σήματος στο πεδίο του χρόνου και χρήση της ανάλυσης FFT για τη μετατροπή του στο πεδίο της συχνότητας.

Οι αναλυτές FFT έχουν πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Ορισμένα από τα πλεονεκτήματά τους είναι καταρχήν, ότι παρέχουν αναπαράσταση υψηλής ανάλυσης του πεδίου συχνοτήτων, επιτρέποντας την ακριβή αναγνώριση και τον χαρακτηρισμό μεμονωμένων συνιστωσών συχνότητας σε ένα δεδομένο σήμα εισόδου. Κατά δεύτερον, επιτρέπουν την αποτελεσματική και γρήγορη επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων, γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους για εφαρμογές ανάλυσης και παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Και τρίτον, επιτρέπουν την καταγραφή μεταβατικών ή χρονικά μεταβαλλόμενων σημάτων, συμβάλλοντας στον προσδιορισμό του δυναμικού συχνοτικού περιεχομένου. Παρά τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα που πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψιν. Οι αναλυτές φάσματος FFT ενδέχεται να παρουσιάζουν περιορισμούς όσον αφορά το εύρος συχνοτήτων, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την ικανότητά τους να καταγράφουν και να αναλύουν με ακρίβεια σήματα με εξαιρετικά υψηλές ή χαμηλές συχνότητες ή σήματα με σημαντικές διακυμάνσεις στο πλάτος. Ο κύριος περιοριστικός παράγοντας είναι η ταχύτητα του μετατροπέα ADC που χρησιμοποιείται για την δειγματοληψία του σήματος εισόδου. Επιπλέον, η διακριτή φύση των υπολογισμών FFT ενδέχεται να επηρεάσει την ακρίβεια των υπολογισμών. Γενικώς, ενώ οι αναλυτές φάσματος FFT προσφέρουν ισχυρές δυνατότητες ανάλυσης σήματος, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί τους και οι πιθανές πηγές σφαλμάτων προκειμένου να ερμηνεύονται με ακρίβεια τα αποτελέσματα. Παλαιότερα, το κύριο μειονέκτημα των αναλυτών FFT ήταν το περιορισμένο εύρος συχνοτήτων τους, με τους περισσότερους να μην μπορούν να πραγματοποιήσουν μετρήσεις πέραν των 100kHz. Ο κύριος περιοριστικός παράγοντας ήταν η ταχύτητα του μετατροπέα ADC ο οποίος χρησιμοποιείται για την δειγματοληψία του σήματος εισόδου. Επομένως για κάποιο διάστημα οι αναλυτές σάρωσης επικράτησαν για μετρήσεις RF και μικροκυμάτων. Ένα ακόμη μειονέκτημα των εν λόγω αναλυτών είναι η εξαιρετικά μεγάλη υπολογιστική ισχύς την οποία απαιτούν για να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί.

3.3.2.2 Vector Signal Analysis - VSA

Οι αναλυτές φάσματος μετρούν το μέγεθος μιας εισόδου σε σχέση με τη συχνότητα του σήματος, ενώ οι διανυσματικοί αναλυτές σήματος μετρούν το μέγεθος και τη φάση ενός σήματος εισόδου σε μια μόνο συχνότητα. Η ανάλυση σημάτων που φέρουν ψηφιακή διαμόρφωση απαιτεί διανυσματικές μετρήσεις που παρέχουν πληροφορίες τόσο για το μέγεθος όσο και για τη φάση. Συγκεκριμένα οι VSA έχουν σχεδιαστεί για την ανάλυση σύνθετων σημάτων με σχήματα διαμόρφωσης όπως QAM (Quadrature Amplitude Modulation), PSK (Phase Shift Keying) και FSK (Frequency Shift Keying). Ένας VSA ψηφιοποιεί όλη την ισχύ RF εντός της ζώνης διέλευσης και αποθηκεύει την ψηφιοποιημένη κυματομορφή στη μνήμη. Η κυματομορφή στη μνήμη περιέχει πληροφορίες τόσο για το μέγεθος όσο και για τη φάση, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την ψηφιακή επεξεργασία σήματος (DSP) για αποδιαμόρφωση, μετρήσεις ή επεξεργασία απεικόνισης. Ενώ ο VSA έχει προσθέσει τη δυνατότητα αποθήκευσης κυματομορφών στη μνήμη, είναι περιορισμένη η ικανότητά του να αναλύει μεταβατικά

συμβάντα, καθώς η σειριακή φύση της επεξεργασίας σε streams σημαίνει ότι το όργανο είναι ουσιαστικά αδύνατο να αντιληφθεί γεγονότα που συμβαίνουν μεταξύ των λήψεων. Άλλοι περιορισμοί του VSA περιλαμβάνουν προκλήσεις στην απομόνωση ασθενών σημάτων παρουσίας ισχυρότερων σημάτων και σημάτων που αλλάζουν σε συχνότητα αλλά όχι σε πλάτος.

4 *Ανίχνευση Φάσματος*

Η ανίχνευση φάσματος είναι μια σημαντική τεχνική για ττον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και της δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα (DSA), η οποία ανιχνεύει το περιβάλλον RF και επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση του φάσματος συχνοτήτων RF. Ουσιαστικά αποτελεί μια ποιοτική και ποσοτική ανάλυση του εξεταζόμενου εύρους ζώνης, η οποία επιτυγχάνεται συλλέγοντας πληροφορίες και δεδομένα σχετικά με σήματα στις διάφορες συχνότητες και την κατηγοριοποίηση τους. Η ανίχνευση φάσματος είναι πολύ σημαντική, καθώς η ζήτηση για ασύρματες επικοινωνίες και συνεπώς οι ανάγκες των καταναλωτών ολοένα και αυξάνονται. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να είναι δυνατός ο εντοπισμός των ανεκμετάλλευτων συχνοτήτων, έτσι ώστε να μπορέσουν να αναπτυχθούν νέες υπηρεσίες. Τα γνωστικά ραδιοσυστήματα (cognitive radio) σε συνδυασμό με την φασματική ανίχνευση παρέχουν μια αξιόπιστη φασματική εικόνα η οποία διευκολύνει την ανίχνευση των αδειοδοτημένων ή αλλιώς πρωτευόντων χρηστών, εάν υπάρχουν, και τον προσδιορισμό του φάσματος το οποίο δεν χρησιμοποιείται. Με αυτό τον τρόπο καθίσταται δυνατή οι αξιοποίηση συχνοτήτων οι οποίες εμπίπτουν στο ανεκμετάλλευτο αδειοδοτημένο φάσμα των πρωτευόντων συστημάτων, το οποίο θα μπορούσε να ανατεθεί σε δευτερεύοντα συστήματα. Συνεπώς στόχος της ανίχνευσης φάσματος είναι ο περιορισμός παρεμβολών στους πρωτεύοντες χρήστες, ο εντοπισμός και η εκμετάλλευση "κενών" στο διαθέσιμο φάσμα, αλλά και η αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Στην ανίχνευση σήματος, δύο κοινές προσεγγίσεις είναι η ανίχνευση ενέργειας και η ανίχνευση ενέργειας Neyman-Pearson, και οι οποίες θα αναλυθούν στην συνέχεια. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της παρουσίας ή της απουσίας σήματος σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον.

Ωστόσο, το πεδίο της ανίχνευσης φάσματος δεν στερείται προκλήσεων. Ένα από τα κύρια εμπόδια προκύπτει από την επίδραση του θορύβου, των παρεμβολών και των συνθηκών εξασθένισης που προκαλούν σκίαση στα ευαίσθητα σήματα ενδιαφέροντος. Η ακριβής ανίχνευση καθίσταται δύσκολη όταν επισκιάζεται από τις συγκεκριμένες δυσμενείς συνθήκες. Επιπλέον, τα διάφορα πρότυπα επικοινωνίας και σχημάτων διαμόρφωσης περιπλέκουν περαιτέρω την ανίχνευση φάσματος και επιβάλλουν πιο περίπλοκες στρατηγικές ανίχνευσης. Επομένως, οι στόχοι της ανίχνευσης φάσματος εκτείνονται πέρα από την απλή ανίχνευση φάσματος και περιλαμβάνουν τη σχεδίαση τεχνικών ικανών να εντοπίζουν αξιόπιστα τα σήματα εν μέσω θορύβου και παρεμβολών. Παρόλα αυτά οι βέλτιστες τεχνικές έχουν μη ρεαλιστικές απαιτήσεις

όπως η γνώση πληροφορίας εκ των προτέρων. Για το λόγο αυτό εφαρμόζονται τεχνικές οι οποίες δεν απαιτούν πολλές γνώσεις για τη δομή ή περιεχόμενο των σημάτων, υστερούν όμως σε απόδοση.

4.1 Ανίχνευση Ενέργειας

Στο επίκεντρο της ανίχνευσης φάσματος βρίσκεται η τεχνική της ανίχνευσης ενέργειας, μια τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση της παρουσίας σημάτων εντός μιας λήψης που περιλαμβάνει θόρυβο. Συγκεκριμένα η ανίχνευση ενέργειας είναι μια ασυνεχής μέθοδος εντοπισμού του πρωτεύοντος σήματος, βασισμένη στον στατιστικό έλεγχο υποθέσεων, η οποία εξετάζει διεξοδικά το ενεργειακό περιεχόμενο του σήματος αναζητώντας αποκλίσεις που υποδηλώνουν την πιθανή ύπαρξη μεταδιδόμενου σήματος. Λόγω της απλότητας και της μη απαιτούμενης προηγούμενης γνώσης των PU – Primary User σημάτων, η ανίχνευση ενέργειας είναι μια εκ των δημοφιλέστερων τεχνικών ανίχνευσης τόσο στην τοπική όσο και στη συνεργατική ανίχνευση. Επειδή όπως προαναφέρθηκε ο δέκτης δεν έχει γνώση των χαρακτηριστικών ή της κυματομορφής του σήματος, λαμβάνει αποφάσεις με βάση τις στατιστικές ιδιότητες της λαμβανόμενης ισχύος αντί να προσπαθεί να εξάγει και να αναλύσει τη συγκεκριμένη κυματομορφή. Οι στατιστικές παράμετροι που συνήθως λαμβάνονται υπόψιν είναι η ενέργεια ή η εκτίμηση μέσης ισχύς του λαμβανόμενου σήματος, οι οποίες συγκρίνονται με ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπεται ο εντοπισμός ασθενών ή διακοπτόμενων σημάτων σε ασύρματα περιβάλλοντα.

Τα δεδομένα που λαμβάνει ένας δέκτης, είναι μια συλλογή τυχαίων δειγμάτων της μορφής $X = [x_1, x_2, \ldots, x_N]$ τα οποία θα μπορούσε να είναι σήμα αλλά και θόρυβος. Πιο συγκεκριμένα για να διαχωριστούν αυτές οι δύο έννοιες, γίνονται δύο υποθέσεις, η μηδενική (H_0) και η εναλλακτική (H_1). Κατά την πρώτη H_0, δεν υπάρχει σήμα (δηλαδή υπάρχει μόνο θόρυβος και το κανάλι δε θεωρείται κατειλημμένο), ενώ κατά τη δεύτερη υπόθεση H_1, υπάρχει σήμα. Για τον προσδιορισμό της υπόθεσης που ισχύει, η ενέργεια του σήματος αναλύεται για χρόνο T , σε εύρος ζώνης W. Το λαμβανόμενο σήμα υψώνεται στο τετράγωνο και ολοκληρώνεται στο διάστημα παρατήρησης. Αν το αποτέλεσμα αυτών των πράξεων είναι μικρότερο από την τιμή ενός κατωφλίου το οποίο έχει αποφασιστεί, ισχύει η υπόθεση H_0, ενώ αν είναι μεγαλύτερο του κατωφλίου ισχύει η απόφαση H_1.

Η απόφαση σχετικά με το ποια υπόθεση ισχύει για κάθε περίπτωση περιγράφεται από την παρακάτω σχέση :

$$H = \begin{cases} H_0, & \alpha\nu \quad \sum_{n=1}^{N} | y[n] |^2 \le \lambda \\ H_1, & \alpha\lambda\lambda\iota\acute{\omega}\varsigma \end{cases}$$

, όπου λ η τιμή του κατωφλίου.

Και ισχύει επίσης ότι :

$$\mathcal{H}_0 : x[0] = w[0]$$
$$\mathcal{H}_1 : x[0] = s[0] + w[0]$$

, όπου s[0]=1 και w[0]~N[0,1].

Η επίδοση ενός ανιχνευτή φάσματος αξιολογείται από την πιθανότητα ορθής ανίχνευσης (Probability of detection – PD) και την πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού (Probability of false alarm – PFA), και οι οποίες εφαρμόζονται σε διάφορους τύπους συστημάτων ανίχνευσης. Η πιθανότητα ορθής ανίχνευσης αντιπροσωπεύει το ενδεχόμενο ο ανιχνευτής να επιλέξει την υπόθεση H1, δηλαδή ότι υπάρχει σήμα, ενώ πράγματι υπάρχει σήμα. Αντιθέτως, η πιθανότητα εσφαλμένης ανίχνευσης αντιπροσωπεύει το ενδεχόμενο ο ανιχνευτής να επιλέξει την υπόθεση H1, ενώ στην πραγματικότητα δεν υπάρχει σήμα αλλά θόρυβος. Σημαντική είναι και η πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης (Probability of missed detection - PMD) η οποία αντιπροσωπεύει την πιθανότητα το σύστημα να μην αναγνωρίσει το σήμα ενδιαφέροντος, και να το χαρακτηρίσει ως θόρυβο. Πρακτικά με τον υπολογισμό αυτών τον πιθανοτήτων, ποσοτικοποιείται η ικανότητα του συστήματος να ανιχνεύει σωστά το σήμα ενδιαφέροντος, με παράλληλη ελαχιστοποίηση των χαμένων ανιχνεύσεων. Ιδανικά θα πρέπει η πιθανότητα ορθής ανίχνευσης να είναι ίση με ένα ή γεινικά κατά πολύ μεγαλύτερη από την πιθανότητα εσφαλμένης ανίχνευσης, κάτι το οποίο σημαίνει ότι ο ανιχνευτής είναι αξιόπιστος και ότι το φάσμα αξιοποιείται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο εκμεταλλευόμενο τις συχνότητες που υποχρησιμοποιούνται. Στο πλαίσιο των ανιχνευτών ενέργειας, οι οποίοι χρησιμοποιούνται συνήθως σε ραντάρ και συστήματα επικοινωνιών, η πιθανότητα ανίχνευσης σχετίζεται με το επίπεδο κατωφλίου που χρησιμοποιείται για να ληφθεί η απόφαση παρουσίας ή απουσίας του σήματος. Η ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος συγκρίνεται με ένα προκαθορισμένο κατώφλι και με βάση αυτή τη σύγκριση λαμβάνεται απόφαση σχετικά με το εάν το σήμα ανιχνεύεται. Σημαντική είναι και η πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης (Probability of missed detection - PMD) η οποία αντιπροσωπεύει την πιθανότητα το σύστημα να μην αναγνωρίσει το σήμα ενδιαφέροντος, και να το χαρακτηρίσει ως θόρυβο.

Συνοψίζοντας, η ανίχνευση ενέργειας αποτελεί θεμελιώδη τεχνική της επεξεργασίας σήματος και της θεωρίας της ανίχνευσης, καθώς είναι χρήσιμο εργαλείο σε τομείς όπως τα ραντάρ, οι ασύρματες επικοινωνίες και η ανίχνευση φάσματος. Με την συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να ανιχνευθεί οποιοσδήποτε τύπος σήματος, χωρίς να υπάρχει γνώση σχετικά με το σήμα το οποίο πρόκειται να ανιχνευθεί. Παρόλα αυτά η ισχύς, αλλά και τα χαρακτηριστικά του θορύβου θα πρέπει να είναι γνωστά για να επιλεγεί μια αποτελεσματική τιμή κατωφλίου, καθώς μια από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι ενεργειακοί ανιχνευτές είναι ότι ο σηματοθορυβικός λόγος δε θα πρέπει να είναι κατάλληλο σε σχέση με το κατώφλι το οποίο έχει επιλεγεί. Ύστερα, μέσω της σύγκρισης της ενέργειας του λαμβανόμενου σήματος με το προκαθορισμένο κατώφλι, οι ανιχνευτές ενέργειας δύνανται να εντοπίσουν την παρουσία σημάτων εν μέσω θορύβου και παρεμβολών. Κατά τον σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού συστήματος ανίχνευσης, είναι σημαντικό να γίνει η κατάλληλη εξισορρόπηση μεταξύ της ελαχιστοποίησης των ψευδών συναγερμών και των χαμένων ανιχνεύσεων. Τέλος, κάποια από τα

πλεονεκτήματα της ανίχνευσης φάσματος με βάση την ανίχνευση ενέργειας είναι η απλότητα, το χαμηλό υπολογιστικό και υλοποιητικό κόστος, αλλά και η ικανότητα λειτουργίας ανεξαρτήτως από το πραγματικό σήμα.

4.2 Θεώρημα Neyman-Pearson

Το θεώρημα Neyman-Pearson αποτελεί ένα θεμελιώδες πόρισμα στον στατιστικό έλεγχο υποθέσεων (hypothesis testing), το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία στον τομέα της ανίχνευσης φάσματος, και συγκεκριμένα στο πλαίσιο της ανίχνευσης ενέργειας. Καθώς τα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας γίνονται διαρκώς πιο περίπλοκα και δυναμικά, η ανάγκη ακριβούς εντοπισμού σημάτων παρουσία θορύβου και παρεμβολών καθίσταται υψίστης σημασίας. Το θεώρημα Neyman-Pearson παρέχει τη βέλτιστη διαδικασία διάκρισης μεταξύ δύο υποθέσεων ελέγχοντας παράλληλα τις πιθανότητες ψευδούς ανίχνευσης και πραγματικής ανίχνευσης και επιτυγχάνοντας τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ τους. Συνηθίζεται να χρησιμοποιείται σε προβλήματα δυαδικού ελέγχου υποθέσεων (binary hypothesis testing) όπου στόχος είναι η λήψη μιας απόφασης μεταξύ δύο ανταγωνιστικών υποθέσεων, με βάση τα παρατηρούμενα δεδομένα.

Κεντρικό ρόλο στη θεωρία Neyman-Pearson κατέχει τόσο η διάκριση υποθέσεων όσο και η ορθολογική χρήση κατανομών πιθανοτήτων. Συγκεκριμένα, εξετάζεται μια τυχαία μεταβλητή της οποίας η συχνότητα πυκνότητας πιθανότητας (PDF) ακολουθεί γκαουσιανή κατανομή $N(\mu,\sigma^2)$ όπου μ είναι η μέση τιμή και σ^2 η διακύμανση της κατανομής. Η διακύμανση μπορεί να είναι ίση με 1 και η μέση τιμή μπορεί να είναι είτε ίση με 0 είτε ίση με 1, δηλαδή η κατανομή μπορεί να είναι είτε N(0,1) είτε N(1,1). Επομένως κάθε πιθανή τιμή της μέσης τιμής μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μια υπόθεση και κατά συνέπεια να προκύψει το πρόβλημα της επιλογής μεταξύ δύο ανταγωνιστικών υποθέσεων.

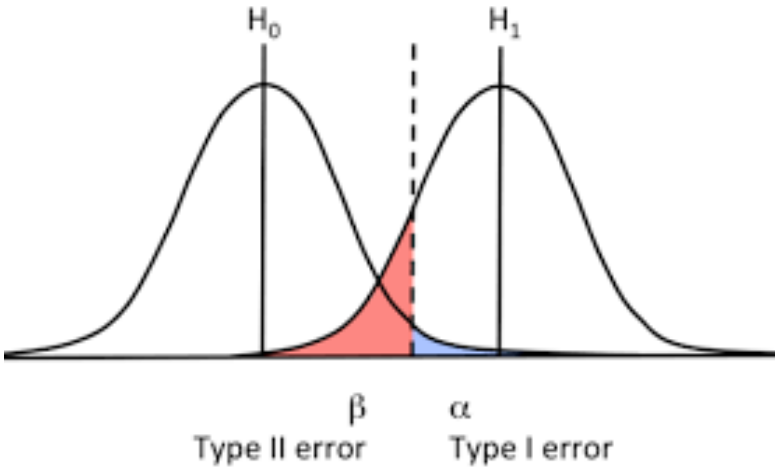
H_0 : μ=0 → Μηδενική Υπόθεση

H_1 : μ=1 → Εναλλακτική Υπόθεση

Ένας Neyman-Pearson (NP) Ανιχνευτής καλείται να αποφασίσει μεταξύ των H_0 και H_1, με βάση ένα σύνολο παρατηρούμενων δεδομένων {x[0], x[1], … , x[N-1]}, τα οποία στην δική μας περίπτωση αποτελούν την έξοδο ενός εκ των καναλιού του δέκτη. Τα δείγματα αυτά συγκρίνονται με ένα κατώφλι το οποίο επιλέγεται με βάση την επιθυμητή τιμής της πιθανότητας ψευδούς ανίχνευσης την οποία επιλέγει ο σχεδιαστής του συστήματος. Αν το δείγμα είναι μικρότερο από το κατώφλι, τότε θα ισχύει η υπόθεση H_0, ενώ αν το δείγμα είναι μεγαλύτερο από το κατώφλι, τότε θα ισχύει η υπόθεση H_1. Η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί και μια αντιστοίχιση κάθε πιθανής τιμής του συνόλου αυτού, σε μια απόφαση.

Σύμφωνα με αυτό το σενάριο, είναι δυνατή η πραγματοποίηση δύο σφαλμάτων κατά την επιλογή των υποθέσεων. Σε περίπτωση που επιλεγεί η υπόθεση H_1 ενώ αληθεύει η υπόθεση H_0 το

σφάλμα ονομάζεται σφάλμα Τύπου I, ενώ σε περίπτωση που επιλεγεί η υπόθεση H_0 ενώ αληθεύει η υπόθεση H_1 το σφάλμα ονομάζεται σφάλμα Τύπου II. Οι μηχανικοί συνηθίζεται να αποκαλούν την επιλογή της απόφασης H_1 ενώ αληθεύει το H_0 "false alarm". Επομένως η πιθανότητα $P(H_1;H_0)$ ισούται με την πιθανότητα ψευδούς ανίχνευσης, P_{FA}. Αντίστοιχα το σφάλμα Τύπου II, συχνά αποκαλείται πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης - P_{MD}. Ανάλογα με εκάστοτε σενάριο το οποίο εξετάζεται, ο σχεδιαστής του συστήματος επιλέγει την αντίστοιχη τιμή για την πιθανότητα ψευδούς ανίχνευσης, συνηθίζεται όμως η επιλογή σχετικά μικρής τιμής. Η αποφυγή των σφαλμάτων που προαναφέρθηκαν είναι αδύνατη, ωστόσο μπορεί να υπάρξει κάποια αντιστάθμιση μεταξύ τους. Η ταυτόχρονη μείωση των πιθανοτήτων τους επίσης δεν είναι εφικτή, καθώς η πιθανότητα του σφάλματος Τύπου I ($P(H_0;H_1)$) μειώνεται με κόστος αύξησης της πιθανότητας του σφάλματος Τύπου II ($P(H_1;H_0)$). Μια τυπική προσέγγιση στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι ο περιορισμός της πιθανότητας $P(H_1;H_0)$ σε μια καθορισμένη σταθερά έστω α. Συμπερασματικά, θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα ορθής ανίχνευσης $P_D = P(H_1;H_1)$, με τον περιορισμό $P_{FA}=P(H_1;H_0)=\alpha$.



Εικόνα 11. Type I error and Type II error

Συγκεκριμένα, το Θεώρημα Neyman-Pearson :

Για την μεγιστοποίηση της P_D για ένα δοθέν $P_{FA}=\alpha$, θα πρέπει να επιλεγεί η υπόθεση H_1, εάν :

$$L(\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x};\mathcal{H}_1)}{p(\mathbf{x};\mathcal{H}_0)} > \gamma$$

όπου γ είναι το κατώφλι και υπολογίζεται από τον τύπο :

$$P_{FA} = \int_{\{\mathbf{x}:L(\mathbf{x})>\gamma\}} p(\mathbf{x};\mathcal{H}_0)d\mathbf{x} = \alpha.$$

Η συνάρτηση L(x) ονομάζεται likelihood ratio ή λόγος πιθανοφάνειας, και δείχνει την πιθανότητα του H_1 έναντι του H_0 για κάθε τιμή του x.

4.3 Συνεργατική και Τοπική Ανίχνευση Φάσματος

Μια προσέγγιση στην ανίχνευση φάσματος είναι συνεργατική ανίχνευση (cooperative sensing). Η συνεργατική ανίχνευση είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται κυρίως στα Cognitive Radio CR δίκτυα. Αξιοποιεί τη συλλογική νοημοσύνη πολλαπλών ραδιοσυστημάτων με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας της ανίχνευσης φάσματος. Κάθε γνωστικό ραδιοσύατημα εκτελεί τοπική ανίχνευση φάσματος αναλύοντας το λαμβανόμενο σήμα στη δική του εμβέλεια. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτή την ανίχνευση παρέχουν μια αρχική εικόνα της απασχόλησης φάσματος εντός της εμβέλειας του κάθε συστήματος. Στη συνέχεια, οι συσκευές μοιράζονται μεταξύ τους τα αποτελέσματα για να βελτιωθεί η ανίχνευση. Η κοινή χρήση πληροφοριών μπορεί να επιτευχθεί μέσω άμεσης επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών ή μέσω ενός κεντρικού συστήματος το οποίο συλλέγει και αναλύει τα δεδομένα από πολλές συσκευές.

Μια δεύτερη προσέγγιση στην ανίχνευση φάσματος, και αυτή που θα ακολουθήσουμε στην παρούσα εργασία, είναι η τοπική ανίχνευση (local sensing), που βασίζεται σε συστοιχίες φίλτρων ή αλλιώς "τράπεζες" φίλτρων. Οι συστοιχίες φίλτρων χρησιμοποιούνται για την αποσύνθεση του λαμβανόμενου σήματος σε πολλαπλές υποζώνες ή κανάλια συχνότητας. Στη συνέχεια, κάθε κανάλι αναλύεται ανεξάρτητα για τον προσδιορισμό της παρουσίας ή της απουσίας πρωτευόντων χρηστών. Αυτή η προσέγγιση τοπικής ανίχνευσης προσφέρει πλεονεκτήματα όπως η χαμηλότερη πολυπλοκότητα, η μειωμένη επιβάρυνση επικοινωνίας και η ικανότητα προσαρμογής σε διάφορα χαρακτηριστικά σήματος και σενάρια παρεμβολής.

Πίνακας 2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της συνεργατικής και της τοπικής ανίχνευσης

Μέθοδος Ανίχνευσης	**Πλεονεκτήματα**	**Μειονεκτήματα**
Συνεργατική	• Αυξημένη ακρίβεια ανίχνευσης • Αυξημένη κάλυψη • Μειωμένος χρόνος ανίχνευσης	• Αύξηση Πολυπλοκότητας • Εξάρτηση από άλλα συστήματα

Τοπική	• Ανεξαρτησία • Υπολογιστική Απλότητα • Ασφάλεια	• Περιορισμένες πληροφορίες • Αυξημένα false alarms

5 SDR και USRP

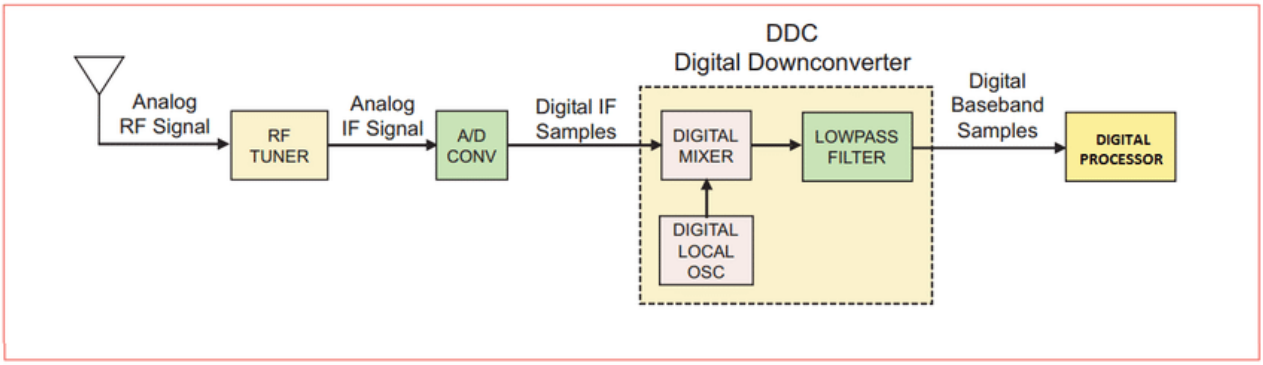
5.1 Software Defined Radio – SDR

Η ιστορία του Software Defined Radio μπορεί να αναχθεί στη δεκαετία του 1970, όταν έγιναν διαθέσιμα τα πρώτα τσιπ ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP). Αυτά τα τσιπ επέτρεψαν την υλοποίηση ορισμένων από τις λειτουργίες επεξεργασίας σήματος σε λογισμικό, μειώνοντας την πολυπλοκότητα και το κόστος του υλικού. Ωστόσο, η έννοια του SDR αναπτύχθηκε πλήρως από τον J.Mitola μόλις τη δεκαετία του 1990, όπου ορίστηκε ο πρώτος πομποδέκτης αποκλειστικά βασισμένος σε λογισμικό, και υπήρξε μια απλουστευμένη υλοποίηση χάρη στην πρόοδο της επεξεργαστικής ισχύος των υπολογιστών και τη διαθεσιμότητα εξαρτημάτων υλικού χαμηλού κόστους. Τα πρώτα συστήματα SDR χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για στρατιωτικές εφαρμογές, όπως η ασφαλής επικοινωνία, το ραντάρ και ο ηλεκτρονικός πόλεμος. Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, η τεχνολογία SDR άρχισε να χρησιμοποιείται σε μη στρατιωτικές εφαρμογές, όπως η ασύρματη επικοινωνία και το broadcasting, ενώ σήμερα βρίσκει εφαρμογή σε ακόμη περισσότερους τομείς.

Το Software Defined Radio (SDR) είναι ένας τύπος συστήματος ραδιοεπικοινωνίας όπου τα παραδοσιακά στοιχεία του υλικού-hardware, όπως οι μίκτες, τα φίλτρα, οι ενισχυτές, οι διαμορφωτές και οι αποδιαμορφωτές αλλά και οι λειτουργίες όπως η δειγματοληψία και η συχνότητα αυτής, αντικαθίστανται από μονάδες λογισμικού-software. Η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με τον συνδυασμό ενός υπολογιστή γενικής χρήσης ή μιας εξειδικευμένης πλατφόρμας υλικού και ενός RF hardware υλικού, όπως για παράδειγμα ενός USRP ή ενός RTL-SDR. Η προσέγγιση αυτή δημιουργεί μια ασύρματη ζεύξη η οποία παρέχει υψηλό επίπεδο επαναχρησιμοποίησης, επιτρέπονται στο ίδιο υλικό να υποστηρίζει πολλαπλά πρωτόκολλα και ζώνες συχνοτήτων. Τα SDR χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως για παράδειγμα σε δορυφορικές επικοινωνίες, κυψελωτά δίκτυα, στρατιωτικά συστήματα επικοινωνιών ή ακόμη και σε ερασιτεχνικά ραδιο-συστήματα.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται ένας δέκτης λογισμικού SDR. Ξεκινώντας από τα αριστερά προς τα δεξιά υπάρχει η κεραία, και ύστερα ο συντονιστής ραδιοσυχνότητας - RF ο

οποίος μετατρέπει τα αναλογικά RF σήματα τα οποία λαμβάνει η κεραία, σε αναλογική ενδιάμεση - IF συχνότητα. Ο μετατροπέας από αναλογικό σε ψηφιακό, γνωστός και ως ADC, ψηφιοποιεί το σήμα IF, δηλαδή μετατρέπει το συνεχές στο πεδίο του χρόνου σήμα, σε διακριτά δυαδικά κωδικοποιημένα σήματα. Τα δείγματα αυτά τροφοδοτούνται στο επόμενο στάδιο που είναι ο ψηφιακός μετατροπέας υποβιβασμού – DDC (Digital Downconverter). Ο DDC μεταφράζει τα ψηφιακά IF δείγματα σε σήματα βασικής ζώνης, φιλτράροντας και περιορίζοντας το εύρος ζώνης του σήματος. Τα δείγματα βασικής ζώνης τροφοδοτούνται με τη σειρά τους στον ψηφιακό επεξεργαστή, ο οποίος εκτελεί επεξεργασίες όπως η αποδιαμόρφωση και η αποκωδικοποίηση. Το μεγαλύτερο μέρος της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος εκτελείται από λογισμικό.

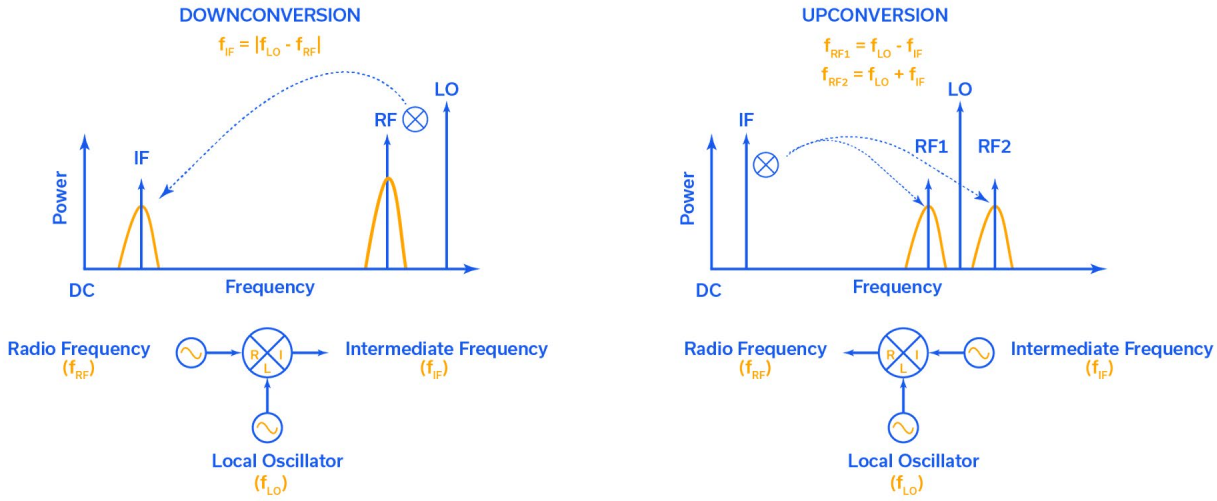


Εικόνα 12. Block diagram ενός SDR δέκτη

5.1.1 RF Front End

Συγκεκριμένα, σε έναν δέκτη SDR το αρχικό στάδιο του δέκτη ονομάζεται RF Front End και είναι υπεύθυνο για τον χειρισμό των εισερχόμενων σημάτων RF πριν αυτά μετατραπούν σε ψηφιακή μορφή. Πρωταρχικός σκοπός του είναι να επιλέγει την επιθυμητή ζώνη συχνοτήτων, να φιλτράρει τα ανεπιθύμητα σήματα και τις παρεμβολές και να ενισχύει το εισερχόμενο σήμα σε κατάλληλο επίπεδο για περαιτέρω επεξεργασία. Το RF Front End έχει ως πρώτο βήμα τη λήψη σημάτων από την κεραία, τα οποία μπορεί να μεταφέρουν διάφορους τύπους πληροφοριών όπως φωνή, δεδομένα, εικόνες με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Με τη σειρά του ο RF Tuner προετοιμάζει το σήμα για περαιτέρω επεξεργασία. Επιτρέπει στον δέκτη να συντονιστεί σε μια συγκεκριμένη συχνότητα ή σε ένα εύρος συχνοτήτων, παρέχοντας την δυνατότητα επιλογής του επιθυμητού σήματος μέσα σένα ευρύ φάσμα διαθέσιμων ραδιοσυχνοτήτων. Ο συντονιστής μπορεί να μετατρέψει προς τα πάνω (upconvert) ή προς τα κάτω (downconvert) το λαμβανόμενο RF σήμα σε μια ενδιάμεση συχνότητα IF η οποία είναι καταλληλότερη για την επεξεργασία. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ρυθμιζόμενων εξαρτημάτων, όπως οι μείκτες και οι τοπικοί ταλαντωτές (local oscillators). Με την πρόσμιξη του εισερχόμενου σήματος RF με ένα σήμα τοπικού ταλαντωτή, είναι δυνατή η μείωση ή η αύξηση της συχνότητας σε μια πιο διαχειρίσιμη ενδιάμεση συχνότητα. Αφού τα σήματα έχουν επεξεργαστεί και μετασχηματιστεί από τον

συντονιστή, διαβιβάζονται στον μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC) για να ψηφιοποιηθούν.



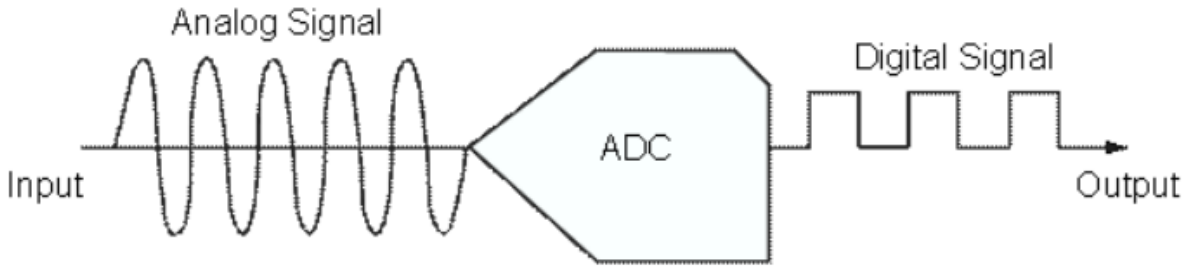
Εικόνα 13. Downconvertion και Upconvertion

5.1.2 Analog to Digital Converter - ADC

Τα σήματα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, αναλογικά και τα ψηφιακά σήματα. Τα αναλογικά σήματα είναι τα σήματα του πραγματικού κόσμου, όπως για παράδειγμα τα ηχητικά κύματα που δημιουργούνται από τις αλλαγές στην πίεση του αέρα, η θερμοκρασία ή η μεταβαλλόμενη τάση σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Τα ψηφιακά σήματα από την άλλη, είναι διακριτές και κβαντισμένες αναπαραστάσεις της πληροφορίας. Αποτελούνται από διακριτές τιμές ή επίπεδα, και συνήθως ακολουθούν το δυαδικό σύστημα, δηλαδή αναπαρίστανται από 0 και 1, τιμές που αντιπροσωπεύουν δύο πιθανές καταστάσεις. Ο επεξεργαστής από αναλογικό σε ψηφιακό – ADC μετατρέπει τα αναλογικά σήματα σε ψηφιακά. Για να γίνει αυτή η μετατροπή, τα ψηφιακά σήματα κβαντίζουν τα συνεχή αναλογικά , που σημαίνει ότι ένα εύρος αναλογικών τιμών αντιστοιχίζεται σε συγκεκριμένες ψηφιακές τιμές. Η μετατροπή αυτή προτιμάται λόγω της μεγαλύτερης ανθεκτικότητας των ψηφιακών σημάτων σε περιβάλλοντα θορύβου και παρεμβολών, αλλά και της μεγαλύτερης ευκολίας που παρουσιάζουν στην επεξεργασία τους από ψηφιακές συσκευές και υπολογιστές.

Το πρώτο βήμα στη λειτουργία ενός ADC είναι η δειγματοληψία του αναλογικού σήματος. Το αναλογικό σήμα, το οποία είναι συνεχές, δειγματοληπτείται σε τακτά χρονικά διαστήματα και τα διακριτά δείγματα αντιπροσωπεύουν το πλάτος του αναλογικού σήματος σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Μετά τη δειγματοληψία κάθε αναλογικό δείγμα κβαντίζεται, δηλαδή του αποδίδεται μια διακριτή ψηφιακή τιμή. Η διαδικασία αυτή είναι ουσιαστικά η αντιστοίχιση του πλάτους κάθε δείγματος στην πλησιέστερη ψηφιακή τιμή εντός ενός

προκαθορισμένου εύρους. Ο αριθμός των πιθανών ψηφιακών τιμών καθορίζεται από το βάθος bit του ADC, το οποίο συνήθως εκφράζεται ως N bit, όπου N ο αριθμός δυαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση κάθε δείγματος. Ο αριθμός των bit στην ψηφιακή έξοδο καθορίζει την ανάλυση του ADC. Για παράδειγμα ένας ADC 8 bit μπορεί να αναπαραστήσει το αναλογικό σήμα χρησιμοποιώντας $2^8 = 256$ διακριτές τιμές, χωρίζοντας το αναλογικό σήμα σε 256 επίπεδα σε κάθε ένα από τα οποία ανατίθεται ένας μοναδικός δυαδικός κωδικός. Επομένως, όσα περισσότερα τα bits του μετατροπέα, τόσο πιο ακριβής είναι και η αναπαράσταση του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.



Εικόνα 14. Μετατροπέας από Αναλογικό σε Ψηφιακό

5.1.3 Ψηφιακό Front End

Το Digital Front End – DFE σε ένα USRP είναι ένα κρίσιμο τμήμα το οποίο είναι υπεύθυνο για την ψηφιακή επεξεργασία των εισερχόμενων και εξερχόμενων σημάτων RF. Το ψηφιακό Front End ξεκινά με την ψηφιοποίηση του αναλογικού RF σήματος το οποίο λαμβάνεται από το RF Front End, και το ψηφιοποιεί με τη βοήθεια του μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό ADC. Η ανάλυση και ο ρυθμός δειγματοληψίας του μετατροπέα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα και την ακρίβεια του σήματος. Μετά την ψηφιοποίηση είναι δυνατή η εφαρμογή διάφορων βημάτων επεξεργασίας για την βελτίωση της ποιότητας του σήματος, όπως το φιλτράρισμα με σκοπό την απομάκρυνση θορύβου ή παρεμβολών, προσαρμογές του κέρδους με σκοπό τη βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου και ενδεχομένως υποδειγματοληψία ώστε να μειωθεί ο ρυθμός των δεδομένων. Τα πιο συνηθισμένα βήματα επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται σε αυτό το τμήμα, είναι το φιλτράρισμα και ο αποδεκατισμός, που αποσκοπούν στην επιλογή και την εξαγωγή του τμήματος του φάσματος που αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος, από το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων.

5.1.4 Ψηφιακοί Επεξεργαστές Σήματος

Οι ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος (DSP) κατέχουν καθοριστικό ρόλο στα Universal Software Radio Peripherals (USRP), παρέχοντας την υπολογιστική ισχύ που απαιτείται για εργασίες ψηφιακής επεξεργασίας σήματος σε πραγματικό χρόνο. Αυτοί οι επεξεργαστές βρίσκονται στην καρδιά του Digital Front End (DFE) του USRP, όπου εκτελούν μια ποικιλία αλγορίθμων ασύρματης επεξεργασίας μέσω λογισμικού, συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης, της αποδιαμόρφωσης, του φιλτραρίσματος και της διανομής καναλιών. Οι DSP επιτρέπουν την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα των USRP, επιτρέποντας στους χρήστες να προσαρμόζουν και να αναδιαμορφώνουν τα ραδιοσυστήματά τους για διαφορετικές εφαρμογές. Με τις υψηλές δυνατότητες επεξεργασίας τους, οι DSP διασφαλίζουν ότι τα USRP μπορούν να χειριστούν αποτελεσματικά τις απαιτήσεις των σύγχρονων ασύρματων επικοινωνιών, της ανάλυσης φάσματος και άλλων εργασιών επεξεργασίας σήματος.

5.2 Πλεονεκτήματα του SDR

- **Ευελιξία και Προσαρμοστικότητα :**

  Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των SDR είναι η ευελιξία τους. Τα παραδοσιακά ραδιοσυστήματα χρησιμοποιούν ειδικά στοιχεία υλικού, για κάθε πρωτόκολλο και ζώνη συχνοτήτων, τα οποία μπορεί να είναι δαπανηρά και πολύπλοκα στην συντήρηση. Χάρη στα SDR, το ίδιο υλικό μπορεί να επαναπρογραμματιστεί για να υποστηρίζει διαφορετικά πρωτόκολλα και ζώνες, μειώνοντας το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος. Επιπλέον, τα SDR μπορούν εύκολα να ενημερώνονται και να αναβαθμίζονται και συνεπώς να υποστηρίζουν νέα πρωτόκολλα ή λειτουργίες, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής του συστήματος.

- **Αυξημένη απόδοση φάσματος:**

  Το SDR επιτρέπει προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος και προσαρμοστικά σχήματα διαμόρφωσης, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της αποδοτικότητας του φάσματος. Με τη δυναμική προσαρμογή της διαμόρφωσης, της κωδικοποίησης και των επιπέδων ισχύος, τα συστήματα SDR μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη χρήση των διαθέσιμων πόρων φάσματος, επιτρέποντας την προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου.

- **Οικονομική απόδοση:**

  Το SDR προσφέρει πλεονεκτήματα κόστους, μειώνοντας την ανάγκη για εξειδικευμένα εξαρτήματα υλικού. Με το SDR, μια ενιαία πλατφόρμα υλικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλαπλές ασύρματες εφαρμογές, καταργώντας την ανάγκη ειδικευμένου υλικού για

κάθε εφαρμογή. Αυτή η επεκτασιμότητα και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένο κόστος εξοπλισμού και ανάπτυξης.

- **Κοινή χρήση και ταυτόχρονη χρήση του φάσματος:**

  Το SDR επιτρέπει τον αποτελεσματικότερο διαμοιρασμό του φάσματος μεταξύ διαφορετικών χρηστών και υπηρεσιών, προωθώντας τη συνύπαρξη και ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές. Αυτό επιτρέπει τη βελτιωμένη αξιοποίηση των περιορισμένων πόρων του φάσματος, υποστηρίζοντας την ανάπτυξη των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας και προωθώντας την καινοτομία.

5.3 Universal Software Radio Peripheral – USRP

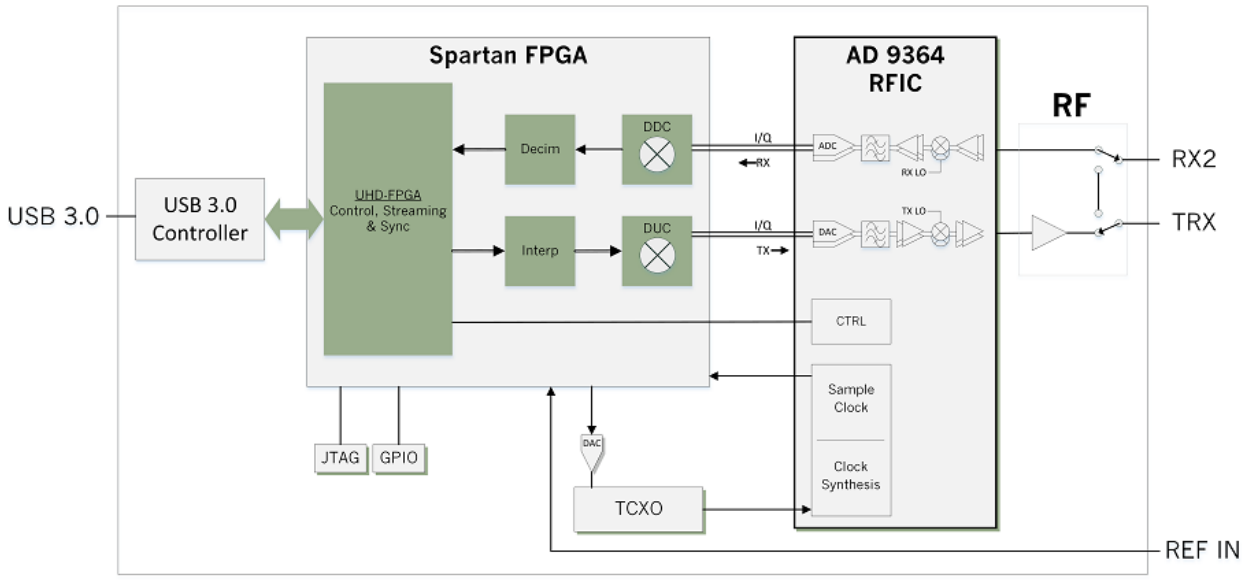
Το Universal Software Radio Peripheral (USRP) είναι μια προηγμένη πλατφόρμα υλικού ειδικά σχεδιασμένη για την υποστήριξη ασύρματων εφαρμογών καθορισμένων από λογισμικό. Τα USRPs αποτελούν κορυφαίο προϊόν της Ettus Research, η οποία έχει συμβάλλει σημαντικά στην προώθηση των ραδιοσυστημάτων ορισμένων από λογισμικό. Συγκεκριμένα η Ettus Research ιδρύθηκε το 2010 από τον Matt Ettus και τους συνεργάτες του οι οποίοι αφιερώθηκαν στην έρευνα και την ανάπτυξη των USRP, μετατρέποντας την εταιρία στον κορυφαίο προμηθευτή παγκοσμίως όσον αφορά τις πλατφόρμες ασύρματων επικοινωνιών SDR.

5.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

5.4.1 USRP B200-mini

Το USRP B200mini είναι ένα μοντέλο το οποίο ανήκει στην οικογένεια των προϊόντων USRP της Ettus Research. Στην εικόνα 11 παρατίθεται η φωτογραφία του συγκεκριμένου μοντέλου, ενώ στην εικόνα 12 ένα block διάγραμμα του μοντέλου.

Εικόνα 15. Ettus Research USRP B200-mini



Εικόνα 16. Block διάγραμμα του USRP B200-mini

Χαρακτηριστικά του USRP B200mini :

- Ευρύ φάσμα συχνοτήτων από 70 MHz έως 6 GHz
- Έως 56MHz άμεσο εύρος ζώνης
- Λειτουργία full duplex
- Κανάλια : 1 TX, 1 RX
- Προγραμματιζόμενο από τον χρήστη, Xilinx Spartan-6 XC6SLX75 FPGA (Field Programmable Gate Array)
- Ρυθμιστής σύνδεσης USB 3.0
- Συγχρονισμός με αναφορά ρολογιού 10 MHz
- General Purpose Input/Output-GPIO και Joint Test Action Group – JTAG για δυνατότητες ελέγχου και αποσφαλμάτωσης
- Πλήρες περίβλημα αλουμινίου
- Διαστάσεις (μήκος x πλάτος x ύψος) : 83,3 x 50,8 x 8,4 mm
- Βάρος : 24.0 γραμμάρια
- USRP Hardware Driver λογισμικού ανοιχτού κώδικα API έκδοση 3.9.0 ή νεότερης
- Υποστήριξη του λογισμικού GNU Radio το οποίο υποστηρίζεται από την Ettus Research μέσω του GR-UHD, μιας διεπαφής στο UHD που διανέμεται από το GNU Radio.

5.5 Υποστηριζόμενο Λογισμικό

Οι γενικευμένες πλατφόρμες ασύρματης επικοινωνίας που καθορίζονται από λογισμικό (USRPs) είναι όπως προαναφέρθηκε ευέλικτες και ευπροσάρμοστες συσκευές υλικού που έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών λογισμικού με τυποποιημένο τρόπο. Οι πλατφόρμες αυτές είναι εξοπλισμένες με FPGA και μετατροπείς από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC) που επιτρέπουν την επεξεργασία και την μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Μέσω του καθορισμένου από λογισμικό χαρακτήρα τους, οι USRP μπορούν να ελεγχθούν χρησιμοποιώντας διάφορα πακέτα λογισμικού, όπως το GNU Radio, το Matlab ή το LabView εξασφαλίζοντας την ομαλή ένταξή τους σε υπάρχοντα συστήματα επικοινωνίας και ερευνητικά περιβάλλοντα.

Η επίσημη υποστήριξη για τις διάφορες εφαρμογές λογισμικού διευκολύνονται από την διαθεσιμότητα ολοκληρωμένων βιβλιοθηκών API, οδηγών και kit ανάπτυξης που επιτρέπουν την εύκολη επικοινωνία και αλληλεπίδραση με τα USRPs. Επιπλέον τα USRPs προσφέρουν υποστήριξη για πολλαπλά πρωτόκολλα επικοινωνίας, σχήματα διαμόρφωσης και ζώνες συχνοτήτων, καθιστώντας τα κατάλληλα για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των ασύρματων επικοινωνιών, των συστημάτων ραντάρ, των δορυφορικών επικοινωνιών, των cognitive radio και της παρακολούθησης φάσματος. Τέλος, ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση των δεδομένων που αποκτάμε μέσω των USRP και του υποστηριζόμενου λογισμικού, είναι το Matlab.

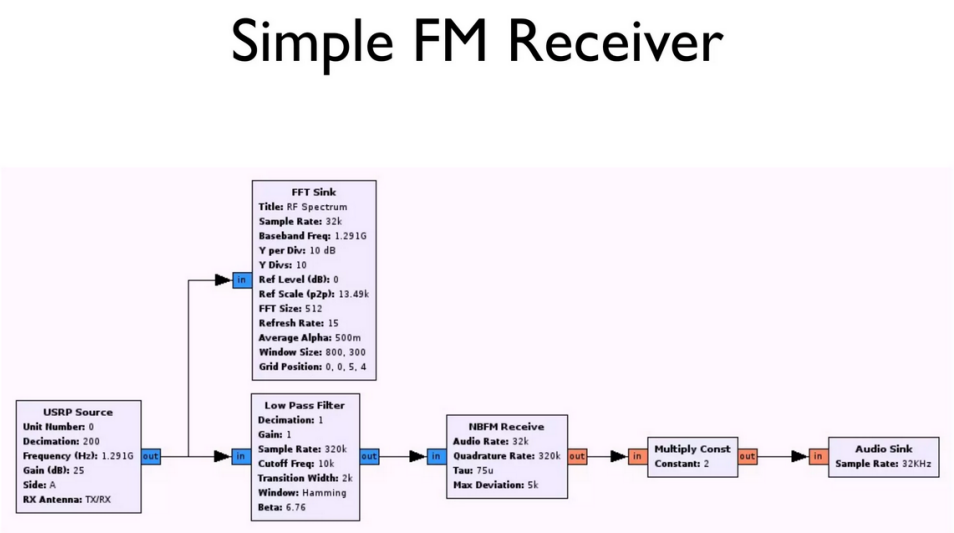
5.5.1 GNU Radio

Το GNU Radio είναι μια ελεύθερη και ανοικτού κώδικα εργαλειοθήκη ανάπτυξης λογισμικού που επιτρέπει τη δημιουργία ραδιοσυστημάτων συναρμολογώντας μπλοκ επεξεργασίας με αρθρωτό τρόπο. Η αρχιτεκτονική του μπορεί να αναλυθεί σε διάφορα βασικά στοιχεία. Πρωτίστως υπάρχουν τα μπλοκ επεξεργασίας σήματος, τα οποία συγκροτούν μια εκτενή βιβλιοθήκη. Τα εν λόγω μπλοκ εκτελούν ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών, από τις πιο θεμελιώδεις λειτουργίες όπως το φιλτράρισμα, η διαμόρφωση και η αποδιαμόρφωση, ως και τις πιο προηγμένες όπως η κωδικοποίηση και η διόρθωση σφαλμάτων. Τα μπλοκ επεξεργασίας αποτελούν δομικά στοιχεία των συστημάτων SDR και μπορούν να διασυνδεθούν μεταξύ τους δημιουργώντας ένα διάγραμμα ροής (flowgraph), με σκοπό τη σχεδίαση σύνθετων "κυκλωμάτων" επεξεργασίας σήματος. Το διάγραμμα ροής, δημιουργείται και ελέγχεται με τη χρήση του GNU Radio Companion (GRC), είναι η γραφική αναπαράσταση ενός συστήματος SDR. Αποτελείται από μπλοκ επεξεργασίας σήματος τα οποία είναι συνδεδεμένα με ροές δεδομένων, και συνεπώς απεικονίζουν τη ροή δεδομένων από το ένα μπλοκ στο άλλο.

Το GNU Radio υποστηρίζει μια πληθώρα διεπαφών εισόδου και εξόδου, συμπεριλαμβανομένων των εισόδων/εξόδων ήχου, των διεπαφών υλικού και του εξωτερικού εξοπλισμού RF, όπως το USRP. Αυτές οι διεπαφές επιτρέπουν στο GNU Radio να αλληλεπιδρά

με τον φυσικό κόσμο, καθιστώντας το ένα ευέλικτο εργαλείο για εφαρμογές προσομοίωσης αλλά και για εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο. Επιπροσθέτως, το GNU Radio παρέχει ένα ευρύ σύνολο από APIs και βιβλιοθήκες που επιτρέπουν στους προγραμματιστές να δημιουργούν προσαρμοσμένα μπλοκ επεξεργασίας σήματος, διευκολύνοντας την προσαρμογή και την επέκταση των δυνατοτήτων του λογισμικού. Ειδικότερα, τα προσαρμοσμένα μπλοκ επεξεργασίας δημιουργούνται με τη χρήση κώδικα Python (η επεξεργασία σήματος πραγματοποιείται κυρίως σε C++) και μπορούν να ενσωματωθούν ομαλά στα διαγράμματα ροής. Για τη δημιουργία ενός μπλοκ Python, οι προγραμματιστές καθορίζουν τη συμπεριφορά του μπλοκ προσδιορίζοντας τους τύπους εισόδου και εξόδου, τη λογική επεξεργασίας και τυχόν παραμέτρους.

Το Gnu Radio Companion, παράγει δύο κύριους τύπους αρχείων, τα αρχεία .grc και τα αρχεία Python (.py). Η σχέση μεταξύ των δύο τύπων αρχείων είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη και την εκτέλεση εφαρμογών SDR. Τα αρχεία GRC χρησιμεύουν ως οπτική υποστήριξη για τη σχεδίαση των διαγραμμάτων ροής, ενώ τα αρχεία Python είναι οι εκτελέσιμες αναπαραστάσεις των εν λόγω διαγραμμάτων ροής. Οι χρήστες μπορούν να επεξεργαστούν τα αρχεία GRC στο γραφικό περιβάλλον για να τροποποιήσουν τη δομή του γραφήματος ροής και το GRC θα αναπαράγει το αντίστοιχο Python script ώστε να αντικατοπτριστούν αυτές οι αλλαγές. Τελικά τα αρχεία Python εκτελούνται για την εκπόνηση εφαρμογών SDR, αξιοποιώντας τις δυνατότητες του GNU Radio.



Εικόνα 17. Απλό παράδειγμα ενός διαγράμματος ροής για έναν FM δέκτη στο GRC

5.5.2 Matlab

Η Matlab είναι μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου και ένα περιβάλλον που χρησιμοποιείται κυρίως για αριθμητικούς υπολογισμούς, ανάλυση δεδομένων και οπτικοποίηση. Παρέχει ένα τεράστιο φάσμα συναρτήσεων και εργαλειοθηκών για διάφορους τομείς, όπως επεξεργασία σήματος, συστήματα ελέγχου, επεξεργασία εικόνας, μηχανική μάθηση και πολλά άλλα. Η Matlab χρησιμοποιείται ευρέως στον ακαδημαϊκό χώρο, την έρευνα και τη βιομηχανία, για ανάλυση δεδομένων, ανάπτυξη αλγορίθμων, μοντελοποίηση, προσομοίωση και σχεδιασμό συστημάτων. Η χρήση του Matlab σε συνδυασμό με το GNU Radio επιτρέπει την αξιοποίηση όλων αυτών των λειτουργιών για εφαρμογές όπως συστήματα ραντάρ, ασύρματες επικοινωνίες, ραδιοφωνία καθορισμένη από λογισμικό, είτε οποιοδήποτε πεδίο που περιλαμβάνει επεξεργασία σήματος. Συνεπώς το Matlab χρησιμεύει ως πολύτιμο εργαλείο για την ενίσχυση της ανάλυσης και της ερμηνείας των δεδομένων που προκύπτουν από το GNU Radio.

Αναλυτικότερα μερικά από τα πλεονεκτήματα της ανάλυσης των δεδομένων του GNU Radio με τη χρήση Matlab παρατίθενται παρακάτω.

- **Επεξεργασία σήματος υψηλής ευελιξίας**

  Παρέχεται ένα εκτεταμένο σύνολο ενσωματωμένων συναρτήσεων, εργαλειοθηκών και βιβλιοθηκών για την επεξεργασία σήματος, επιτρέποντας ένα ευρύ φάσμα ανάλυσης στα δεδομένα. Αυτό περιλαμβάνει λειτουργίες όπως φιλτράρισμα, φασματική ανάλυση, διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση, αλλά και προηγμένες μαθηματικές πράξεις.

- **Διαδραστική επεξεργασία δεδομένων**

  Το περιβάλλον είναι διαδραστικό και φιλικό προς το χρήστη, καθιστώντας εύκολη την ανάλυση και την οπτικοποίηση δεδομένων. Υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας προσαρμοσμένων διαγραμμάτων, φασματογραφημάτων, ιστογραμμάτων και άλλων απεικονίσεων τα οποία βοηθούν στην απόκτηση πληροφοριών για τα δεδομένα.

- **Προηγμένες μαθηματικές δυνατότητες**

  Οι μαθηματικές δυνατότητες του Matlab επεκτείνονται πέρα από την επεξεργασία σήματος, και περιλαμβάνουν πράξεις πινάκων, βελτιστοποίηση και στατιστική.

- **Πλήρης τεκμηρίωση και υποστήριξη**

Το Matlab επωφελείται την εκτενή τεκμηρίωση, την ευρεία κοινότητα χρηστών και την εύκολη πρόσβαση στην τεχνική υποστήριξη, κάτι που μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμο, ειδικά όσον αφορά σύνθετες εργασίες επεξεργασίας σήματος.

6 *Αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν και Polyphase Filters*

6.1 Polyphase Filter Banks

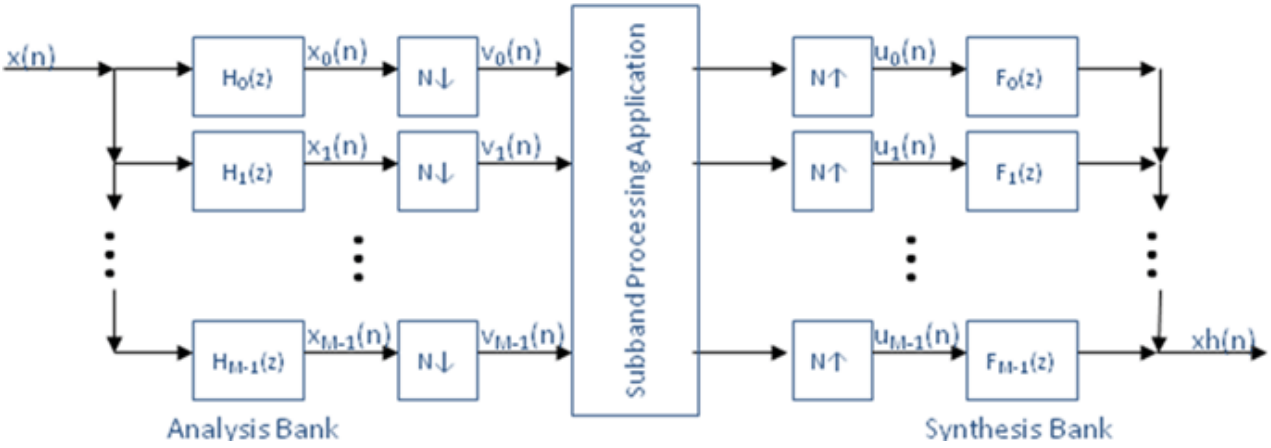
Οι Πολυφασικές Συστοιχίες Φίλτρων (Polyphase Filter Banks – PFBs), έχουν ως στόχο τη διάσπαση ενός σήματος εισόδου ευρείας ζώνης σε πολλαπλές υποζώνες ή υποκανάλια, καθένα από τα οποία περιέχει συγκεκριμένες συνιστώσες συχνότητας του αρχικού σήματος. Η λειτουργία μιας PFB συνεπώς, ξεκινά με ένα σήμα εισόδου, το οποίο έστω είναι της μορφής x[n]. Σε αυτή την περίπτωση, το σήμα θα χωριστεί σε ένα σύνολο σημάτων $x_0[N]$, $x_1[N]$, ...,$x_{N-1}[N]$, το οποίο μπορεί να ληφθεί από τράπεζες φίλτρων με εύρος ζώνης BW_1, BW_2, ...,BW_N και κεντρικές συχνότητες f_{c1}, f_{c2}, ...,f_{cN}. Αυτή η διαίρεση του σήματος εισόδου σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, ονομάζεται αποσύνθεση, και επιτυγχάνεται μέσω \μιας σειράς ειδικά σχεδιασμένων φίλτρων, όπως είναι και τα πολυφασικά φίλτρα. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά φίλτρα, τα πολυφασικά φίλτρα επιτρέπουν την παράλληλη επεξεργασία, κάτι που τα καθιστά κατάλληλα για εργασίες επεξεργασίας σήματος σε πραγματικό χρόνο (real-time) αλλά και σε πολλαπλούς ρυθμούς (multi-rate).

Στην επεξεργασία σημάτων πολλαπλών ρυθμών, οι ρυθμοί δειγματοληψίας των υποσημάτων μπορεί να διαφέρουν από τον ρυθμό δειγματοληψίας του αρχικού σήματος, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη επεξεργασία διαφορετικών συνιστωσών συχνότητας. Ο ρυθμός δειγματοληψίας καθορίζει τον αριθμό τον δειγμάτων που λαμβάνονται από ένα συνεχές αναλογικό σήμα ανά μονάδα χρόνου. Οι πολλαπλοί ρυθμοί αναφέρονται είτε σε υπερδειγματοληψία, είτε σε υποδειγματοληψία. Υπερδειγματοληψία υπάρχει όταν αυξάνεται ο ρυθμός δειγματοληψίας με αποτέλεσμα να εισέλθουν επιπλέον δείγματα μεταξύ των ήδη υφιστάμενων δειγμάτων και συνεπώς να υπάρξει αύξηση της ανάλυσης (χωρίς όμως την εμφάνιση

επιπλέον πληροφορίας λόγω της τήρησης του θεωρήματος δειγματοληψίας). Αντιστρόφως, υποδειγματοληψία υπάρχει όταν μειώνεται ο ρυθμός δειγματοληψίας και η ανάλυση, καθώς κάποια δείγματα απορρίπτονται. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει να αποδοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο φαινόμενο της παραμόρφωσης (aliasing) του σήματος, το οποίο προκύπτει συνήθως στην περίπτωση που το σήμα δεν φιλτραριστεί σωστά με κάποιο ψηφιακό φίλτρο πριν πραγματοποιηθεί η υποδειγματοληψία. Μια διαδικασία η οποία επιτυγχάνει τη διατήρηση της ακεραιότητας του σήματος είναι η αναδειγματοληψία (resampling) η οποία αποτελεί έναν συνδυασμό της υπερδειγματοληψίας και της υποδειγματοληψίας.

Σε μια τράπεζα πολυφασικών φίλτρων υπάρχουν συνήθως δύο στάδια, η ανάλυση και η σύνθεση. Το στάδιο της ανάλυσης αποτελείται από ένα σύνολο φίλτρων ανάλυσης $H_k(n)$, όπου κάθε φίλτρο επεξεργάζεται ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων, το οποίο διαχωρίζει το σήμα εισόδου σε M-υποσήματα $X_k(n)$. Κατά το στάδιο της σύνθεσης, τα επιμέρους σήματα που παράγονται στο στάδιο της ανάλυσης συνδυάζονται ή ανακατασκευάζονται για την παραγωγή ενός βελτιωμένου σήματος εξόδου. Συγκεκριμένα, το στάδιο σύνθεσης αποτελείται από ένα σύνολο M φίλτρων σύνθεσης $F_k(n)$ τα οποία συνδυάζουν M σήματα $Y_k(n)$ σε ένα ανακατασκευασμένο σήμα x^(n). Το συγκεκριμένο στάδιο περιλαμβάνει συχνά την άθροιση ή την ανάμειξη των υποσημάτων με ελεγχόμενο τρόπο.

Η χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (Discrete Fourier Transform – DFT), είναι επίσης ένα κρίσιμο τμήμα των πολυφασικών συστοιχιών φίλτρων. Μια PFB μπορεί να οριστεί επίσης ως μια δομή φίλτρων τα οποία λειτουργούν σε πολλαπλούς ρυθμούς, σε συνδυασμό με τον DFT μπορεί να εξάγει υποζώνες από ένα σήμα εισόδου. Ο αλγόριθμος DFT από μόνος του έχει δύο βασικά μειονεκτήματα, τη διαρροή και τις απώλειες. Το πρώτο μειονέκτημα προκύπτει από το γεγονός ότι η εφαρμογή του DFT σε ένα σήμα πεπερασμένης διάρκειας, θεωρεί την υπόθεση ότι το σήμα εισόδου επαναλαμβάνεται απείρως στο χρόνο, ενώ στην πράξη τα σήματα του πραγματικού κόσμου τείνουν να είναι πεπερασμένης διάρκειας. Αποτέλεσμα αυτής της αντιστοιχίας μεταξύ των παραδοχών του συγκεκριμένου αλγορίθμου και του πραγματικού σήματος ενδέχεται να είναι η φασματική διαρροή, δηλαδή η διαρροή της ενέργειας από μια συγκεκριμένη συνιστώσα συχνότητας του σήματος εισόδου, σε γειτονικά συχνοτικά πεδία στην έξοδο. Το δεύτερο μειονέκτημα του DFT, εμφανίζεται επειδή ο αλγόριθμος υποθέτει ότι το σήμα εισόδου δειγματοληπτείται ακριβώς στη σωστή φάση, χωρίς όμως να είναι απαραίτητο στην πράξη. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολές του μεγέθους των συνιστωσών συχνότητας, καθιστώντας δύσκολη την εκτίμηση του πραγματικού μεγέθους τους. Με τη χρήση πολυφασικών συστοιχιών είναι δυνατή η εξάλειψη των εν λόγω προβλημάτων. Τα πολυφασικά φίλτρα μετριάζουν την διαρροή σε γειτονικά κανάλια, απομονώνοντας συγκεκριμένες συνιστώσες συχνότητας, ενώ κάθε κανάλι επεξεργάζεται ανεξάρτητα, παρέχοντας ακριβέστερη αναπαράσταση του συχνοτικού περιεχομένου. Ακόμη, τα πολυφασικά φίλτρα είναι σχεδιασμένα προκειμένου να ευθυγραμμίζουν της συνιστώσες συχνότητας του σήματος με τις αποκρίσεις του φίλτρου. Χάρη σε αυτή την ευθυγράμμιση ελαχιστοποιούνται οι διακυμάνσεις στο μέγεθος, παρέχοντας μια πιο συνεπή και ακριβή αναπαράσταση του συχνοτικού περιεχομένου σε διαφορετικά κανάλια. Εν ολίγοις, τα PFB έχουν σχεδιαστεί για να αντιμετωπίζουν τα ζητήματα της διαρροής και της απώλειας απόκλισης που μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια της ανάλυσης συχνότητας με χρήση του DFT.



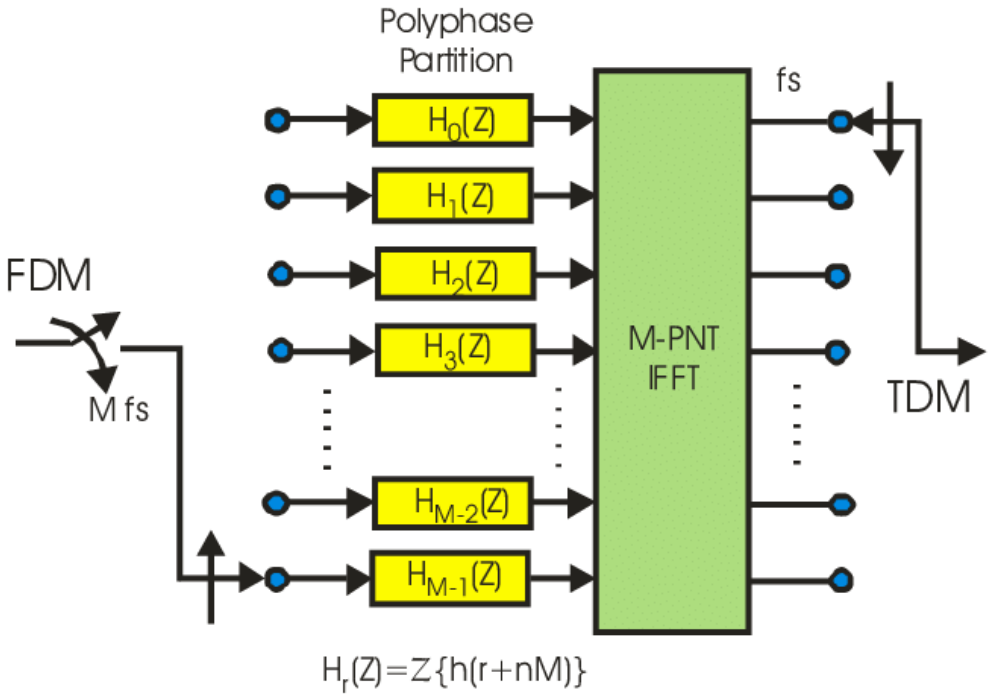
Εικόνα 18. Παράδειγμα Πολυφασικής Συστοιχίας Μ-καναλιών

6.2 Polyphase Channelizer

Ο Channelizer ανήκει στην κατηγορία των πολυφασικών φίλτρων και χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό ενός σήματος Ευρείας Ζώνης σε πολλαπλά κανάλια Στενής Ζώνης. Μπορεί να θεωρηθεί και ως τεχνική μείωσης του ρυθμού δειγματοληψίας, καθώς το σήμα εισόδου έχει στην πλειοψηφία των περιπτώσεων υψηλότερο ρυθμό δειγματοληψίας από ότι έχουν ύστερα τα κανάλια, κάτι που είναι λογικό από τη στιγμή που πρέπει να ικανοποιείται το κριτήριο Nyquist για ολόκληρο το εύρος ζώνης. Υπενθυμίζεται ότι για να ικανοποιείται το κριτήριο Nyquist για ένα πραγματικό σήμα εύρους ζώνης B, έτσι ώστε να μη χάνεται πληροφορία κατά την ανακατασκευή του σήματος, ο ρυθμός δειγματοληψίας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσος με 2*B. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην παρούσα εφαρμογή ασχολούμαστε με μιγαδικά σήματα, όπου μας αρκεί ο ρυθμό δειγματοληψίας να ισούται με το εύρος ζώνης. Στην περίπτωση του channelizer ο ρυθμός δειγματοληψίας του κάθε καναλιού θα είναι ο ρυθμός δειγματοληψίας του αρχικού σήματος διαιρεμένος με τον αριθμό των καναλιών που υπάρχουν στην έξοδο του καναλοποιητή. Για παράδειγμα αν το αρχικό σήμα έχει ρυθμό δειγματοληψίας 96kHz και έχουμε 6 κανάλια, το κάθε κανάλι θα έχει ρυθμό δειγματοληψίας 96kHz/6=16kHz.

Απλοποιημένα, η λειτουργία του καναλοποιητή περιγράφεται ως εξής. Αρχικά δέχεται ένα σήμα εισόδου ευρείας ζώνης, το οποίο περιέχει πολλαπλές συνιστώσες συχνότητας. Με τη βοήθεια της πολυφασικής "τράπεζας" φίλτρων την οποία διαθέτει, αποσυνθέτει το σήμα εισόδου σε πολλαπλούς παράλληλους κλάδους ή αλλιώς κανάλια, όπου κάθε κανάλι αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη υποζώνη συχνότητας του αρχικού σήματος. Κάθε κανάλι της πολυφασικής συστοιχίας φίλτρων περιλαμβάνει ένα σύνολο φίλτρων τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να εξάγουν τις συνιστώσες συχνότητας εντός της υποζώνης που τους έχει ανατεθεί, ενώ παράλληλα εξασθενούν ή απορρίπτουν συχνότητες εκτός του καθορισμένου εύρους τους. Τέλος, η έξοδος του channelizer αποτελείται από πολλαπλά σήματα υποζώνης, καθένα από τα οποία περιέχει

διαφορετικό εύρος συνιστωσών συχνότητας. Κάθε κανάλι μπορεί στη συνέχεια να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα κανάλια.



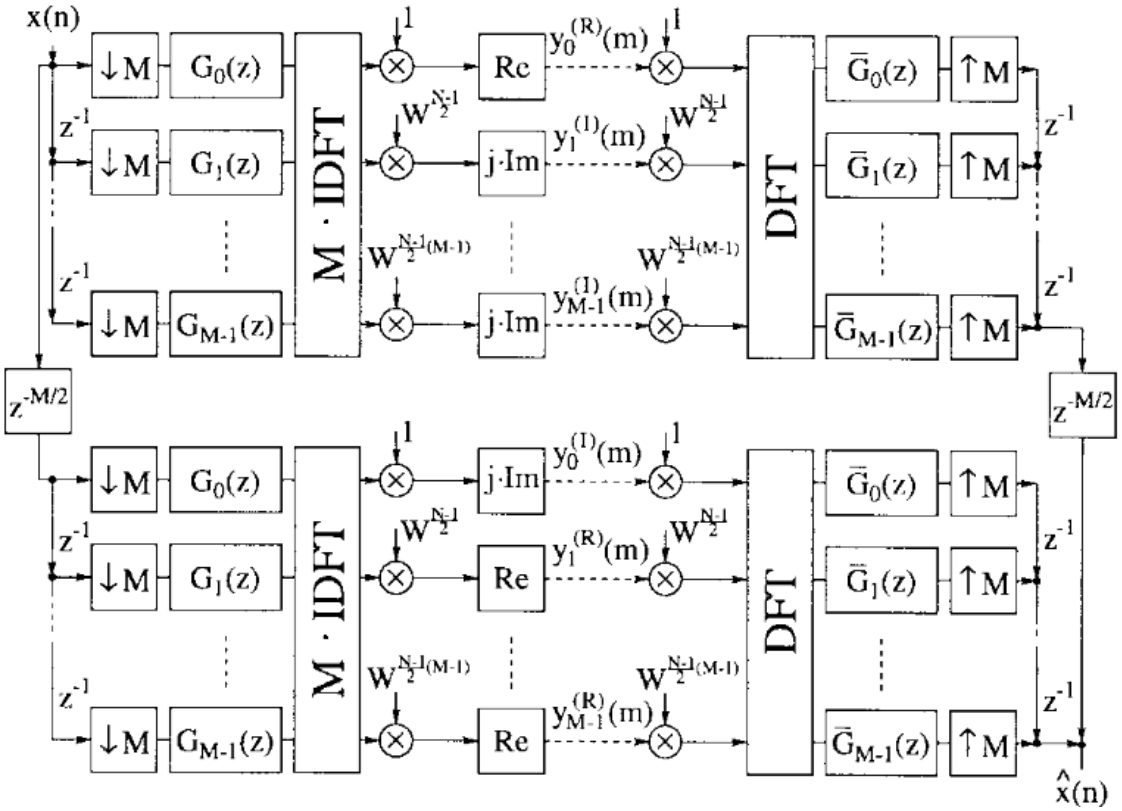
Εικόνα 19. M-to-1 Down-Sample, M-Path Polyphase Channelizer

6.3 Modified Discrete Fourier Transform – MDFT Filter Banks

Οι Συστοιχίες Φίλτρων Τροποποιημένου Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier ή αλλιώς Συστοιχίες Φίλτρων MDFT είναι ένας ειδικός τύπος τράπεζας φίλτρων, οι οποίες συνδυάζουν βασικά στοιχεία των συστοιχιών φίλτρων DFT και των γραμμικών φίλτρων ανάλυσης και σύνθεσης, στοχεύοντας στην τέλεια ανακατασκευή του σήματος ή στην σχεδόν τέλεια ανακατασκευή του σήματος. Οι συστοιχίες φίλτρων Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier – DFT, χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο DFT για να αναλύσουν το συχνοτικό περιεχόμενο ενός διακριτού σήματος. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των συστοιχιών DFT είναι η δυνατότητα να υλοποιούν φίλτρα ανάλυσης και σύνθεσης γραμμικής φάσης, μέσω της κατάλληλης μιγαδικής διαμόρφωσης ενός χαμηλοπερατού πρότυπου φίλτρου. Για να είναι πράγματι γραμμικής φάσης τα φίλτρα ανάλυσης και σύνθεσης, τα οποία θα είναι πανομοιότυπα, θα πρέπει το χαμηλοπερατό πρότυπο φίλτρο να ικανοποιεί την ιδιότητα της μηδενικής φάσης. Αυτό συνεπάγεται ότι το γραμμικό φίλτρο δεν θα πρέπει να εισάγει καμία απόκλιση καθυστέρησης ή μετατόπισης φάσης στο σήμα εισόδου σε οποιαδήποτε συχνότητα. Με άλλα λόγια, η απόκριση του φίλτρου θα πρέπει να είναι συμμετρική γύρω από τη μηδενική συχνότητα, γεγονός που επιφέρει μηδενική μετατόπιση φάσης σε όλες τις συχνότητες. Επιπροσθέτως, η ιδιότητα της μηδενικής φάσης συνεπάγεται ότι το

φίλτρο επιτρέπει σε όλες τις συνιστώσες συχνότητας του σήματος εισόδου να διέλθουν από το φίλτρο με την ίδια καθυστέρηση, δηλαδή το φίλτρο εισάγει σταθερό group delay ανεξάρτητα από τη συχνότητα. Οι συστοιχίες DFT πλεονεκτούν επίσης και στην υπολογιστική αποδοτικότητα, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για πρακτικές υλοποιήσεις όπου υπάρχουν πολλά δείγματα. Παρόλα αυτά, αποδεικνύεται ότι καμία DFT τράπεζα που λειτουργεί στην δειγματοληψία Nyquist δεν μπορεί να παρέχει τέλεια ανακατασκευή. Η υπεροχή των MDFT έναντι των DFT είναι η τέλεια ανακατασκευή και η ικανότητά τους να ακυρώνουν παρεμβολές.

Οι συστοιχίες MDFT χρησιμοποιούν μιγαδική διαμόρφωση, εκτελούν αποδεκατισμό του σήματος σε δύο βήματα, διαθέτουν M αριθμό καναλιών και δειγματοληπτούνται ακριβώς στον ρυθμό Nyquist. Η μιγαδική διαμόρφωση, κατά την οποία μπορούν να εκτελούνται πράξεις με μιγαδικούς αριθμούς, είναι μια σύνθετη διαμόρφωση που επιτρέπει την αναπαράσταση τόσο της πληροφορίας πλάτους, όσο και της πληροφορίας φάσης στο σήμα. Οι βασικές τροποποιήσεις που εισάγουν οι συστοιχίες MDFT είναι δύο. Η πρώτη βασική τροποποίηση, είναι ο αποδεκατισμός, δηλαδή η μείωση του ρυθμού δειγματοληψίας, των υποζωνών ο οποίος συμβαίνει σε δύο βήματα, με ή χωρίς να εισάγεται καθυστέρηση. Στο πρώτο σκέλος, το σήμα κάθε υποζώνης αποδεκατίζεται χωρίς καθυστέρηση, ενώ στο δεύτερο σκέλος πραγματοποιείται αποδεκατισμός με καθυστέρηση ίση με M/2. Η δεύτερη τροποποίηση που εισάγεται είναι η εναλλασσόμενη λήψη του πραγματικού



Εικόνα 20. Παράδειγμα των σταδίων ανάλυσης και σύνθεσης, από το άρθρο "Modified DFT Filter Banks withPerfect ReconstructionTanja Karp, Member, IEEE, and N. J. Fliege, Senior Member, IEEE"

και του φανταστικού μέρους των σημάτων υποζώνης. Συγκεκριμένα, αφού έχει προηγηθεί ο αποδεκατισμός σε δύο βήματα, γίνεται η παραδοχή ότι το πραγματικό μέρος όλων των ζυγών υποζωνών και το φανταστικό μέρος όλων των περιττών υποζωνών λαμβάνεται κατά το πρώτο βήμα χωρίς καθυστέρηση. Αντιθέτως, θεωρούμε ότι κατά το δεύτερο σκέλος του αποδεκατισμού λαμβάνεται το πραγματικό μέρος των περιττών υποζωνών και το φανταστικό μέρος των ζυγών υποζωνών, με καθυστέρηση M/2. Αφού το αρχικό σήμα εισόδου έχει περάσει από τα φίλτρα ανάλυσης και έχει υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία, σειρά έχουν τα φίλτρα σύνθεσης. Στα φίλτρα σύνθεσης είναι επιθυμητό να έχει φτάσει ολόκληρη πληροφορία, καθώς στόχος των MDFT είναι η τέλεια ανακατασκευή του αρχικού σήματος.

Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα των MDFT-FBs είναι αρχικά η τέλεια ή σχεδόν τέλεια ανακατασκευή του σήματος και η δυνατότητα να ακυρώνουν παρεμβολές. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα των MDFT φίλτρων να υποστηρίζουν την υλοποίηση του βέλτιστου Neyman-Pearson ανιχνευτή, δηλαδή ενός weighted energy detectors, της μορφής :

$$T_{\text{oqam}}(\mathbf{y}) = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_w^2} \sum_{i=0}^{L-1} \frac{|c_i|^2}{\sigma_s^2 |c_i|^2 + \sigma_w^2} \left(\mathbf{y}_i^{(\text{oqam})}\right)^{\text{H}} \mathbf{y}_i^{(\text{oqam})}$$

Ο συγκεκριμένος τύπος προκύπτει ύστερα από πράξεις, καθώς εάν η έξοδος της συστοιχίας φίλτρων MDFT χρησιμοποιείται μετά τους πραγματικούς και τους φανταστικούς συντελεστές, τότε όλα τα διανύσματα σήματος τα οποία χρησιμοποιούνται στην διαδικασία ανίχνευσης είναι ασυσχέτιστα. Με άλλα λόγια οι έξοδοι των υποκαναλιών θα είναι ασυσχέτιστες, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την ανίχνευση σήματος χωρίς διαρροές από γειτονικά κανάλια. Αν ο ανιχνευτής δεν είχε αυτή την ιδιότητα, θα ήταν αναγκαίες οι πράξεις μεταξύ πινάκων ώστε να ακυρωθούν παρεμβολής γειτονικής ζώνης, καθιστώντας τον ανιχνευτή δύσκολο στην υλοποίηση και μη-πρακτικό.

6.4 Σχήματα διαμόρφωσης και Quadrature Phase Shift Keying - QPSK

Διαμόρφωση ονομάζεται η διαδικασία μεταβολής των ιδιοτήτων ενός φέροντος σήματος, δηλαδή ενός σήματος με σταθερή κυματομορφή. Τα χαρακτηριστικά του σήματος τα οποία μπορεί να μεταβληθούν κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης, είναι το πλάτος, η συχνότητα ή η φάση. Αυτή η διαδικασία έχει σκοπό την κωδικοποίηση πληροφοριών, και την μετάδοσή τους μέσω ενός καναλιού επικοινωνίας το οποίο μπορεί να είναι ενσύρματο ή ασύρματο.

Η διαμόρφωση είναι μια πολύ απαραίτητη τεχνική για τον χώρο των τηλεπικοινωνιών, λόγω των διάφορων διευκολύνσεων που προσφέρει. Αρχικά επιτρέπει την αποτελεσματικότερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, μέσω της κωδικοποίησης των πληροφοριών στα φέροντα σήματα. Επιπλέον, βελτιστοποιεί την διάδοση του σήματος με προσαρμοσμένο τρόπο, καθώς διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης είναι κατάλληλες για διαφορετικές εφαρμογές ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του καναλιού. Ακόμη η διαμόρφωση βοηθά στη μείωση των παρεμβολών που προέρχονται από άλλα σήματα, καθώς καθιστά εφικτή τη διάκριση και τον διαχωρισμό διαφορετικών ροών δεδομένων. Αυτή η μείωση των παρεμβολών είναι απαραίτητη για την αξιοπιστία ενός συστήματος, ειδικότερα σε πολυσύχναστες ζώνες συχνοτήτων. Τέλος, επιτρέπει τη συμβατότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και συσκευών. Με την παροχή ενός τυποποιημένου πλαισίου κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης πληροφοριών, διασφαλίζεται η ακριβής ερμηνεία των δεδομένων.

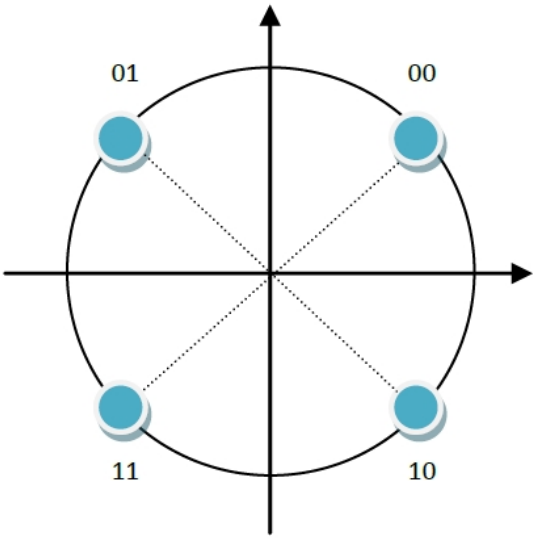
Υπάρχουν διάφοροι τύποι διαμόρφωσης, οι οποία αντιστοιχούν σε μια ευρύτερη κατηγορία η οποία αντιπροσωπεύει τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φέροντος σήματος τα οποία μπορούμε να τροποποιήσουμε. Συγκεκριμένα, οι βασικοί τύποι διαμόρφωσης είναι τρεις· η διαμόρφωση πλάτους (AM), η διαμόρφωση συχνότητας (FM) και η διαμόρφωση φάσης (PM). Η διαμόρφωση πλάτους - AM χαρακτηρίζεται από την απλότητά της, και προτιμάται συνήθως σε εκπομπές ήχου, όπως ραδιοφωνικές εκπομπές ομιλίας ή ειδήσεων. Κάποιες από τις υποκατηγορίες της AM διαμόρφωσης, είναι η διαμόρφωση διπλής πλευρικής ζώνης με καταπιεσμένο φέρον (Double Side Band Supressed Carrier - DSB-SC) ή χωρίς καταπιεσμένο φέρον (DSB), και η διαμόρφωση μονής πλευρικής ζώνης (Single Side Band – SSB). Η διαμόρφωση συχνότητας – FM, φημίζεται για την αντοχή της στο θόρυβο με βάση το πλάτος. Συνήθως προτιμάται για μεταδόσεις μεγάλης συχνότητας, στο αναλογικό ραδιόφωνο και στη μετάδοση ήχου υψηλής ποιότητας. Οι υποκατηγορίες της FM διαμόρφωσης περιλαμβάνουν τη διαμόρφωση συχνότητας στενής ζώνης (Narrow Band FM - NBFM) και τη διαμόρφωση συχνότητας ευρείας ζώνης (Wide Band FM - WBFM). Όσον αφορά τη διαμόρφωση φάσης, χαρακτηρίζεται από ανθεκτικότητα έναντι διακυμάνσεων πλάτους, και είναι κατάλληλη για σενάρια με μεταβαλλόμενη ισχύ σήματος. Κάποιοι τύποι PM διαμορφώσεων που χρησιμοποιούνται στις ψηφιακές επικοινωνίες, είναι η δυαδική διαμόρφωση φάσης (Binary Phase Shift Keying – BPSK) και η τετραγωνική διαμόρφωση φάσης (Quadrature Phase Shift Keying – QPSK). Υπάρχουν βέβαια, και τεχνικές διαμόρφωσης οι οποίες συνδυάζουν την AM, την FM και την PM με διάφορους τρόπους. Τα υβριδικά αυτά σχήματα διαμόρφωσης αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα των διαφορετικών τύπων διαμόρφωσης για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων επικοινωνίας. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα είναι η τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation - QAM), η οποία συνδυάζει τη διαμόρφωση πλάτους και τη διαμόρφωση φάσης για μετάδοση ψηφιακών σημάτων, η οποία χρησιμοποιείται σε μόντεμ και ψηφιακές τηλεοράσεις.

Παρακάτω θα υλοποιήσουμε έναν πομπό ο οποίος χρησιμοποιεί την διαμόρφωση QPSK για την κωδικοποίηση της πληροφορίας. Η QPSK είναι ένας τύπος διαμόρφωσης όπου κάθε σύμβολο του ψηφιακού σήματος αντιπροσωπεύεται από έναν συνδυασμό τεσσάρων διαφορετικών μετατοπίσεων φάσης του φέροντος σήματος, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε έναν μοναδικό συνδυασμό δύο bits μέσω της κωδικοποίησης Gray, το οποίο είναι ένα δυαδικό αριθμητικό σύστημα όπου δύο διαδοχικές τιμές διαφέρουν μόνο σε ένα bit. Η συγκεκριμένη μέθοδος

κωδικοποίησης όχι μόνο διευκολύνει την αποδοτική αναπαράσταση, αλλά παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο στην ελαχιστοποίηση του ρυθμού σφάλματος bit (Bit Error Rate – BER). Αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο για την αξιολόγηση της απόδοσης και της ακεραιότητας ενός ψηφιακού συστήματος επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, είναι ένας λόγος που ποσοτικοποιεί τον αριθμό των bit που λαμβάνονται με σφάλμα προς το συνολικό αριθμό των bit που μεταδίδονται σε ένα σύστημα επικοινωνίας. Ένα χαμηλό BER υποδηλώνει καλύτερη απόδοση με λιγότερα σφάλματα.

Η QPSK χρησιμοποιεί τέσσερις δυνατές μετατοπίσεις φάσεις με μεταβολή 90 μοιρών, π.χ. στις 0, 90, 180 και 270 μοίρες (ενώ συνήθως προτιμάται να υπάρχει μια ολίσθηση 45^{o} 45, 135, 225 και 315 μοίρες), οι οποίες αντιστοιχούν στους τέσσερις δυνατούς συνδυασμούς bits 00, 01, 10 και 11. Το γεγονός ότι υπάρχουν τέσσερις φάσεις (2^2) και συνεπώς κάθε σύμβολο αναπαριστά δύο bits πληροφορίας με κωδικοποίηση Gray, εξασφαλίζει ότι οι μεταβάσεις μεταξύ διαδοχικών τιμών απαιτούν μόνο μια αλλαγή ενός bit, μειώνοντας στρατηγικά την πιθανότητα σφαλμάτων κατά την αποδιαμόρφωση. Το διάγραμμα αστερισμού QPSK παρέχει μια γραφική αναπαράσταση αυτών των τεσσάρων σημείων, τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους και είναι τοποθετημένα γύρω από την περίμετρο ενός κύκλου. Αυτή η οπτικοποίηση βοηθά στην κατανόηση του σχήματος διαμόρφωσης, αλλά και απλοποιεί την διαδικασία της αποδιαμόρφωσης.

Τέλος, όσον αφορά την πρακτική εφαρμογή, το φέρον υφίσταται διαμόρφωση με τις επιλεγμένες μετατοπίσεις φάσης, μια διαδικασία η οποία εξαρτάται από τα ψηφιακά σύμβολα που προορίζονται για μετάδοση. Αυτά τα διαμορφωμένα σήματα μεταφέρονται στη συνέχεια μέσω του καναλιού επικοινωνίας. Η συστηματική και ισαπέχουσα τοποθέτηση των σημείων του αστερισμού ενισχύει την ανθεκτικότητα του συστήματος και συμβάλλει στην αξιοπιστία και την ακρίβεια της μετάδοσης δεδομένων στο σύστημα επικοινωνίας.



Εικόνα 21. Σηματαστερισμός QPSK

7 Υλοποίηση και Μετρήσεις

7.1 Ενεργειακός Ανιχνευτής με Polyphase Channelizer

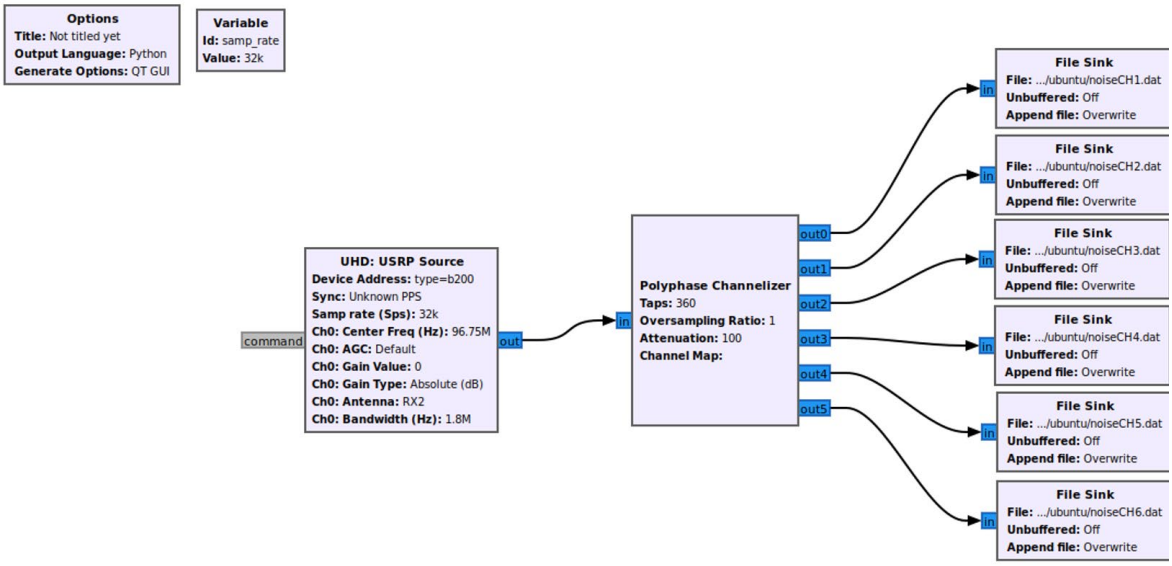
Στην συγκεκριμένη ενότητα θα υλοποιηθεί ένα πείραμα με τη βοήθεια του GNU Radio και των μηχανημάτων USRP, το οποίο θα υλοποιεί έναν polyphase channelizer που θα χωρίζει το εισερχόμενο σήμα σε έξι ξεχωριστά κανάλια. Πρωταρχικός στόχος του πειράματος, είναι η ανίχνευση ενέργειας και ο προσδιορισμός κατωφλίου για κάθε κανάλι. Η χρησιμότητα του καθορισμού κατάλληλων ορίων ανίχνευσης ενέργειας, έγκειται στην βελτιστοποίηση της ευαισθησίας και της αξιοπιστίας του συστήματος. Η επίτευξη μιας βέλτιστης ισορροπίας εξασφαλίζει τον ακριβή εντοπισμό και την απομόνωση των σημάτων ενδιαφέροντος, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την επίδραση του θορύβου και των παρεμβολών. Μέσω του συγκεκριμένου πειράματος, εμβαθύνουμε στις ιδιότητες των polyphase channelizer, της ανίχνευσης ενέργειας και της ενσωμάτωσης αυτών των εννοιών στο πλαίσιο του GNU Radio.

7.1.1 Μέτρηση AWGN θορύβου

Πρώτο βήμα για την έναρξη του πειράματος, είναι η δημιουργία ενός διαγράμματος ροής στο GNU Radio Companion. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 23, το κατασκευασμένο σύστημα περιλαμβάνει έναν δέκτη USRP, ο οποίος υλοποιείται από ένα “UHD : USRP Source”, και έναν Polyphase Channelizer, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την κατάτμιση του εισερχόμενου σήματος σε 6 διαφορετικά κανάλια. Η έξοδος αυτής της διαδικασίας αποθηκεύεται στη συνέχεια σε έξι αντίστοιχα αρχεία, για κάθε κανάλι, τα οποία θα χρησιμεύσουν στην επακόλουθη ανίχνευση ενέργειας.

Η ανίχνευση της ενέργειας, χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση της παρουσίας ή της απουσία σημάτων εντός του καθορισμένου φάσματος συχνοτήτων. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να οριστεί κάποιο κατώφλι κάτω από το οποίο τα σήματα θα διακρίνονται ως θόρυβος και όχι ως τα επιθυμητά δεδομένα. Ο ακριβής προσδιορισμός αυτών των κατωφλίων πραγματοποιείται μέσω μιας διαδικασίας που περιλαμβάνει τη μέτρηση επιπέδου θορύβου. Συγκεκριμένα φροντίζουμε να μετρήσουμε μόνο θόρυβο μέσω του “USRP Source”, δεν συνδέουμε δηλαδή κάποια κεραία στο

USRP, και εν συνεχεία χωρίζουμε το θόρυβο αυτό σε έξι κανάλια τα οποία θα εξετάσουμε ενδελεχώς στο Matlab.



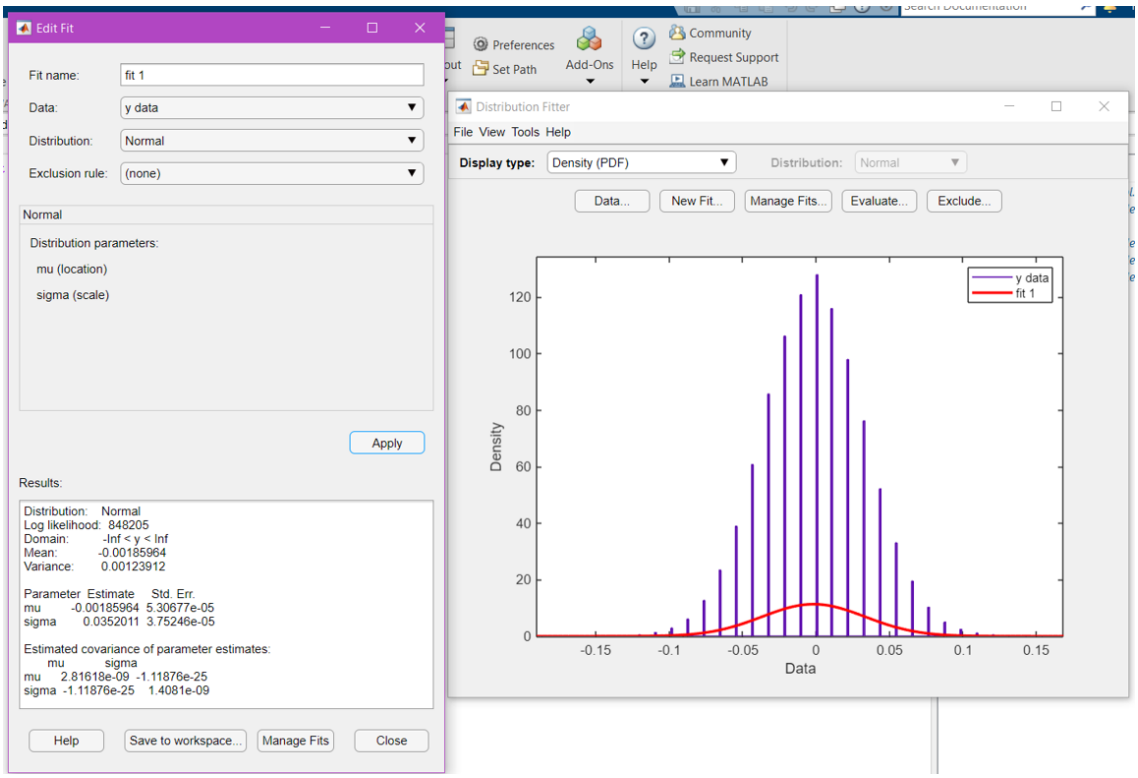
Εικόνα 22. Διάγραμμα ροής στο Gnu Radio Companion, στο οποίο χωρίζουμε το εισερχόμενο σήμα σε 6 κανάλια με τη βοήθεια ενός polyphase channelizer

Η ανάλυση των δεδομένων σε Matlab επικεντρώνεται στην αξιολόγηση του κατά πόσο τα δεδομένα θορύβου που αποκτήθηκαν ακολουθούν μια κανονική κατανομή (ανά πραγματικό και φανταστικό μέρος). Η απαίτηση τα δεδομένα να ακολουθούν μια κανονική κατανομή έχει τις ρίζες της σε στατιστικές υποθέσεις και μεθοδολογίες που συχνά αξιοποιούνται στην επεξεργασία σήματος και στον έλεγχο υποθέσεων, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4. Πιο απλά, η παραδοχή κανονικής κατανομής απλοποιεί τις στατιστικές αναλύσεις και διευκολύνει την εφαρμογή καθιερωμένων τεχνικών. Για παράδειγμα, οι συναρτήσεις PDF και CDF βοηθούν στην οπτικοποίηση της κατανομής των δεδομένων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με τις τιμές κατωφλίου. Συγκεκριμένα, η PDF – Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας αντιπροσωπεύει την πιθανότητα παρατήρησης μιας τυχαίας μεταβλητής σε ένα συγκεκριμένο εύρος, ενώ η CDF – Cumulative Distribution Function, αντιπροσωπεύει την πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή να είναι μικρότερη ή ίση από μια συγκεκριμένη τιμή.

Επομένως, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα τα οποία αποκτήσαμε μέσω των File Sinks, φτιάχνουμε (εκτιμούμε) τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ή probability density function (PDF) του πραγματικού μέρους του σήματος στη Matlab, και ύστερα εφαρμόζουμε την κανονική κατανομή για να βρούμε τις δύο χαρακτηριστικές παραμέτρους της κατανομής αυτής, την τυπική απόκλιση (σ) και την μέση τιμή (mean). Στη συγκεκριμένη μέτρηση προκύπτει ότι σ^2=0.00123912 , σ=0.0352011 και mean = -0.00185964. Σε μια κανονική κατανομή η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας συμβολίζεται συχνά ως N(mean,σ^2). Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα συμβολίζεται ως N(-0.00185964, 0.00123912).

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικές παράμετροι της Κανονικής κατανομής

Όνομα Μεταβλητής	**Μεταβλητή**	**Τιμή Μεταβλητής**
Διακύμανση	σ^2	0.00123912
Τυπική Απόκλιση	σ	0.0352011
Μέση Τιμή	mean	-0.00185964



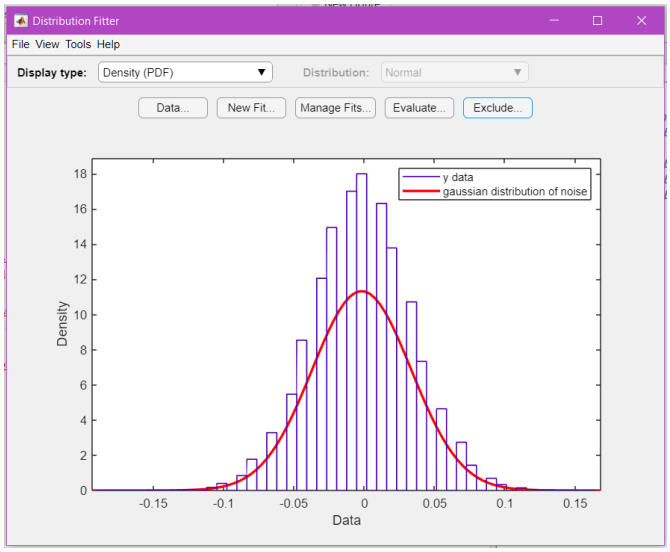
Εικόνα 23. Probability Density Function και Κανονική Κατανομή του σήματος σε Matlab

Οι χαρακτηριστικές παράμετροι που αποκτήσαμε από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, μας επιβεβαίωσαν ότι τα δεδομένα θορύβου ακολουθούν την κανονική κατανομή. Παρόλα αυτά δεν έχουμε μια ικανοποιητική οπτικοποίηση. Αυτό συμβαίνει γιατί τα USRP, όπως και όλα τα embedded devices, έχουν πεπερασμένη ακρίβεια. Οι μετατροπείς ADC (Analog-to-Digital Converters) στις συσκευές USRP έχουν συνήθως μια συγκεκριμένη ανάλυση, η οποία συχνά αναφέρεται ως ανάλυση "N-bit". Συγκεκριμένα ο ADC του USRP που διαθέτουμε, έχει 14 bit για να αποτυπώσει τα σήματα και να αναπαραστήσει τα πλάτη χρησιμοποιώντας 2^{14} διακριτά επίπεδα ή bins. Κάθε ένα από τα επίπεδα αυτά αντιπροσωπεύει έναν μοναδικό ψηφιακό κωδικό που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη αναλογική τάση εντός του εύρους εισόδου του ADC. Αυτό σημαίνει ότι το σήμα δεν μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή κατά την διακριτοποίηση, αλλά έχει συγκεκριμένες στάθμες τιμών οι οποίες μπορούν να παρατηρηθούν στα bins που υπάρχουν στο ιστόγραμμα. Ωστόσο, κατά τη θεωρητική ανάλυση οι τιμές θεωρούνται συνεχείς και έτσι προκύπτει η γκαουσιανή κατανομή, η οποία όμως όπως παρατηρείται στο παραπάνω διάγραμμα

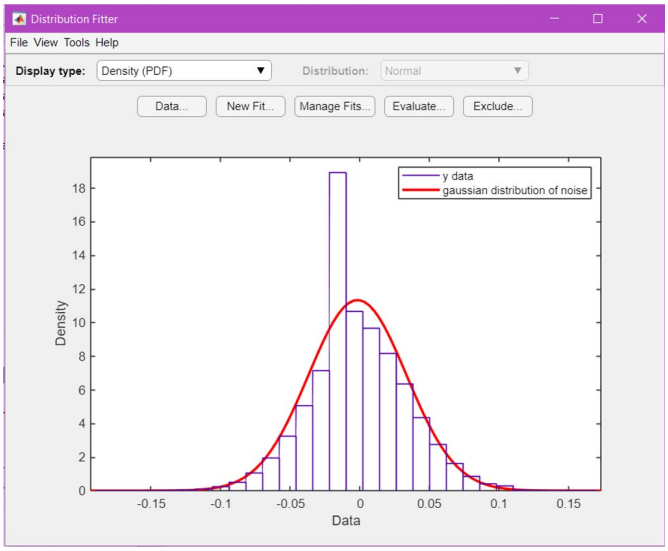
δεν είναι ίδια με την PDF. Αυτό συμβαίνει γιατί η μεταβλητή είναι διακριτή και όχι συνεχής, λόγω της πεπερασμένης ακρίβειας του μετατροπέα που διαθέτουμε.

Συγκεκριμένα, ένα ιστόγραμμα είναι μια γραφική αναπαράσταση της κατανομής των δεδομένων. Στο πλαίσιο των ADC και της επεξεργασίας σήματος, ένα ιστόγραμμα δείχνει πόσο συχνά εμφανίζεται κάθε ένα από τα διακριτά επίπεδα ή bins στο ψηφιοποιημένο σήμα, δηλαδή δείχνει την πυκνότητα. Ο άξονα x του ιστογράμματος αναπαριστά τα διακριτά επίπεδα και ο άξονα y αναπαριστά τον αριθμό των εμφανίσεων για κάθε bin. Ακόμη, το ιστόγραμμα δείχνει πυκνότητα, δείχνει δηλαδή πόσο συχνά εμφανίζεται μια συγκεκριμένη τιμή στο σύνολο των τιμών. Από τη στιγμή που δεν υπάρχει δυνατότητα απεικόνισης οποιαδήποτε τιμής, οι τιμές που πλησιάζουν την τιμή που πραγματικά εμφανίζεται στο σήμα, αποκτούν μεγαλύτερη πυκνότητα και για αυτό το λόγο το ιστόγραμμα φαίνεται "ψηλότερο" σε σχέση με την κανονική κατανομή.

Για να διορθωθεί η λανθασμένη απεικόνιση του κατά τα άλλα λογικού αποτελέσματος που έχει προκύψει, θα πρέπει να προσαρμόσουμε κατάλληλα τα bins. Η αύξηση του αριθμού των bins, δηλαδή η υψηλότερη ανάλυση, επιτρέπει την αναπαράσταση μικρότερων αλλαγών με μεγαλύτερη ακρίβεια, με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ιστογράμματος με στενότερες κορυφές και πιο λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με το σήμα. Αντιθέτως, η μείωση του αριθμού των bins, δηλαδή η μείωση της ανάλυσης, έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερα βήματα κβαντισμού καθιστώντας δυσκολότερη τη διάκριση μικρών μεταβολών στο σήμα, και οδηγεί σε ένα ιστόγραμμα το οποίο έχει ευρύτερες κορυφές. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου πειράματος, η μείωση του αριθμού των bins βοηθά στην σύγκριση με την κανονική κατανομή. Αρχικά θα μειώσουμε τον αριθμό των bins σε 50, αλλά το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό, οπότε θα μειώσουμε στη συνέχεια τον αριθμό των bins σε 30.



Εικόνα 25. Μείωση του αριθμού των bins σε 50 για καλύτερο fitting



Εικόνα 24. Μείωση του αριθμού των bins σε 30 για καλύτερο fitting

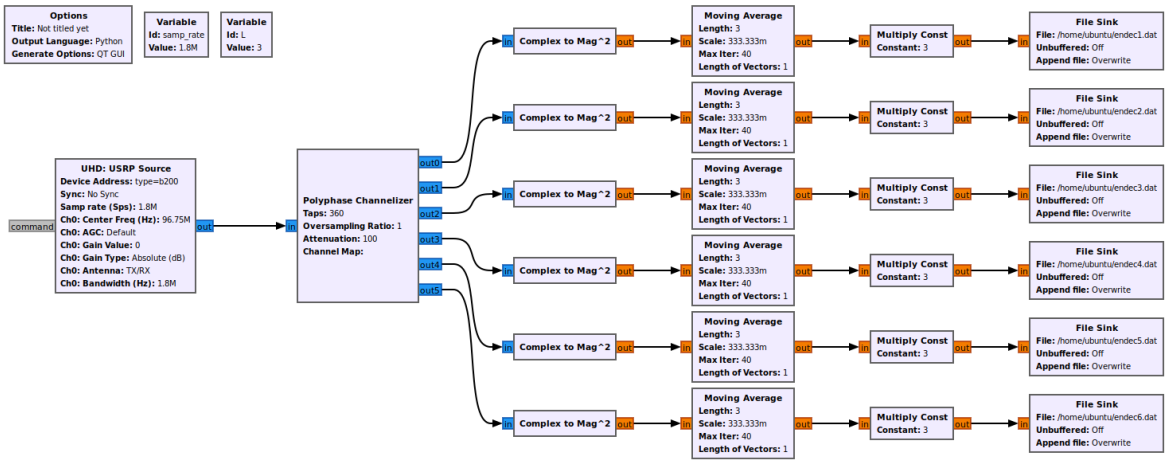
Κατά συνέπεια, η ανάλυση αποδεικνύει ότι η φύσει το θορύβου ακολουθεί τα χαρακτηριστικά του Προσθετικού Γκαουσιανού Λευκού Θορύβου - Additive Gaussian White Noise (AWGN), εφόσον τα δεδομένα του παρουσιάζουν συμμόρφωση με τα χαρακτηριστικά μιας Κανονικής ή αλλιώς Γκαουσιανής κατανομής. Ο προσδιορισμός θορύβου AWGN επιτρέπει την περαιτέρω ανάλυση επιτρέποντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με την ισχύ του θορύβου στα επόμενα βλήματα. Αυτό διευκολύνει τον ακριβέστερο και αποδοτικότερο προσδιορισμό των κατωφλίων.

7.1.2 Μέτρηση ενέργειας και εύρεση κατωφλίων

Αφού αποδείξαμε ότι τα δεδομένα θορύβου ακολουθούν κανονική κατανομή, επόμενο βήμα είναι η μέτρηση της ενέργειας για κάθε κανάλι, και συνεπώς ο υπολογισμός κατωφλίου του κάθε καναλιού.

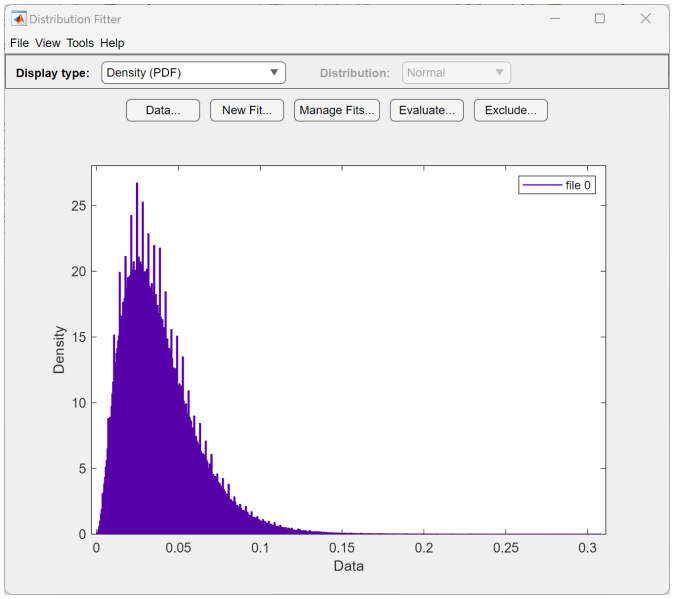
Από την έξοδο του φίλτρου για κάθε κανάλι λαμβάνουμε δείγματα της μορφής x_0, x_1, x_2, …, x_N και κάθε δείγμα είναι της μορφής $x=\alpha+i\beta$ και ακολουθεί μιγαδική γκαουσιανή κατανομή. Συγκεκριμένα το α και το β ακολουθούν Γκαουσιανή κατανομή της μορφής $N(0,\sigma^2)$ το καθένα, οπότε προκύπτει ότι η x ακολουθεί Complex Gaussian κατανομή της μορφής $N(0,2\sigma^2)$. Η ισχύς του κάθε δείγματος είναι η απόλυτη τιμή του υψωμένη εις το τετράγωνο, δηλαδή $|x_0|^2$, $|x_1|^2$, $|x_2|^2$,…, $|x_N|^2$. Από την άθροιση της ισχύος του κάθε δείγματος προκύπτει μια εκτίμηση της ενέργειας η οποία συμβολίζεται με Τ, μια τυχαία μεταβλητή η οποία ακολουθεί την κατανομή Γάμμα, δηλαδή : $T=|x_0|^2 + |x_1|^2 + |x_2|^2 +…+ |x_N|^2$. Ο αριθμός L των δειγμάτων που αθροίζονται επιλέγεται αναλόγως, με σκοπό να χωριστεί το κανάλι σε μικρότερα κομμάτια στο χρόνο. Η κατανομή Γάμμα που ακολουθεί η τυχαία μεταβλητή Τ, μοιάζει με την Γκαουσιανή Κατανομή που ακολουθεί ο θόρυβος με τη διαφορά ότι δεν είναι συμμετρική και επίσης είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά. Η κατανομή Γάμμα είναι της μορφής $\Gamma(\alpha,\beta)$ όπου $\alpha=L$ και $\beta=2\sigma^2=\sigma'^2$.

Για να γίνουν οι συγκεκριμένες πράξεις στο GNURadio και να έχουμε μια εκτίμηση της ενέργειας θα κάνουμε ορισμένες αλλαγές στο flowgraph. Συγκεκριμένα θα χρησιμοποιήσουμε το block “Complex to Mag^2”, στο οποίο θα εισαχθεί το μιγαδικό σήμα και θα υψωθεί εις το τετράγωνο. Η έξοδος του συγκεκριμένου block εισέρχεται ύστερο στο block “Moving Average”, το οποίο υπολογίζει έναν κινητό μέσο όρο της εισόδου output[i]=scale*sum(input[i-length:i]). Για να υπολογίσουμε την ενέργεια, και όχι τον μέσο όρο, θα πολλαπλασιάσουμε την έξοδο με την σταθερά L, δηλαδή τον αριθμό των δειγμάτων. Η σταθερά L παίζει καθοριστικό ρόλο στην έξοδο του μπλοκ “Moving Average” και χρησιμεύει ως παράγοντας κλιμάκωσης, επηρεάζοντας το πλάτος του σήματος που προκύπτει. Όταν το L είναι σχετικά μικρό, η επίδραση της κλιμάκωσης μειώνεται, ενώ όταν το L είναι σχετικά μεγάλο η απόκριση του κινητού μέσου όρου ενισχύεται, παρέχοντας μια πιο έντονη αναπαράσταση της ενέργειας του σήματος. Ουσιαστικά, η προσαρμογή της σταθεράς L επιτρέπει τον έλεγχο της ευαισθησίας της εκτίμησης της ενέργειας.

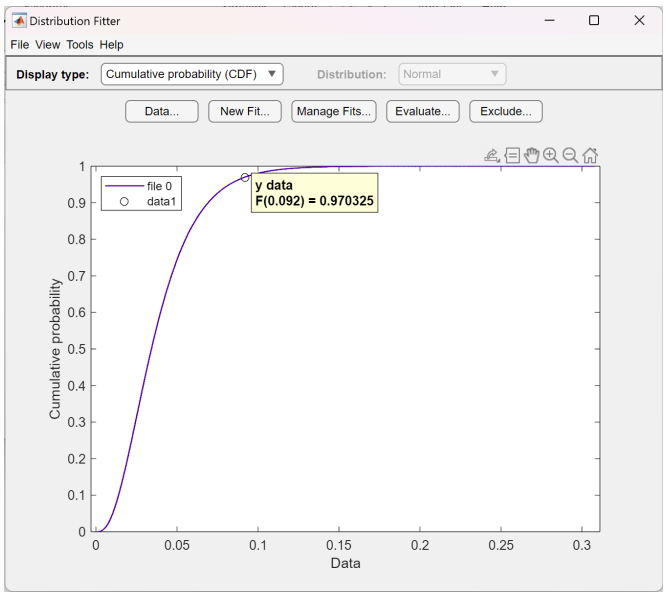


Εικόνα 26. Διάγραμμα ροής Ενεργειακού Ανιχνευτή στο GNURadio Companion

Ανοίγοντας τα αρχεία τα οποία προκύπτουν από το flowgraph στο Matlab, στο Distribution Fit Tool, βλέπουμε τη Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας του θορύβου η οποία πράγματι ακολουθεί την κατανομή Γάμμα. Ύστερα, με τη βοήθεια της Cumulative Probability Function και επιλέγοντας την επιθυμητή Πιθανότητα Ψευδούς Ανίχνευσης μπορούμε να επιλέξουμε το κατάλληλο κατώφλι. Έστω ότι P_{FA}=3% , τότε το κατώφλι είναι ίσο με threshold=0.092. Η τιμή κατωφλίου που προέκυψε, είναι ίδια για όλα τα κανάλια.



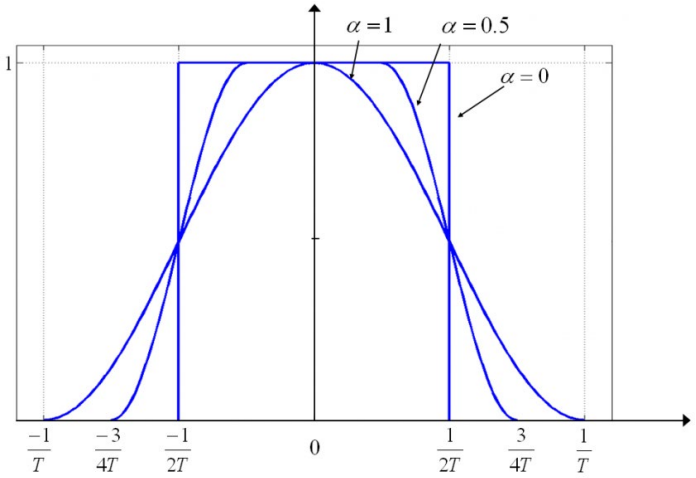
Εικόνα 28. Probability Density Function του θορύβου η οποία ακολουθεί την κατανομή Γάμμα



Εικόνα 27. Cumulative Probability Function του θορύβου για PFA=3% και threshold=0.092.

Παραπάνω προκύπτει ότι τα κατώφλια είναι ίδια για κάθε κανάλι. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η λειτουργία του Polyphase Channelizer στο GNU Radio δεν είναι η επιθυμητή. Αντί να πραγματοποιεί κατάτμηση του σήματος, πραγματοποιεί απλώς αποδεκατισμό, με αποτέλεσμα όλα τα κανάλια να έχουν το ίδιο περιεχόμενο. Το μπλοκ δηλαδή στην αρχική του μορφή δεν πραγματοποιεί φιλτράρισμα. Για το λόγο αυτό θα υλοποιήσουμε ένα Root Raised Cosine φίλτρο το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε στον καναλοποιητή, και ύστερα θα μετρήσουμε εκ νέου τα κατώφλια.

Μέσω Matlab, δημιουργούμε τους συντελεστές του Root Raised Cosine (RRC) φίλτρου, τους οποίους και εισάγουμε ως μεταβλητή στον Polyphase Channelizer. Το φίλτρο αυτό δεν είναι πολύ αυστηρό, δηλαδή το σήμα δεν μεταβαίνει γρήγορα από τη ζώνη διέλευσης στη ζώνη διακοπής. Αυτό το καθορίζει ο παράγοντας roll-off του φίλτρου, ο οποίος συμβολίζεται και με α, και ισχύει ότι 0<α<1. Όταν ο παράγοντας roll-off ενός φίλτρου είναι μεγάλος, η μετάβαση μεταξύ της ζώνης διέλευσης και της ζώνης διακοπής είναι πιο αργή. Υπάρχουν επίσης αυστηρότερα φίλτρα, των οποίων η υλοποίηση είναι πολλές φορές μη εφικτή, καθώς όσους περισσότερους συντελεστές έχει ένα φίλτρο, τόσους περισσότερους πολλαπλασιασμούς θα πρέπει να εκτελέσει. Αυτό συνεπάγεται ανάγκη για περισσότερο χρόνο και περισσότερη υπολογιστική ισχύ.



Εικόνα 29. RRC φίλτρα για διαφορετικούς παράγοντες roll-off

Ύστερα, μετρήθηκαν εκ νέου κατώφλια, καθώς λόγω της προσθήκης του φίλτρου στον Polyphase Channelizer, το σύστημα λειτουργεί πλέον διαφορετικά. Όπως και πριν, υπολογίζουμε τα κατώφλια, βρίσκοντας στην συνάρτηση CDF τους το σημείο που αντιστοιχεί σε πιθανότητα ψευδούς ανίχνευσης ίση με 3% για κάθε κανάλι. Τα νέα κατώφλια τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα βρίσκονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Τιμές κατωφλίων - Σύστημα με 6 κανάλια

Κανάλι	**Τιμή Κατωφλίου**
0	4e-07

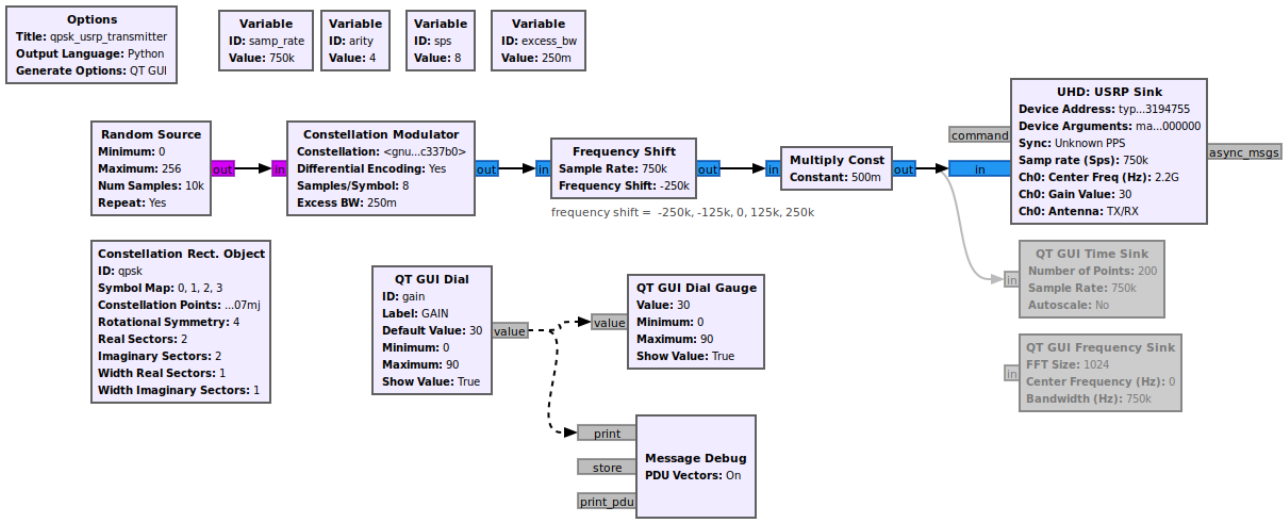
1	9.4e-08
2	7.7e-08
3	5.6e-08
4	7.75e-08
5	9.4e-08

7.2 Περιβάλλον εκπομπής-λήψης UDFT βασισμένο σε QPSK

Στη συγκεκριμένη ενότητα, βασισμένο στο πείραμα της ενότητας 7.1, θα υλοποιηθεί με τη βοήθεια του GNU Radio Companion, ένα πραγματικό περιβάλλον εκπομπής-λήψης βασισμένο σε QPSK χρησιμοποιώντας πλατφόρμες USRP. Συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθούν δύο USRP, ένα σε ρόλο πομπού και ένα σε ρόλο δέκτη.

7.2.1 Πομπός QPSK

Το πρώτο βήμα για την υλοποίηση του περιβάλλοντος το οποίο προαναφέρθηκε, είναι η μετάδοση του σήματος QPSK. Αρχικά, παράγεται μια ροή bit μέσω του μπλοκ “Constellation Rect. Object”, η οποία διαμορφώνεται σε ένα μιγαδικό σηματαστερισμό, μέσω του μπλοκ “Constellation Modulator”. Τα μπλοκ “QT GUI Dial” και “Dial Gauge” εισάγονται για να προσφέρουν τη δυνατότητα αλλαγής του κέρδους χωρίς να χρειάζεται να σταματήσει η λειτουργία του πομπού για να γίνει χειροκίνητα η αλλαγή, μιας και τα συγκεκριμένα μπλοκ είναι run-time adjustable.



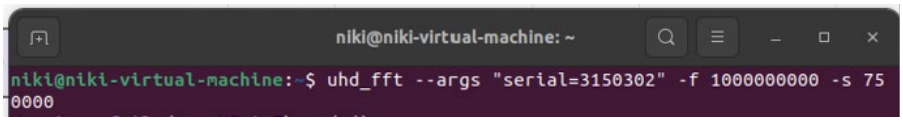
Εικόνα 30. Διάγραμμα ροής πομπού QPSK με χρήση USRP

Το μπλοκ “Frequency Shift” είναι ικανό να μετατοπίζει την κεντρική συχνότητα εκπομπής, στοχεύοντας στην μετάδοση του παλμού σε διαφορετικά κανάλια, ανάλογα με τον ρυθμό δειγματοληψίας και την τιμή η οποία θα εισαχθεί στο πεδίο Frequency Shift του ομώνυμου μπλοκ, και η οποία υποδεικνύει κατά πόσο θα μετατοπιστεί η κεντρική συχνότητα στον άξονα x. Ο ρυθμός δειγματοληψίας του πειράματος είναι 750.000 Hz, και τα κανάλια στον δέκτη είναι 6. Στο συγκεκριμένο σύστημα τίθεται σε εφαρμογή το θεώρημα Nyquist, το οποίο ορίζει ότι η μέγιστη συχνότητα που μπορεί να αναπαρασταθεί είναι το ήμισυ του ρυθμού δειγματοληψίας. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό και έχοντας ρυθμό δειγματοληψίας 750.000 Hz, το έγκυρο εύρος συχνοτήτων είναι από -375.000 Hz έως 375.000 Hz. Επομένως οι μετατοπίσεις φάσης θα είναι οι -250.000 Hz, -125.000 Hz, 0 Hz, 125.000 Hz και 250.000 Hz. Παρατηρείται ότι οι δυνατές μετατοπίσεις φάσης είναι πέντε, ενώ τα διαθέσιμα κανάλια είναι έξι. Αυτό συμβαίνει γιατί τα κανάλια θα πρέπει να τοποθετηθούν με τρόπο που να καλύπτει το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων, χωρίς επικάλυψη ή πλεονασμό. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ένα από τα κανάλια μοιράζεται στην αρχή και στο τέλος του άξονα x, είναι αναδιπλούμενο και συνεπώς δεν χρησιμοποιείται.

Εφόσον πραγματοποιηθεί η διαμόρφωση του παλμού σε ένα από τα πέντε πλέον διαθέσιμα κανάλια, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το εργαλείο “uhd_fft” (του USRP) μέσω του τερματικού, σε συνδυασμό με τον συγχρονισμένο δέκτη USRP τον οποίο θα συντονισμένος στη συχνότητα το πομπού. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να διαπιστώσουμε εάν όντως ο δέκτης λαμβάνει το σήμα που μεταδίδει ο πομπός, και εάν η μετατόπιση της συχνότητας ήταν αποτελεσματική. Η εκτέλεση της εντολής “uhd_fft, αποδίδει την φασματική αναπαράσταση του σήματος, προσφέροντας πληροφορίες σχετικά με πιθανές παρεμβολές φασματική διαρροή και άλλα χαρακτηριστικά του μεταδιδόμενου σήματος.

Η επιλεγμένη συχνότητα για το συγκεκριμένο σύστημα βρίσκεται στα 2.2 GHz, μια σκόπιμη επιλογή για την ελαχιστοποίηση των επιπλοκών που προκύπτουν από ταυτόχρονες μεταδόσεις από διαφορετικά συστήματα. Με την επιλογή μιας συχνότητας η οποία είναι απαλλαγμένη από πρόσθετες μεταδόσεις, η διαδικασία μετάδοσης και λήψης απλοποιείται και η εξέταση του σήματος γίνεται πιο σαφής. Η συγκεκριμένη επιλογή συχνότητας συμβάλλει σε μια πιο ελεγχόμενη και αξιόπιστη αξιολόγηση, εξασφαλίζοντας ότι η παρατηρούμενη φασματική αναπαράσταση εκφράζει με περισσότερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά του μεταδιδόμενου σήματος, χωρίς να υπάρχουν εξωτερικές παρεμβολές.

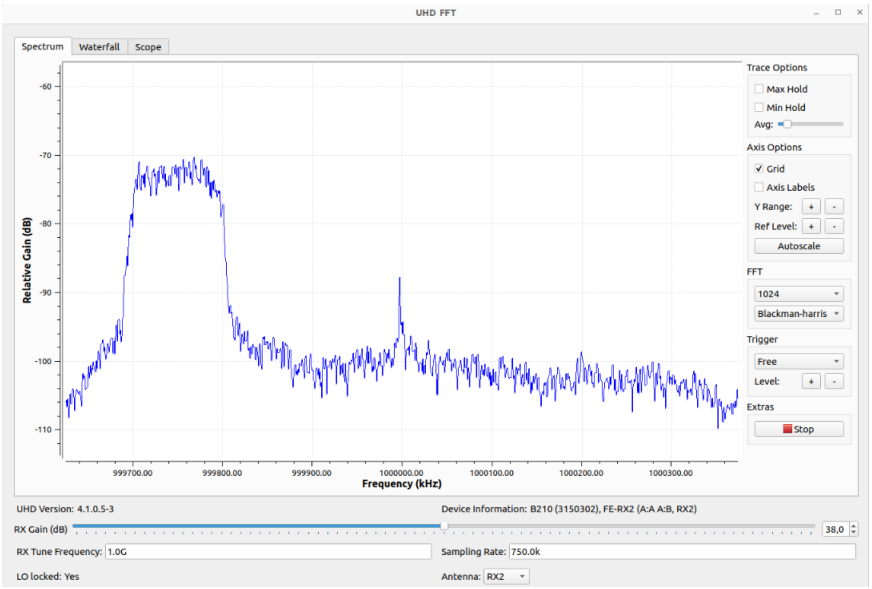
Παρακάτω υπάρχει μια ενδεικτική εκτέλεση της εντολής “uhd_fft” για το USRP με σειριακό αριθμό 3150302, σε συχνότητα 1GHz και ρυθμό δειγματοληψίας 750.000Hz.



Εικόνα 31. Εντολή στο τερματικό η οποία υλοποιεί τον uhd_fft

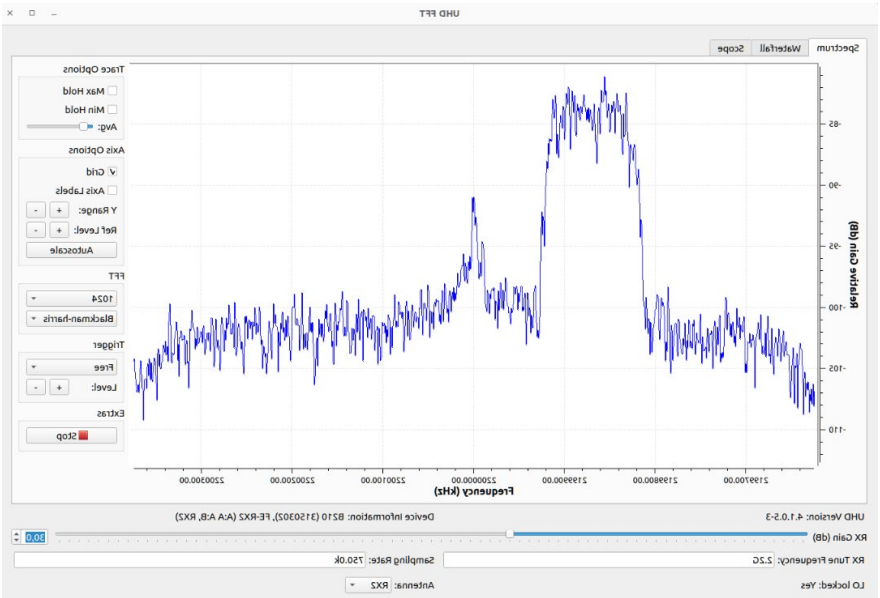
Το αποτέλεσμα της παραπάνω εντολής αναπαρίσταται στις παρακάτω εικόνες, για διαφορετικές μετατοπίσεις φάσης και διαφορετικά κέρδη.

Για παράδειγμα, για μετατόπιση φάσης -250.000, εκτίμηση του φάσματος του παλμού που μεταδίδεται είναι η εξής :



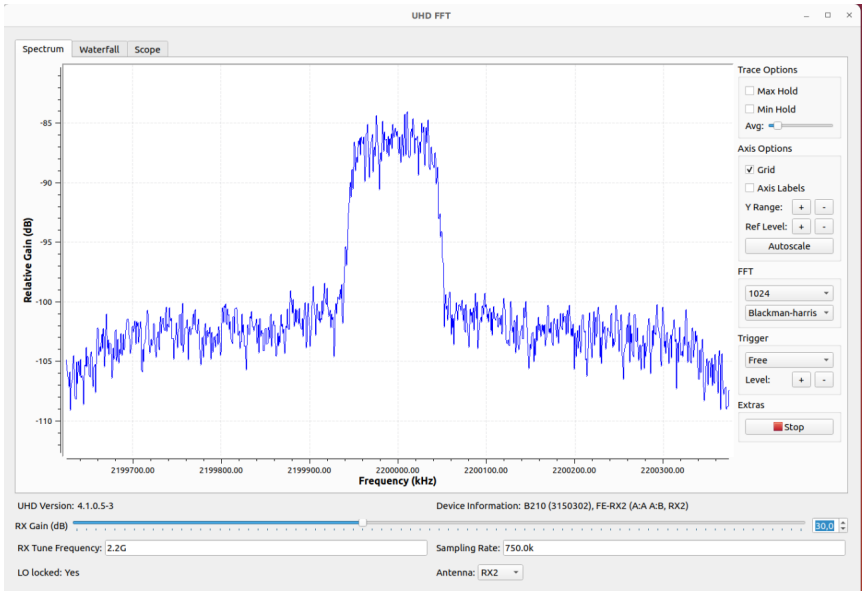
Εικόνα 32. Uhd_fft μετατόπιση φάσης = -250.000

Για μετατόπιση φάσης -125.000, ο παλμός που μεταδίδεται είναι ο εξής :



Εικόνα 33. : Uhd_fft μετατόπιση φάσης = -125.000

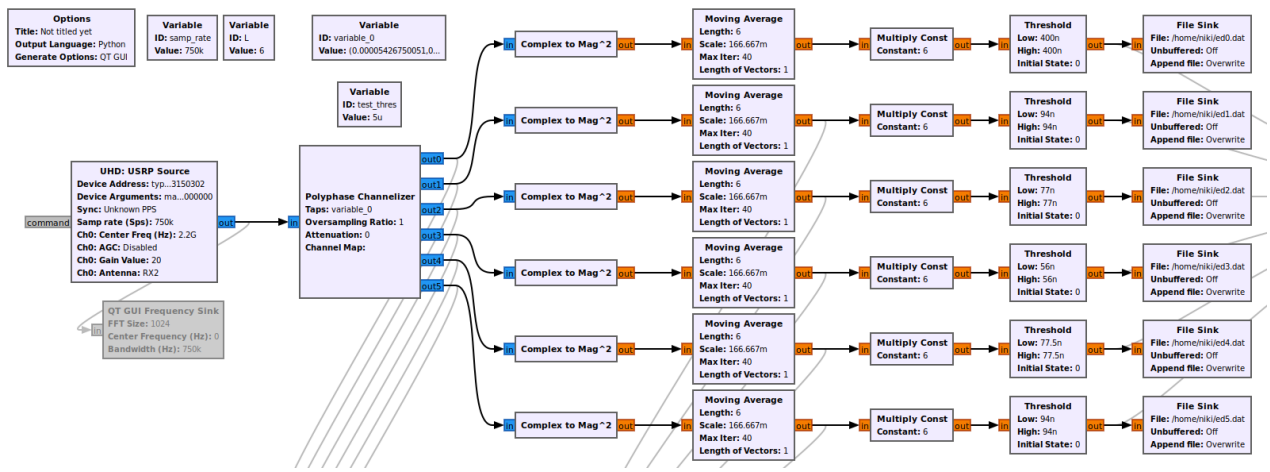
Ενώ για μηδενική μετατόπιση φάσης, είναι ο εξής :



Εικόνα 34. Uhd_fft μετατόπιση φάσης = 0

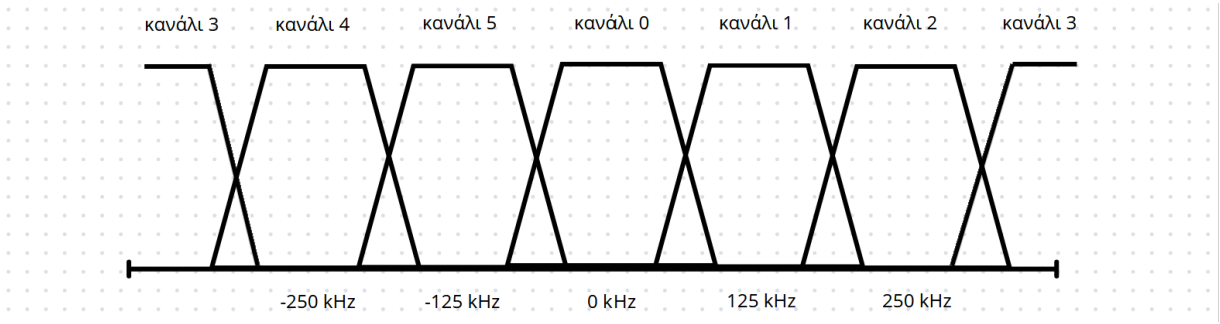
7.2.2 Ο δέκτης του συστήματος

Στον δέκτη του συστήματος προσθέτουμε τα “Threshold” blocks, τα οποία τοποθετούμε ακριβώς πριν τα File Sinks. Ως τιμή στα “Threshold” blocks εισάγουμε την τιμή του κατωφλίου που υπολογίσαμε προηγουμένως για κάθε κανάλι, τόσο στο Low όσο και στο High. Αν η τιμή στην έξοδο του μπλοκ ισούται με 1, συνεπάγεται ότι η υπόθεση η οποία επιλέχθηκε από το σύστημα είναι η H1, δηλαδή ότι υπάρχει σήμα. Αντιθέτως αν η τιμή στην έξοδο είναι ίση με 0, σημαίνει ότι η υπόθεση που επιλέχθηκε είναι η H0, δηλαδή ότι δεν υπάρχει σήμα αλλά θόρυβος. Τα κατώφλια που υπολογίστηκαν, υπάρχουν στον Πίνακα 4, και τοποθετούνται στα αντίστοιχα μπλοκ στην Εικόνα 35.



Εικόνα 35. Περιβάλλον Πομπού-Δέκτη, Δέκτης με 6 κανάλια

Αφού έχουν υπολογιστεί τα κατώφλια για κάθε κανάλι, θα ξεκινήσουμε την εκπομπή του σήματος μέσω του πομπού, για όλα τα phase shifts ξεκινώντας από το -250.000 και καταλήγοντας στο 250.000 σε Hz. Αναλόγως με το εκάστοτε phase shift, ο παλμός που μεταδίδεται θα αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο κανάλι. Το file sink που αντιστοιχεί σε αυτό το κανάλι θα έχει μεγαλύτερο αριθμό άσσων, αφού εκεί συγκεντρώνεται το σήμα. Καθώς το φίλτρο που έχουμε εφαρμόσει δεν είναι πολύ απότομο, όπως προαναφέρθηκε, θα πρέπει να εξεταστούν και τα ακριβώς γειτονικά κανάλια του καναλιού εκπομπής για τυχόν φασματικές διαρροές. Με τη βοήθεια του Dial Gauge που υπάρχει στον πομπό, θα πάρουμε μετρήσεις για κέρδη από 0 μέχρι 90 με βήμα 5, για να εντοπίσουμε την αναλογία μηδενικών και άσσων στα αρχεία που αντιστοιχούν στα κανάλια ενδιαφέροντος. Αξίζει να αναφερθεί, για την καλύτερη κατανόηση του πειράματος, ότι για μετατόπιση φάσης ίση με -250.000 Hz τα κανάλια ενδιαφέροντος θα είναι τα (3,4,5), για -125.000 Hz θα είναι τα (0,4,5), για 0 Hz θα είναι τα (0,1,5), για 125.000 Hz θα είναι τα (0,1,2) και για 250.000 Hz θα είναι τα (1,2,3). Όσον αφορά τα κανάλια ενδιαφέροντος, τα κεντρικά κανάλια αφορούν τα κανάλια στα οποία στοχεύει ο πομπός την μετάδοση του παλμού, ενώ τα δύο γειτονικά αφορούν τα κανάλια στα οποία είναι πιθανόν να υπάρξει φασματική διαρροή ενός τμήματος του επιθυμητού σήματος.



Εικόνα 36. UDFT κανάλια και phase shifts

Ακόμη, αξίζει να αναφερθεί ότι ανάλογα με το κέρδος το οποίο έχει επιλεχθεί στον πομπό, στην έξοδο των threshold blocks παρατηρούνται διαφορετικές αναλογίες μηδενικών και άσσων. Για χαμηλότερα κέρδη στον πομπό παρατηρούνται περισσότερα μηδενικά, ενώ για υψηλότερα κέρδη παρατηρούνται περισσότεροι άσσοι. Αυτό είναι απολύτως λογικό γιατί έχοντας υψηλότερο κέρδος μετάδοσης το σήμα φτάνει στον δέκτη με μεγαλύτερη ισχύ. Βέβαια, καθώς ενισχύεται το σήμα, πολλές φορές ενισχύεται και ο θόρυβος, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό.

7.2.3 Πιθανότητα Χαμένης Ανίχνευσης

Ο συνολικός αριθμός των μηδενικών που παρατηρούνται, προς το συνολικό αριθμό των δειγμάτων που παρατηρούνται, μας δίνει την πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης. Για κάθε μετατόπιση φάσης εξετάζουμε τα κανάλια στα οποία γίνεται η εκπομπή του παλμού, και συγκεκριμένα το περιεχόμενο των αρχείων στα οποία αντιστοιχούν τα συγκεκριμένα κανάλια. Τα δεδομένα τα οποία υπάρχουν στα file sinks αυτά, αναλύονται μέσω Matlab και έτσι προκύπτει ένα διάγραμμα

του οποίου ο άξονας x αντιπροσωπεύει το εκάστοτε κέρδος στον πομπό, ενώ ο άξονας y αντιπροσωπεύει την πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης – probability of missed detection (P_{MD}). Παρατηρείται ότι πράγματι η πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης μειώνεται ή ακόμη γίνεται μηδενική για μεγαλύτερα κέρδη εκπομπής. Παρακάτω βρίσκουμε τα κανάλια ενδιαφέροντος, δηλαδή το κανάλι στο οποίο υπάρχει η κύρια εκπομπή και τα ακριβώς γειτονικά του, για μετατόπιση φάσης ίση με -250.000, και ύστερα με τους τύπους της Εικόνας 36, υπολογίζουμε τις πιθανότητες χαμένης ανίχνευσης για κάθε κέρδος από 0 μέχρι 90 με βήμα 5.

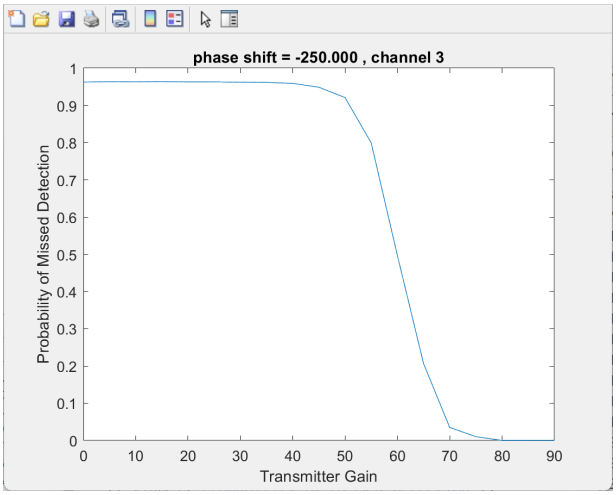
```
Command Window
>> ind=find(values==0);
   Pmd=length(ind)/length(values)
```

Εικόνα 37. Τύπος Εύρεσης Πιθανότητας Χαμένης Ανίχνευσης

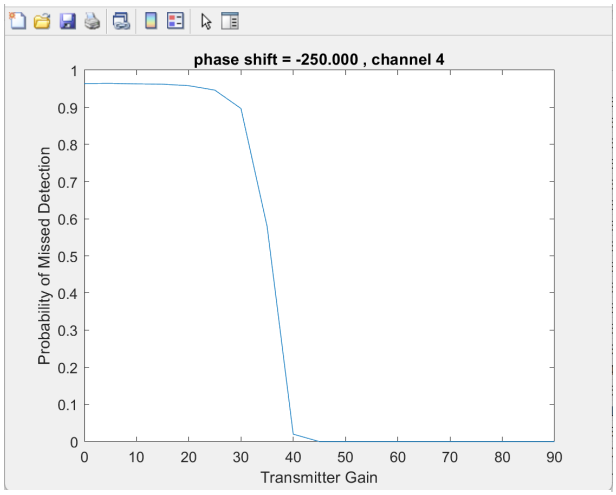
Πίνακας 5. Πιθανότητες Χαμμένης Ανίχνευσης - Κέρδους για τα κανάλια ενδιαφέροντος και Μετατόπιση Φάσης ίση με -250.000Hz

Κέρδος	P_{MD} - Κανάλι 3	P_{MD} - Κανάλι 4	P_{MD} - Κανάλι 5
0	0.9626	0.964	0.9653
5	0.9636	0.9644	0.9652
10	0.9633	0.963	0.9656
15	0.9639	0.9622	0.9646
20	0.963	0.9582	0.9652
25	0.963	0.9462	0.9647
30	0.9622	0.8967	0.9644
35	0.9617	0.5796	0.9641
40	0.9591	0.0199	0.9648
45	0.9487	5.81e-05	0.9648
50	0.9209	5.95e-05	0.9644
55	0.7992	3.96e-05	0.9625
60	0.497	4.35e-05	0.9597
65	0.2066	3.73e-05	0.9479
70	0.0349	4.10e-05	0.8651
75	0.0101	5.18e-05	0.7136
80	6.12e-05	4.21e-05	0.599
85	2.98e-05	3.92e-05	0.13
90	2.15e-05	4.29e-05	0

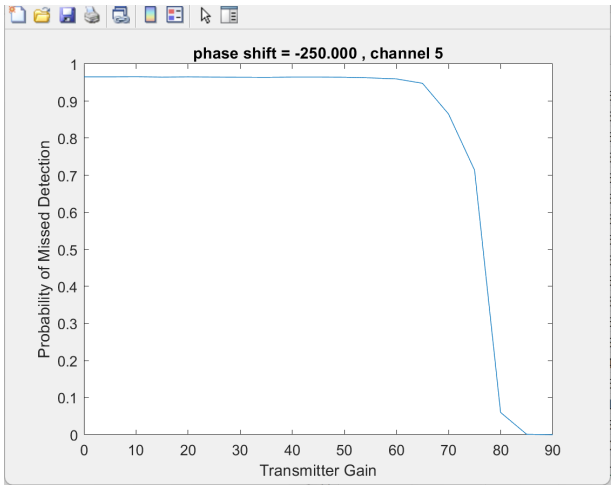
Τα κανάλια στα οποία στοχεύει η εκπομπή για μετατόπιση συχνότητας ίση με -250.000 Hz είναι τα 3,4 και 5. Ο παλμός βρίσκεται κυρίως στον κανάλι 5, ενώ κομμάτι του σήματος διαρρέεται και στα γειτονικά του κανάλια, δηλαδή στα κανάλια 3 και 4. Παρακάτω απεικονίζονται τα διαγράμματα Κέρδους – Χαμένης Ανίχνευσης για κάθε ένα από τα κανάλια ενδιαφέροντος στη συγκεκριμένη περίπτωση. Παρατηρούμε ότι η πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης έχει τιμή ίση με 1 για χαμηλότερα κέρδη εκπομπής. Υπενθυμίζεται ότι η πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης αφορά τις περιπτώσεις που το σύστημα έχει θεωρήσει ότι δεν υπάρχει σήμα, ενώ στην πραγματικότητα υπάρχει. Η πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης θα πρέπει να μειώνεται όσο αυξάνεται το κέρδος εκπομπής. Αυτό όντως συμβαίνει, όπως μπορούμε να δούμε από τον πίνακα αλλά και από τα διαγράμματα, και κυρίως στο το κανάλι στο οποίο υπάρχει η κύρια εκπομπή, όπου η πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης αρχίζει να μειώνεται κατά πολύ για κέρδος πομπού ίσο με 35-40 dB.



Εικόνα 38. Διάγραμμα Κέρδους - Χαμένης Ανίχνευσης, Κανάλι 3, Μετατόπιση Φάσης = -250.000 Hz

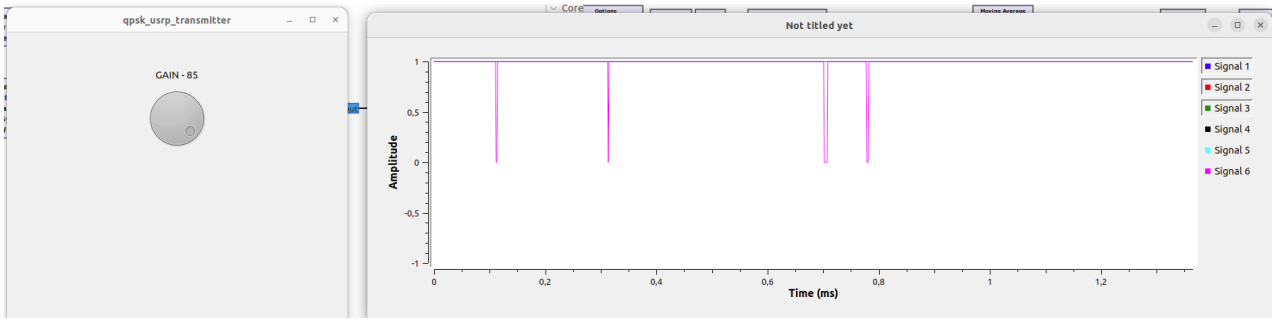


Εικόνα 39. Διάγραμμα Κέρδους - Χαμένης Ανίχνευσης, Κανάλι 4, Μετατόπιση Φάσης = -250.000 Hz

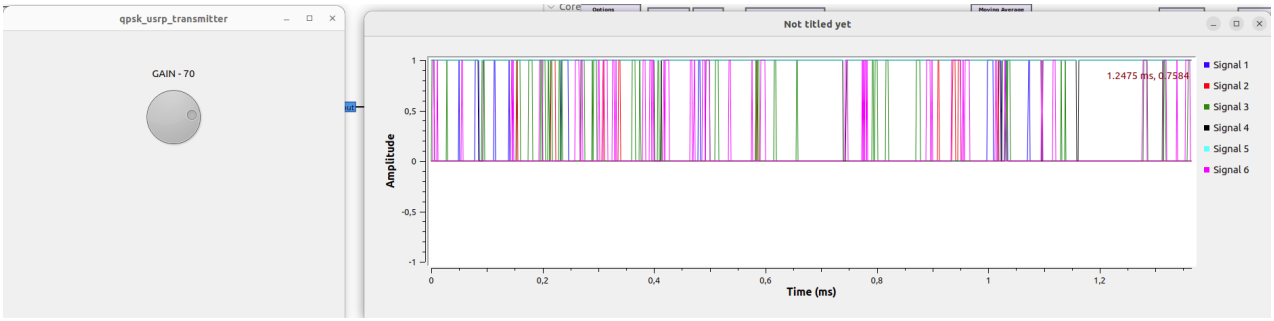


Εικόνα 40. Διάγραμμα Κέρδους - Χαμένης Ανίχνευσης, Κανάλι 5, Μετατόπιση Φάσης = -250.000 Hz

Στην παρακάτω εικόνα παρατηρούμε την έξοδο του QT GUI Time Sink του δέκτη. Έχουμε επιλέξει να απεικονίζονται μόνο οι έξοδοι των καναλιών ενδιαφέροντος, για κέρδος στον πομπό ίσο με 85. Παρατηρείται ότι για τα κανάλια 3 και 4 τα οποία αντιστοιχούν στο Signal 4 και Signal 5, η τιμή βρίσκεται μόνιμα στο 1 για το διάστημα που απεικονίζεται. Αντιθέτως η τιμές για το κανάλι 5 το οποίο αντιστοιχεί στο Signal 6, βρίσκεται στο 1 για το μεγαλύτερο διάστημα, ενώ υπάρχουν και κάποιες πτώσεις στο 0. Οι τιμές στο 0 αντιπροσωπεύουν τις χαμένες ανιχνεύσεις. Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα αυτά ταιριάζουν πράγματι με τις τιμές που βρήκαμε για τις πιθανότητες χαμένης ανίχνευσης, οι οποίες είχαν μεγαλύτερες τιμές για το κανάλι 5, και συνεπώς εμφανίζονται περισσότερες χαμένες ανιχνεύσεις για αυτό το κανάλι.



Εικόνα 41. Χαμμένες Ανιχνεύσεις QT GUI Time Sink Output



Εικόνα 42. QT GUI Time Sink Output, όλα τα κανάλια

7.3 MDFT Filter Banks και τέλεια ανακατασκευή

Η συγκεκριμένη ενότητα αφορά τις συστοιχίες φίλτρων Modified DFT . Στόχος είναι η παρατήρηση της συμπεριφοράς των συγκεκριμένων συστοιχιών, αλλά και των πλεονεκτημάτων τα οποία παρουσιάζουν. Έχουν την δυνατότητα να ακυρώνουν το φάσμα που προκύπτει από τις παρεμβολές γειτονικού καναλιού, πλησιάζοντας σχεδόν την τέλεια ανακατασκευή του αρχικού σήματος. Ακόμη, οι έξοδοι των γειτονικών MDFT φίλτρων είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, κάτι που επιτρέπει την κατασκευή ενός βέλτιστου ενεργειακού ανιχνευτή. Αν οι έξοδοι των γειτονικών καναλιών δεν ήταν ασυσχέτιστες μεταξύ τους, τότε θα ήταν απαραίτητη η χρήση ενός ενεργειακού ανιχνευτή ο οποίος εκτελεί πράξεις μεταξύ πινάκων, καθιστώντας έτσι μη πρακτική την υλοποίησή του. Επίσης αποφεύγεται η ενεργοποίηση των γειτονικών φίλτρων όταν υπάρχει

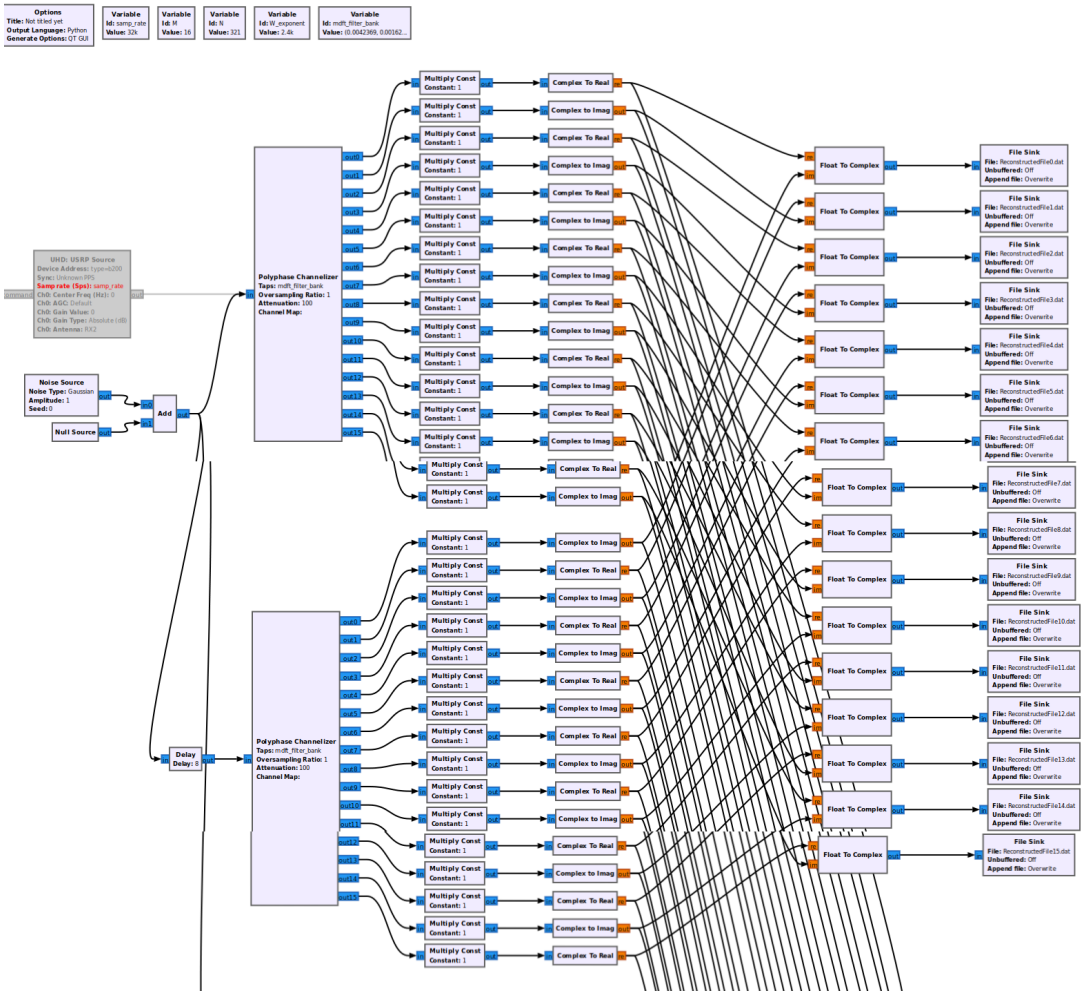
εκπομπή σε ένα συγκεκριμένο κανάλι (όπως γίνεται στο προηγούμενο παράδειγμα για τα κανάλια 3 και 5 σε υψηλές τιμές κέρδους).

Για το συγκεκριμένο πείραμα, θα υλοποιήσουμε μια MDFT τράπεζα φίλτρων με 321 συντελεστές. Οι συντελεστές έχουν παραχθεί μέσω κώδικα Matlab, και θα εισαχθούν ως διάνυσμα στο αντίστοιχο πεδίο του Polyphase Channelizer, ο οποίος ύστερα θα χωρίσει το σήμα σε 16 υποκανάλια

7.3.1 Διάγραμμα ροής συστοιχίας MDFT 16 καναλιών

Σε ένα διάγραμμα ροής του GNU Radio Companion που υλοποιεί ένα σύστημα βασισμένο στις συστοιχίες φίλτρων MDFT, το στάδιο ανάλυσης χρησιμεύει ως το αρχικό τμήμα επεξεργασίας για την αποδόμηση ή την ανάλυση ενός ευρυζωνικού σήματος εισόδου σε πολλαπλά κανάλια. Η τράπεζα φίλτρων ανάλυσης χρησιμοποιεί ένα σύνολο φίλτρων σχεδιασμένων να χωρίζουν το σήμα εισόδου σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, με κάθε φίλτρο να αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο υπό-κανάλι.

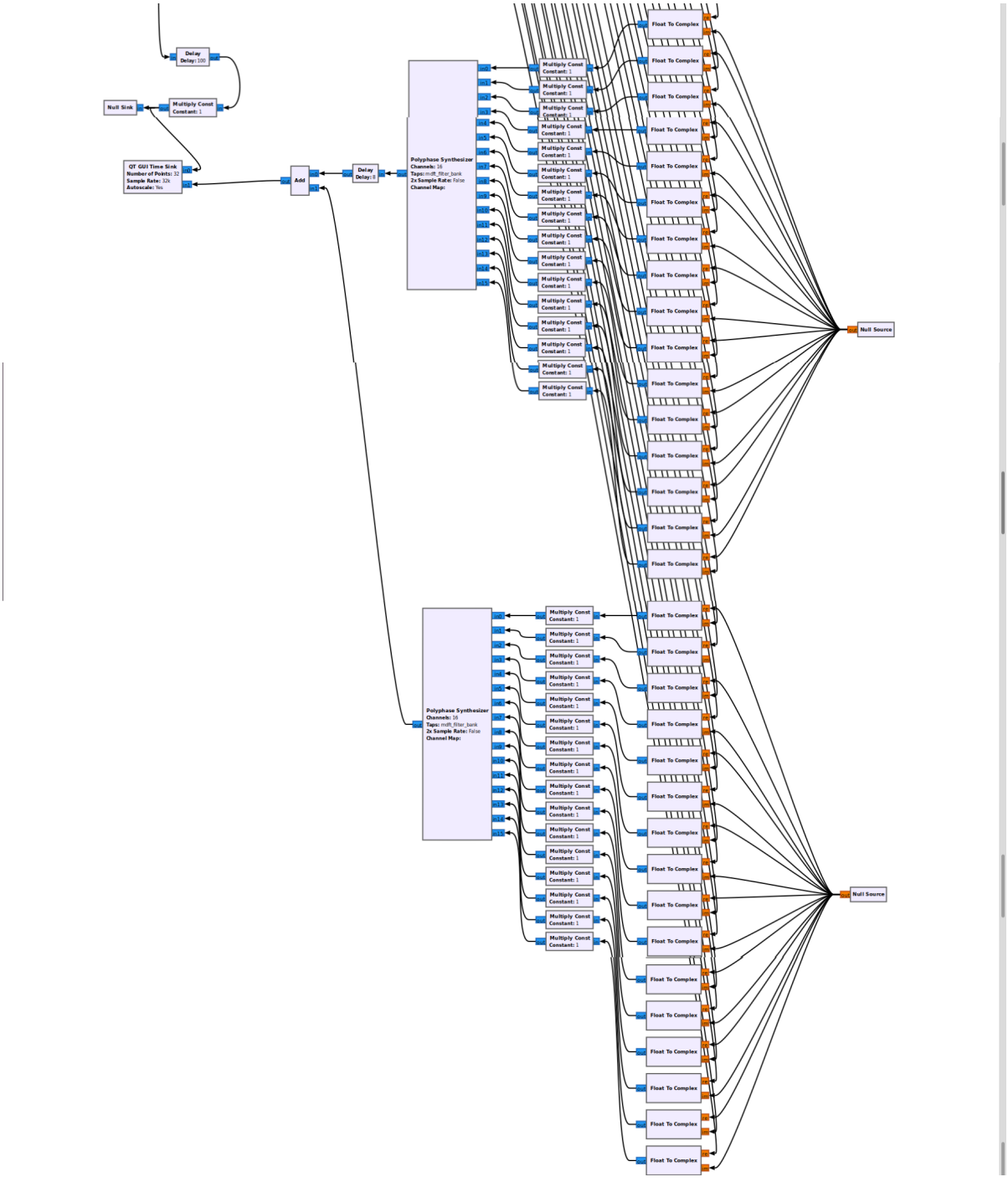
Παρακάτω απεικονίζονται τα φίλτρα ανάλυσης της συστοιχίας φίλτρων MDFT.



Εικόνα 43. Διάγραμμα ροής τράπεζας φίλτρων ανάλυσης MDFT με 16 υποκανάλια

Όσον αφορά τον τομέα της σύνθεσης τράπεζας φίλτρων MDFT στο διάγραμμα ροής, το στάδιο των φίλτρων σύνθεσης είναι υπεύθυνο για την ανακατασκευή του αρχικού σήματος ευρείας ζώνης χρησιμοποιώντας τις υποκαναλοποιημένες συνιστώσες που προέκυψαν από τα φίλτρα ανάλυσης. Τα φίλτρα σύνθεσης είναι σχεδιασμένα για να συνδυάζουν τις πληροφορίες από τα υποκανάλια, ανακατασκευάζοντας το αρχικό σήμα και ελαχιστοποιώντας την παραμόρφωση και την παρεμβολή.

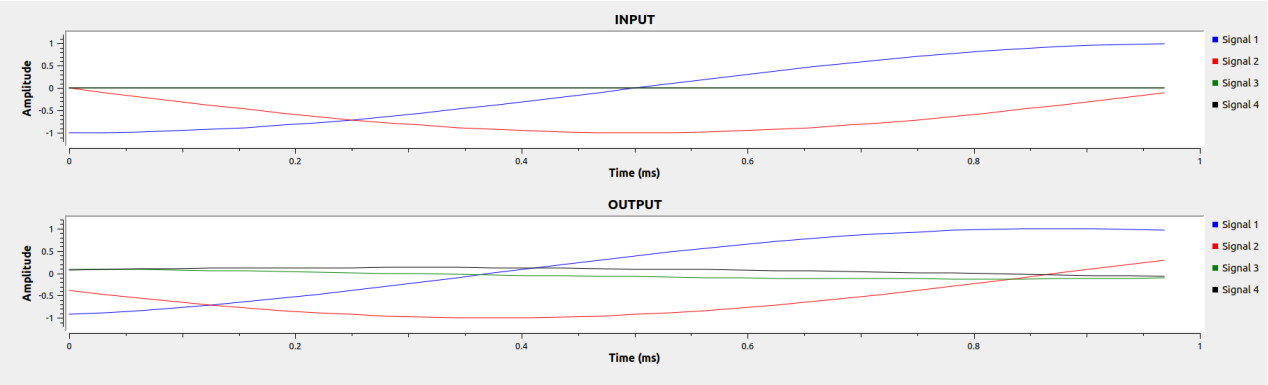
Παρακάτω απεικονίζεται η συνέχεια του προηγούμενου σχήματος, δηλαδή τα αντίστοιχα φίλτρα σύνθεσης.



Εικόνα 44. Διάγραμμα ροής τράπεζας φίλτρων σύνθεσης MDFT με 16 υποκανάλια

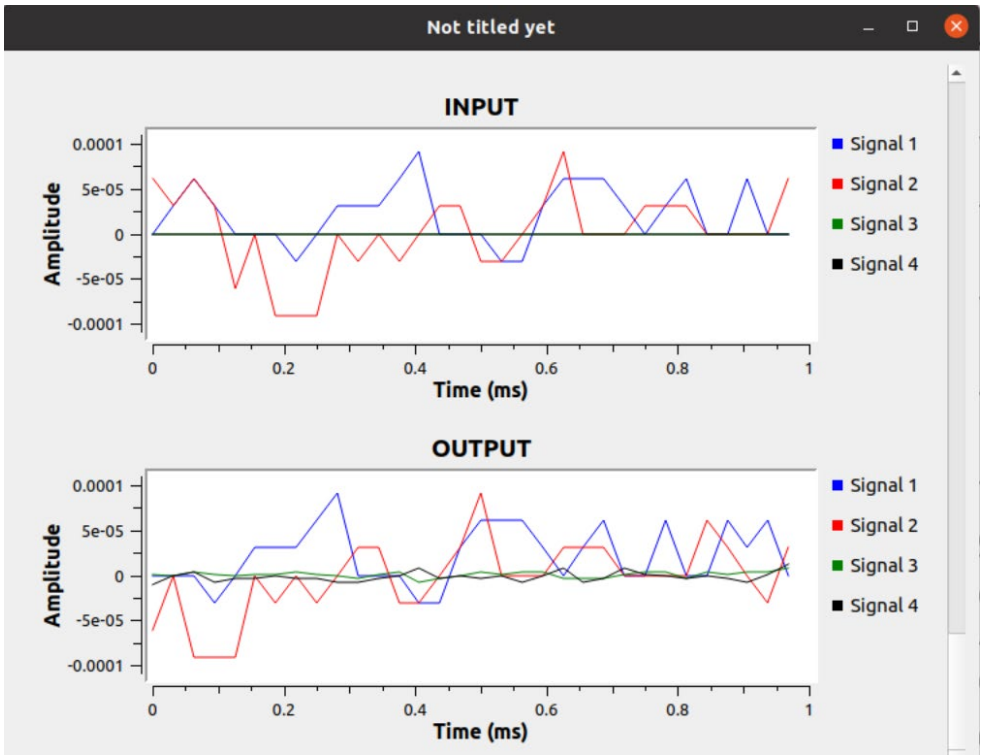
7.3.2 Ανακατασκευή του σήματος εισόδου

Σε πρώτη φάση λήφθηκαν δείγματα εισόδου τα οποία προέκυψαν από μια πηγή η οποία παράγει ημίτονα, χρησιμοποιώντας το μπλοκ “Signal Source” του Gnu Radio Companion. Το σήμα εισόδου απεικονίζεται στο πρώτο διάγραμμα, ενώ στο δεύτερο διάγραμμα απεικονίζεται το ανακατασκευασμένο σήμα. Παρατηρούμε ότι έχουμε επιτύχει σχεδόν τέλεια ανακατασκευή.



Εικόνα 46. PR για απλό ημιτονοειδές σήμα εισόδου

Ύστερα γίνεται χρήση του μπλοκ USRP Signal Source, για τη λήψη δειγμάτων, και γίνεται η αντίστοιχη απεικόνιση του αρχικού σήματος εισόδου και του ανακατασκευασμένου σήματος στην έξοδο. Παρατηρούμε ότι πράγματι το σήμα στην έξοδο είναι πανομοιότυπο με το σήμα εισόδου, απλώς ελαφρώς μετατοπισμένο.

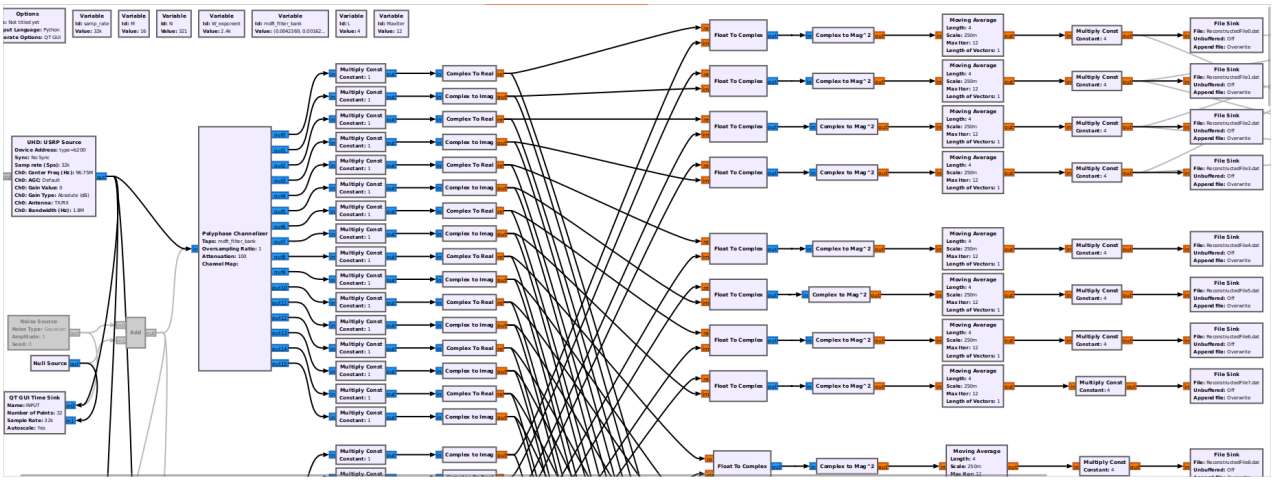


Εικόνα 45. PR για σήμα από δέκτη USRP

7.4 Υλοποίηση Ενεργειακού Ανιχνευτή και συστήματος εκπομπής-λήψης με τη χρήση των συστοιχιών MDFT

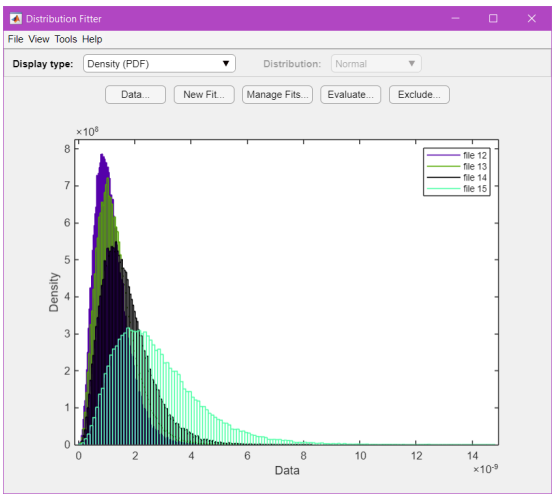
7.4.1 Μέτρηση ενέργειας των δεκαέξι υπό-καναλιών

Για κάθε υπό-κανάλι, κατασκευάζεται μια αλληλουχία μπλοκ η οποία υπολογίζει την ενέργεια του εισερχόμενου σήματος. Συνεπώς κατασκευάζονται συνολικά 16 ενεργειακοί ανιχνευτές.

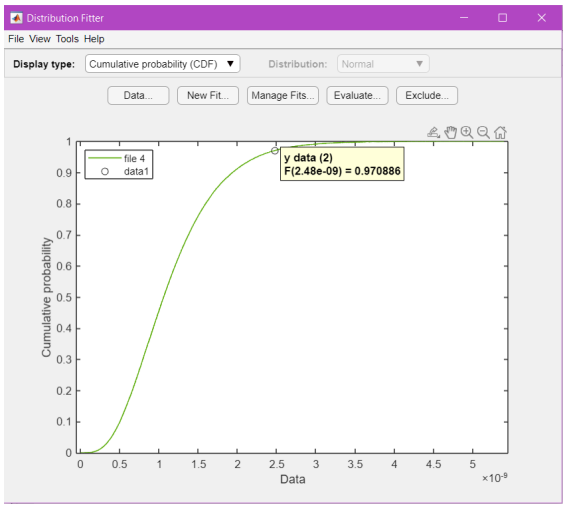


Εικόνα 47. Διάγραμμα Ροής - Ανίχνευση ενέργειας για τα κανάλια 0 εως 16

Ύστερα τα δεδομένα τα οποία αποθηκεύτηκαν στα αρχεία μέσω των “File Sinks”, επεξεργάζονται μέσω Matlab. Στη συνέχεια, κατασκευάζεται η συχνότητα πυκνότητας πιθανότητας – PDF για κάθε αρχείο, και έπειτα η CDF για κάθε αρχείο/κανάλι, και επιλέγοντας την επιθυμητή πιθανότητα εσφαλμένης ανίχνευσης υπολογίζονται τα κατώφλια. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η P_{FA} ισούται με 3%. Παρακάτω παρουσιάζονται οι PDF ορισμένων υποκαναλιών ανά τετράδες και μια ενδεικτική CDF, ενώ στη συνέχεια υπάρχει ο πίνακας των κατωφλίων όλων των καναλιών.



Εικόνα 49. PDF των καναλιών 0,1,2,3



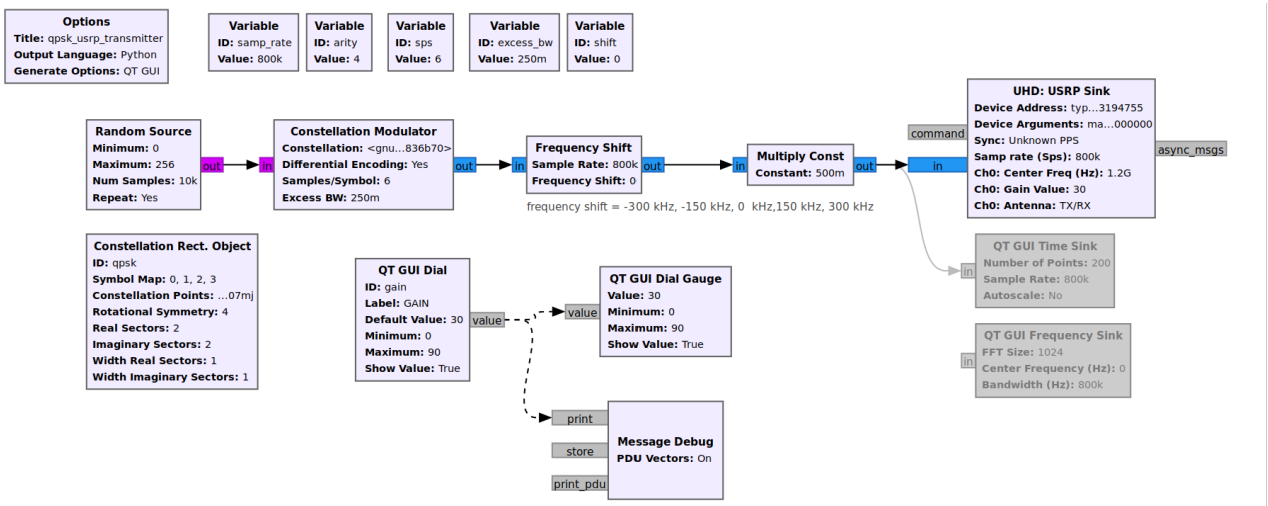
Εικόνα 48. CDF καναλιού 4

Πίνακας 6. Τιμές Κατωφλίου για τα κανάλια 0 εως 16

Αριθμός Καναλιού	Τιμή Κατωφλίου
0	2.25e-08
1	6.33e-09
2	3.66e-09
3	2.85e-09
4	2.48e-09
5	2.3e-09
6	2.15e-09
7	1.94e-09
8	1.41e-09
9	1.93e-09
10	2.16e-09
11	2.32e-09
12	2.5e-09
13	2.48e-09
14	3.66e-09
15	6.26e-09

7.4.2 Πομπός QPSK

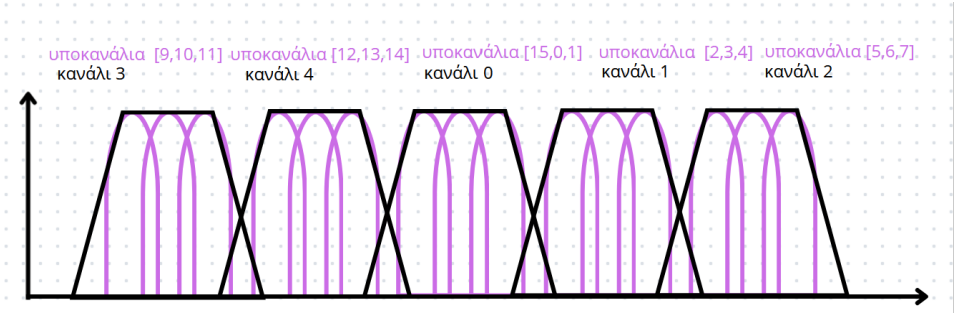
Ο πομπός QPSK ο οποίος θα υλοποιηθεί σε αυτή την ενότητα είναι της ίδιας λογικής με τον πομπό που υλοποιήθηκε στην ενότητα 7.2 και θα μεταδίδει επίσης στη συχνότητα 1.2 GHz. Στο παρόν σενάριο, ο ρυθμός δειγματοληψίας του πειράματος είναι 800.000 Hz, και τα κανάλια στον δέκτη είναι 5, αφού τα 16 κανάλια που είχαμε ομαδοποιούνται ανά 3, και το κανάλι 8 το οποίο θα αναδιπλώνονταν δεν χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη υλοποίηση, όπως θα εξηγήσουμε και στη συνέχεια. Οι μετατοπίσεις συχνότητας θα είναι οι -300 kHz, -150 kHz, 0 kHz, 150 kHz και 300 kHz. Μια ακόμη διαφορά μεταξύ του πομπού που υλοποιείται σε αυτή την ενότητα και του πομπού ο οποίος υλοποιήθηκε στην ενότητα 7.2 είναι ο αριθμός των SPS. Τα SPS – Samples Per Symbol, αντιπροσωπεύουν τον ρυθμό και τα δείγματα με τον οποίο μεταδίδονται τα σύμβολα σε ένα σύστημα επικοινωνίας. Τα σύμβολα στη συγκεκριμένη περίπτωση της QPSK διαμόρφωσης αποτελούνται από 2 bit, και είναι τα 00, 01, 10 και 11. Στο συγκεκριμένο πείραμα το SPS θα έχει τιμή 6, δηλαδή θα μεταδίδει 6 δείγματα ανά σύμβολο, έναντι των 8 που μεταδίδονταν στο προηγούμενο πείραμα.



Εικόνα 50. Πομπός QPSK - MDFT Σύστημα

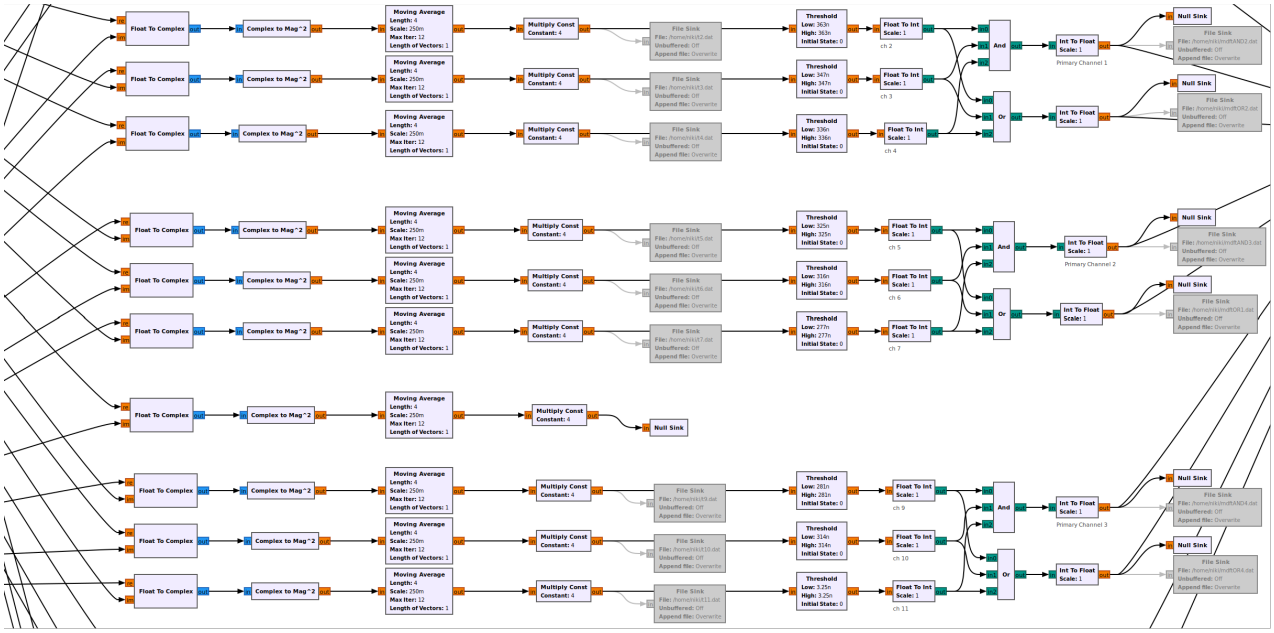
7.4.3 Ομαδοποίηση των υπό-καναλιών σε πέντε πρωτεύοντα κανάλια όπου το καθένα περιλαμβάνει τρία υπό-κανάλια

Η ομαδοποίηση των υπό-καναλιών έτσι ώστε κάθε κύριο κανάλι να περιλαμβάνει περιττό αριθμό υπό-καναλιών, είναι πιο συμφέρουσα από την ομαδοποίηση με τρόπο τέτοιο ώστε κάθε κύριο κανάλι να περιλαμβάνει άρτιο αριθμό υπό-καναλιών, καθώς τα υπό-κανάλια διαμοιράζονται σωστότερα, και δεν ξεφεύγουν από τα όρια κάθε κύριου καναλιού. Σε περίπτωση που ο αριθμός τους ήταν άρτιος θα χρειάζονταν ο πολλαπλασιασμός των συντελεστών του φίλτρου με έναν εκθετικό φανταστικό συντελεστή, με σκοπό τη μετατόπιση συχνότητας. Συνεπώς, για να μπορέσουμε να ομαδοποιήσουμε τα δεκαέξι υποκανάλια με τρόπο τέτοιο ώστε κάθε ομάδα να περιέχει περιττό αριθμό καναλιών, θα απορρίψουμε το κανάλι 8, το οποίο ούτως ή άλλως δεν θα ήταν χρήσιμο καθώς εκεί βρίσκεται το σημείο αναδίπλωσης. Με αυτό τον τρόπο θα δημιουργήσουμε 5 πρωτεύοντα κανάλια καθένα από τα οποία θα περιέχει 3 υπό-κανάλια. Το κανάλι 0 θα περιέχει τα [15,0,1], το κανάλι 1 τα [2,3,4], το κανάλι 2 τα [5,6,7], το κανάλι 3 τα [9,10,11] και το κανάλι 4 τα [12,13,14].



Εικόνα 51. Διάγραμμα συστοιχίας MDFT με 5 πρωτεύοντα κανάλια το καθένα από τα οποία περιλαμβάνει 3 υπό-κανάλια

Έπειτα, θα πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες αλλαγές στο διάγραμμα ροής, έτσι ώστε να να υπάρχει στο σύστημα ομαδοποίηση σε 5 πρωτεύοντα κανάλια με 3 υπό-κανάλια το καθένα. Για να γίνει αυτό, υλοποιούνται πέντε ανιχνευτές AND και πέντε ανιχνευτές OR τριών εισόδων, στους οποίους είσοδοι θα είναι κάθε φορά τα αντίστοιχα υπό-κανάλια. Ακόμη, αφού το υπό-κανάλι 8 δεν χρησιμοποιείται, θα καταλήγει σε ένα "Null Sink". Τέλος, το κέρδος στον δέκτη θα είναι ίσο με 30 dB και σύμφωνα με αυτό το κέρδος θα υπολογιστούν και τα νέα κατώφλια του καινούργιου συστήματος που υλοποιήθηκε.



Εικόνα 52. Διάγραμμα Ροής συσήματος MDFT με 5 πρωτεύοντα κανάλια και ενεργειακούς ανιχνευτές AND και OR

Τα κατώφλια που υπολογίστηκαν εκπέμποντας με frequency shift ίσο με 0, δηλαδή στο κανάλι 0 το οποίο περιλαμβάνει τα υποκανάλια [15,0,1] για κέρδος δέκτη 30 είναι τα εξής :

Πίνακας 7. Κατώφλια καναλιών για εκπομπή στο Πρωτεύον Κανάλι 0

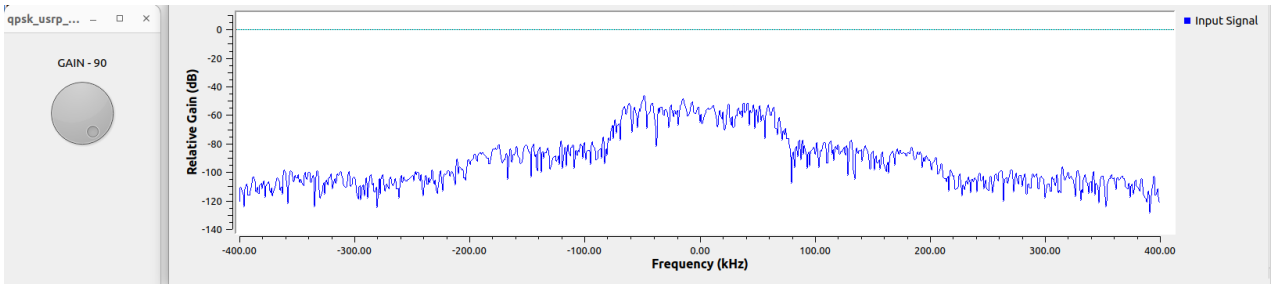
Υπό-κανάλι	**Κέρδος Δέκτη 30 dB** **Κέρδος πομπού 0 dB**
2	3.63e-07
3	3.47e-07
4	3.63e-07
5	3.25e-07
6	3.16e-07

7	2.77e-07
9	2.81e-07
10	3.14e-07
11	3.25e-07
12	3.40e-07
13	3.52e-07
14	3.57e-07

Αφού εκπέμπουμε στο πρωτεύον κανάλι 0, το οποίο περιλαμβάνει τα υπό-κανάλια [15,0,1], τα γειτονικά κανάλια θα είναι τα κανάλια 1 [2,3,4] και 4 [12,13,14]. Για το λόγο αυτό παρατηρούμε ότι τα κατώφλια για αυτά τα υπό-κανάλια είναι ελαφρώς υψηλότερα από τα κατώφλια στα μη γειτονικά κανάλια. Αυτό συμβαίνει για να καλυφθεί η πιθανότητα ύπαρξης διαρροής από το κανάλι εκπομπής στα γειτονικά. Παρόλα αυτά η διαφορά ανάμεσα στα κατώφλια είναι πολύ μικρή, σχεδόν αμελητέα καθώς τα νούμερα είναι της τάξης e-07. Για το λόγο αυτό θα υλοποιήσουμε ένα πείραμα, στο οποίο θα διαλέξουμε το μεγαλύτερο κατώφλι και θα το εφαρμόσουμε σε όλα τα κανάλια, ως worst case scenario.

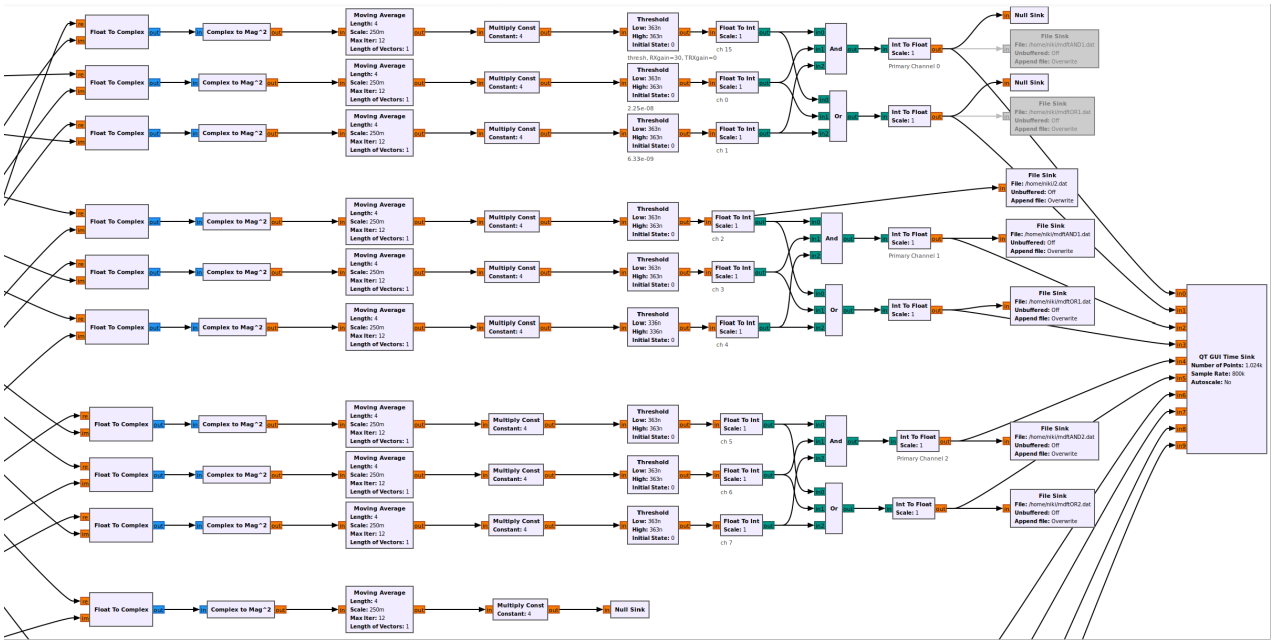
7.4.4 Worst Case Scenario εκπομπής στο Πρωτεύον Κανάλι 0 επιλέγοντας το μεγαλύτερο κατώφλι για όλα τα υπό-κανάλια

Στο παρόν πείραμα η εκπομπή θα γίνεται σταθερά στο Πρωτεύον Κανάλι 0 το οποίο περιλαμβάνει τα υποκανάλια 15, 0 και 1, δηλαδή θα θέσουμε την μεταβλητή frequency shift στον πομπό ίση με 0 kHz.



Εικόνα 53. Παλμός για frequency shift ίσο με 0 kHz

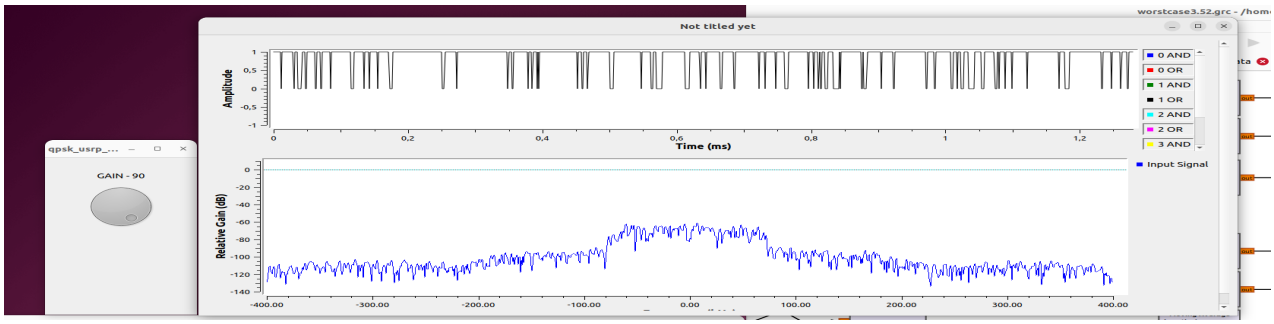
Το κατώφλι που έχει επιλεχθεί για όλα τα υπό-κανάλια θα είναι το μεγαλύτερο εκ των κατωφλίων τα οποία υπολογίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, αφού όπως προαναφέρθηκε υποθέτουμε ότι η αριθμητική τους διαφορά μπορεί να χαρακτηριστεί αμελητέα. Έτσι θα υλοποιηθεί ένα σενάριο χειρότερης περίπτωσης και θα χρησιμοποιήσουμε παντού το κατώφλι 3.63e-07.



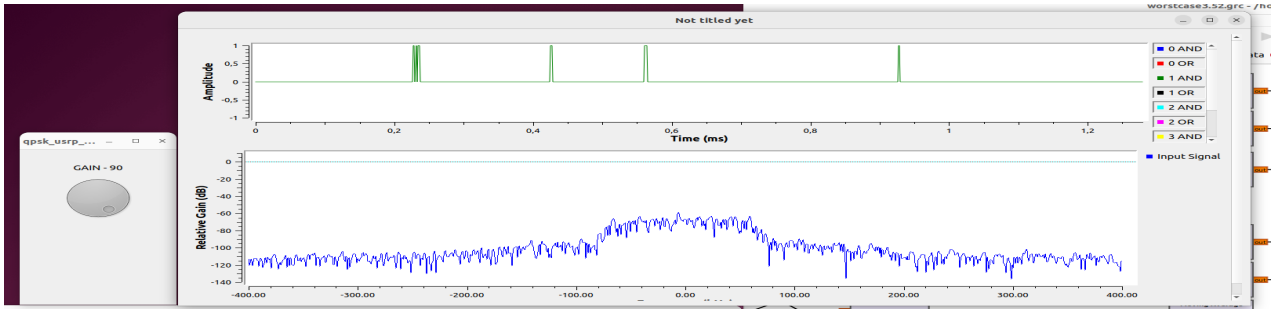
Εικόνα 54. Διάγραμμα ροής δέκτη για worst case scenario

Για κέρδος πομπού ίσο με 90, δηλαδή το υψηλότερο κέρδος για το σύστημά μας, παρατηρούμε τις οπτικές απεικονίσεις των εξόδων των ανιχνευτών AND και OR για κάθε πρωτεύον κανάλι.

Παρατηρούμε ότι για το γειτονικό πρωτεύον κανάλι 1, υπάρχουν πολλές φορές όπου το σύστημα θεωρεί ότι υπάρχει σήμα στο κανάλι, ενώ στην πραγματικότητα ο παλμός μεταδίδεται στο κανάλι 0. Ακόμη παρατηρούμε ότι πράγματι ο ενεργειακός ανιχνευτής AND είναι αυστηρότερος από τον OR, καθώς οι μεταβάσεις στο 1, δηλαδή οι φορές που θεωρεί ότι στο σύστημά μας υπάρχει και σήμα εκτός από θόρυβος, είναι πολύ λιγότερες από ότι είναι στον OR. Παρόμοια συμπεριφορά έχει και το γειτονικό κανάλι 4.

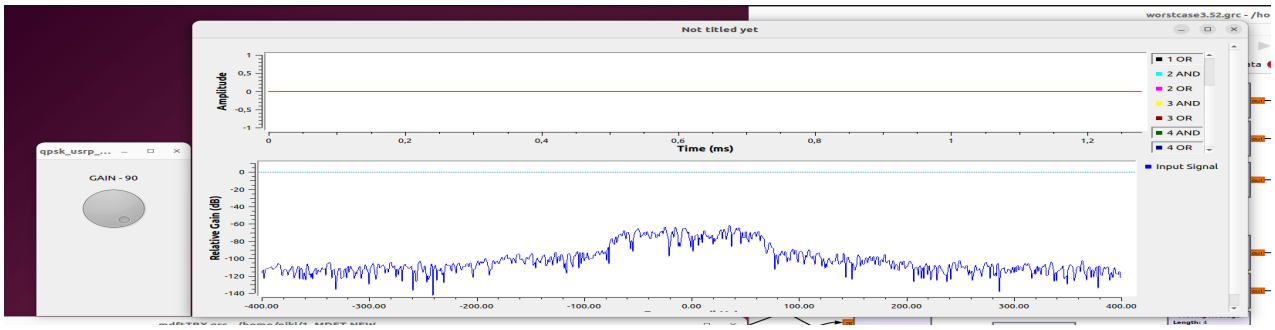


Εικόνα 55. Έξοδος του ανιχνευτή OR για το γειτονικό κανάλι 1



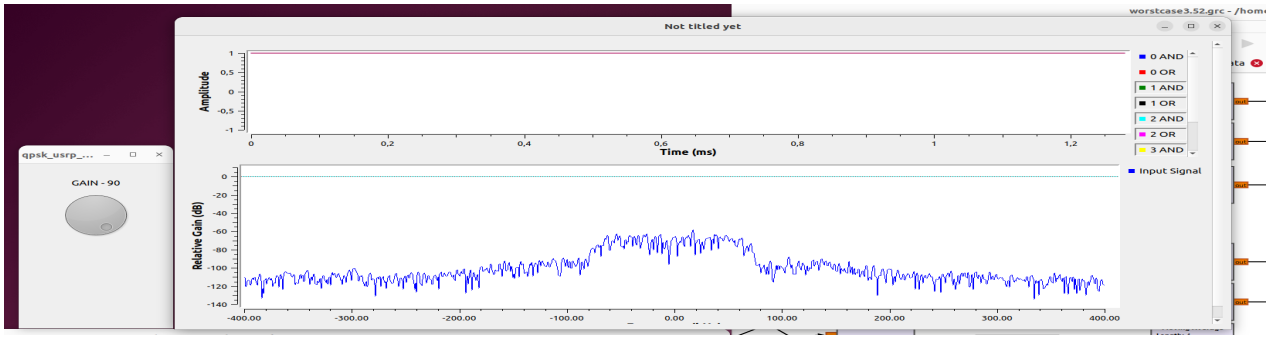
Εικόνα 56. Έξοδος του ανιχνευτή AND για το γειτονικό κανάλι 1

Για τα μη γειτονικά κανάλια, δηλαδή τα πρωτεύοντα κανάλια 2 και 3, παρατηρούμε ότι η έξοδος των ανιχνευτών είναι σταθερά ίση με το μηδέν. Δηλαδή παρόλο που το κέρδος του πομπού είναι το μέγιστο δυνατό, δεν υπάρχει φασματική διαρροή στα κανάλια αυτά, ούτε υπάρχουν άλλου είδους παρεμβολές.



Εικόνα 57. Έξοδος των AND και OR ανιχνευτών για τα μη-γειτονικά κανάλια από το κανάλι εκπομπής

Τέλος, για το κανάλι στο οποίο στοχεύει ο πομπός να εκπέμψει τον παλμό, παρατηρούμε ότι οι έξοδοι και των δύο ανιχνευτών, για κέρδος πομπού ίσο με 90dB, είναι πάντα ίσες με 1.



Εικόνα 58. Έξοδος των AND και OR ανιχνευτών για το κανάλι εκπομπής

Στη συνέχεια, εκπέμποντας ακόμη στο ίδιο κανάλι, θα αποθηκεύσουμε σε ξεχωριστά αρχεία τις μετρήσεις για κέρδος πομπού από 0 έως 90 με βήμα 5. Ύστερα θα ανοίξουμε αυτά τα αρχεία στο Matlab, και θα υπολογίσουμε για κάθε ένα, την πιθανότητα ψευδούς ανίχνευσης. Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιήσουμε αφορούν το άμεσα γειτονικό υπό-κανάλι 2, και όλες τις εξόδους των ανιχνευτών AND και OR. Προφανώς δεν θα εξεταστούν τα δεδομένα που προκύπτουν από τις εξόδους που αφορούν το κανάλι εκπομπής, καθώς αυτό δεν περιλαμβάνει ψευδείς ανιχνεύσεις, αλλά εκεί εκπέμπει ο πομπός σκόπιμα το σήμα. Ο τύπος που θα χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστούν οι πιθανότητες λανθασμένης ανίχνευσης, είναι ο εξής :

P_{FA} = sum(x)/length(x), όπου x θα είναι το κάθε αρχείο.

Αυτό στην ουσία σημαίνει ότι μετράμε όλες τις περιπτώσεις όπου καταγράφηκε 1 ενώ έπρεπε να έχει καταγραφεί 0.

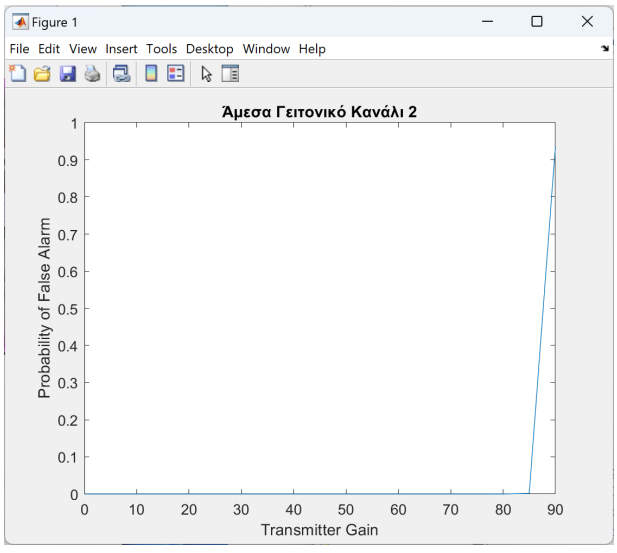
Οι πιθανότητες ψευδούς ανίχνευσης που υπολογίστηκαν εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 8. Πιθανότητες Ψευδούς Ανίχνευσης για κέρδος πομπού 0:5:90

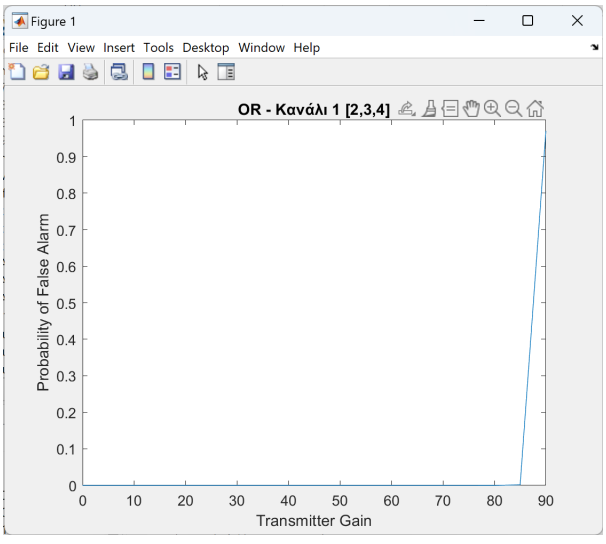
Κέρδος Tx	**Υπό-Κανάλι 2**	**AND 1**	**AND 2**	**AND 3**	**AND 4**	**OR 1**	**OR 2**	**OR 3**	**OR 4**
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	1.04e-05	0	0	0	0	1.04e-05	0	0	3.39e-05
75	1.51e-05	0	0	0	0	1.51e-05	0	0	0,01
80	6.15e-05	5.77e-06	0	0	7.69e-06	6.15e-05	0	0	0,08
85	0.0017	0	0	0	6.93e-	0.0017	0	0	0,41

					06				
90	0.93	0.02	4.56e-05	5.08e-05	0.0405	0.9708	6.49e-05	6.32e-05	0.99

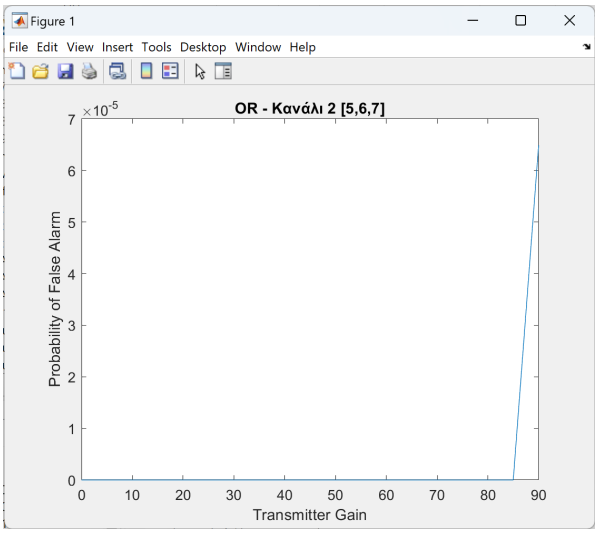
Παρακάτω υπάρχει το διάγραμμα Πιθανότητας Εσφαλμένης Ανίχνευσης για το άμεσα γειτονικό υπό-κανάλι 2. Παρατηρούμε ότι η πιθανότητα εσφαλμένης ανίχνευσης βρίσκεται μόνιμα στο 0, εκτός από όταν ο πομπός εκπέμπει με κέρδος ίσο με 90dB, όπου η πιθανότητα εσφαλμένης ανίχνευσης είναι ίση με περίπου 90%. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε δύο παράγοντες. Η μια εξήγηση είναι ότι σε επίπεδο κέρδους ίσο με 90dB υπάρχει πιθανότητα υπερφόρτωσης του δέκτη. Ακόμη λόγω της κοντινής απόστασης μεταξύ του πομπού και του δέκτη, ο δέκτης οδηγείται σε κορεσμό, καθώς υπερβαίνει τη γραμμική περιοχή του ενισχυτή και του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (A/D), με συνέπεια την παραμόρφωση του σήματος. Αυτή η παραμόρφωση εισάγει "παράγωγα" θορυβώδη σήματα, συμβάλλοντας στο παρατηρούμενο φαινόμενο. Μια άλλη εξήγηση είναι ότι, ενώ το MDFT φίλτρο μας κάλυπτε αποτελεσματικά μέχρι τα 90 dB, το υψηλό κέρδος που ακολουθεί οδηγεί σε ένα σενάριο όπου η αποκοπή του φίλτρου είναι ανεπαρκής, προκαλώντας ψευδείς ανιχνεύσεις. Σημειώνεται ότι η αποκοπή του φίλτρου αναφέρεται στη συχνότητα πέρα από την οποίο ένα φίλτρο εξασθενεί ή μειώνει το πλάτος των σημάτων που διέρχονται από αυτό. Όταν ένα σύστημα λειτουργεί με υψηλή ενίσχυση, ενισχύει τόσο τα επιθυμητά σήματα όσο και τον θόρυβο που υπάρχει στο σύστημα. Το φίλτρο έχει ως στόχο να διακρίνει τα σήματα ενδιαφέροντος από τον ανεπιθύμητο θόρυβο. Ωστόσο, όταν το κέρδος είναι εξαιρετικά υψηλό, το φίλτρο ενδέχεται να δυσκολεύεται να καταστείλει επαρκώς όλες τις ανεπιθύμητες συνιστώσες, οδηγώντας σε ψευδείς συναγερμούς.



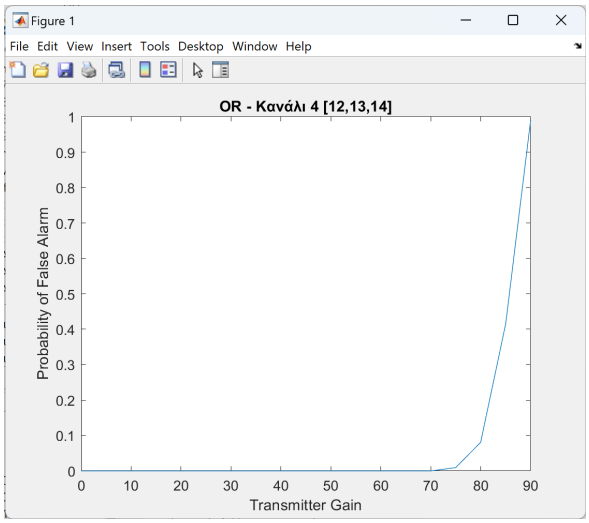
Εικόνα 60. Διάγραμμα Πιθανότητας Ψευδούς Ανίχνευσης - Κέρδους Πομπού για το Άμεσα Γειτονικό υποκανάλι 2



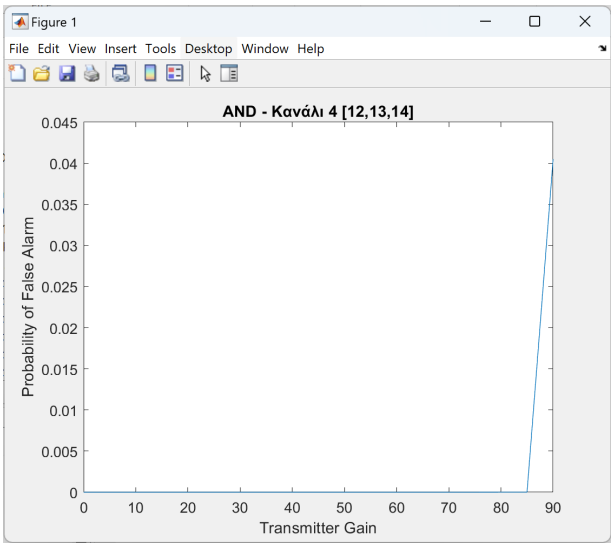
Εικόνα 59. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Γειτονικό Κανάλι 1, OR



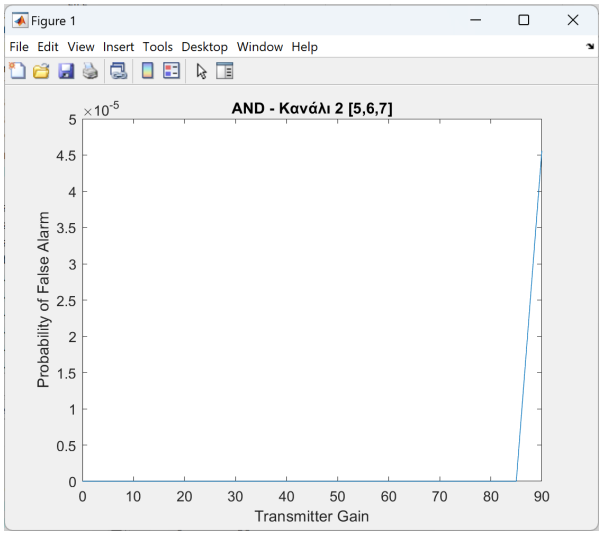
Εικόνα 62. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Γειτονικό Κανάλι 1, AND



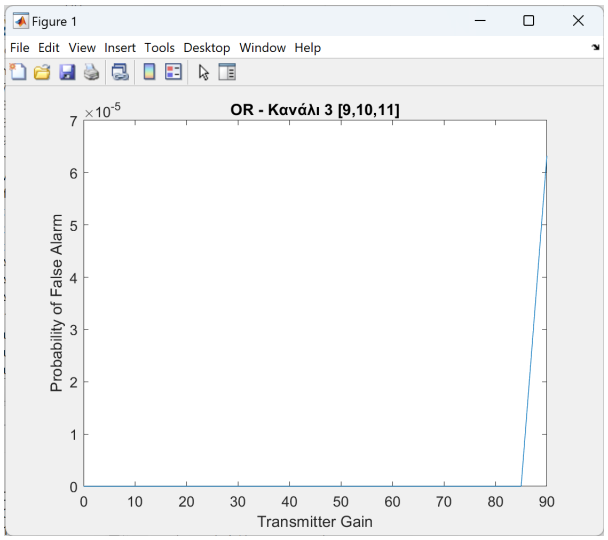
Εικόνα 61. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Γειτονικό Κανάλι 4, OR



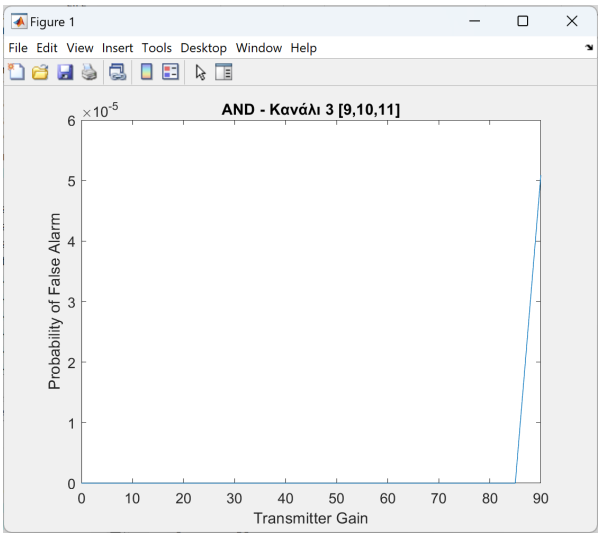
Εικόνα 64. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Γειτονικό Κανάλι 4, AND



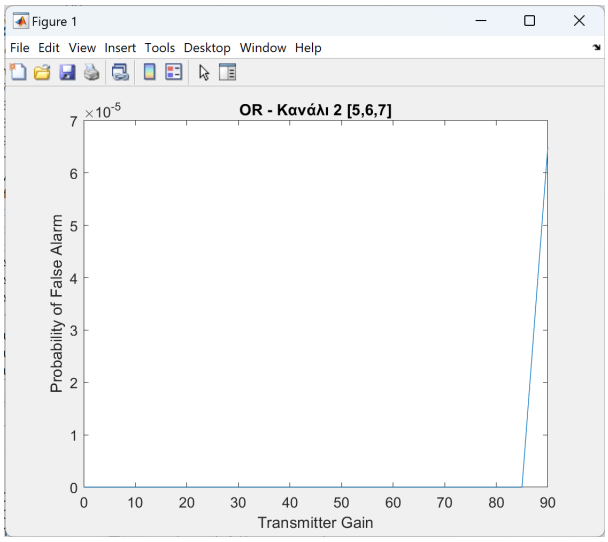
Εικόνα 63. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Μη-Γειτονικό Κανάλι 2, AND



Εικόνα 66. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Μη-Γειτονικό Κανάλι 3, OR



Εικόνα 65. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Μη-Γειτονικό Κανάλι 3, AND



Εικόνα 67. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Μη-Γειτονικό Κανάλι 2, OR

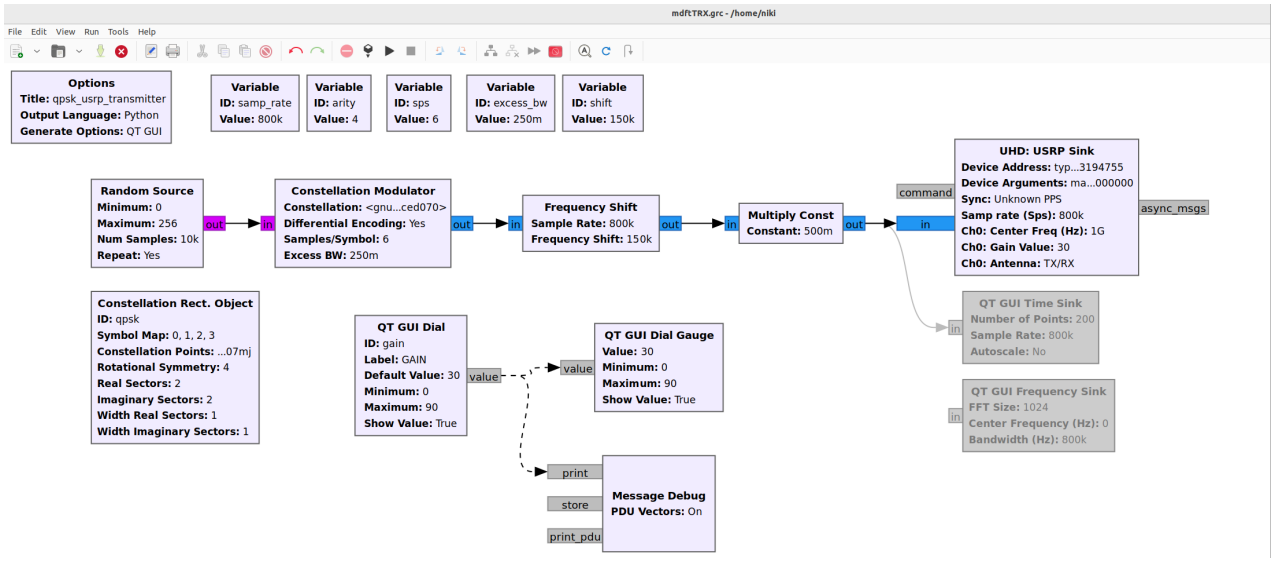
Εξετάζοντας τα διαγράμματα Πιθανότητας Εσφαλμένης Ανίχνευσης για το γειτονικό Κανάλι 1 το οποίο περιέχει τα υποκανάλια 2,3,4 και το γειτονικό Κανάλι 4 το οποίο περιέχει τα υποκανάλια 12,13,14, μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα. Όσον αφορά το κανάλι 1, παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις η πιθανότητα ψευδούς ανίχνευσης είναι ίση με μηδέν, εκτός από όταν το κέρδος του πομπού είναι ίσο με 90dB, όπως ακριβώς συνέβαινε και για το άμεσα γειτονικό υπό-κανάλι 2 προηγουμένως. Παρόλα αυτά στην περίπτωση που εξετάζουμε τον ανιχνευτή AND, η πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης έχει υψηλότερη τιμή περίπου 2.5%, ενώ στην περίπτωση που εξετάζουμε τον ανιχνευτή OR, είναι ίση με 1. Το 2.5% είναι μια αποδεκτή τιμή για το σύστημά μας, μιας και είχαμε επιλέξει και την πιθανότητα ψευδούς συναγερμού να ισούται με 3% προηγουμένως για την διαδικασία υπολογισμού των κατωφλίων, αλλά με πιθανότητα ψευδούς ανίχνευσης ίση με 100% το σύστημα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Όσον αφορά το κανάλι 4, παρατηρούμε ότι έχει παρόμοια συμπεριφορά, με τη διαφορά ότι έχει υψηλότερη τιμή στα 90dB

για τον ανιχνευτή AND περίπου ίση με 4.5%, ενώ για τον ανιχνευτή OR οι τιμές της πιθανότητας εσφαλμένης ανίχνευσης αρχίζουν να είναι διάφορες του μηδενός για κέρδος 75dB.

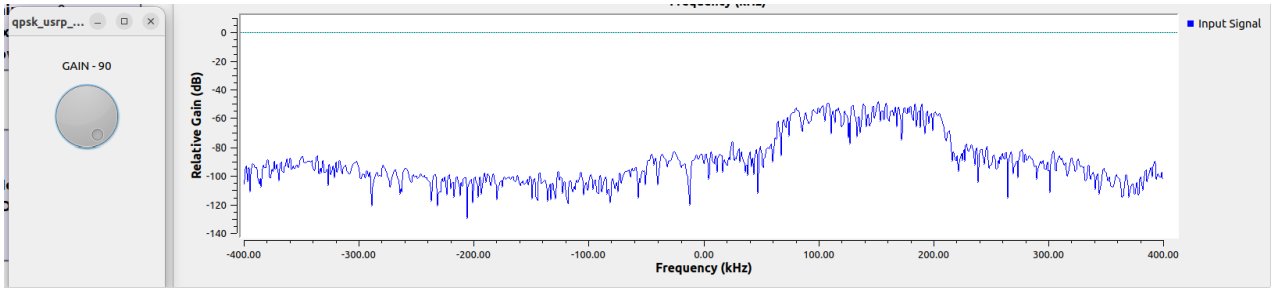
Τέλος, εξετάζουμε τα διαγράμματα Πιθανότητας Εσφαλμένης Ανίχνευσης για το μη-γειτονικό Κανάλι 2 το οποίο περιέχει τα υποκανάλια 5,6,7 και το η-γειτονικό Κανάλι 3 το οποίο περιέχει τα υποκανάλια 9,10,11. Για να τα μη-γειτονικά κανάλια παρατηρούμε ότι για υψηλό κέρδος πομπού η υψηλότερη τιμή της πιθανότητα χαμένης αίχνευσης παραμένει πολύ χαμηλά και είναι της τάξης 10^{-5}.

7.4.5 Εκπομπή στο Πρωτεύον Κανάλι 1 και Πιθανότητες Χαμένης Ανίχνευσης

Για να εκπέμπει ο πομπός στο Πρωτεύον Κανάλι 1, το οποίο περιλαμβάνει τα Υπό-κανάλια [2,3,4], θα πρέπει να ορίσουμε την μεταβλητή “phase shift” στο διάγραμμα ροής του πομπού ίση με 150kHz. Έτσι θα περιμένουμε να δούμε τον παλμό μετατοπισμένο στα δεξιά σε σχέση με τον παλμό που παρατηρήθηκε στην προηγούμενη υποενότητα.



Εικόνα 69. Διάγραμμα Ροής Πομπού, εκπομπή στα +150kHz

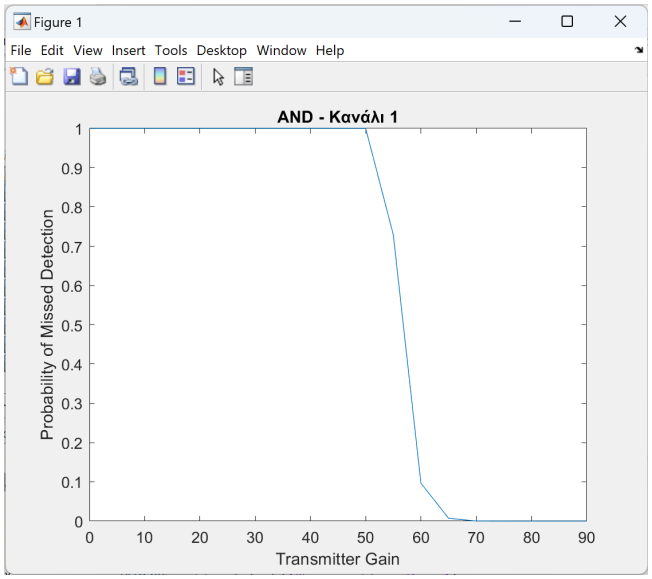


Εικόνα 68. Εκπομπή στο Πρωτεύον Κανάλι 1, οπτική απεικόνιση παλμού

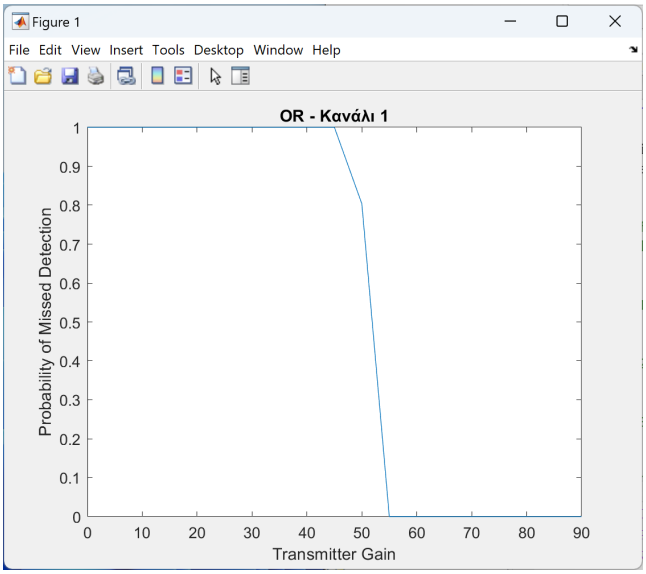
Για το κανάλι στο οποίο εκπέμπει ο πομπός θα υπολογίσουμε την πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης για κέρδος 0:5:90 για τις εξόδους των AND και OR ανιχνευτών. Η Πιθανότητα Αποτυχημένης Ανίχνευσης (PMD) ποσοτικοποιεί την εμφάνιση ψευδώς αρνητικών αποτελεσμάτων ή αλλιώς μηδενικών, που αντιπροσωπεύουν περιπτώσεις όπου το επιθυμητό σήμα δεν εντοπίζεται. Η ιδανική τιμή της PMD είναι το μηδέν. Αναμένουμε η πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης, να μειώνεται όσο αυξάνεται το κέρδος εκπομπής. Τα χαμηλότερα κέρδη πομπού μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση της ευαισθησίας του συστήματος, καθιστώντας το λιγότερο ικανό στην ανίχνευση σημάτων και συμβάλλοντας κατά συνέπεια σε περιπτώσεις χαμένης ανίχνευσης. Επίσης θεωρητικά περιμένουμε οι PMD να αρχίσουν να μειώνονται για κέρδος πομπού 20-30 dB. Παρόλα αυτά παρατηρούμε ότι αρχίζουν να μειώνονται για κέρδος 50-55 dB. Μια πιθανή εξήγηση για αυτό είναι ότι το πείραμα εκτελείται σε ένα μόνο μηχάνημα και συνεπώς η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη είναι αρκετά κοντινή, κάτι που επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Πίνακας 9. Πιθανότητες Χαμένης Ανίχνευσης

Κέρδος Πομπού	**P_{MD} AND 1**	**P_{MD} OR 1**
0	1	1
5	1	1
10	1	1
15	1	1
20	1	1
25	1	1
30	1	1
35	1	1
40	1	1
45	1	1
50	1	0.8
55	0.7292	1.30e-04
60	0.0964	1.37e-05
65	0.0073	1.46e-05
70	2.77e-04	1.27e-05
75	3.36e-06	1.79e-05
80	1.02e-06	7.90e-06
85	6.2e-06	1.38e-06
90	4.92e-06	1.23e-06



Εικόνα 70. Διάγραμα Πιθανότητας Χαμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Κανάλι 1, AND



Εικόνα 71. Διάγραμα Πιθανότητας Χαμένης Ανίχνευσης - Κέρδος Πομπού για το Κανάλι 1, OR

7.4.5.1 Διαγράμματα Πιθανότητας Εσφαλμένης Ανίχνευσης – Πιθανότητας Χαμένης Ανίχνευσης

Γνωρίζουμε ότι η σχέση μεταξύ της Πιθανότητας Χαμένης Ανίχνευσης - PMD και της Πιθανότητας εσφαλμένης ανίχνευσης – PFA συχνά αντιπροσωπεύει ένα σενάριο συμβιβασμού. Όσο αυξάνεται η ευαισθησία του συστήματος η πιθανότητα μη-εντοπισμού τείνει να μειώνεται. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα είναι πιο ικανό να ανιχνεύει τα επιθυμητά σήματα με αποτέλεσμα οι PMD να έχουν χαμηλότερες τιμές. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται η ευαισθησία το σύστημα τείνει να είναι πιο επιρρεπές στην ανίχνευση ψευδών συναγερμών. Συνεπώς, συχνά υπάρχει συμβιβασμός μεταξύ της ελαχιστοποίησης της PMD και της ελαχιστοποίηση της PFA. Το διάγραμμα που θα δημιουργήσουμε PMD-PFA απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο οι αλλαγές στην ευαισθησία ανάλογα με το κέρδος εκπομπής, επηρεάζουν τα ποσοστά των ψευδών συναγερμών και των χαμένων ανιχνεύσεων.

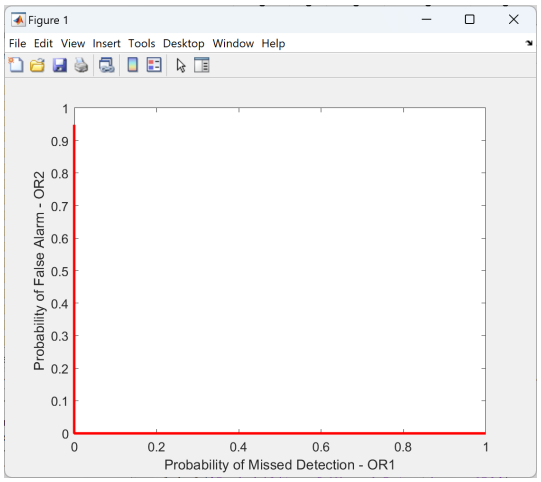
Προηγουμένως υπολογίσαμε τις πιθανότητες εσφαλμένης ανίχνευσης (PFA) για τα γειτονικά κανάλια από το κανάλι εκπομπής και την πιθανότητα χαμένης ανίχνευσης (PMD) για το κανάλι εκπομπής για δύο διαφορετικά σενάρια εκπομπής στο κανάλι 0 και στο κανάλι 1 αντίστοιχα. Αφού υπολογίσαμε αυτές τις πιθανότητες και παρατηρήσαμε τα αντίστοιχα διαγράμματα πιθανοτήτων – κέρδους πομπού, στη συνέχεια θα υπολογίσουμε για ένα από τα δύο σενάρια εκπομπής τις πιθανότητες χαμένης ανίχνευσης για το κανάλι εκπομπής και τις πιθανότητες εσφαλμένης ανίχνευσης για τα γειτονικά κανάλια, και ύστερα θα δημιουργήσουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα. Ο άξονα x θα αφορά πιθανότητας χαμένης ανίχνευσης και ο άξονας y τις πιθανότητες εσφαλμένης ανίχνευσης, με στόχο την οπτική απεικόνιση της συσχέτισης ανάμεσα στις δύο αυτές πιθανότητες.

Συγκεκριμένα, για το σενάριο όπου ο πομπός εκπέμπει στο κανάλι 1 έχουμε ήδη υπολογίσει την PMD που αφορά το κανάλι 1 για τις εξόδους των ανιχνευτών AND και OR. Σειρά έχει ο υπολογισμών των PFA για τις εξόδους των ανιχνευτών AND και OR που θα αφορούν τα κανάλια 0 και 2. Οι πιθανότητες θα υπολογιστούν με τον τύπο PFA = sum(x)/length x.

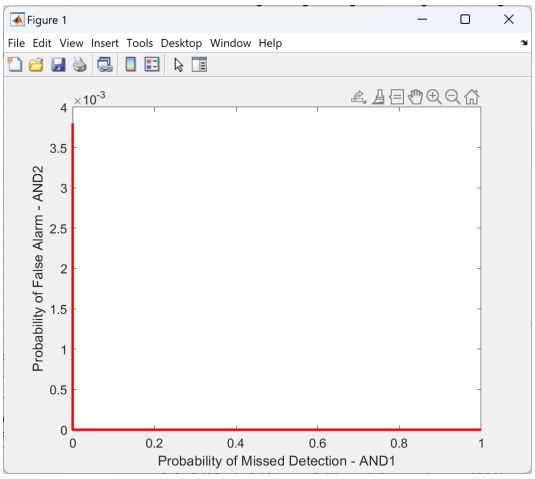
Πίνακας 10. PFAs γειτονικών καναλιών για εκπομπή στα +150kHz

Κέρδος Πομπού	PFA AND 0	PFA 0R 0	PFA AND 2	PFA OR 2
0	0	0.0134	0	0
5	0	0.0141	0	0
10	0	0.0143	0	0
15	0	0.0145	0	0
20	0	0.0137	0	0
25	0	0.0133	0	0
30	0	0.0126	0	0
35	1.70E-05	0.0145	0	0
40	0	0.0128	0	0
45	0	0.0144	0	0
50	9.22E-06	0.0155	0	0
55	0	0.0148	0	0
60	0	0.0528	0	0
65	0	0.2639	0	0
70	0	0.6632	0	0
75	8.96E-06	0.8584	0	1.12E-05
80	0	0.9698	0	5.64E-06
85	6.20E-06	0.9956	3.45E-06	1.17E-05
90	0.2066	1	0.0038	0.9486

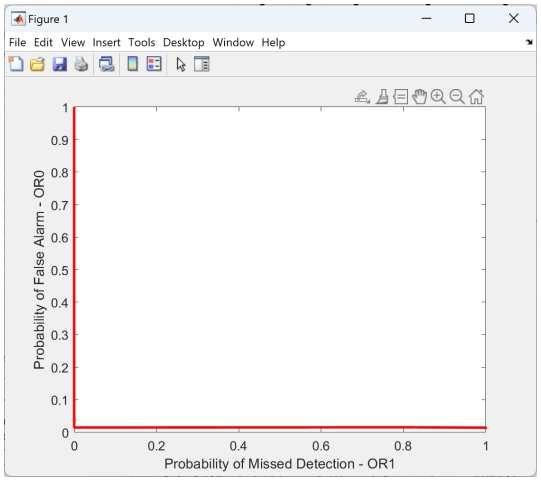
Στα διαγράμματα που προέκυψαν, οι γραμμές που αντιστοιχούν στην PMD και οι γραμμές που αντιστοιχούν στην PFA σχηματίζουν γωνία 90 μοιρών στην αρχή των αξόνων. Το συγκεκριμένο διάγραμμα απεικονίζει ένα συμβιβασμό μεταξύ PMD και PFA, όπου υπάρχει βέλτιστη ισορροπία μεταξύ της ελαχιστοποίησης των χαμένων ανιχνεύσεων και των ψευδών συναγερμών.



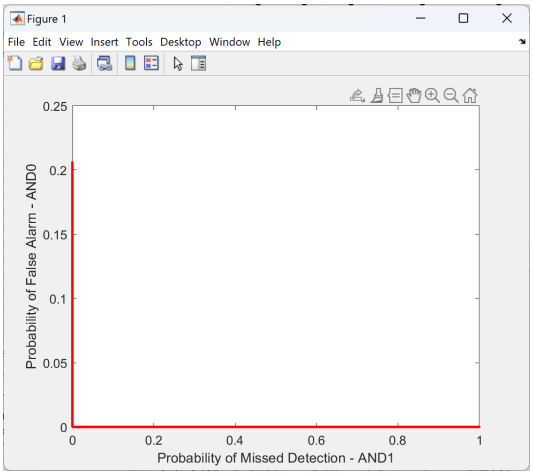
Εικόνα 75. Διάγραμμα PFA OR2 - PMD OR1



Εικόνα 74. Διάγραμμα PFA AND2 - PMD AND1



Εικόνα 73. Διάγραμμα PFA OR0 - PMD OR1



Εικόνα 72. Διάγραμμα PFA AND0- PMD AND1

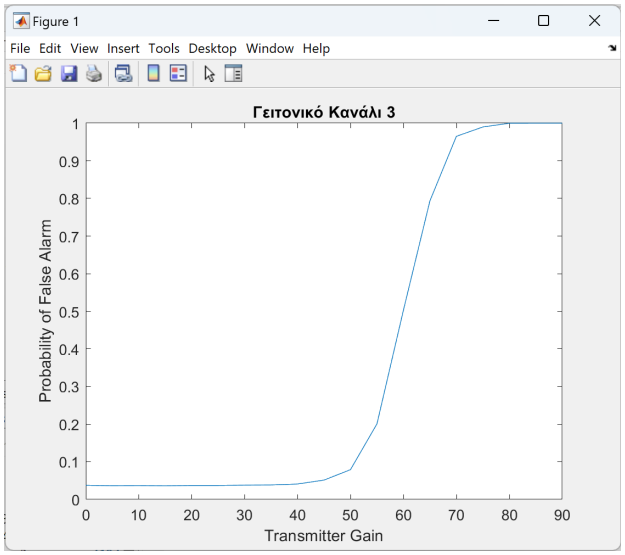
7.5 Σύγκριση UDFT με MDFT

Οι ιδιότητες των Modified Discrete Fourier Filter Banks, καθιστούν τα γειτονικά κανάλια ασυσχέτιστα μεταξύ τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον μειωμένο αριθμό ψευδών ανιχνεύσεων στα γειτονικά κανάλια. Πράγματι, στο σύστημα το οποίο υλοποιήθηκε προηγουμένως παρατηρήσαμε ότι η πιθανότητα ψευδών ανιχνεύσεων ήταν ίση με 0 για τα γειτονικά κανάλια, με εξαίρεση την περίπτωση όπου υπήρχε πολύ υψηλό κέρδος εκπομπής. Στα συστήματα UDFT, όπου τα γειτονικά κανάλια δεν είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους, περιμένουμε οι πιθανότητες εσφαλμένης ανίχνευσης να είναι αυξημένες. Για να δούμε αν αυτό συμβαίνει στην πράξη, θα υπολογίσουμε τις πιθανότητες χαμένης ανίχνευσης των γειτονικών καναλιών του καναλιού, αφού θα εκπέμψουμε με phase shift ίσο με -125kHz.

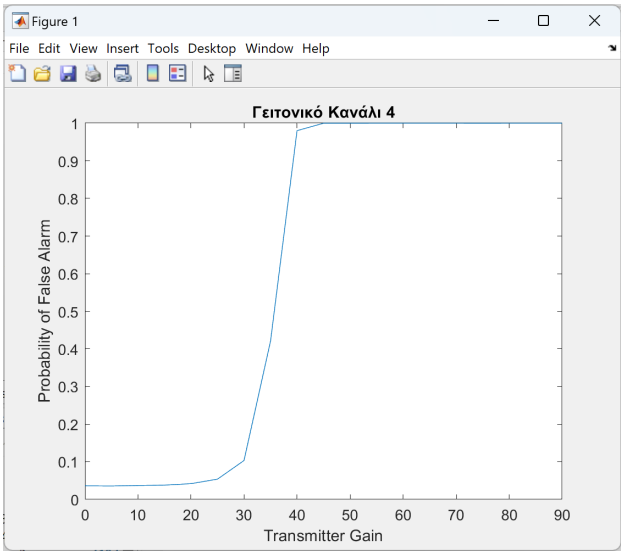
Πίνακας 11. Πιθανότητες Ψευδούς Ανίχνευσης για κέρδος 0:5:90

Κέρδος Πομπού	**P_{FA} Καναλιού 3**	**P_{FA} Καναλιού 4**
0	0.0374	0.0360
5	0.0364	0.0356
10	0.0367	0.0370
15	0.0361	0.0378
20	0.0370	0.0418
25	0.0370	0.0538
30	0.0378	0.1033
35	0.0383	0.4204
40	0.0409	0.9801
45	0.0513	0.9999
50	0.0791	0.9999
55	0.2008	1
60	0.5030	1
65	0.7934	1
70	0.9651	1
75	0.9899	0.9999
80	0.9999	1
85	1	1
90	1	1

Αφού υπολογίστηκαν οι πιθανότητες για κέρδος από 0 μέχρι 90 με βήμα 5, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα Πιθανότητας Εσφαλμένης Ανίχνευσης – Κέρδους πομπού για τα γειτονικά κανάλια από το κανάλι εκπομπής στο UDFT σύστημα έξι καναλιών που υλοποιήθηκε στην ενότητα 7.1. Παρατηρούμε ότι ενώ στο MDFT σύστημα η πιθανότητα εσφαλμένης ανίχνευσης ήταν σταθερά ίση με το 0, στο παρόν σύστημα η πιθανότητα εσφαλμένης ανίχνευσης έχει ως χαμηλότερη τιμή το 3%, δηλαδή την τιμή που είχε χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό των κατωφλίων και στα δύο συστήματα. Για το γειτονικό κανάλι 3 η τιμή παραμένει σταθερά στο 3% για κέρδος έως και 50dB, ενώ για το γειτονικό κανάλι 4 για κέρδος έως και 30 dB και στη συνέχεια η τιμή αυτή αυξάνεται. Για το κανάλι 3 η αύξηση της τιμής γίνεται πιο σταδιακά, ενώ για το κανάλι 4 η αύξηση είναι πιο απότομη μέχρι η P_{FA} να ισούται με 100%. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα που προέκυψαν για αυτό το σύστημα με τα διαγράμματα που προέκυψαν για το MDFT σύστημα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το MDFT σύστημα προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά τα κέρδη εκπομπής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να είναι λειτουργικό το σύστημα.



Εικόνα 76. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδους Πομπού για το γειτονικό κανάλι 3 του UDFT συστήματος



Εικόνα 77. Διάγραμμα Εσφαλμένης Ανίχνευσης - Κέρδους Πομπού για το γειτονικό κανάλι 4 του UDFT συστήματος

Όσον αφορά τις πιθανότητες χαμένης ανίχνευσης, η μεγαλύτερη διαφορά που παρατηρήθηκε ανάμεσα σε UDFT και MDFT, είναι ότι για την πρώτη περίπτωση συστήματος, υπολογίζαμε τις PMD όχι μόνο για το κανάλι στο οποίο στόχευε ο πομπός να εκπέμψει τον παλμό, αλλά και για τα γειτονικά του κανάλια, καθώς υπήρχε φασματική διαρροή από το κύριο κανάλι στα γειτονικά. Στην δεύτερη περίπτωση συστήματος όμως, τα κανάλια είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους λόγω των ιδιοτήτων των συστοιχιών φίλτρων MDFT, οπότε υπολογίστηκαν οι PMD αποκλειστικά για το κανάλι στο οποίο στόχευε ο πομπός να εκπέμψει.

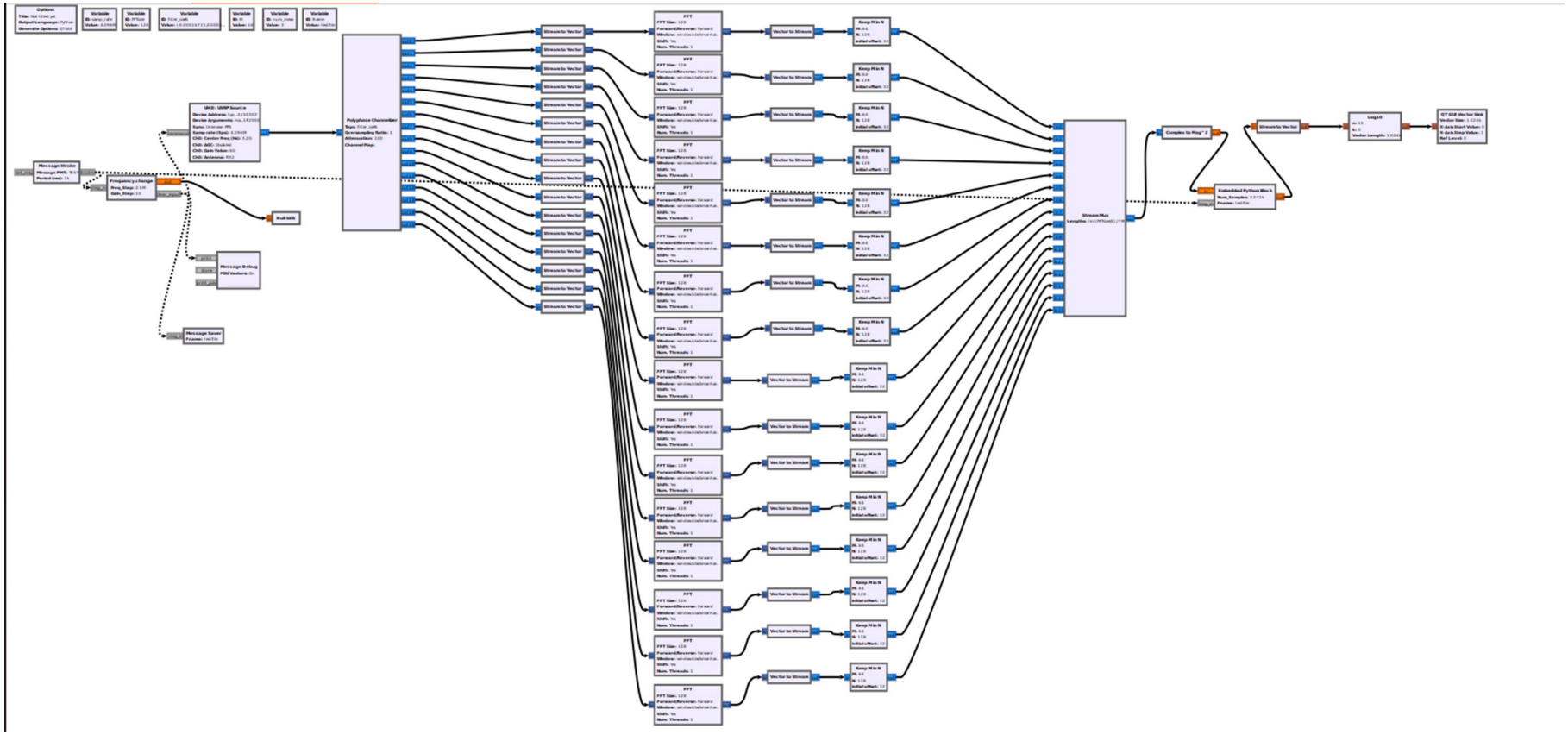
7.6 Υβριδικός Αναλυτής Φάσματος με χρήση FFT

Στην παρακάτω υλοποίηση παρουσιάζεται ένας υβριδικός αναλυτής φάσματος που πραγματοποιεί τόσο φιλτράρισμα όσο και Fourier Transform με σκοπό τον συγκερασμό των πλεονεκτημάτων από τους swept time αναλυτές και τους αναλυτές που βασίζονται στον Fourier και συγκεκριμένα:

- Επιτρέπουν μεγάλο εύρος ζώνης χωρίς την απαίτηση για ιδιαίτερα πολλούς υπολογιστικούς πόρους.
- Ελέγχει την αύξηση του επιπέδου θορύβου και των φασματικών διαρροών λόγω του FFT.
- Παράγει το αποτέλεσμα σε πραγματικό χρόνο.
- Προσφέρει μεγάλη ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας.

Η υλοποίηση γίνεται με τα εξής στοιχεία:

- Το εισερχόμενο σήμα οδηγείται σε μια τράπεζα φίλτρων που μπορεί να είναι είτε UDFT ή MDFT (στο σχήμα είναι UDFT 16 ζωνών).
- Στη συνέχεια παραλληλοποιούνται N δείγματα ανά υποκανάλι (N=128 στο παράδειγμα) και εφαρμόζεται παράθυρο για τον έλεγχο των διαρροών του FFT.
- Πραγματοποιείται FFT N δειγμάτων.
- Λαμβάνεται απόλυτη τιμή και ύψωση στο τετράγωνο.
- Τα αποτελέσματα πολυπλέκονται και ενοποιούνται για τα 16 κανάλια ώστε να παρουσιαστεί η τελική εκτίμηση του φάσματος.



Εικόνα 78. Διάγραμμα Αναλυτή Φάσματος με συνδυασμό τράπεζας φίλτρων και FFT

Βιβλιογραφία

[1] Cognitive Radio Technology - Bruce A. Fette

[2] Distributed Coordination in Dynamic Spectrum Allocation Networks - Jun Zhao, Haitao Zheng, Guang-Hua Yang

[3] Spectrum Occupancy Measurements and Analysis in Beijing , Jiantao Xue*,Zhiyong Feng,Ping Zhang, doi: 10.1016/j.ieri.2013.11.042

[4] A Survey of Dynamic Spectrum Access : Signal Processing and Networking Perspectives , Qing Zhao , Ananthram Swami

[5] A Dynamic Spectrum Access on SDR for IEEE 802.15.4 networks

[6]https://www.juniper.net/documentation/en_US/junos-space-apps/network-director4.0/topics/concept/wireless-interference.html

[7] https://www.viavisolutions.com/en-us/what-rf-interference

[8] https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/signal-interference

[9]https://doi.org/10.1080/17517575.2021.1939426 A novel service level agreement model using blockchain and smart contract for cloud manufacturing in industry 4.0 , Wenan Tan, Hai Zhu, Jinjing Tan, Yao Zhao, Li Da Xu & Kai Guo

[10] https://blog.endaq.com/vibration-analysis-fft-psd-and-spectrogram

[11 https://learn.keysight.com/application-notes/spectrum-analysis-basics#main-content

[12] https://en.wikipedia.org/wiki/Spectrum_analyzer

[13]https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/Subsystems/concepts/content/concepts_types_spec_an.htm

[14] Signal Processing Basics & Filtering - Computer Science Department, University of Crete

[15] Book : Software Defined Radio for Engineers

[16] Book : Simulation Techniques, Models of Communication Signals and Processes – Floyd M. Gardner, John D. Baker (library)

[17] Book : *Spectrum and Network Measurements* by Robert A. Witte (Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993).

[18] https://www.tek.com/en/documents/primer/what-spectrum-analyzer-and-why-do-you-need-one

[19] https://www.electronics-notes.com/articles/test-methods/spectrum-analyzer/fft-fast-fourier-transform-spectrum-analyser.php

[20] NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey

[21] Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey , Ian F. Akyildiz , Brandon F. Lo, Ravikumar Balakrishnan

[22] Elaborate analysis and design of filter-bank-based sensing for wideband cognitive radios , Konstantinos Maliatsos* , Athanasios Adamis and Athanasios G Kanatas

[23] Fundamentals of Statistical Signal Processing-Detection Theory, Steve M. Kay

[24] Θεωρία Εκτίμησης & Ανίχνευσης, Γεώργιος Β. Μουστακίδης, Καθηγητής Πανεπιστήμιο Πατρών

[25]https://www.analog.com/en/education/education-library/software-defined-radio-for-engineers.html

[26] A Dynamic Spectrum Access on SDR for IEEE 802.15.4 networks

[27] https://wiki.gnuradio.org

[28] Modified DFT Filter Banks with Perfect Reconstruction, Tanja Karp, Member, IEEE, and N. J. Fliege, Senior Member, IEEE