



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Σχολή Τεχνολογίας

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

Μελέτη και σχεδίαση ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων με χρήση GNU Radio και USRP

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γονιδάκης Κωνσταντίνος (ΑΜ: 3120075)

Επιβλέπων: Καρέτσος Γεώργιος, Καθηγητής

ΛΑΡΙΣΑ, Ιούνιος 2024



UNIVERSITY OF THESSALY

School of Technology

Digital Systems Department

Study and design of wireless tele- communication systems using GNU Radio and USRP

BACHELOR THESIS

Gonidakis Konstantinos (RN: 3120075)

Supervisor: Karetsos George, Prof

LARISSA, June 2024

Υπεύθυνη Δήλωση περί Ακαδημαϊκής Δεοντολογίας και Πνευματικών Δικαιωμάτων

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον, και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

(Υπογραφή)

Ονοματεπώνυμο Φοιτητή

Γονιδάκης Κωνσταντίνος

Ημερομηνία

19/6/2024

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Καρέτσος Γεώργιος

Βαθμίδα/ιδιότητα επιβλέποντα,

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Γονιδάκης Κωνσταντίνος

Βαθμίδα/ιδιότητα μέλους 1, Τμήμα/Ιδρυμα μέλους 1

Ημερομηνία έγκρισης: dd-mm-yyyy

Περίληψη

Η πτυχιακή αυτή εργασία δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην ανάλυση αλλά και στην μελέτη – σχεδίαση των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων επικεντρώνοντας σε ειδικά εργαλεία – λογισμικά και πρόσθετα αυτών, όπως το GNU Radio, το LabVIEW και το λογισμικό κάποιων συστημάτων προγραμματιζόμενων ραδιοσυχνοτήτων USRP. Περιγράφονται αναλυτικά τα κύρια μέρη τους, τα χαρακτηριστικά τους, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα παράλληλα γίνεται ανάλυση στους σύγχρονους δέκτες και στις εφαρμογές που βρίσκουν τόπο σε διάφορους τομείς όπως η ερασιτεχνική ραδιοεπικοινωνία. Αναδεικνύεται η σημαντική συμβουλή των Software Defined Radio και παρατίθενται αξιολογικές εφαρμογές οι οποίες αποδεικνύουν την ανάγκη για συνεχή έρευνα στο συγκεκριμένο τομέα. Ακόμα ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στα συστήματα ραδιοεπικοινωνιών (SDR) και στην τεχνολογική τους εξέλιξη όπως και στις πρακτικές εφαρμογές τους. Ειδικότερα έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο της National Instruments USRP-2920 με bandwidth 50 MHz – 2.2 GHz με απώτερο σκοπό να εξυπηρετήσει την υλοποίηση. Η έρευνα επικεντρώνεται στην κατανόηση βασικών αρχών καθώς και στην εκτενείς ανάλυση των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, στην ερμηνεία – σύγκριση διαμορφώσεων της QAM σχηματικά και διαγραμματικά αλλά και τις διαφορές που αναπτύσσονται σε σχέση με άλλες διαμορφώσεις.

Ακόμα υλοποιείται ένα πραγματικό FM-receiver και έπειτα ένα FM-transmitter με την βοήθεια όλου του εξοπλισμού που έχει αναλυθεί παρακάτω αλλά και με την βοήθεια του GNU Radio για το receiver και του LabVIEW για το transmitter. Σκοπός της προκείμενης πτυχιακής είναι αφενός η εμβάθυνση θεωρητικών αλλά και ιστορικών γνώσεων - βάσεων γύρω από τον τομέα των ασύρματων τηλεπικοινωνιών, ο πειραματισμός με εξειδικευμένο εξοπλισμό και αφετέρου μέσα από την υλοποίηση που πραγματοποιήθηκε να φανούν οι δυνατότητες που προσφέρουν οι τηλεπικοινωνίες σε συνδυασμό με λίγο hardware.

Abstract

This thesis gives special emphasis to the analysis but also to the study - design of wireless telecommunication systems focusing on special tools - software and their add-ons, such as GNU Radio, LabVIEW and the software of some USRP programmable radio frequency systems. Their main parts, their characteristics, advantages and disadvantages are described in detail, while an analysis is made of modern receivers and the applications found in various fields such as amateur radio communication. The important advice of Software Defined Radio is highlighted and respectable applications are listed which demonstrate the need for continued research in the specific area. A special emphasis has also been placed on radio communication systems (SDR) and their technological development as well as their practical applications. In particular, the National Instruments USRP-2920 model with Bandwidth 50 MHz – 2.2 GHz has been used with the ultimate purpose of serving our implementation. The research focuses on the understanding of basic principles as well as on the extensive analysis of wireless telecommunication systems, on the interpretation - comparison of QAM configurations schematically and diagrammatically as well as the differences that develop in relation to other configurations.

A real FM-receiver and then an FM-transmitter is still implemented with the help of all the equipment that has been analyzed below but also with the help of GNU Radio for the receiver and LabVIEW for the transmitter. The aim of this thesis is, on the one hand, to deepen theoretical and historical knowledge - bases around the field of wireless telecommunications, experimentation with specialized equipment, and on the other hand, through the implementation carried out, to see the possibilities offered by telecommunications in combination with some hardware.

Ευχαριστίες

Η διεκπεραίωση της προκείμενης πτυχιακής εργασίας καθώς και του όλου εγχειρήματος δεν θα μπορούσε να έρθει εις πέρας δίχως την πολύτιμη βοήθεια αλλά και υποστήριξη ενός συνόλου ανθρώπων για τους οποίους είμαι ευγνώμων και θα επιθυμούσα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου καθώς θα ήθελα με αυτό τον τρόπο να αναγνωριστεί και ο δικός τους κόπος για όλη τη βοήθεια που μου παρείχαν ώστε να υλοποιηθεί όσο το δυνατόν ορθότερα αυτή η εργασία.

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω προσωπικά τον καθηγητή μου κ. Καρέτσο Γεώργιο αλλά και συνοδοιπόρο μου καθώς μου στάθηκε σε όποια δυσκολία προέκυψε ειδικά κατά τη διάρκεια των αρχικών πειραμάτων μου λύνοντας μου οποιοδήποτε προβληματισμό πρόκυπτε εν ευθέτω χρόνο, δίνοντας μου σωστή καθοδήγηση, όλες τις απαραίτητες συμβουλές και το πιο σημαντικό από όλα την εμπιστοσύνη την οποία μου έδειχνε καθημερινά εμπνέοντας με να προχωρήσω ακόμα περισσότερο. Επομένως μου στάθηκε ως πολύτιμος αρωγός από την αρχή ως το τέλος δίνοντάς μου τη δυνατότητα να καταφέρω περισσότερα από όσα είχα στο αρχικό μου πλάνο να υλοποιήσω.

Ως εκ τούτου θα ήθελα να εκφράσω απέραντη ευγνωμοσύνη σε όλο το άρτια καταρτισμένο προσωπικό του τμήματος Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας που μου έδωσε τη δυνατότητα να κάνω μια ζωντανή υλοποίηση λήψης και μετάδοσης ραδιοφώνου στο πλήρως εξοπλισμένο εργαστήριο με όλον τον απαραίτητο εξοπλισμό.

Τέλος θα ήταν μεγάλη παράλειψη να μην εκφράσω τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου για τη συνεχή ψυχική αλλά και οικονομική υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου

Γονιδάκης Κωνσταντίνος

19/6/2024

Περιεχόμενα

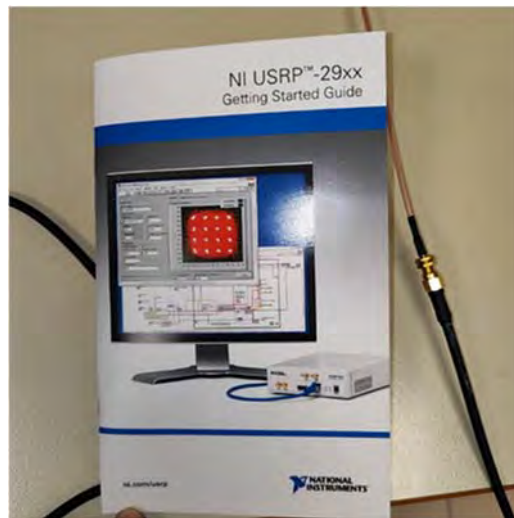
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	VII
ABSTRACT	IX
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	XI
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	XIII
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	5
2.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	5
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	6
2.3 ΕΙΔΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ – ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ – ΔΟΜΗ – ΙΣΟΣΤΑΘΜΙΣΤΕΣ, ΚΑΝΑΛΙΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	9
2.3.1 <i>Είδη Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων</i>	9
2.3.2 <i>Κριτήρια Απόδοσης και Περιορισμοί</i>	11
2.3.3 <i>Δομή Τηλεπικοινωνιακού συστήματος</i>	12
2.3.4 <i>Τρόποι Διάδοσης</i>	13
2.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ SOFTWARE DEFINED RADIO (SDR).....	14
2.5 ΤΥΠΟΙ ΔΕΚΤΩΝ (ΧΡΗΣΕΙΣ – ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ)	15
3 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ FM TRANSMITTER - RECEIVER	19
3.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΑ USRP ΚΑΙ ΠΟΙΑ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ	20
3.2 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ FM RECEIVER ΣΤΟ GNU RADIO.....	36
3.3 LABVIEW.....	48
3.3.1 <i>Ιδιότητες και τα Χαρακτηριστικά του LabVIEW</i>	49
3.4 FM TRANSMITTER.....	51
3.4.1 <i>Πομπός FM (Frequency Modulation)</i>	51
3.4.2 <i>Λειτουργία – Χαρακτηριστικά – Εφαρμογές</i>	51
4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ FM TRANSMITTER ΜΕ LABVIEW	53
4.1 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΗΧΟΥ ΣΕ AUDIO ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	53

4.2	ΠΡΟΒΟΛΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	56
5	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ M-QAM TRANSMITTER - RECEIVER	59
5.1	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ QAM ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ	66
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	77

1 Εισαγωγή

Η παρούσα πτυχιακή βασίζεται στις αρχές της ραδιοεπικοινωνίας και στην μελέτη – σχεδίαση των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Ξεκινώντας με τη ραδιοεπικοινωνία η οποία παραμένει να είναι ένα σύγχρονο μέσο επικοινωνίας – ψυχαγωγίας και όχι μόνο αλλά είναι και ένας από τους σημαντικότερους τομείς της σύγχρονης τεχνολογίας εφόσον επηρεάζουν καθημερινά τη ζωή μας μέσα από πληθώρα γκάμα εφαρμογών. Αντικείμενο μελέτης απασχολεί τους κλάδους των τηλεπικοινωνιών, των δορυφορικών επικοινωνιών, της ραδιοτηλεοπτικής μετάδοσης αλλά και της στρατιωτικής ασφάλειας. Μέρα με τη μέρα υπάρχει μεγάλη εξέλιξη των συγκεκριμένων τεχνολογιών και σημειώνονται πολλές καινοτομίες ειδικά στις ραδιοεπικοινωνίες διαμέσων λογισμικών. Επομένως αναφερόμαστε σε συστήματα Software Defined Radio όπου με τον τρόπο τους έχουν την ικανότητα να σχεδιάζουν να υλοποιούν συστήματα ραδιοεπικοινωνιών παράλληλα μπορούν να εξελίσσονται με την πάροδο των χρόνων προσφέροντας πλεονεκτήματα ευελιξίας ,προσαρμοστικότητας ,οικονομίας , αλλά και ανεξαρτητοποίηση από τους περιορισμούς του hardware. Δηλαδή τα παλαιότερα χρόνια τα παραδοσιακά ράδιο-συστήματα χρησιμοποιούσαν αρκετά λειτουργικά μέρη τα οποία είχαν υλοποιηθεί με εξειδικευμένο υλικό και λογισμικό και όλο αυτό επέφερε μεγάλες επιπτώσεις από την άποψη του εξοπλισμού καθώς απαιτούσε μεγάλους πόρους συνεχής αναβάθμιση εξοπλισμού αλλά και λογισμικού όπως και συνεχές αλλαγές σε πολλαπλά πρωτόκολλα. Εκτός αυτών των επιπτώσεων είχαμε καθυστερήσεις σε πολλά project εφόσον υπήρχε εξάρτηση από εξειδικευμένο υλικό, εδώ έρχονται τα SDR όπου με την υποβοήθηση λογισμικού επιτρέπουν εύκολη αναβάθμιση και προσαρμογή των συστημάτων με νέα πρωτόκολλα και διαφορετικές τεχνολογίες καθώς η ανάγκη για φυσική αντικατάσταση του εξοπλισμού πλέον είναι ανύπαρκτη μειώνοντας έτσι το κόστος και αυξάνοντας την ευελιξία αλλά και την ικανότητα πολυλειτουργικότητας με άλλες συσκευές όπου μπορούν και αυτές να υποστηρίξουν παρόμοια πρωτόκολλα έτσι ώστε με μια απλή αλλαγή του λογισμικού να προχωρήσουν νέα project. Πρωταρχικό ρόλο σε όλα αυτά παίζουν οι δέκτες των ραδιοσυνοτήτων όπου σκοπός τους είναι να ανιχνεύουν και να επεξεργάζονται ηλεκτρομαγνητικά σήματα αλλά και να τα μετατρέπουν σε χρήσιμα δεδομένα ή πληροφορίες. Οι εν

λόγω δεκτές θα πρέπει να παρέχουν υψηλή ευαισθησία, επιλεκτικότητα και το βασικότερο απόκριση συχνότητας έτσι ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία λήψεων σημάτων αυτό ισχύει είτε ένας δέκτης είναι παραδοσιακός είτε σύγχρονος. Οι βασικές διαφορές ενός παραδοσιακού και ενός σύγχρονου δέκτη είναι ότι ένας παραδοσιακός δέκτης βασίζεται σε αναλογικές μεθόδους λήψης και επεξεργασίας ραδιο-σημάτων επομένως χρησιμοποιεί αναλογικά κυκλώματα με σκοπό την αποδιαμόρφωση και την ενίσχυση των σημάτων άρα επιτυγχάνεται αναλογική επεξεργασία με μίκτες φίλτρα και ενισχυτές, σταθερή σχεδίαση δηλαδή υπάρχει εξάρτηση του κυκλώματος και δεν μπορεί να αλλάξει αν δεν αντικατασταθεί ένα φυσικό-αναλογικό κύκλωμα και τέλος από τη στιγμή που θα σχεδιαστεί μια εξειδικευμένη συσκευή δεν θα μπορέσει να προσαρμοστεί έγκαιρα για άλλη χρήση με αποτέλεσμα με την πάροδο των χρόνων ίσως να μείνει άχρηστη εφόσον η τεχνολογία των τηλεπικοινωνιών είναι ένας κλάδος που αναπτύσσεται ραγδαία. Παρόλα αυτά όμως προσφέρουν απλότητα και αξιοπιστία. Ενώ ένας σύγχρονος δέκτης χρησιμοποιεί ψηφιακές μεθόδους και σύγχρονα λογισμικά για την επεξεργασία ραδιο-σημάτων και έχει τη δυνατότητα να ενσωματώνει εξειδικευμένους μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό και ψηφιακού σε αναλογικό ενώ μπορεί να επεξεργάζεται τα ψηφιακά σήματα υποβάλλοντας τα σε επεξεργασία από εξειδικευμένο λογισμικό το οποίο συνεργάζεται άρτια με τον εξοπλισμό ενώ μπορούμε με την πάροδο των χρόνων να αναβαθμίζουμε τα συστήματά μας , να τα κάνουμε να συγχρονιστούν με άλλα προσφέροντας ευελιξία και προσαρμοστικότητα. Το μόνο αρνητικό που θα μπορούσαμε να αναφέρουμε για τους σύγχρονους δέκτες είναι πως μιλάμε για μια ακριβή επένδυση προχωρημένης τεχνολογίας σε σχέση με τους φτηνούς παραδοσιακούς δεκτές όμως αν αναλογιστούμε τι προσφέρει χρονικά θα καταλάβουμε ότι αξίζει το κόστος του. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει καλύτερος και λιγότερο καλός δέκτης είτε είναι φθηνός είτε ακριβός εφόσον ακόμη και σήμερα κάθε ένας βρίσκει χρήση σε συγκεκριμένες εφαρμογές τις οποίες λόγω των συνθηκών είτε του οικονομικού είτε του περιβάλλοντος δεν μπορούν να αντικατασταθούν ή δεν συμφέρει να αντικατασταθούν. Ωστόσο στη δικιά μας περίπτωση η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε με ψηφιακούς ενσωματωμένους δέκτες χρησιμοποιώντας όλα τα πρωτόκολλα τα οποία ήταν αναγκαία καθώς όπως και όλα τα πρότυπα. Ενώ ταυτόχρονα επειδή όπως είπαμε ο ψηφιακός εξοπλισμός (Εικόνες 16 – 29) που χρησιμοποιήθηκε ήταν ιδιαίτερα ακριβός λήφθηκαν όλα τα απαραίτητα μέτρα προστασίας έτσι ώστε οι μετρήσεις να είναι ακριβείς όπως ακριβώς ορίζει η εταιρεία παραγωγής στο εγχειρίδιο χρήσης (Εικόνα 1).



Εικόνα 1 Εγχειρίδιο Χρήσης

2 Ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα

Παρακάτω θα αναλυθούν τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και συστήματα ενώ παράλληλα θα γίνει ιστορική αναδρομή αυτών και θα περιγραφούν εκτεταμένα τα είδη , τα μοντέλα , οι τεχνολογίες ,τα κριτήρια απόδοσης, οι περιορισμοί, τα βασικά σημεία για τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, η ανάλυση της δομής του, η αποκωδικοποίηση της πηγής, η αποδιαμόρφωση, ο ιστοσταθμιστής της , οι ορολογίες των καναλιών και των βασικών τύπων τους, οι τρόποι διάδοσης, οι λόγοι εξασθένησης των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων κ.α.

2.1 Γενικές έννοιες

Πριν εμβαθύνουμε σε ειδικές ορολογίες ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων – συστημάτων και στις τεχνικές αυτών θα αναφερθούμε σε κάποιες γενικές έννοιες των ασύρματων δικτύων. Ως ένα ασύρματό δίκτυο[1], [2] θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο και παραδείγματα – υλοποιήσεις αυτών είναι ένα τηλεφωνικό δίκτυο, ένα τοπικό η εξωτερικό δίκτυο υπολογιστών κ.α. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται πίσω από αυτές τις εφαρμογές είναι τα ραδιοκύματα όπου χρησιμοποιούνται ως φορείς πληροφορίας. Δηλαδή η ροή των δεδομένων γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και η συχνότητα του φέροντος καθορίζεται από τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων ο οποίος κάθε φορά είναι διαφορετικός ανάλογα με τις απαιτήσεις που υποστηρίζει το δίκτυο. Οι κύριες διαφορές της ασύρματης επικοινωνίας με την ενσύρματη είναι ότι δεν χρησιμοποιούνται για την διαδικασία μετάδοσης υλικά όπως τα καλώδια. Σε προηγούμενα χρόνια οι απαιτήσεις των τηλεφωνικών δικτύων ήταν μικρότερες και έτσι τα τηλεφωνικά δίκτυα ήταν αναλογικά μεταγενέστερα όμως τα ασύρματα δίκτυα βασίζονται σε ψηφιακές τεχνολογίες όπου στην ουσία αναφερόμαστε σε υλοποιήσεις δικτύων υπολογιστών τις περισσότερες φορές σε τοπικό επίπεδο με στατικές ip και χρήση τηλεφωνικών κέντρων. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αλλά και οι δορυφορικές επικοινωνίες είναι ενταγμένα στον τομέα των ασύρματων δικτύων όπως και τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN) , τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN), τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN) είναι οι ναυαρχίδες

των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Εφόσον η υλοποίηση μας επί της ουσίας βασίζεται στον τομέα της ραδιοφωνίας, θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν και είναι τηλεπικοινωνιακά μέσα από τη φύση τους ασύρματα όπως και η τηλεόραση σε πολλές περιπτώσεις παρατηρείται πως δεν συμπεριλαμβάνονται στα ασύρματα δίκτυα και αυτό συμβαίνει διότι η μετάδοση γίνεται προς όλες τις κατευθύνσεις χωρίς να υπάρχει κάποια δόμηση στο όλο “δίκτυο” το οποίο είναι κατασκευασμένο με την τεχνολογία τηλεπικοινωνιακών κόμβων. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι όλες οι πληροφορίες των δεδομένων μεταφέρονται ως αναλογικές συμπεραίνοντας δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ή να συσχετιστούν δομικά με την τεχνολογία των δικτύων των υπολογιστών.

2.2 Ιστορική Αναδρομή

Ξεκινώντας μια ιστορική επισκόπηση, το 1876 ο Alexander Graham Bell εφευρίσκοντας μια νέα τεχνολογική καινοτομία στον τομέα της επικοινωνίας φέρνοντας στο φως την συσκευή του τηλεφώνου αν και αργότερα αποδείχθηκε επίσημα ότι προηγούμενος εφευρέτης είχε αναγνωριστεί ο ο Antonio Meucci. Λίγο αργότερα το 1915 έχουμε ανάπτυξη στην πρώτη τηλεφωνική μετάδοση μεγάλων αποστάσεων και όλο αυτό το χρωστάμε χάρη στην ανακάλυψη του τριαδικού ενισχυτή η οποία εμφανίστηκε το 1906. Έπειτα ξεκίνησαν οι εργασίες του 1953 για το πρώτο υπερατλαντικό καλώδιο το οποίο τέθηκε σε λειτουργία για την κάλυψη αναγκών της τηλεφωνίας. Το 1897 Ο Almon Brown Strowger κατασκευάζει τον πρώτο ηλεκτρομηχανικό αυτόματο μεταγωγέα ενώ το 1960 κατασκευάζεται και ο πρώτος ψηφιακός μεταγωγέας. Γύρω στο 1820 ο Oersted απέδειξε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί και παράγει μαγνητικό πεδίο έπειτα το 1831 ο Faraday τεκμηρίωσε με την κίνηση ενός μαγνήτη πλησίον ενός αγωγού ότι προκαλείται επαγωγικό ρεύμα που σημαίνει σ ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικού πεδίου. Το 1867 ο James Maxwell κατάφερε να προβλέψει την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αλλά και να τεκμηριώσει θεωρία αυτών. Το 1887 ο Hertz αποδεικνύει την ασύρματη μετάδοση σήματος για λίγα μέτρα αλλά και την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το 1896 Ο Guglielmo Marconi μέσα στην βρετανική υπηρεσία τηλεγράφων αποδεικνύει επί σκηνής τις λειτουργίες του ασύρματου τηλεγράφου. Το 1901 ο Marconi καταφέρνει με μεγάλη επιτυχία τη μετάδοση ραδιοφωνικού σήματος κατά μήκος του Ατλαντικού ωκεανού και όλο αυτό το οφείλεται στον Nicola Tesla και Alexander Stepanovich Popov. Λίγο αργότερα το 1914 πραγματοποιείται η πρώτη ράδιο επικοινωνιακή μετάδοση φωνής και στα τέλη του 1920 ξεκινούν οι εγκαταστάσεις

ασύρματων δεκτών σε οχήματα της αστυνομίας του Detroit. Το 1930 ξεκινά η ανάπτυξη των ασύρματων πομπών αλλά και η διαμόρφωση κατά πλάτος της φέρουσας καθώς και η ανάπτυξη όλου του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού η οποία καταλαμβάνει σε χώρο λίγο πάνω από το μισό ενός αυτοκινήτου. Το 1935 Ο Armstrong επιδεικνύει τη διαμόρφωση κατά συχνότητα (Frequency Modulation, FM) ενώ το 1946 αναπτύσσεται η ζεύξη αλλά και η διασύνδεση κινητών χρηστών με δημόσια δίκτυα PSTN. Το 1949 ιδρύεται ως νέα κατηγορία υπηρεσιών οι ασύρματες ραδιοεπικοινωνίες από την FCC. Επομένως τα τελευταία 50 χρόνια υπάρχει κατακόρυφη ανάπτυξη στους τομείς των δορυφορικών επικοινωνιών στους τομείς των οπτικών επικοινωνιών σε κινητές κυψελωτές ασύρματης επικοινωνίας και το σημαντικότερο αναπτύσσονται λογισμικά, κατασκευάζονται συσκευές μετατροπής από αναλογικό σε ψηφιακό. Επίσης υπάρχουν ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις στα ηλεκτρονικά, δηλαδή σε εφαρμογές με ολοκληρωμένα κυκλώματα, σε εφαρμογές παραγωγής και ενίσχυσης μικροκυμάτων, σε τεχνολογίες κεραιών και διαμόρφωσης αυτών, και στα transistor. Ακόμα καλπάζουν και οι θεωρητικές εξελίξεις στον τομέα της εκπαίδευσης αλλά και της παραγωγής, πιο συγκεκριμένα υπάρχει ανάπτυξη στην θεωρία της πληροφορίας σε τεχνικές διαμόρφωσης και σε διάφορους αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος. Θα θεωρούταν παράλειψη αν δεν αναφερόμασταν στην «φрукτωρία» όπου είναι το πρώτο σύστημα ασύρματης αλλά και ψηφιακής επικοινωνίας και η πρώτη εμφάνισή του γίνεται πριν το 1100 προ χριστού στην πορεία των χρόνων αναβαθμίστηκε τεχνολογικά αλλά και επεκτάθηκε σε ολόκληρη την ελληνική επικράτεια. Όπως σε όλα τα ασύρματα συστήματα ψηφιακής επικοινωνίας έτσι και σε αυτό που υπήρχε δεν θα μπορούσε να λείπει το σύστημα αναμετάδοσης το οποίο αποτελούνταν από 2 ομάδες των 5 ατόμων η κάθε μία, η πρώτη ομάδα έπρεπε να αναδείξει σύμφωνα με τον αριθμό των κλάδων οποίος ήταν αναμμένος αποδείκνυε το τμήμα των γραμμάτων για το οποίο γινόταν αναφορά ενώ η δεύτερη ομάδα έφερε αριθμό των αναμμένων δάδων και προσπαθούσε να επιδείξει σε ποιο συγκεκριμένο γράμμα γινόταν αναφορά από το τμήμα αυτό. (βλ Εικόνα 2)



Εικόνα 2 Φρυκτωρία το 1ο ασύρματο σύστημα επικοινωνίας

Πηγή εικόνας: Οι εικόνες υπάρχουν στο βιβλίο «Συστήματα Τηλεπικοινωνιών», J. G. Proakis, M. Salehi, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (Μετάφραση-Επιμέλεια: Καρούμπαλος Κ. και Ζέρβας Ε., Καραμπογιάς Σ., Σαγκριώτης Ε.)

Πρέπει να γνωρίζετε ότι όλες οι δάδες ήταν πάντοτε αναμμένες και δεν τις έσβηναν κάθε φορά αλλά χρησιμοποιούσαν μια άλλη τεχνική της κάλυψης και της αποκάλυψης με την χρήση ενός πανιού που είχε σκοπό τη μετάδοση του εκάστοτε χαρακτήρα, το μήνυμα που προσπαθούσαν να μεταφέρουν είχε τη δυνατότητα να μεταδοθεί σε γεωγραφικές αποστάσεις ύψους 1000 km και άνω και όλο αυτό σε λιγότερο από 1 ώρα . Περίεργο του όλου συστήματος αλλά και ταυτόχρονα εξαιρετικά ενδιαφέρον είναι ότι οι θέσεις των σταθμών αναμετάδοσης (Εικόνα2.1) είναι σχεδόν οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.



Εικόνα 2.1 Σταθμοί αναμετάδοσης

Πηγή εικόνας: Οι εικόνες υπάρχουν στο βιβλίο «Συστήματα Τηλεπικοινωνιών», J. G. Proakis, M. Salehi, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (Μετάφραση-Επιμέλεια: Καρούμπalos Κ. και Ζέρβας Ε., Καραμπογιάς Σ., Σαγκριώτης Ε.)

2.3 Είδη Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων – Κριτήρια Απόδοσης και Περιορισμοί – Δομή – Ισοσταθμιστές, κανάλια και τρόποι μετάδοσης

2.3.1 Είδη Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων

Ένα από τα βασικά είδη τηλεπικοινωνιακών συστημάτων είναι τα τηλεφωνικά συστήματα τα οποία εντάσσονται στα ενσύρματα συστήματα και παρέχουν την παλιά πολλαπλή σύνδεση (POTS) η οποία επιτυγχάνεται με καλώδια χαλκού για να μπορεί να μεταδοθεί η πληροφορία της φωνής. Ένα άλλο είδος στα τηλεφωνικά συστήματα είναι τα ISDN (Integrated Services Digital Network) όπου εδώ αναφερόμαστε σε ψηφιακά πια τηλεφωνικά δίκτυα τα οποία παρέχουν τη μετάδοση της φωνής αλλά και πολλών δεδομένων όπως βίντεο μέσα από το ίδιο δίκτυο. Παρακάτω θα αναφερθούμε στα δίκτυα υπολογιστών τα οποία κατά βάση η συνδεσμολογία τους είναι το Ethernet RJ45 όπου με αυτό το καλώδιο αναπτύσσονται διάφορες τοπολογίες όπως αυτή του αστέρα με σκοπό την δημιουργία ενός ενσύρματου τοπικού δικτύου (LAN) το συγκεκριμένο καλώδιο βγαίνει σε διάφορες κατηγορίες ,όμως σήμερα η πιο διαδεδομένη είναι η CAT 5/6 κάθε μία

υποστηρίζει διαφορετικές ταχύτητες και λειτουργίες. Επιπρόσθετα, έχουμε και τις οπτικές ίνες όπου χρησιμοποιούν φωτεινά σήματα με σκοπό τη μετάδοση μεγάλων όγκων δεδομένων και προσφέρουν υψηλές ταχύτητες σε μεγάλες αποστάσεις. Περνώντας στα ασύρματα συστήματα και πιο συγκεκριμένα στην κινητή τηλεφωνία όπου έχουμε 2G,3G,4G,5G δηλαδή διαφορετικές γενιές της κινητής τηλεφωνίας οι οποίες προσφέρουν βελτιώσεις με την πάροδο των χρόνων στις ποιότητες των παροχών υπηρεσιών που προσφέρουν για τη μεταφορά των δεδομένων και της φωνής αλλά και στην ταχύτητα. Ένα άλλο ασύρματο σύστημα είναι αυτό που επιτυγχάνεται με τη χρήση δορυφόρων όπως λειτουργεί το GPS (Global Positioning System) , η δορυφορική τηλεόραση, το δορυφορικό ραδιόφωνο και ότι χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πληροφοριών μέσω δορυφόρου όπως οι δορυφορικές επικοινωνίες οι οποίες μπορούν να προσφέρουν τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες σε δυσμενείς περιοχές και όχι μόνο. Μια άλλη κατηγορία είναι αυτή των δημοσίων δικτύων όπου εδώ αναφερόμαστε σε κυψελωτά δίκτυα τα οποία μπορούν και χωρίζονται σε μικρές κυψέλες αντιστοιχίζοντας κάθε μία το δικό της πομποδέκτη σε διάφορες περιπτώσεις ανάλογα βέβαια και τις απαιτήσεις υπάρχει διάσπαση σε πιο μικρά κυψελωτά δίκτυα με σκοπό τη βέλτιστη επικοινωνία. Επίσης υπάρχουν τα GSM (Global System for Mobile Communications) όπου προσφέρουν τις υπηρεσίες τους στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς. Έπειτα περνάμε στα δίκτυα σταθερής τηλεφωνίας τα γνωστά σε όλους PSTN (Public Switched Telephone Network) και VoIP (Voice over Internet Protocol) . Η τεχνολογία VoIP προσφέρει τη μετάδοση φωνής από το διαδίκτυο η οποία πολλές φορές επιτυγχάνεται μέσω καλωδίων ethernet όπου ένα ζεύγος μεταφέρει πληροφορία και το άλλο ρεύμα. Μια άλλη κατηγορία η οποία χρησιμοποιείται καθημερινά είναι τα εταιρικά και ιδιωτικά δίκτυα ή αλλιώς PBX (Private Branch Exchange) και VPN (Virtual Private Network) . Τα πιο διαδεδομένα όμως τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι αυτά της εκπομπής και λήψης εδώ αναφερόμαστε στην τηλεόραση και στο ραδιόφωνο είτε αυτή η λειτουργία γίνεται αναλογικά είτε ψηφιακά. Επίσης ένας κλάδος είναι τα δίκτυα δεδομένων τα οποία βρίσκουν χρήση στα δίκτυα υπολογιστών και τα πρωτόκολλα TCP/IP. Εδώ εντάσσονται και τα δίκτυα σκευωροί που επικοινωνούν μεταξύ τους με άλλες υπηρεσίες και όλο αυτό επιτυγχάνεται μέσω του διαδικτύου τα λεγόμενα IoT (Internet of Things). Τέλος δεν θα μπορούσαμε να παραλείψουμε τα ολοκληρωμένα συστήματα που συνδυάζουν φωνητικές κλήσεις, ανταλλαγή μηνυμάτων, βιντεοκλήσεις και όλα αυτά σε μια ενσωματωμένη πλατφόρμα ενώ λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο. Όπως είδαμε τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι ποικίλα και διαφέρουν οι τύποι πλη-

ροφορίας τους υπάρχουν σχεδιαστικές προκλήσεις σε θέματα υλικού αλλά και επεξεργασίας, η αναπαράσταση της πληροφορίας γίνεται με αναλογικά σήματα και σύμβολα. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ένα γενικό μοντέλο ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος έχει ως αρχή την πηγή η οποία μπορεί και παράγει ένα σήμα προς μετάδοση στη συνέχεια έχουμε τον πομπό όπου δουλειά του είναι να μπορέσει να μετατρέψει ένα σήμα σε μια κατάλληλη μορφή ώστε να μπορεί να μεταδοθεί από ένα κανάλι, όμως κάθε κανάλι πάντα φέρνει παραμόρφωση μέσω του θορύβου και δημιουργεί διάφορες παρεμβολές επομένως ο δέκτης προσπαθεί να το αποδιαμορφώσει αλλά και να επεξεργαστεί το σήμα που πήρε και τέλος καταλήγουμε σε έναν μετατροπέα εξόδου όπου πρέπει να μετατραπεί η έξοδος που παίρνει από τον δέκτη στα αρχικά πλαίσια της πληροφορίας.

2.3.2 Κριτήρια Απόδοσης και Περιορισμοί

Τα κριτήρια απόδοσης στα αναλογικά συστήματα επικοινωνίας είναι βασικά η πιστότητα η οποία χαρακτηρίζεται από τον τύπο $m(t) \approx \hat{m}(t)$ ενώ στα ψηφιακά συστήματα επικοινωνίας το κριτήριο είναι η πιθανότητα σφάλματος bit η οποία χαρακτηρίζεται από τον τύπο $P_b = P(b \neq \hat{b})$. Αυτά ισχύουν όταν οι συνθήκες σε ένα μη ιδανικό κανάλι και όταν P_b είναι εξαρτώμενη από την ισχύ του σήματος και την ισχύ του θορύβου, από το ίδιο το κανάλι και τα χαρακτηριστικά του και από τον ρυθμό τον οποίο μεταδίδονται τα δεδομένα. Ένω παράλληλα υπάρχουν και περιορισμοί δηλαδή ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων περιορίζεται από την ισχύ του σήματος και του θορύβου και από την παραμόρφωση. Ακόμα και όταν δεν έχουμε παραμόρφωση ή θόρυβο τότε μπορεί να επιτευχθεί ρυθμός μετάδοσης χωρίς τέλος δηλαδή ένας ατέρμων βρόγχος με μηδενική πιθανότητα P_b . Σύμφωνα όμως με το θεώρημα shannon-Hartley όπου ορίζεται ο μέγιστος δυνατός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων με παρουσία θορύβου. Πιο συγκεκριμένα για ένα κανάλι AWGN χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος $C = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{WN_0} \right) \text{ bits/sec}$ όμως πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς δεν κάνει για δέκτες με πρακτικά συστήματα. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι αν υπάρχει μετάδοση με ρυθμό $R < C$ τότε και μόνο τότε υπάρχει δυνατότητα μετάδοσης χωρίς σφάλματα με παρουσία θορύβου. Γενικότερα μπορούμε να κατανοήσουμε ότι τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα έχουν τη δυνατότητα διαμορφώνουν και να επεξεργάζονται αναλογικά σήματα με σκοπό τη μετάδοση σε ένα κανάλι αντιμετωπίζοντας την παραμόρφωση είτε στο θόρυβο είτε στο κανάλι.

2.3.3 Δομή Τηλεπικοινωνιακού συστήματος

Όπως μπορούμε να καταλάβουμε η δομή ενός ψηφιακού τηλεπικοινωνιακού συστήματος δεν είναι τόσο απλή παρακάτω θα προσπαθήσουμε να δώσουμε μια βασική διαδικασία της δομής αυτής. Ξεκινώντας με την πηγή και σε συνδυασμό με το αναλογικό σήμα το οποίο φτάνει στον κωδικοποιητή και στη συνέχεια διάφορα δυαδικά σύμβολα καταφτάνουν στον κωδικοποιητή του καναλιού τα οποία συνεχίζουν σε ένα ψηφιακό διαμορφωτή ως αναλογικά σήματα φτάνοντας σε ένα κανάλι και στη συνέχεια αναλαμβάνει ένας ψηφιακός διαμορφωτής την αποκωδικοποίηση του καναλιού των διαδίκων συμβόλων και έπειτα την αποκωδικοποίηση της πηγής καταλήγοντας στα επιθυμητά αποτελέσματα ή αλλιώς στην έξοδο. Η πηγή πληροφορίας είναι αναλογική και έχει τη δυνατότητα να μετατραπεί σε ψηφιακή ενώ όταν η πηγή πληροφορίας είναι ψηφιακή τότε χρησιμοποιούνται σύμβολα από πεπερασμένο αλφάβητο και μετατρέπονται σε δυαδική ή μια άδικη μορφή, εκεί αναπτύσσονται φαινόμενα όπως της εντροπίας και της πληροφορίας συμβόλου. Βασικός στόχος του αποκωδικοποιητή της πηγής είναι η αναπαράσταση σε bits, παίρνει ως είσοδο μια ακολουθία συμβόλων, και πρέπει να βγάλει ως έξοδο μια ακολουθία bits. Η όλη διαδικασία της κωδικοποίησης μπορεί να είναι είτε με απώλειες είτε χωρίς απώλειες εκτός αν η πηγή είναι αναλογική τότε θα έχουμε πάντα απώλειες. Αυτό που επιτυγχάνεται στον αποκωδικοποιητή καναλιού είναι ο έλεγχος σφαλμάτων και η ανίχνευση αυτών με σκοπό την διόρθωσή τους, εδώ υπάρχει είσοδος συμβολοσειρών αλλά και έξοδος συμβολοσειρών (συμβολοσειρές εννοούνται τα bits). Όταν γίνεται χρήση φίλτρων πομπού και δέκτη τότε βρισκόμαστε στη φάση της μετάδοσης της βασικής ζώνης και βασικός στόχος είναι το σύμβολο το οποίο μεταδίδεται να μορφοποιηθεί ή να επεξεργαστεί κατάλληλα με σκοπό να διορθωθούν οι ατέλειες που βρίσκονται στο κανάλι της βασικής ζώνης. Όταν παραδείγματος χάριν χρησιμοποιούμε κωδικοποίηση PAM τότε δυαδικά σύμβολα αντικατοπτρίζονται σε ορθογώνιους παλμούς. Εκεί γίνεται η μορφοποίηση του παλμού και αυτό συμβαίνει για να είναι υλοποιήσιμη μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης αλλά και να εφαρμόζει το κριτήριο Nyquist. Στο στάδιο της αποδιαμόρφωσης περιγράφεται η διαδικασία της ζωνοπερατής μετάδοσης, τα σήματα που μεταδίδονται ενώ έχουν αντιστοιχηθεί σε σύμβολα πρέπει να αντιστοιχηθούν και σε κυματομορφές σημάτων οι οποίες να έχουν την ικανότητα να διέρχονται από το ζωνοπερατό κανάλι δηλαδή να εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός Fourier. Να σημειωθεί ότι το μέσο σήμερα το οποίο μεταφέρει την πληροφορία μέσα στη βασική ζώνη ονομάζεται φέρον και η μορφή του είναι ημιτονοειδής. Σε ολοκληρωμένα κυκλώματα πιθανόν να

συναντήσουμε και ισοσταθμιστές. Πρωταρχικός στόχος ενός ισοσταθμιστή είναι να απομακρύνει όποιες συνέπειες μπορεί να προκύψουν από ένα μη ιδανικό κανάλι άρα ισοσταθμιστές είναι ένα ψηφιακό φίλτρο το οποίο προσπαθεί να αποτρέψει τη δια συμβολική παρεμβολή κατά τη μετάδοση σε ένα κανάλι όταν αυτό επιτευχθεί τότε υπάρχει εξισορρόπηση. Το κανάλι είναι υπεύθυνο γιατί είναι μεταξύ σύνδεση ενός πομπού και ενός δέκτη όμως σχεδόν όλα τα κανάλια έχουν και πολλές αδυναμίες. Βασικό πρόβλημα σε ένα κανάλι είναι ότι σίγουρα θα έχει περιορισμένο εύρος ζώνης, Θα παρουσιάσει εξασθένηση και παραμορφώσεις σε πλάτος και φάση, χρονικές μεταβολές και σίγουρα θορύβους ειδικά αν είναι κοντά σε ηλεκτρικό πεδίο. Θόρυβος μπορεί να είναι είτε θερμικός είτε κρουστικός παρεμβολής. Όταν εννοούμε κανάλι μπορεί να είναι είτε ενσύρματο είτε κυματοδηγός είτε οπτική ίνα είτε και ασύρματο. Ακόμα υπάρχουν υποβρύχια κανάλια, κανάλια αποθήκευσης και διάφορα άλλα. Το πιο σύνθητες ίσως και πιο οικονομικό είναι το ενσύρματο όπου αποτελείται από συνεστραμμένα ζεύγη χαλκού με συγκεκριμένο εύρος ζώνης μπορεί να είναι θωρακισμένα φιλομένα με σκοπό την καλύτερη και πιο ασφαλής μετάδοση χωρίς να μεταφέρεται τόσο ο θόρυβος. Είτε να είναι ομοαξονικό καλώδιο όπου θα έχει πλαστικό περίβλημα κάτω από το πλαστικό περιτύλιγμα συνήθως έχει μια μεταλλική ασπίδα, ακόμη πιο κάτω υπάρχει ένα είδος πλαστικού σαν τεφλόν και στο κέντρο του υπάρχει χαλκός. Συνηθίζεται τα αξονικά καλώδια να τα ονομάζουμε μονόκλωνα εννοώ τα συνεστραμμένα ζεύγη πολύκλωνα και η βασική τους διαφορά είναι ότι στα μονόκλωνα υπάρχει ένας αγωγός ενώ στα πολύκλωνα πολλές τρίχες καλωδίου χαλκού. Κάποιοι πιο εξειδικευμένοι τύποι καναλιών είναι κυματοδηγοί όπου καθοδηγούν τη διάδοση με ηλεκτρομαγνητικά κύματα ενώ αντίστοιχα με παρόμοιο τρόπο λειτουργούν και οι οπτικές ίνες όπου θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι ένας οπτικός κυματοδηγός.

2.3.4 Τρόποι Διάδοσης

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάγνωσης στο χώρο των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων κάποιοι από αυτούς είναι οι παρακάτω:

Κυματοδήγηση μεταξύ εδάφους και ιονόσφαιρας. Η συγκεκριμένη τεχνική έχει εύρος 10 KHz – 100KHz το μήκος κύματος αντιστοιχίζεται περίπου στα 10 km. Χρησιμοποιείται για διάδοση σε πολύ μεγάλες αποστάσεις και κυρίως γύρω από τη γη το μειονέκτημα αυτής της διάδοσης είναι ότι έχει αρκετά χαμηλές ταχύτητες και η μετάδοση της πληροφορίας αργεί ενώ απαιτούνται γιγάντιες κεραιές. Ένας άλλος τρόπος διάδοσης είναι το εδαφικό όπου εδώ καλό είναι να υπάρχει μεγάλη αγωγιμότητα διότι όσο πιο μεγάλη είναι η αγωγιμότητα στο έδαφος τόσο πιο μεγάλη θα είναι και η απόσταση η οποία θα διανύει,

εδώ το εύρος είναι 0.3MHz – 3MHz το μήκος κύματος είναι περίπου 100 m ενώ η απόσταση είναι από 100 έως 200 km. Επιπροσθέτως, διάδοση θα μπορούσε να γίνει και με κύμα χώρου όπου εδώ γίνεται ανάκλαση στην ιονόσφαιρα σε ύψος από 50 έως 500 km και το εύρος αντιστοιχίζεται 3MHz – 30MHz μήκος κύματος στα 10 m και απόσταση 400 km ενώ παρουσιάζονται ευνοϊκές συνθήκες κατά την περίοδο της νύχτας. Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η διάδοση μπορεί να γίνει μια διαμέσου ενός εδαφικού κύματος ή διαβάζοντας το κύμα στο χώρο στην ιονόσφαιρα δηλαδή. Ακόμα υπάρχει ως μέσο και η τρόποςφαιρική διάδοση η οποία βασίζεται στο φαινόμενο της σκέδασης και σε συγκεντρώσεις σωματιδίων στην τροπόσφαιρα. Εδώ το εύρος 30MHz – 400MHz το μήκος κύματος είναι περίπου 1 m. Επίσης ένας άλλος τρόπος είναι η διάδοση οπτικής επαφής βασιζόμενος στην χρωματική περιοχή εδώ η κάλυψη είναι πολύ περιορισμένη λόγω της καμπυλότητας της γης. Τέλος επιτυγχάνεται και διάδοση μέσω μετεωριτών όπου και εδώ βλέπουμε ότι λειτουργεί με το φαινόμενο της ανάκλασης σε περιοχές που ιονίζονται λόγω των μετεωριτών σε ύψος 80-100 km. Έχει παρατηρηθεί ούτε κατά τη διάρκεια μεγάλων βροχοπτώσεων ή ομίχλης υπάρχει εξασθένηση του σήματος ανά συχνότητα.

Οι μηχανισμοί διάδοσης των παραπάνω είναι οι εξής:

- LOS (Line-of-Sight)
- Ανάκλαση (reflection)
- Περίθλαση (diffraction)
- Σκέδαση (scattering)

2.4 Συστήματα Software Defined Radio (SDR)

Τα συστήματα Software Defined Radio κοινώς (SDR) [3] αλλά και οι δέκτες receivers είναι ένα από τα βασικά και αναπόσπαστα κομμάτια της σημερινής ραδιοεπικοινωνίας. Παρακάτω αναλύονται αλλά και περιγράφονται λεπτομερώς κάποιες από αυτές τις συγκεκριμένες τεχνολογίες από τις οποίες προσφέρονται. Πριν αναλυθούν κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά των SDR καλό θα ήταν να τονίσουμε ότι τα περισσότερα αν όχι όλα υποστηρίζονται από τεχνολογίες ραδιοεπικοινωνίας και επί της ουσίας σχεδόν όλα τα ράδιο ηλεκτρονικά μέρη όπως οι διαμορφωτές, οι ενισχυτές, τα φίλτρα, χρησιμοποιούνται μέσω ειδικά διαμορφωμένου λογισμικού και αυτό έχει ως άμεσο πλεονέκτημα την ανεξαρτητοποίηση από εξειδικευμένο hardware. Κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά των SDR αναλύονται παρακάτω ως εξής:

Ένα σύστημα SDR έχει το πλεονέκτημα της πολυλειτουργικότητας δηλαδή έχει τη δυνατότητα να παρέχει ταυτόχρονα πολλά ραδιοπρότυπα και πρωτόκολλα μόνο με την ενιμέρωση του λογισμικού. Ακόμα με την υποβοήθηση όλων αυτών των νέων προτύπων στον τομέα της ραδιοεπικοινωνίας τα SDR είναι πολύ εύκολο να αναβαθμιστούν αλλά και να προσαρμοστούν υποστηρίζοντας όποια νέα έκδοση πρότυπου ή πρωτοκόλλου κυκλοφορεί. Επιπρόσθετα το βασικότερο πλεονέκτημα το οποίο έχουν τα SDR είναι το κόστος. Πιο συγκεκριμένα ίσως το κόστος αγοράς να είναι μεγάλο στην αρχή όμως έχει παρατηρηθεί ότι μακροπρόθεσμα όλες οι αναβαθμίσεις που θα χρειαστούν μειώνουν το συνολικό κόστος και όλο αυτό συμβαίνει επειδή δεν είμαστε εξαρτημένοι από το υλικό αλλά εξοικονομούμε χρήματα μέσα από νέα πρότυπα και τα λογισμικά που κυκλοφορούν ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε χρήστη. Επομένως υπάρχει και μεγάλη ευελιξία. Τα κύρια μέρη ενός τέτοιου συστήματος αρχικά είναι οι ραδιοσυχνότητες στο μπροστινό τμήμα (RF Front End). Εκεί κουμπώνουν κεραίες, φίλτρα ή διάφοροι ενισχυτές-αντάπτορες με σκοπό την λήψη και την προετοιμασία του όλου ραδιοσυστήματος προς την ψηφιοποίηση. Επίσης έχει ενσωματωμένο αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα (ADC) όπου εκεί μετατρέπεται το αναλογικό σήμα που έρχεται από το RF front σε ψηφιακό σήμα. Ένα από τα πιο ζωτικής σημασίας ενσωματωμένα συστήματα τα οποία έχει είναι το (DSP) δηλαδή η ψηφιακή επεξεργασία σήματος είτε μέσα από το λογισμικό είτε από το υλικό με την ανάλογη υποβοήθηση που θα χρειαστεί. Σε περίπτωση που απαιτείται η μετατροπή του ψηφιακού σε αναλογικού σήματος αυτό υλοποιείται μέσω του (DAC) και κύρια δουλειά του είναι να μετατρέπει όλα τα ψηφιακά σήματα τα οποία έρχονται σε αναλογικά σήματα.

2.5 Τύποι δεκτών (Χρήσεις – Λειτουργίες και τα χαρακτηριστικά τους)

Όσον αφορά τους δέκτες Receivers αναφερόμαστε σε ειδικά διαμορφωμένες συσκευές οι οποίες μπορούν και λαμβάνουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα και τα μετατρέπουν σε χρήσιμες πληροφορίες παραδείγματος χάριν εικόνα, ήχο, δεδομένα. Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά των δεκτών είναι η ευαισθησία η οποία δίνει την ικανότητα στον δέκτη να μπορεί να ανιχνεύει αλλά και να δέχεται ασθενή σήματα. Ένα άλλο κύριο χαρακτηριστικό είναι το χαρακτηριστικό της επιλεκτικότητας όπου ο δέκτης έχει τη δυνατότητα

να ξεχωρίζει το επιθυμητό σήμα που χρειάζεται από όλα τα υπόλοιπα ανεπιθύμητα σήματα. [4], [5], [6] Ομοίως ένα κύριο χαρακτηριστικό είναι η δυναμική περιοχή όπου ο αποδέκτης μπορεί και επιλέγει το εύρος των επιπέδων σήματος που είναι επεξεργάσιμα χωρίς βέβαια να υποστεί καμία παραμόρφωση. Επιπλέον, υπάρχει και η απόκριση της συχνότητας δηλαδή η ικανότητα που έχει ο δέκτης να λειτουργεί σε διαφορετικές συχνότητες.

Τύποι Δεκτών :

- Αναλογικοί δέκτες: οι αναλογικοί δέκτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε ραδιοφωνα AM/FM χρησιμοποιούν αναλογικές φιλοσοφίες-μεθόδους για τη λήψη αλλά και για την επεξεργασία των σημάτων.
- Ψηφιακοί δέκτες: οι ψηφιακοί δέκτες σχεδόν πάντοτε ενσωματώνουν και χρησιμοποιούν έναν ADC αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα με σκοπό την ψηφιοποίηση των σημάτων και έναν DSP ψηφιακό επεξεργαστή σήματος για την επεξεργασία ενώ παράλληλα χρησιμοποιούν ψηφιακές μεθόδους και όχι αναλογικές.
- Υβριδικοί δέκτες: Οι υβριδικοί δέκτες περιλαμβάνουν έναν συνδυασμό των αναλογικών αλλά και των ψηφιακών μεθόδων στοχεύοντας στη λήψη και την επεξεργασία σημάτων.

Τα βασικά λειτουργικά μέρη ενός receiver (δέκτη) και κάποια από αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί στην υλοποίηση μας, είναι αρχικά μια κεραία η οποία θα συλλέγει στοχευμένα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έπειτα ένας ενισχυτής ραδιοσυχνότητας RF Amplifier όπου σκοπός του είναι να ενισχύει το σήμα που λαμβάνεται από την κεραία. Βασικό παράγοντα αποτελεί και ο μίκτης όπου δουλειά του είναι να μεταφέρει το σήμα σε κάποια ενδιάμεση συχνότητα με απώτερο σκοπό την ευκολότερη επεξεργασία. Εκτός τον ενισχυτή ραδιοσυχνότητας θα χρειαστεί και ένας ενισχυτής ενδιάμεσης συχνότητας όπου βασική επιδίωξη του είναι να ενισχύσει το σήμα στην ενδιάμεση συχνότητα. Αναπόσπαστο κομμάτι είναι ο αποδιαμορφωτής (Demulator) όπου σκοπός του είναι να από διαμορφώνει το σήμα για να ανακτήσει τις αρχικές πληροφορίες (αυτή η λειτουργία συνήθως αφορά τον ήχο). Τέλος θα χρειαστούμε και ένα ακουστικό σύστημα ή αλλιώς ένα σύστημα εξόδου δεδομένων με σκοπό να παρέχει τις παραπάνω ανακτημένες πληροφορίες προσφέροντάς τες στον δέκτη.

Οι πιο σύνηθες εφαρμογές ενός λογισμικού ασύρματης ραδιοεπικοινωνίας – των δεκτών όπως και του δικού μας είναι η ερασιτεχνική ραδιοεπικοινωνία με βασικό κοινό ράδιο ερασιτέχνες όπου πειραματίζονται καθημερινά με διαφορετικά πρότυπα και συχνότητες αλλά δίνοντάς μας και έναν εναλλακτικό τρόπο επικοινωνίας σε περιπτώσεις έκτακτης

ανάγκης καθώς έχει αποδειχθεί πως είναι από τις ελάχιστες μεθόδους επικοινωνίας που παραμένουν πάντα διαθέσιμες και δεν εξαντλούνται όπως οι μέθοδοι των κινητών τηλεφώνων σε περίπτωση υπέρβασης. Μια άλλη εφαρμογή που έχει παρατηρηθεί ότι χρησιμοποιείται στις μέρες μας είναι εφαρμογές που στοχεύουν τη στρατιωτική και τη δημόσια ασφάλεια, δηλαδή με χρήση SDR επιτυγχάνεται η κρυπτογράφηση επικοινωνίας σε περίπτωση ηλεκτρονικού πολέμου. Εντούτοις ένας τομέας όπου χρησιμοποιούνται εφαρμογές με τα SDR είναι ο κλάδος της επιστημονικής έρευνας καθώς βλέπουμε καθημερινή ανάπτυξη σε εφαρμογές με θέμα την αστρονομία και σε περιβαλλοντικές μετρήσεις. Ένας άλλος τομέας είναι αυτός του εμπορίου όπου ταλανίζεται καθημερινά χρησιμοποιώντας πολλές μεθόδους τηλεπικοινωνιών όπως η δορυφορική επικοινωνία και οι ραδιοηλεκτρικές εκπομπές γενικότερα θα μπορούσαμε να πούμε ότι τεχνολογία SDR μπορεί και μετασχηματίζει τον τομέα των ραδιοεπικοινωνιών δίνοντας τη δυνατότητα της ευελιξίας της οικονομίας αλλά και της πολυλειτουργικότητας εφόσον οι δέκτες συνεχίζουν να αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο της επικοινωνίας και αποδεικνύεται καθημερινά η εξασφάλιση της αποτελεσματικότερης λήψης και επεξεργασίας των σημάτων.

3 Υλοποίηση FM Transmitter - Receiver

Εφόσον αναλύθηκε όλη η προ απαιτούμενη βασική θεωρία σχετικά με τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα παρακάτω θα αναλύσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο γίνεται βήμα προς βήμα την υλοποίηση η οποία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο του τμήματος ψηφιακών συστημάτων Link: <https://wimots.ds.uth.gr/el/home-2/> . Η υλοποίηση η οποία έγινε συνοπτικά έχει ως αντικείμενο το προγραμματισμό και το σχεδιασμό ενός συστήματος επικοινωνίας ασύρματου δέκτη και πομπού χρησιμοποιώντας λογισμικά για την εκπομπή και τη λήψη σημάτων fm ,όπως είναι το GNU Radio και το LabVIEW. Υλοποιήθηκε ένα FM Transmitter – Receiver εφαρμόζοντας τεχνικές επικοινωνίας σήματος με σκοπό το μέγιστο δυνατό αποτέλεσμα. Ακόμα μια υλοποίηση η οποία έγινε είναι ο γραφικός σχηματισμός της QAM με σκοπό να αναλυθεί και να συγκριθεί αυτή η διαμόρφωση με άλλες. Η μεθοδολογία συνοπτικά που ακολουθήθηκε ήταν αρχικά η ανάλυση των απαιτήσεων δηλαδή αρχικά έγινε μια λεπτομερής ανάλυση όλων των απαιτήσεων ώστε να υλοποιηθεί ένα σύστημα επικοινωνίας έπειτα έγινε ένας πρόχειρος σχεδιασμός του συστήματος και αργότερα προχώρησε ο βασικός σχεδιασμός του συστήματος επικοινωνίας και των αλγορίθμων επεξεργασίας αλλά και της διασύνδεσης με τον εξοπλισμό. Επόμενο βήμα ήταν η υλοποίηση του συστήματος σιγά σιγά άρχιζε το σύστημα επικοινωνίας να παίρνει μορφή χρησιμοποιώντας τα λογισμικά τα οποία προαναφέρθηκαν και εννοείται πριν από όλα αυτά σχεδιάστηκαν οι ροές των σημάτων καθώς και διαγράμματα ροής - καταστάσεων για τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Τελευταίο βήμα της μεθοδολογίας ήταν η αξιολόγηση της απόδοσης δηλαδή πραγματοποιήθηκε αναλυτική αξιολόγηση της απόδοσης όλου του συστήματος μέσω συνεχών πειραμάτων αλλά και μετρήσεων για να επιβεβαιωθούν όλες οι προδιαγραφές οι οποίες ήταν στο αρχικό πλάνο αλλά και να βελτιωθούν τυχόν ατέλειες λειτουργικότητας και απόδοσης. Οι στόχοι του όλου εγχειρήματος είναι αρχικά η υλοποίηση ενός SDR συστήματος και η ανάπτυξη ενός λειτουργικού συστήματος επικοινωνίας με αυτή την τεχνολογία. Όπως προαναφέραμε και στη μεθοδολογία βασικός στόχος ήταν και η θεωρητική μελέτη σχεδίασης όλων των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία σήματος αλλά και την υλοποίηση του συ-

στήματος. Ένας ακόμη βασικός στόχος ήταν η αξιολόγηση της απόδοσης δηλαδή να αξιολογηθεί η απόδοση του συστήματος αλλά και να επιβεβαιωθεί ότι συμμορφώνεται με τις προδιαγεγραμμένες προδιαγραφές που ορίζει ο κατασκευαστής αλλά και αυτές που ορίσαμε εμείς γιατί ήταν σημαντικό να διασφαλιστεί η ποιότητα και η αποτελεσματικότητά του. Κάποια από τα ενδεικτικά αποτελέσματα ήταν η ανάλυση συμπεριφοράς του καναλιού και η μελέτη αυτού με πολλά πειράματα και μετρήσεις όπως η απόκριση σε διάφορες συνθήκες σήματος πριν το θόρυβο SNR , οι απώλειες που προέκυψαν στο κανάλι κ.α. Ο χρόνος εκτέλεσης και η απόκριση του συστήματος δηλαδή να αξιολογηθούν όλες η λειτουργίες οι οποίες εκτελούνται κατά τη λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο όπως και να γίνουν αναλύσεις αποδόσεις στην είσοδο αλλά και στην έξοδο με μελέτη της απόδοσης του συστήματος στην ισχύ εισόδου και στα επίπεδα του σήματος. Όσον αφορά την υλοποίηση με την σχηματική απεικόνιση της διαμορφώσεως QAM εκεί έγιναν αρκετά πειράματα με σκοπό να βελτιωθεί η απόδοση του σήματος και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις BER. Τέλος, έγιναν μεγάλες προσπάθειες ώστε να βελτιωθεί η απόδοση, η ευαισθησία ,η απόσταση, το εύρος ζώνης καθώς και ο αριθμός σφαλμάτων. Παρακάτω αναλύεται ο εξοπλισμός , τα λογισμικά και όλες οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν σχετικά με την υλοποίηση.

3.1 Τι είναι τα USRP και ποια η χρήση τους

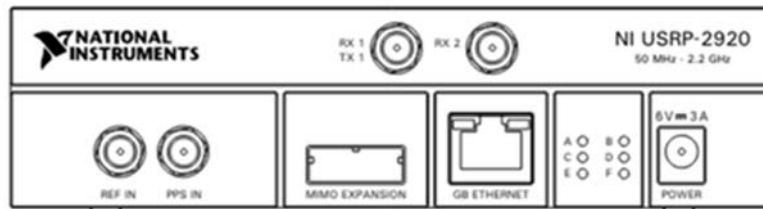
Στην συγκεκριμένη πτυχιακή κύριο μέρος του εξοπλισμού και πρωταρχικό ρόλο από μεριάς Hardware συντέλεσε το USRP (Universal Software Radio Peripheral)[7] της NI (National Instruments). Τα συγκεκριμένα USRP είναι εξειδικευμένα εργαλεία τα οποία κατασκευάστηκαν με κύριο μέλημα τους την ανάπτυξη αλλά και την εξέλιξη λογισμικού ορατότητας ραδιοφάσματος (SDR). Κάθε ένα μοντέλο εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς και έχει διαφορετικές λειτουργίες. Γενικότερα όμως θα μπορούσαμε να πούμε ότι δίνουν την δυνατότητα σε όποιον τα χρησιμοποιεί να σχεδιάζει, να αναλύει , να προγραμματίζει αλλά και να υλοποιεί ράδιο-συστήματα με την υποβοήθηση λογισμικού (π.χ. LabVIEW). Με τον όρο SDR (Software Defined Radio) εννοούμε συγκεκριμένες τεχνολογίες ορατότητας ραδιοφάσματος, δηλαδή δυνατότητες προγραμματισμού και διαχείρισης ράδιο-συστήματος από ένα οποιοδήποτε λογισμικό με σκοπό να αποφευχθεί κάθε είδους “εξάρτηση” ή περιορισμός από την μεριά του hardware. Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά τη δική μας περίπτωση στα USRP αναφερόμαστε στην παραμετροποίηση του υλικού μας και στον προγραμματισμό του ώστε να μας εξυπηρετήσει με τις λειτουργίες

του σε διάφορες συχνότητες Hertz (για τα δικά μας δεδομένα το μοντέλο NI USRP 2920 με το οποίο δουλέψαμε λειτουργεί από 50MHz έως 2.2 GHz) πρωτόκολλα και λειτουργίες επικοινωνίας. Όλο αυτό μας παρέχει μεγάλη ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε ποικίλες εφαρμογές ράδιο-συστημάτων όπως σε εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών, ράδιο ερασιτεχνικές υλοποιήσεις, πειράματα, αυτοματισμούς συστήματα αισθητήρων κ.α. Όλα τα προαναφερθέντα είναι δημοφιλή σε πολλούς επιστήμονες-ερευνητές ηλεκτρονικούς, ραδιοερασιτέχνες, μηχανικούς και εκπαιδευτικά ιδρύματα παγκόσμιας κλάσης. Σε επίπεδο ασύρματων επικοινωνιών οι χρήστες μπορούν να κατασκευάσουν ράδιο-συστήματα στον τομέα της κινητής τηλεφωνίας ,στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και επικοινωνιών Iot. Σε επίπεδο συστημάτων αισθητήρων βρίσκουν χρήση στον σχεδιασμό εξυπηρετητών και την κατασκευή δικτύων των αισθητήρων (π.χ. σε συστήματα ασφαλείας χρήση ραντάρ ,ανίχνευσης και εντοπισμού ,κίνησης, θερμοκρασίας με την ανάλογη υποστήριξη εξοπλισμού-λογισμικού). Στον κλάδο των ραδιοερασιτεχνών γίνονται καθημερινά πειράματα με ακριβό εξοπλισμό προσπαθώντας να εκμεταλλευτούν την πληθώρα δυνατοτήτων που παρέχουν τα USRP για την εξέλιξη των νέων τρόπων επικοινωνίας με την υποστήριξη δορυφόρων, ακόμα επιτυγχάνεται ραδιοερασιτεχνική επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων μέσω τροποσφαιρικής ή Es σποραδικής ή ιονοσφαιρικής διάδοσης. Ακόμα τα USRP έχουν κάνει την εμφάνιση τους σε πολλά πανεπιστημιακά ιδρύματα επομένως επακόλουθο είναι να ενταχθούν και σε πολλά πανεπιστημιακά προγράμματα με θέμα την διερεύνηση πάνω σε θέματα σχετικά με την αρχιτεκτονική και την δομή των ασύρματων επικοινωνιών, αναπτύσσοντας τις θεωρητικές τους γνώσεις οι φοιτητές και βρίσκοντας πρακτικές εφαρμογές σε δεύτερο χρόνο. Συνοπτικά κάποιες από τις πιο βασικές χρήσεις των USRP είναι :

- Η έρευνα και η ανάπτυξη ασύρματων εφαρμογών
- Εφαρμογές ανάμεσα στην επικοινωνία οχημάτων (V2V) και στην επικοινωνία ανάμεσα σε οχήματα και υποδομείς (V2I) που βρίσκουν λύσεις στην αυτόνομη οδήγηση και στην ασφαλέστερη κίνηση στο οδικό μας δίκτυο.
- Ραδιοερασιτεχνικά πειράματα
- Εκπαιδευτικές εφαρμογές
- Εφαρμογές με βάση την επικοινωνία με σκοπό την ανάπτυξη τεχνικών κρυπτογράφησης και διαμορφώσεων σήματος
- Ανάπτυξη εφαρμογών συστημάτων επικοινωνίας (Χαμηλής ισχύος όπως ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και ασύρματα δίκτυα τοπικής εμβέλειας για την επικοινωνία υπολογιστών Wi-Fi)
- Ανάπτυξη εφαρμογών συστημάτων επικοινωνίας υψηλών ταχυτήτων τα οποία βρίσκουν τόπο στα συστήματα επικοινωνίας ευρείας ζώνης ,τα λεγόμενα

(wideband communication systems) και τα συστήματα πολλαπλών εισόδων – εξόδων (multiple input – multiple output MIMO).

Συνοψίζοντας το USRP είναι ένα SDR το οποίο μπορεί να στέλνει και να λαμβάνει σήματα για χρήση εφαρμογών επικοινωνίας. Παρακάτω παρατίθενται εικόνες για την απεικόνιση της συσκευής (εικόνα 3).



Εικόνα 3 Μπροστινή όψη συσκευής

Τεχνικά χαρακτηριστικά – δυνατότητες μοντέλου NI USRP-2920

Θα ξεκινήσω από τις βασικές προδιαγραφές ασφαλείας όπου συστήνει η εταιρεία και θα συνεχίσω με ειδικές λειτουργίες καθώς και όλη την διαδικασία εγκατάστασης του εξοπλισμού και σύνδεσης του υπολογιστή από την αρχή μέχρι το τέλος, ολοκληρώνοντας θα αναλύσω λεπτομερώς τρεις «πειραματισμούς – υλοποιήσεις» που έκανα. Αρχικά ο πομπός έχει εύρος συχνοτήτων από 50 MHz έως 2,2 GHz και το βήμα της συχνότητας είναι <1kHz. Η μέγιστη ισχύς εξόδου (P_{out}) από 50 MHz μέχρι και τα 1,2 GHz αναλογείτε στα 50 mW έως τα 100 mW με επίπεδα θορύβου (17 dBm έως 20 dBm) και για το εύρος 1,2 GHz – 2,2 GHz αναλογούν από 30 mW έως 70 mW με επίπεδα θορύβου από 15 dBm έως 18 dBm. Ειδικότερα, το Εύρος κέρδους (Gain Range) κυμαίνεται από 0 dB έως 31 dB με βήμα κέρδους (Gain step) 1.0 dB ενώ η ακρίβεια συχνότητας υπολογίζεται στα 2,5 ppm (parts per million). Κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά σχετικά με το μέγιστο στιγμιαίο εύρος ζώνης σε πραγματικό χρόνο αναφορικά έχει πλάτος δείγματος 16-bit στα 20 MHz ενώ στα 8-bit πλάτος δείγματος η συχνότητα αντιστοιχεί στα 40 MHz. Όσον αφορά το μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας I/Q για πλάτος δείγματος 16-bit αντιστοιχούν 25 MS/s ενώ με 8-bit έχουμε 50 MS/s. Σε επίπεδο μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό έχουμε δύο κανάλια στα 400 MS/s στα 16 bit και το δυναμικό εύρος χωρίς ψευδή στοιχεία DAC (sFDR) με θόρυβο 80 dB. Το εύρος συχνοτήτων του δέκτη είναι 50 MHz έως 2,2 GHz και το βήμα συχνότητας είναι < 1kHz, με εύρος κέρδους 0 dB έως 31,5 dB. Το βήμα κέρδους στον δέκτη είναι 0,5 dB και η μέγιστη ισχύς εισόδου (P_{in}) στα 0 dBm. Το Noise figure παγιώνεται στα 5 dB με 7 dB καθώς η ακρίβεια συχνότητας υπολογίζεται στα 2,5 ppm. Το μέγιστο στιγμιαίο εύρος ζώνης σε πραγματικό χρόνο έχει πλάτος δείγματος στα 16-bit αναλογούν 20 MHz, στα 8-bit έχουμε 40 MHz. Στον τομέα του μέγιστου ρυθμού

δειγματοληψίας I/Q τμηματικά έχουμε : Πλάτος δείγματος 16-bit τα 25 MS/s, Πλάτος δείγματος 8-bit 50 MS/s , μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό (ADC=Analog-to-digital converter) με 2 κανάλια, 100 MS/s, 14 bit, ADC sFDR στα 88 dB. Οι απαιτήσεις από μεριάς συνολικής ισχύος σε μια συνεδρία τυπικής λειτουργίας είναι από 12 W έως 15 W, παρά το γεγονός ότι σε μια μέγιστη λειτουργία χρειάζεται 18 W. **Εξαιρετικά σημαντικό είναι να χρησιμοποιηθεί για τις απαιτήσεις ισχύος το βύσμα-τροφοδοτικό DC 6 V , 3A το οποίο περιέχεται στην συσκευασία ή σε περίπτωση απώλειας για τον οποιαδήποτε λόγο υπάρχει σαν ενδεχόμενο να χρησιμοποιηθεί τροφοδοτικό που φέρει ειδική ένδειξη LPS , διότι έπεται από έρευνα που έκανα, χρήστες που χρησιμοποίησαν διαφορετικό από του κατασκευαστή αργά η γρήγορα προκάλεσαν ανεπανόρθωτη ζημιά στα ηλεκτρονικά στοιχεία της πλακέτας.** Αξίζει να σημειωθεί πως η πρώτη κίνηση πριν ακόμα από-συσκευαστεί η συσκευή ήταν η πλήρης κατανόηση του εγχειριδίου χρήσης (και το έντυπο αλλά και το ηλεκτρονικό-νεότερο της ιστοσελίδας το οποίο με προέτρεψε από πολλά αργότερα). Θα προχωρήσουμε με τα φυσικά χαρακτηριστικά της συσκευής. Το βάρος του είναι 1,193 kg ενώ οι διαστάσεις του είναι 15,875 cm φάρδος, 4,826 cm ύψος , με 21,209 cm μήκος. Έχει κατασκευαστεί αυστηρά για εσωτερική χρήση με μέγιστο υψόμετρο ορθής λειτουργίας τα 2000 m και μέση θερμοκρασία τους 25 °C, μολονότι ο βαθμός ρύπανσης του είναι κλίμακας 2. Ιδανικές θερμοκρασίες λειτουργίας είναι από -5 °C – 23 °C και το εύρος σχετικής υγρασίας χωρίς συμπύκνωση ανέρχεται από 10% έως 90% ,όλα τα προαναφερθέντα έχουν δοκιμαστεί σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60068-2-56, IEC 61010-1, EN 61010-1, UL 61010-1, CSA C22.2 . [8]Από πλευράς περιβαλλοντικής διαχείρισης η ΝΙ έχει δεσμευτεί να σχεδιάζει και να προσφέρει προϊόντα με περιβαλλοντικά υπεύθυνο τρόπο. Ακόμα παρατίθενται και τα πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας EN 61326-1 (IEC 61326-1): Εκπομπές κλάσης A; Βασική α-νοσία

- EN 55011 (CISPR 11): Ομάδα 1, εκπομπές κατηγορίας A
- EN 55022 (CISPR 22): Εκπομπές κλάσης A
- EN 55024 (CISPR 24)
- AS/NZS CISPR 11: Ομάδα 1, εκπομπές κατηγορίας A
- AS/NZS CISPR 22: Εκπομπές κατηγορίας A
- FCC 47 CFR Μέρος 15B: Εκπομπές κατηγορίας A
- ICES-001: Εκπομπές κατηγορίας A

Δυνατότητες και λειτουργίες:

Τα USRP παρέχουν μια πληθώρα δυνατοτήτων για την υλοποίηση διάφορων εφαρμογών λογισμικού – προγραμματισμού ορατότητας ραδιοφάσματος σε πολλούς τομείς. Κάποιες από τις βασικές δυνατότητες ενός USRP είναι οι εξής :

α) Παρέχουν υψηλή ευαισθησία και έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν χαμηλά – ασθενή σήματα διαμέσου του αέρα, τα οποία είναι ιδανικά για υλοποίηση εφαρμογών που αποζητούν πόρους υψηλής ευαισθησίας όπως συστήματα ανίχνευσης.

β) Ευρυζωνική κάλυψη: Τα USRP είναι εργαλεία που προσφέρουν μεγάλο φάσμα συχνοτήτων και αυτό επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργήσουν διαφορετικό είδος εφαρμογών σε διάφορα μέσα επικοινωνίας.

γ) Υψηλή ευελιξία: Βασικό πλεονέκτημα των USRP είναι ο προγραμματισμός τους και η παραμετροποίηση των διάφορων λειτουργιών με τα εκάστοτε πρότυπα και την υποβοήθηση τεχνολογιών επικοινωνίας όπως Wi-Fi, LTE, GSM.

δ) Πολλαπλές κεραίες: Τα περισσότερα μοντέλα USRP υποστηρίζουν παραπάνω από μία εισόδους και εξόδους RF με αποτέλεσμα να μπορούν να αποστέλλουν σε πολλά κανάλια ταυτόχρονα.

ε) Εξαιρετική απόδοση - προγραμματισμός: Με τη συνεργασία λειτουργικών – λογισμικών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και στην υλοποίηση (GNU Radio και το LabVIEW) επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση με μικρά επίπεδα θορύβου και υψηλή περιοδικότητα σήματος πράγμα που τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για απαιτητικές εφαρμογές.

Τι είναι νόμιμο και τι παράνομο;

Θα ήταν μεγάλη παράληψη αν δεν αναφέραμε τα νομικά πλαίσια τα οποία ορίζει το κράτος όσον αφορά το χώρο των ραδιοσυχνοτήτων. Σύμφωνα με ΦΕΚ 262B' / 3-2 άρθρο 3, παράγραφος 5 απαγορεύεται ρητά η εγκατάσταση κατευθυντικών κεραιών υπό προϋποθέσεις. Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς κορυφής (PEP) ανέρχεται στα 500W για τα βραχέα και για τα 100w για τα υπερβραχέα και αυτό μπορεί να μετρηθεί-αποδειχθεί με τη χρήση ενός απλού βατόμετρου στην έξοδο του πομπού. Διεθνώς η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς ονομάζεται ισχύς κορυφής PEP στην έξοδο του πομποδέκτη. Τα περισσότερα μηχανήματα που κυκλοφορούν στο εμπόριο αγγίζουν τα 100W επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η χρήση κατευθυντικών κεραιών απαγορεύεται. Σε περίπτωση όμως που κάποιος χρειάζεται μεγαλύτερη επιτρεπόμενη ισχύ θα χρειαστεί να περάσει από διαδικασία αδειοδότησης όπως συμβαίνει στις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας. Αν σκεφτούμε όμως ότι οι ραδιοερασιτεχνικές κεραίες δεν είναι του εμπορίου και είναι παραμετροποιημένες

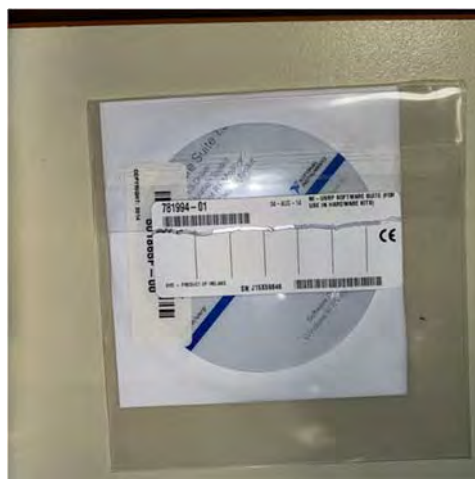
ιδιοκατασκευές (custom made) θα χρειαστεί η απαιτούμενη μελέτη καθώς και οι απαιτούμενες μετρήσεις με εξουσιοδοτημένα όργανα τα οποία παρέχει μόνο η ΕΕΑΕ. Ουδεμία ευρωπαϊκή χώρα δεν έχει τόσο χαμηλό όριο ισχύος (100W) και ακτινοβολούμενης (ERP) για την οποία δεν υφίσταται ακριβής τρόπος μέτρησης από τους ραδιοερασιτέχνες. Σύμφωνα με εκτενείς μελέτες στην Ευρώπη ως επι το πλείστον ο μέσος χρόνος διάρκειας εκπομπής κάποιου ραδιοερασιτεχνικού σταθμού αντιστοιχίζεται από 1 έως 5 λεπτά την ημέρα και μόλις[9] λίγες ώρες το μηνά ενώ η μέση ισχύς εκπομπής υπολογίζεται στα 30 – 50% της μέγιστης που παρέχει ο πομποδέκτης αναλόγως τον τίτλο που έχει. Ακόμα με μία μελέτη η ανάλυση των δεδομένων των ερευνητών με μετρήσεις της ΕΕΑΕ [10] οι κυριότερες πηγές ακτινοβολήσης στην Αθήνα αλλά και σε κάθε αστικό περιβάλλον είναι οι εξής:

- Ραδιοφωνία FM (40-80%)
- Τηλεοπτικές εκπομπές VHF/UHF (20-35%)
- Ειδικά ραδιοδύκτια/TETRA 20%
- Σταθμοί βάσης κινητής τηλεφωνίας (20-35%)
- Ραδιοζεύξεις (<5%)
- Άλλες δραστηριότητες (Wi-Fi, ραδιοερασιτέχνες, Bluetooth <1%)
(Οι τιμές είναι κατά προσέγγιση)

Εγκατάσταση – Configuration USRP-2920

Σε αυτό το κεφάλαιο έχει γίνει πλήρης ανάλυση όλων των διαδικασιών που χρειάστηκαν για να λειτουργήσει σωστά ο εξοπλισμός μας αλλά και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε. Αρχικά το πρώτο πράγμα που κρίθηκε αναγκαίο ήταν να γίνει μια εκτενής έρευνα για τους κινδύνους που θα μπορούσαν να προκληθούν έστω και άθελα μου και να κατανοηθεί εξ-ολοκλήρου το εγχειρίδιο χρήσης (manual). Εφόσον πάρθηκαν τα απαραίτητα μέτρα και λήφθηκαν υπόψιν όλοι οι κίνδυνοι από-συσκευάστηκε το κουτί και μέσα περιείχε α) το USRP[11] (σε αντιστατική μεμβράνη), β) το τροφοδοτικό AC/DC και καλώδιο τροφοδοσίας, γ) ένα θωρακισμένο καλώδιο ethernet , δ) CD με τους οδηγούς εγκατάστασης (χρησιμοποιήθηκαν νεότεροι από την επίσημη σελίδα της NI για λόγους συμβατότητας λειτουργικού), ε) καλώδιο επέκτασης SMA (m)-to-SMA (m) , ε) ένας 30dB SMA Attenuator , στ) έγγραφα ασφαλής χρήσης, ζ) καλώδιο αντάπτορα για την ένωση της κεραίας με το USRP από SMA θηλυκό σε UHF θηλυκό, η) κεραία SMA UHF/VHF 136-175 MHz

Εγκατάσταση Drivers: Τα drivers ή αλλιώς τα προγράμματα οδήγησης μπορούν να εγκατασταθούν με 2 τρόπους είτε με το cd το οποίο εμπεριέχεται στην συσκευασία της συσκευής (βλέπε εικόνα 3.1), είτε κάνοντας μια αναζήτηση στην επίσημη ιστοσελίδα της ni.com/info εν συνεχεία πληκτρολογώντας τον κωδικό του USRP και ακολουθώντας τις οδηγίες – βήματα κατεβαίνουν όλα τα απαραίτητα αρχεία και plugins που χρειάζονται. Στην δική μας περίπτωση επιλέχθηκε εγκατάσταση του USRP-2920 μέσα από την σελίδα της NI για λόγους συμβατότητας επειδή το cd υποστηρίζει παλαιότερες εκδόσεις των windows που σήμερα δεν χρησιμοποιούνται.



Εικόνα 3.1 Cd Προγραμμάτων Οδήγησης

Παραμετροποίηση Δικτύου (Μόνο με χρήση καλωδίου ethernet): Η συσκευή επικοινωνεί με έναν κεντρικό υπολογιστή ως (host) διαμέσου gigabit ethernet. Επομένως έγιναν οι απαραίτητες ενέργειες στον υπολογιστή και ενεργοποιήθηκαν ορισμένες λειτουργίες έτσι ώστε να μπορεί ο υπολογιστής να επικοινωνήσει με την συσκευή. Υπάρχουν δύο τρόποι να επιτευχθεί αυτό, είτε να ενωθεί η συσκευή με τον υπολογιστή και να δουλέψει με local ip αλλάζοντας την ip του υπολογιστή με αποτέλεσμα να μην έχει πλέον πρόσβαση με το διαδίκτυο μέσω καλωδίου παρά μόνο ασύρματα με χρήση Wi-Fi από εξωτερική κάρτα δικτύου ή να ενωθεί η συσκευή USRP με ένα καλώδιο ethernet RJ45 σε ένα επιτοίχιο πριζάκι ώστε να το αναγνωριστεί από το δίκτυο και να πάρει μια ip. Επόμενο βήμα ήταν η εγκατάσταση από την επίσημη σελίδα ενός εργαλείου ως βοηθός που θα μας δείχνει ανά πάσα στιγμή αν η ζεύξη του USRP με τον υπολογιστή έχει επιτευχθεί σωστά, αυτό το εργαλείο ονομάζεται Ni Configuration tool-utility (Εικόνα 3.27,3.28,3.29), και μας δίνει την δυνατότητα να δούμε τις ip των συσκευών, να αλλάξουμε την default ip ή ακόμα και να εγκαταστήσουμε την συσκευή χειροκίνητα με δικές μας παραμέτρους. Πιο συγκεκριμένα, μας δίνονται πληροφορίες για το id της συσκευής

(εικόνα 7,8), για την συνδεσιμότητα, και την δεδομένη κατάσταση – εικόνα της συσκευής. Παρέχει λειτουργία USRP Card burner όπου μπορεί να περαστεί χειροκίνητα εικόνα του firmware όπως και το FPGA Image (δεν συνίσταται) , τέλος έχει ένα παράθυρο για την αναβάθμιση του λογισμικού , την αυτόματη εύρεση συσκευής και την χειροκίνητη εγκατάσταση (υπάρχουν εικόνες παρακάτω για όλα τα παραπάνω). Εφόσον ελεγχθούν όλα αυτά και αλλαχτούν οι ρυθμίσεις δικτύου της τοπικής σύνδεσης στις ιδιότητες του πεδίου Internet στην καρτέλα που αναγράφει Internet Protocol Version 4 (TCP/IPv4) τότε και μόνο τότε θα μπορέσουμε να «ενώσουμε» την συσκευή με τον υπολογιστή σε κάθε άλλη περίπτωση ο υπολογιστής δεν θα αναγνωρίσει ποτέ το συγκεκριμένο μοντέλο (αυτό δεν ισχύει και για τα νεότερα μοντέλα με σύνδεση usb). Διαβάζοντας το εγχειρίδιο χρήσης θα παρατηρήσουμε ότι η προκαθορισμένη στατική – interface διεύθυνση ip είναι η 192.168.10.1 υπάρχει δυνατότητα να αλλαχθεί όμως αν γίνει αυτό και για τον οποιαδήποτε λόγο «χαθεί» ,το συγκεκριμένο μοντέλο δεν υποστηρίζει λειτουργία Hard Reset δηλαδή δεν υπάρχει δυνατότητα να το γυρίσουμε στην default και αυτός είναι και ένας βασικός λόγος που δεν αλλάχτηκε ώστε να μπορεί με την ίδια ευκολία να κάνει την συνδεσιμότητα κάποιος άλλος. Ακόμα πρέπει να σημειωθεί ότι η Host Ethernet interface subnet mask είναι 255.255.255.0 και η προκαθορισμένη USRP device IP address είναι η 192.168.10.2 . Το μηχάνημα χρησιμοποιεί datagram protocol (UDP) broadcast packets με σκοπό να κάνει ευκολότερη την διαδικασία της εύρεσης όμως στα περισσότερα συστήματα αυτή η λειτουργία μπλοκάρει από το τείχος προστασίας και αποτρέπει την επικοινωνία με την συσκευή οπότε καλό θα ήταν να το απενεργοποιήσουμε για να γίνει ευκολότερη η όλη διαδικασία.

Appendix B: Network Troubleshooting

The Device Does Not Connect to the Host Ethernet Interface

The host Ethernet interface must be a gigabit Ethernet interface to connect to the USRP device. Ensure the connection between the host network interface card and the device cable connection is valid and both the device and computer are powered on. A lit green LED in the upper left corner of the gigabit Ethernet connection port on the device front panel indicates a gigabit Ethernet connection.

The Device Does Not Respond to a Ping (ICMP Echo Request)

The device should reply to an internet control message protocol (ICMP) echo request. Open a Windows command prompt and enter `ping 192.168.10.2`, where `192.168.10.2` is the IP address for your USRP device, to ping the device. If you do not receive a response, verify that the host network interface card is set to a static IP address corresponding to the same subnet as the IP address of the corresponding device. Also verify that the device IP address is set as described in the *Changing the IP Address* section.

The NI-USRP Configuration Utility Does Not Return a Listing for My Device

If the NI-USRP Configuration Utility does not return a listing for your device, search for a specific IP address.

1. Navigate to Program Files\National Instruments\NI-USRP\.
2. <Shift>-right-click the utilities folder, and select **Open command window here** from the shortcut menu to open a Windows command prompt.
3. Enter `uhd_find_devices --args=addr=192.168.10.2` in the command prompt, where `192.168.10.2` is the IP address for your USRP device.
4. Press <Enter>. If the `uhd_find_devices` command does not return the listing for your device, the firewall may be blocking replies to UDP broadcast packets. Windows installs and enables a firewall by default. To allow UDP communication with a device, disable any firewall software associated with the network interface for the device.

Εικόνα 3.2 Επίλυση θεμάτων σύνδεσης δικτύου

The Device IP Address Does Not Reset to the Default

If you cannot reset the default device IP address as described in the *Changing the IP Address* section, your device may be on a different subnet than the host network adapter. You can power cycle the device in a safe (read-only) image, which sets the device to the default IP address of `192.168.10.2`.

1. Open the device enclosure, making sure to take appropriate static precautions.
2. Locate the safe-mode button, a push-button switch (S2), inside the enclosure.
3. Press and hold the safe-mode button while you power cycle the device.

NI-USRP-29xx Getting Started Guide | © National Instruments | 29

4. Continue to press the safe-mode button until the front-panel LEDs blink and remain solid.
5. While in safe-mode, run the NI-USRP Configuration Utility to change the IP address from the default, `192.168.10.2`, to a new value, as described in the *Changing the IP Address* section.
6. Power cycle the device without holding the safe-mode button to return to normal mode.



Note NI recommends that you use a dedicated network with no other USRP devices connected to the host computer to avoid the possibility of an IP address conflict. Also, verify that the static IP address of the host network adapter on the computer that runs the NI-USRP Configuration Utility is different from the device default IP address of `192.168.10.2` and different from the new IP address to which you want to set the device.



Note If the device IP address is on a different subnet from the host network adapter, the host system and configuration utility cannot communicate with and configure the device. For example, the utility recognizes, but cannot configure a device with an IP address of `192.168.11.2` connected to a host network adapter with a static IP address of `192.168.10.1` and a subnet mask of `255.255.255.0`. To communicate with and configure the device, change the host network adapter to a static IP address on the same subnet as the device, such as `192.168.11.1`, or change the subnet mask of the host network adapter to recognize a wider range of IP addresses, such as `255.255.0.0`.

Εικόνα 3.3 Επίλυση θεμάτων σύνδεσης δικτύου

Αλλαγή – ρύθμιση της ip διεύθυνσης

Σε περίπτωση που θελήσουμε να αλλάξουμε την ip Address θα πρέπει να ξέρουμε την τωρινή ip Address της συσκευής ώστε να γίνει configure από το δίκτυο, για να γίνει αυτό ακολουθούμε τα παρακάτω:

- Σιγουρευόμαστε ότι η συσκευή είναι ενεργή και συνδεδεμένη στον υπολογιστή χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο ethernet gigabit και ανοίγοντας το διαχειριστικό πρόγραμμα NI-USRP Configuration Utility από την εκκίνηση -> όλα τα προγράμματα στο φάκελο National Instruments επιλέγοντας Ni-USRP. Αφού ανοίξει στο παράθυρο διαλόγου επιλέγουμε τη συσκευή με διεύθυνση ip 192.168.10.2. Έπειτα επιλέγουμε το πεδίο συσκευές και επιλέγουμε τη συσκευή μας κάνοντας επικυροποίηση των στοιχείων που θα εμφανιστούν. Αφού έχουμε σιγουρευτεί ότι όλα τα εμφανιζόμενα στοιχεία είναι σωστά επιλέγουμε το κουμπί New IP address και μέσα σε αυτό πληκτρολογούμε τη νέα IP διεύθυνση αφού πρώτα έχουμε πληκτρολογήσει την τωρινή διεύθυνση της συσκευής στο ακριβώς από πάνω πεδίο.
- Στη συνέχεια επιλέγουμε το κουμπί Change IP Address και στο παράθυρο που θα μας εμφανιστεί θα μας ρωτήσει αν η IP που έχουμε καταχωρήσει είναι αυτή που θέλουμε, επιλέγουμε ok, διαφορετικά επιλέγουμε cancel. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία θα παρατηρήσουμε ότι το πάνω πεδίο που είχαμε την παλιά μας διεύθυνση έχει αντικατασταθεί με τη νέα. Τέλος θα χρειαστεί να κάνουμε μια ενημέρωση στη λίστα συσκευών για να ενημερωθεί η διεύθυνση στο δίκτυο. Αφού γίνουν όλα αυτά θα πρέπει στο πίσω μέρος της συσκευής να αναβοσβήνει μια πράσινη λυχνία που σημαίνει ότι σύνδεση του υπολογιστή με τη συσκευή έγινε με επιτυχία. Κάτι άλλο που μπορούμε να κάνουμε για να επιβεβαιωθούμε πώς η διεύθυνση IP έχει αλλάξει με επιτυχία είναι ένα εκτελέσουμε την εντολή ping από ένα τερματικό και σε περίπτωση που λάβουμε απάντηση (και επιστρέψουν όλα τα πακέτα) σημαίνει ότι η αλλαγή της διεύθυνσης έγινε με επιτυχία εφόσον η συσκευή λειτουργεί με πρωτόκολλο ICMP echo request (ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί και να ελεγχθεί ότι η συσκευή και ο υπολογιστής μας βρίσκονται στο ίδιο υποδίκτυο).

Ανάλυση Θυρών της συσκευής και εικόνες εξοπλισμού

Στην παρακάτω (εικόνα 5) γίνεται ανάλυση όλων των θυρών της συσκευής. Συνοπτικά εμείς θα πούμε ότι χρησιμοποιήσαμε στην υλοποίηση μας τις θύρες RX1, TX1 και RX2 Για τη μετάδοση - εκπομπή και την λήψη σημάτων. Οι συγκεκριμένες θύρες είναι SMA και έχουν αντίσταση 50 Ohm. Ακόμα έγιναν δοκιμές χρησιμοποιώντας τη θύρα mimo

expansion και ένα καλώδιο mimo cable 0.5m μήκος (βλέπε Εικόνα 3) ώστε να επιτευχθεί η διασύνδεση των 2 συσκευών. Επίσης χρησιμοποιήθηκε η θύρα GB Ethernet και ένα καλώδιο RJ-45 (CAT 5e) Για τη διασύνδεση της συσκευής με τον υπολογιστή. Τέλος, ενώσαμε το τροφοδοτικό της συσκευής το οποίο έχει έξοδο 6 Volt 3 A .[12]



Εικόνα 3.2 Mimo Cable Expansion

Table 5. Connector Descriptions	
Connector	Description
RX 1	Input and output terminal for the RF signal. RX 1 TX 1 is an SMA (f) connector with an impedance of 50 Ω and is a single-ended input or output channel.
TX 1	
RX 2	Input terminal for the RF signal. RX 2 is an SMA (f) connector with an impedance of 50 Ω and is a single-ended input channel.
REF IN	Input terminal for an external reference signal for the local oscillator (LO) on the device. REF IN is an SMA (f) connector with an impedance of 50 Ω and is a single-ended reference input. REF IN accepts a 10 MHz signal with a minimum input power of 0 dBm (632 Vpk-pk) and a maximum input power of 15 dBm (3.56 Vpk-pk) for a square wave or sine wave.
PPS IN	Input terminal for the pulse per second (PPS) timing reference. PPS IN is an SMA (f) connector with an impedance of 50 Ω and is a single-ended input. PPS IN accepts 0 V to 3.3 V TTL and 0 V to 5 V TTL signals.
MIMO EXPANSION	The MIMO EXPANSION interface port connects two USRP devices using a compatible MIMO cable.
GB ETHERNET	The gigabit Ethernet port accepts an RJ-45 connector and gigabit Ethernet compatible cable (Category 5, Category 5e, or Category 6).
POWER	The power input accepts a 6 V, 3 A external DC power connector.

Εικόνα 3.5 Επεξήγηση θυρών συσκευής

Ανάλυση λυχνιών της συσκευής (εικόνα 3.6,3.7)

Στη συνέχεια θα γίνει μια μικρή ανάλυση των λυχνιών της συσκευής A,B,C,D,E,F:

Για την λυχνία A:

Όταν βρισκόμαστε σε κατάσταση μετάδοσης τότε θα πρέπει η λυχνία με το γράμμα Α να είναι φωτεινή με χρώμα πράσινο σε διαφορετική περίπτωση αν η λυχνία δεν ανάβει τότε σημαίνει πως τα δεδομένα δεν μεταδίδονται

Για την λυχνία Β:

Όσον αφορά την λυχνία Β ανάβει σε περίπτωση κατάστασης φυσικής διασύνδεσης με ένα καλώδιο MIMO και ένα αντίστοιχο USRP της αντίστοιχης σειράς 29xx. Δηλαδή εάν έχουμε ενωμένη μια συσκευή με μια άλλη της αντίστοιχης σειράς υπό κανονικές συνθήκες θα πρέπει η λυχνία β να ανάβει με πράσινο χρώμα σε διαφορετική περίπτωση το καλώδιο δεν είναι συνδεδεμένο και η ζεύξη δεν έχει επιτευχθεί.

Για την λυχνία C:

Όταν βρισκόμαστε σε κατάσταση λήψης τότε θα πρέπει η λυχνία με το γράμμα C να είναι αναμμένη σε πράσινη απόχρωση σε διαφορετική περίπτωση δηλαδή όταν η λυχνία δεν είναι αναμμένη σημαίνει ότι η συσκευή δεν λαμβάνει τα δεδομένα.

Για την λυχνία D:

Η λυχνία D ανάβει με πράσινο χρώμα όταν το λογισμικό έχει εγκατασταθεί επιτυχώς. Εάν εγκαταστήσουμε μια νεότερη έκδοση λογισμικού και η λυχνία D δεν είναι αναμμένη σημαίνει ότι δεν έχει εγκατασταθεί ή δεν έχει φορτωθεί με επιτυχία στη συσκευή.

Για τη λυχνία E:

Η λυχνία E έχει τις παρακάτω καταστάσεις φωτολαμψίας οι οποίες αναφέρονται σε τοπικό (LO) oscillator είτε ηλεκτρονικό προσομοιωτή μέσω λογισμικού είτε σε φυσική μορφή. Εάν η λυχνία είναι σβηστή τότε δεν παράγεται σήμα ή το σήμα δεν έρχεται σωστά στη συσκευή. Εάν η λυχνία αναβοσβήνει τότε ο (LO) oscillator δεν έχει μεταφέρει επιτυχώς το σήμα. Εάν η λυχνία είναι σταθερά αναμμένη τότε το σήμα παράγεται κανονικά και ο (LO) oscillator αναπαράγει σωστά το σήμα.

Για τη λυχνία F:

Η λυχνία F αναφέρεται μόνο στην τροφοδοσία της συσκευής δηλαδή όταν είναι σβηστή τότε η συσκευή δεν έχει ρεύμα ή δεν παίρνει το κατάλληλο ρεύμα ενώ όταν η λυχνία είναι σταθερά πράσινα αναμμένη τότε η συσκευή παίρνει κανονικά ρεύμα και είναι σε λειτουργία.

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας που αναγράφει αναλυτικά όλες τις λειτουργίες των λυχνιών τη συσκευής.

Table 6. LED Indicators

LED	Description	Color	Indication
A	Indicates the transmit status of the device.	Off	The device is not transmitting data.
		Green	The device is transmitting data.
B	Indicates the status of the physical MIMO cable link.	Off	The devices are not connected using the MIMO cable.
		Green	The devices are connected using the MIMO cable.
C	Indicates the receive status of the device.	Off	The device is not receiving data.
		Green	The device is receiving data.
D	Indicates the firmware status of the device.	Off	The firmware is not loaded.
		Green	The firmware is loaded.
E	Indicates the reference lock status of the LO on the device.	Off	There is no reference signal, or the LO is not locked to a reference signal.
		Blinking	The LO is not locked to a reference signal.
		Green	The LO is locked to a reference signal.
F	Indicates the powers status of the device.	Off	The device is powered off.
		Green	The device is powered on.

Εικόνα 3.6 Επεξήγηση λυχνίων

Table 5. NI USRP-2920 Module LEDs

LED	Indication
A	Indicates the transmit status of the NI USRP-2920 module: OFF—The module is not transmitting data. GREEN—The module is transmitting data.
B	Indicates the status of the physical MIMO cable link: OFF—The modules are not connected using the MIMO cable. GREEN—The modules are connected using the MIMO cable.
C	Indicates the receive status of the NI USRP-2920 module: OFF—The module is not receiving data. GREEN—The module is receiving data.
D	Indicates the firmware status of the NI USRP-2920 module: OFF—The firmware is not loaded. GREEN—The firmware is loaded.
E	Indicates the reference lock status of the local oscillator (LO) on the NI USRP-2920 module: OFF—There is no reference signal, or the LO is not locked to a reference signal. BLINKING—The LO is not locked to a reference signal. GREEN—The LO is locked to a reference signal.
F	Indicates the power status of the NI USRP-2920 module: OFF—The module is powered off. GREEN—The module is powered on.

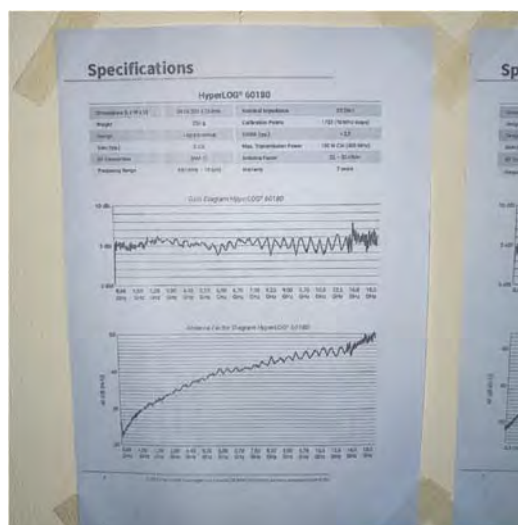
Εικόνα 3.7 Επεξήγηση λυχνίων



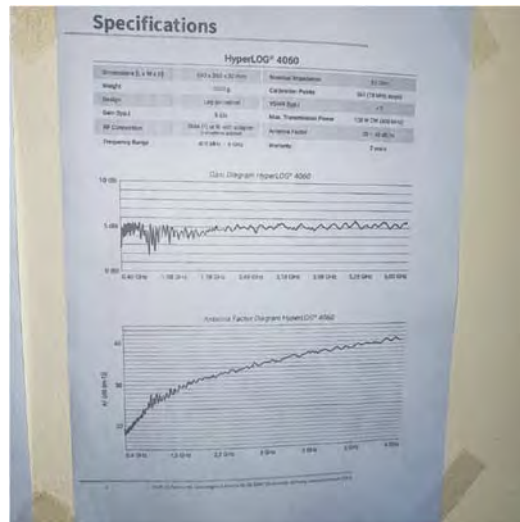
Εικόνα 3.8 USRP 2920,2921



Εικόνα 3.9 Κεραία



Εικόνα 3.10 Χαρακτηριστικά Κεραίας



Εικόνα 3.11 Χαρακτηριστικά Κεραίας 2



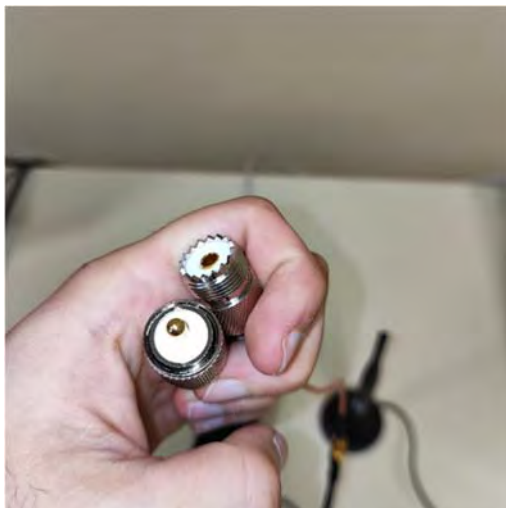
Εικόνα 3.12 Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν



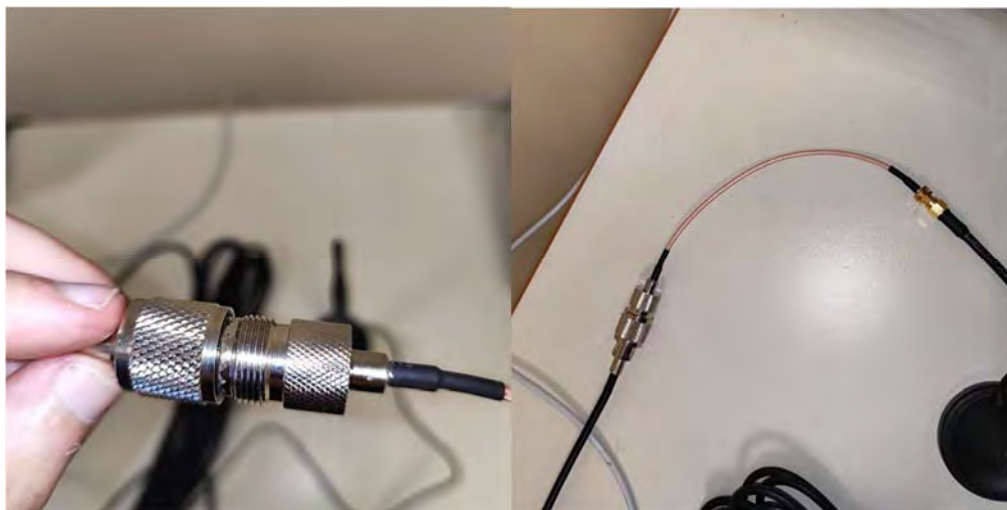
Εικόνα 3.13 Κεραία CB



Εικόνα 3.14 Attenuator 30 dB



Εικόνα 3.15 Διασύνδεση κεραίας - αντάπτορα



Εικόνα 3.16,3.17 Διασύνδεση κεραίας - αντάπτορα



Εικόνα 3.18 Διασύνδεση κεραίας με USRP



Εικόνα 3.19,3.20 Κεραία FM

3.2 Υλοποίηση Συστήματος FM Receiver στο Gnu Radio

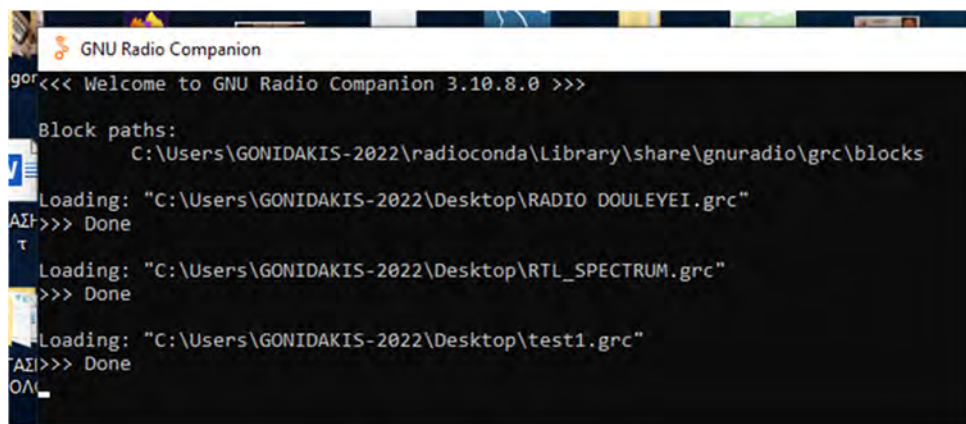
Στο κεφάλαιο 3.2 έχει γίνει πλήρης ανάλυση της υλοποίησης ενός ολοκληρωμένου συστήματος FM Receiver το οποίο είναι κατασκευασμένο βήμα βήμα στο λογισμικό GNU Radio που κατά βάση τρέχει σε Linux αλλά για τη δικιά μας διευκόλυνση κατεβάσαμε μια επέκταση ώστε να μπορούμε να το τρέξουμε σε λειτουργικό windows. Ξεκινώντας με την εγκατάσταση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε, μπορούμε εύκολα να το βρούμε στην επίσημη ιστοσελίδα <https://www.gnuradio.org/>. Συνοπτικά, το GNU radio είναι ένα δωρεάν και ανοιχτού κώδικα λογισμικό με εργαλειοθήκες προγραμματισμού όπου παρέχει μια μεγάλη γκάμα εργαλείων με σκοπό την επεξεργασία σήματος και με blocks για την υλοποίηση λογισμικών του ραδιοφώνου. [13]Είναι διαθέσιμο για χρήση

πολύ εύκολα και σε εξωτερικό υλικό ραδιοσυχνοτήτων έχει χαμηλό κόστος που επιτρέπει τη δημιουργία ραδιοφώνων παρόμοιας και της δικιάς μας υλοποίησης , καθορίζονται μόνο από το λογισμικό και πολλές φορές μας δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε και χωρίς υλικό σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης που δεν έχει τίποτα να χάσει από τα υπόλοιπα.[14] Χρησιμοποιείται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς, στο χώρο της βιομηχανίας, σε ακαδημαϊκό επίπεδο αλλά χρησιμοποιείται και από διάφορους ερασιτέχνες που υποστηρίζουν το συγκεκριμένο περιβάλλον καθημερινά καθώς τους προσφέρει τη δυνατότητα της έρευνας των ασύρματων επικοινωνιών όσο και των πραγματικών ραδιοφωνικών συστημάτων. Μπαίνοντας σε κάποιες γρήγορες οδηγίες τις εγκαταστάσεις του, έτσι λοιπόν σε περίπτωση που χρειαστεί να εγκατασταθεί σε Debian έκδοσης >12 ή σε λειτουργικό Ubuntu έκδοσης >22.04 ή ακόμα και σε Linux Mint > 21.1 ή σε Raspberry Pi Os 64bit Οι εκδόσεις μετά της 30 Οκτώβριου του 2021 τότε μπορεί πολύ απλά τρέχοντας την εντολή `sudo apt-get install gnuradio` από ένα τερματικό να εγκατασταθούν όλα τα απαραίτητα αρχεία που θα χρειαστεί κάποιος για να δουλέψει σε αυτό το περιβάλλον. Σε περίπτωση που κάποιος δουλεύει με Fedora η εντολή που θα πρέπει να τρέξει είναι η `sudo dnf install gnuradio`. Επιστρέφοντας στα Ubuntu λόγω του ότι θα χρειαστούν και κάποιες εξειδικευμένες βιβλιοθήκες – αναβαθμίσεις και packs του προγράμματος θα χρειαστεί να τρέξετε τις ακόλουθες εντολές:

- `sudo add-apt-repository ppa:gnuradio/gnuradio-releases`
- `sudo apt-get update`
- `sudo apt-get install gnuradio python3-packaging`

Ενώ για όλα τα υπόλοιπα Linux Distros ισχύει η ακόλουθη:

- `sudo {apt,dnf,yay,emerge,...} install gnuradio`



Εικόνα 3.21 Τερματικό υλοποίησης

Εάν πάλι θέλουμε να τρέξουμε το λογισμικό μας σε ένα λειτουργικό όπως τα Windows ή τα macOS Όπως και στη δική μας περίπτωση θα χρειαστούμε να κατεβάσουμε στον υπολογιστή μας τον οδηγό εγκατάστασης Radioconda. Παρακάτω link θα βρείτε όλες τις απαραίτητες βιβλιοθήκες και όλα τα απαραίτητα αρχεία που θα χρειαστούν για την εγκατάσταση καθώς και όλες τις εντολές που θα πρέπει να τρέξετε για τα windows ή τα macOS <https://github.com/ryanvolz/radioconda> . Εναλλακτικά εάν δεν λειτουργήσει αυτό υπάρχουν άλλοι 5 τρόποι με άλλα λογισμικά και εργαλεία να κατεβάσετε το GNURadio.

1^{ος} τρόπος : MinGW/MSYS

2^{ος} τρόπος : Cygwin

3^{ος} τρόπος : Chocolatey

4^{ος} τρόπος : WSL | Ubuntu

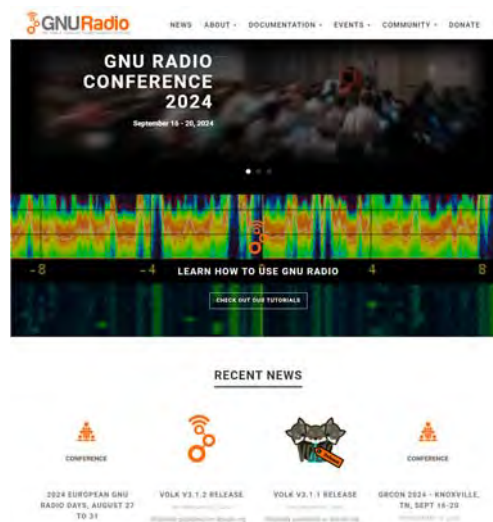
5^{ος} τρόπος : Using an Azure VM

Κατά τον πρώτο τρόπο παρέχεται ένας GNU compiler και κάποια εξειδικευμένα αρχεία για τη μεταγλώττιση των φυσικών εφαρμογών των Windows. Επίσης θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι ένα ολοκληρωμένο σετ παρόμοιων εντολών για τα Linux υλοποιημένο με κυψέλες και εργαλεία τα οποία χρησιμοποιούνται εκεί αλλά δεν συμπεριλαμβάνεται επιφάνεια εργασίας και λειτουργικό των Linux , σε αυτή την περίπτωση τα προγράμματα είναι μικρότερα και γρηγορότερα από την τρίτη περίπτωση και δεν απαιτούνται εξειδικευμένοι κώδικες παραθυρικού περιβάλλοντος. Λειτουργεί με Linux API emulation παρέχει τις βασικές εκδόσεις της Python και ελάχιστες εξωτερικές βιβλιοθήκες. Η υποστήριξή του δεν είναι και η καλύτερη για αυτές τις 2 καθώς είναι προ μεταγλωττισμένες και άμεσα διαθέσιμες δωρεάν. Κατά τον δεύτερο τρόπο παρέχεται ένα πλήρες προσομοιωμένο περιβάλλον Linux στα Windows , όλες τις εξειδικευμένες λειτουργίες μετονομασία αρχείων ,εργαλεία, κυψέλες σε Linux , καθώς και όλα τα εργαλεία που θα χρειαστεί για να χτίσεις εύκολα πολλές βιβλιοθήκες και μόνος σου μέσα στο GNU radio. Επιπροσθέτως, παρέχεται εμπλουτισμένο περιβάλλον προγραμματισμού σε Linux και API χωρίς να απαιτείται το GNU radio για να λειτουργήσει ενώ έχουν δοκιμαστεί όλες οι λειτουργίες σε όλες τις εκδόσεις linux. Οι βιβλιοθήκες είναι γραμμένες σε γλώσσα προγραμματισμού C. Ο τρίτος τρόπος στην ουσία είναι μια εικονική μηχανή πακέτων και διαχειριστής καθώς είναι ανεξάρτητος και απλά παρέχει τα πακέτα του GNU radio (Εικόνα 3.22) και για να λειτουργήσει χρειάζονται οι παρακάτω εντολές :

- `iex ((new-object net.webclient).DownloadString('https://chocolatey.org/install.ps1'))`(Για την εγκατάσταση με διαχειριστικά δικαιώματα)

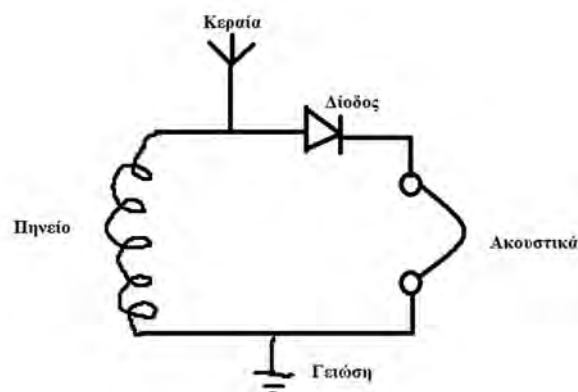
- `choco source add -name gnuradio -source C:\<path-to>\chocolatey-packages` (για την εγκατάσταση της πηγής και όλων των συνταγών για να υλοποιηθεί ο κλώνος του προγράμματος που υλοποιείται από το github)
- `cd <path-to>\chocolatey-package\gnuradio cpack` (για τη δημιουργία πακέτων)
- `choco install gnuradio` (για την εγκατάσταση του GNU radio)

Οι τρόποι 4 και 5 αναφέρονται περί περισσότερο στα Linux και δεν θεωρούνται τόσο χρήσιμοι εφόσον μπορείτε να τρέξετε κατευθείαν το τερματικό το GNU radio παρά μόνο χρησιμεύουν σε περίπτωση που θέλετε να τρέξετε εξειδικευμένα projects.



Εικόνα 3.22 Website Gnu Radio <https://www.gnuradio.org/>

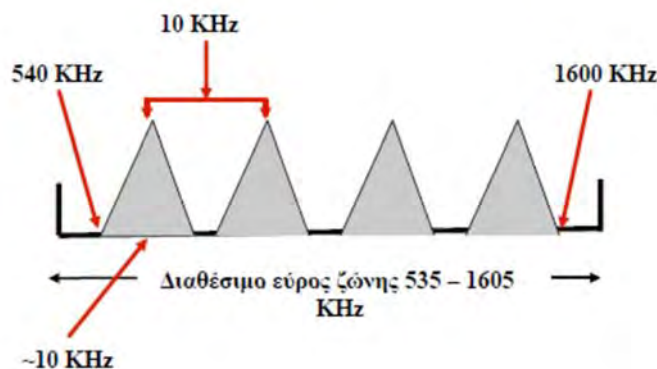
Εφόσον αναλύθηκε το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε θα περάσουμε στην δική μας υλοποίηση που είχε αναδειχθεί η λειτουργία των σημερινών ραδιοφώνων με τη μορφή του SDR (Software Defined Radio) η οποία επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα με το ελεύθερο λογισμικό που αναλύσαμε προηγουμένως GNU Radio. Παρακάτω υπάρχει εικόνα:



Εικόνα 3.23 Υπερετερόδυνος δέκτης

Ξεκινώντας με τον υπερετερόδονος δέκτης όπου είναι μία από τις 3 τεχνολογίες που μπορούν να σχεδιάζουν οι δέκτες και έχει επικρατήσει επειδή πρακτικά είναι η πιο λειτουργική και χειρίζεται πολύ πιο εύκολα και πιο απλά ενώ δεν απαιτείται ιδιαίτερη εκπαίδευση και ιδιαίτερες τεχνικές γνώσεις παρ'όλα αυτά παρέχεται υψηλή ποιότητα ευαισθησία και επιλεκτικότητα. Εδώ θα αναλύσουμε αυτόν τον δέκτη, καλό είναι να αναφερθεί ότι η ραδιοφωνική εκπομπή παλαιότερα γινόταν στα AM[4] (Εικόνα 3.24) και το διαθέσιμο εύρος ζώνης ήταν από 535-1605 KHz ενώ αργότερα αντικαταστάθηκαν τα AM στα FM (εικόνα 34) και είχαν διαθέσιμο εύρος ζώνης από 18 έως 108 MHz.

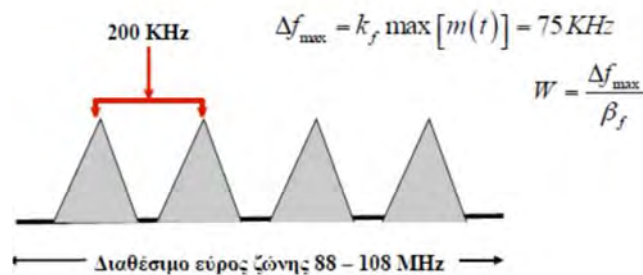
Ραδιοφωνική Εκπομπή AM



Εικόνα 3.24 Ραδιοφωνική Εκπομπή AM

Πηγή εικόνας: Οι εικόνες υπάρχουν στο βιβλίο «Συστήματα Τηλεπικοινωνιών», J. G. Proakis, M. Salehi, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (Μετάφραση-Επιμέλεια: Καρούμπαλος Κ. και Ζέρβας Ε., Καραμπογιάς Σ., Σαγκριώτης Ε.)

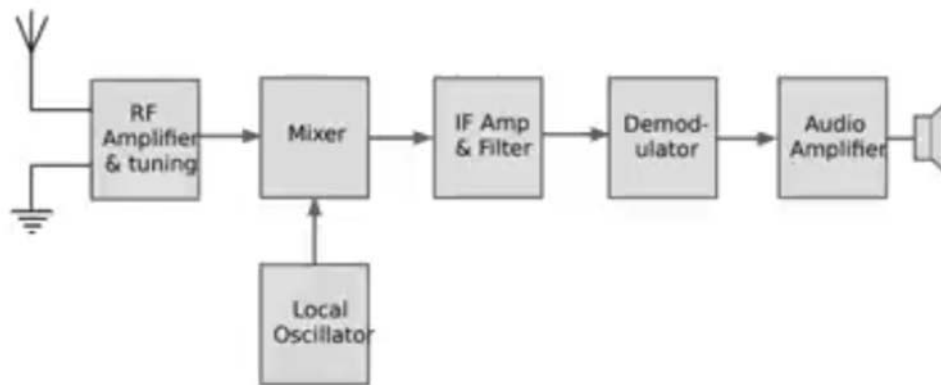
Ραδιοφωνική Εκπομπή FM



Εικόνα 3.25 Ραδιοφωνική Εκπομπή FM

Πηγή εικόνας: Οι εικόνες υπάρχουν προέρχονται από το σύγγραμμα του μαθήματος “Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα” , Εκδόσεις Τζιόλα, μετά από άδεια του συγγραφέα Καθ. Γ. Καραγιαννίδη

Υπάρχει λοιπόν ο ομόδυνος δέκτης όπου σε αυτή την περίπτωση είναι αναγκαία λειτουργία όλων των κυκλωμάτων που είναι συντονισμένα γιατί η φασματική απομόνωση του σήματος εκπομπής και υπάρχει ιδιαίτερη ανάγκη για την υλοποίηση ενός πραγματικού παράθυρου ενώ δημιουργούνται επάλληλα εν σειρά συντονισμένα κυκλώματα. Ο απαιτείται ταυτόχρονη μετακίνηση της κεντρικής συχνότητας για τα φίλτρα που υπάρχουν δηλαδή γίνεται συντονισμένη μεταφορά και υπάρχει μια μηχανική κίνηση και η συνολική συνάρτηση μεταφοράς είναι το γινόμενο των επιμέρους συναρτήσεων. Ενώ στην περίπτωση του ετερόδυνου δεκτή Τα πράγματα διαφέρουν κατά πολύ (βλέπε εικόνα 3.26).



Εικόνα 3.26 Διαφορές δεκτών

Πηγή εικόνας: Οι εικόνες υπάρχουν προέρχονται από το σύγγραμμα του μαθήματος “Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα” , Εκδόσεις Τζιόλα, μετά από άδεια του συγγραφέα Καθ. Γ. Καραγιαννίδη

Σήμερα όμως χρησιμοποιούνται πολύ περισσότερο τα μπλοκ διαγράμματα όπως ένα σύστημα SDR με ένα πολύ οικονομικό τσιπ το 2832 όπου με αυτό μπορεί να υλοποιηθεί κανονικά ένα ολοκληρωμένο SDR δέκτη. Το 2832 έχει δυνατότητες να κάνει λήψη με τον downconverter που έχει ενσωματωμένο από 24 μεγάκυκλους μέχρι 1,7 γίγα επομένως μπορεί και κάνει τη δουλειά που κάνουν όλα τα SDR δηλαδή μπορεί και κάνει δειγματοληψία στην IF που κατεβάζει ο downconverter και να το επεξεργαστεί μετέπειτα ψηφιακά έτσι ώστε να μας κάνει αποδιαμόρφωση και όχι μόνο αλλά και spectrum analyzer και

άλλες εφαρμογές μόνο και μόνο επεξεργάζονται τα ψηφιακά τα σήματα τα οποία χρειαζόμαστε και θέλουμε δηλαδή αυτά που δώσαμε εντολή να κατέβουν στην IF.

Το λεγόμενο τσιπάκι το οποίο αναφέραμε και μπορεί και πραγματοποιεί τα παραπάνω το οποίο είναι το πιο φθινό στην αγορά τη στιγμή κοστίζει περίπου 20-30€ και μοιάζει με φλασάκι (βλέπε εικόνα 36)



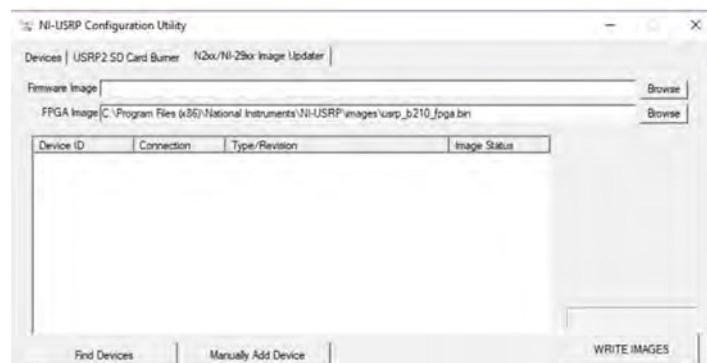
Εικόνα 36 SDR RTL 2832 chip

Αρχικά να πούμε ότι το συγκεκριμένο chip κυκλοφορούσε σαν δέκτης ψηφιακής τηλεόρασης υποστηριζόμενη βέβαια από το λογισμικό το οποίο συνδεόταν στη θύρα usb συνήθως σε ένα Desktop σύστημα. Εννοείται βέβαια ότι λόγω της οικονομικής του τιμής οι επιδόσεις του είναι αρκετά χαμηλές σε σύγκριση με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε στη δικιά μας υλοποίηση ο οποίος αγγίζει τα 8.000€. Ξεκινώντας το μπλοκ διάγραμμα στην πλατφόρμα που χρησιμοποιούμε η οποία δεν προαπαιτεί κώδικα απαραίτητα διότι έχει επιτευχθεί από την ελεύθερη κοινότητα όλα όσα χρειάζονται να είναι παραμετροποιήσιμα από μπλόκ κώδικες. Ξεκινώντας λοιπόν μέσα από το λογισμικό μας δημιουργώντας είναι λευκό template από το File -> New -> QT GUI το οποίο να σημειωθεί ότι είναι σχεδόν το μόνο που υποστηρίζεται από παραθυρικά περιβάλλοντα. Εφόσον δημιουργηθεί το λευκό μας template θα παρατηρήσουμε ότι μας έχει εμφανιστεί πάνω αριστερά ένα μπλοκ το οποίο καθορίζει τον τύπο του αρχείου της ρύθμισης το όνομα του αρχείου και την προκαθορισμένη γλώσσα προγραμματισμού η οποία είναι η Python και ακριβώς δίπλα από αυτό το μπλοκ υπάρχει άλλο ένα μικρότερο σε μέγεθος το οποίο ονομάζεται Variable και καθορίζεται η τιμή της μεταβλητής στο samp_rate η οποία απεικονίζει τη συχνότητα δειγματοληψίας που θα χρειαστεί το usrp και γενικότερα το SDR σύστημα μας. Τώρα για να βρούμε το υλικό που χρησιμοποιούμε το εν λόγω USRP στο περιβάλλον του GNU Radio θα πάμε πάνω δεξιά και θα κλικάρουμε το μεγεθυντικό φακό που μέσα του έχει το A. Αφού το κάνουμε αυτό θα εμφανιστεί μια μπάρα αναζήτησης και εκεί θα πληκτρολογήσουμε UHD: USRP Source ή ότι έχουμε άλλο για πηγή σε περίπτωση δηλαδή που χρησιμοποιήσουμε το rtl που προανέφερα παραπάνω με τα 20 30€

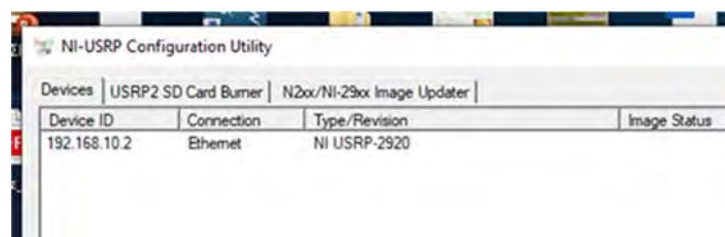
τότε θα πληκτρολογούσαμε αντίστοιχα RTL-SDR Source, δηλαδή σε αυτό το στάδιο επιλέγουμε την πηγή μας. Αφού επιλέξουμε λοιπόν ως πηγή το USRP Θα δούμε ότι στα αριστερά υπάρχει ένα πεδίο για τις εντολές και στα δεξιά η έξοδος και κάποια μηνύματα ενώ φαίνονται ευδιάκριτα 4 κανάλια εκ των οποίων αφορούν την κεραία και τη θύρα ,το κέρδος, το AGC το οποίο είναι ένα πρόσθετο της πλατφόρμας που παρέχει αυτόματες λειτουργίες ελέγχου κέντρου και δύναμης κατά την τιμή που θα έχει εισαχθεί με παραμέτρους τις οποίες μπορούμε να παραμετροποιήσουμε εμείς, επίσης έχει το εύρος των κεντρικών συχνοτήτων σε Hz , την δειγματοληψία, και τα “ρολόγια” του υπολογιστή. Αυτό στην ουσία που κάνει το λογισμικό μας είναι να παίρνουμε τα μπλοκ να τα συνδέσουμε γραφικά στο περιβάλλον με τις μονάδες που θα μας αποτελέσουν το δέκτη μας και χωρίς να έχουμε συγκεκριμένες γραμμές κώδικα να έχουμε ολοκληρώσει ένα δέκτη ή ένα spectrum ή οτιδήποτε άλλο. Αφού καταχωρήσουμε την πηγή μας τώρα θα χρειαστεί να επεξεργαστούμε όλες τις μεταβλητές που εμπεριέχονται σε αυτήν αφού τη κλικάρουμε έχουμε 2 φορές θα επιλέξουμε στο Output Type την επιλογή Complex float32. Έπειτα στην από κάτω γραμμή στο Wire Format καλό είναι να το βάλουμε στο Automatic , τα επόμενα 4 πεδία καλό είναι να αφήσουμε το πρόγραμμα να τα καθορίσει ενώ εμείς θα πρέπει να αλλάξουμε τη λειτουργία Sync σε PC Clock και το χρόνο εκκίνησης σε -1.0 ενώ για το ρολόι δειγματοληψίας θα βάλουμε την τιμή default σε Hz , στο πεδίο Num Mboards καταχωρούμε την τιμή 1, ενώ αντίστοιχα στα ρολόγια πηγής και στο χρόνο πηγής αφήνουμε τις προκαθορισμένες τιμές. Καλό είναι να συμπληρώσουμε στον αριθμό των καναλιών την τιμή ένα. Πολύ σημαντικό είναι να συμπληρωθεί η συνάρτηση samp_rate στο τελευταίο πεδίο. Όλα αυτά αναφέρονται στο πεδίο General, παρακάτω το μόνο που θα χρειαστεί να αλλάξουμε στο πεδίο Advanced είναι στο Minoutbuf και max-outbuf να καταχωρήσουμε την τιμή 0 και στο Show LO Controls βάζουμε την τιμή False ενώ μας δίνεται η δυνατότητα να βάλουμε στην επιλογή σχόλια ότι λεκτικά θέλουμε για να δούμε και για να θυμηθούμε τι ακριβώς έχουμε κάνει αν ανοίξουμε το συγκεκριμένο πρότζεκτ μετά από καιρό. Προχωρώντας στο πεδίο RF Options είναι εξίσου σημαντικό να συμπληρωθεί στην κεντρική συχνότητα το λεκτικό FREQ στην τιμή κέρδους η συνάρτηση RF_GAIN ενώ όπως είναι λογικό ο τύπος κέρδους θα είναι σε (dB) και όπως αναγράφεται χαρακτηριστικά στο λογισμικό είναι Absolute (dB). Στο πεδίο CH0 Antenna βάζουμε RX2 και όσον αφορά το Bandwidth (Hz) καταχωρούμε την τιμή μηδέν εφόσον τα κάνουμε όλα αυτά θα πρέπει να είμαστε βέβαιοι ότι το USRP αναγνωρίζεται και από τον υπολογιστή μας αλλά και από το λογισμικό μας, αυτό αρχικά το επιβεβαιώνουμε από το πρόγραμμα της NI Configuration (εικόνα 9) όπου αν μας εμφανίζεται εκεί

η συσκευή μαζί με την ip τότε σημαίνει ότι είμαστε σε καλό στάδιο όμως για να επιβεβαιώσουμε ότι ή συσκευή εμφανίζεται και στο λογισμικό τότε αφού καταχωρήσουμε το μπλοκ της πηγής μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι στο δεξιά πλαίσιο που ονομάζεται Documentation όλες τις απαραίτητες πληροφορίες. Στη συνέχεια θα περάσουμε τα σήματα που θα βγουν στην έξοδο από την πηγή τα οποία περνούν από μια κεραία εννοείται. Τα σήματα αυτά λοιπόν θα πρέπει να περαστούν από ένα Low pass Filter ώστε να έχουμε έπειτα την δυνατότητα να τα αποδιαμορφώσουμε. Επομένως εκτελούμε την ίδια διαδικασία που κάναμε για να βρούμε την πηγή γράφοντας το λεκτικό Low pass filter ώστε να βρούμε το κατάλληλο μπλοκ και να το εντάξουμε στο διάγραμμα μας (μεγάλη προσοχή, δεν θέλουμε από τα φίλτρα ούτε το FFT Low pass filter αλλά ούτε και το Low pass filter Taps). Αφού φέρουμε το μπλοκ μας στην επιφάνεια, τότε με ένα απλό κλικ ενώνουμε την έξοδο της πηγής με την είσοδό του Low Pass Filter. Κατ' αυτόν τον τρόπο οδεύετε το σήμα από την έξοδο του USRP στο Low Pass Filter. Αφού το καταχωρήσουμε αλλά και το ενώσουμε θα διαπιστώσουμε ότι 3 πεδία είναι κόκκινα μέσα στο Low Pass Filter και αυτό συμβαίνει διότι δεν έχει γίνει η απαραίτητη παραμετροποίηση, για να αποφύγουμε λοιπόν αργότερα τα error κατά την μεταγλώττιση θα μπούμε να καταχωρήσουμε σωστά τις τιμές που πρέπει (η παραμετροποίηση γίνεται αργότερα). Έπειτα αναπόσπαστο στοιχείο της υλοποίησης μας είναι ένας αποδιαμορφωτής FM αυτό το μπλοκ μπορούμε πολύ εύκολα να το βρούμε στον πυρήνα έπειτα στην υποκατηγορία modulator ή για να διευκολυνθούμε μπορούμε να κάνουμε εύρεση πληκτρολογώντας (WBFM) Wide Band FM τώρα θα μας εμφανίσει έναν Wide Band FM Receiver όπου είναι και αυτός ακριβώς ο οποίος θα χρησιμοποιήσουμε για να κάνουμε την αποδιαμόρφωση στην μπάντα των FM. Εδώ τώρα η συνδεσμολογία έχει ως εξής ενώνουμε την έξοδο της πηγής με το Low Pass Filter και έπειτα ενώνουμε την έξοδο του φίλτρου με την είσοδό του αποδιαμορφωτή Wide Band FM Receive. Όταν το κάνουμε όλο αυτό θα παρατηρήσουμε ότι η έξοδος έχει γίνει πορτοκαλί κι αυτό συμβαίνει διότι τα δεδομένα ενώ στην αρχή ήταν ένα σήμα Complex δηλαδή ήταν σύνθετο είχε πραγματικό μέρος και φανταστικό είχαμε πάει στην έξοδο του αποδιαμορφωτή να είναι ένα απλό audio με μορφή πια πραγματικού σήματος. Τώρα, η έξοδος του αποδιαμορφωτή μας θέλουμε να συνδεθεί με τον ενισχυτή του υπολογιστή ώστε να μπορούμε να έχουμε την κατάλληλη έξοδο και να μπορούμε να ακούσουμε, για να επιτευχθεί αυτό θα χρειαστεί να φέρουμε έναν Audio Sink όπου θα λειτουργήσει ως υποδοχέας λήψης του σήματος μας και αποτελεί την ίδια την πλακέτα – κάρτα ήχου του υπολογιστή μας. Στην έξοδο της πηγής θα μπορούσαμε να

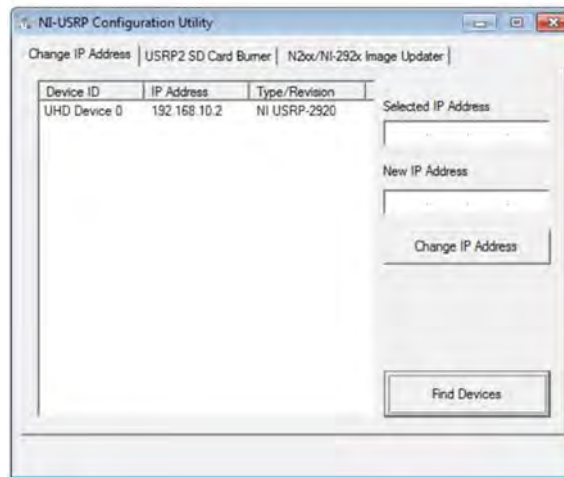
βάλουμε κατά την έξοδο της IF των τριάμισι μέγα κύκλων, όποια συχνότητα κι αν ξεκινήσουμε κατά την είσοδο της πηγής, ο downconverter θα βγάλει στην έξοδο της πηγής, θα κατεβάξει από όποια συχνότητα βάζουμε παραδείγματος χάριν ανεβάζουμε 100 μεγακύκλους με Bandwidth 3.5 μεγακύκλους θα μας βγάλει στην έξοδο της 3,5 μεγακύκλους, αυτούς τους τρεισήμισι μεγακύκλους δειγματοληπτεί όπως και στον υπερτεροδύνο δέκτη παίρναμε την IF και η IF προχώραγε και περιοριζόταν και γινόταν η αποδιαμόρφωση. Έτσι ακριβώς και εδώ μπορούμε να βάλουμε στην έξοδο της πηγής ένα όργανο ώστε να μπορούμε να το κάνουμε και Spectrum Analyzer, έτσι με τρεισήμισι μεγακύκλους κοντά στη φέρουσα ότι άλλο κυκλοφορεί στη φέρουσα ποσο είναι παραδείγματος χάριν οι 100 μεγάλοι κύκλοι που βάλουμε. Για να το κάνουμε αυτό θα πρέπει να καταχωρήσουμε στο διάγραμμα μας ένα Frequency Sink, και πιο συγκεκριμένα ένα QT GUI Frequency Sink από την κατηγορία Instrumentation. Αφού καταχωρήσουμε το κατάλληλο μπλοκ που προανέφερα θα ενώσουμε την έξοδο της πηγής με την είσοδο του υποδοχέα που μόλις καταχωρίσαμε στο in για να γίνει η γραφική απεικόνιση των φερόντων στην περιοχή της IF που κατεβάσαμε.



Εικόνα 3,27 Πρόγραμμα Configuration Utility



Εικόνα 3.28 Ζεύξη συσκευής - υπολογιστή



Εικόνα 3.29 Ζεύξη συσκευής - υπολογιστή

Παραμετροποίηση:

Σειρά έχει η παραμετροποίηση όλου του συστήματος ξεκινώντας με το μπλοκ των μεταβλητών, εάν το κλικάρουμε 2 φορές τότε θα παρατηρήσουμε την προεπιλεγμένη τιμή αν και κανονικά εδώ θα έπρεπε η δειγματοληψία ενός τέτοιου σήματος και η υψηλότερη συχνότητα που μπορεί να δεχθεί είναι η 3.2MHz ή $3200 \cdot 10^3$ ή για να το καταχωρήσουμε σωστά στο σύστημα μας θα πρέπει να γράψουμε 3.2e6. Μέσα στους παραμέτρους θα συμπληρώσουμε ότι έχουμε μια συχνότητα τους 100 μεγακύκλους ως προκαθορισμένη τιμή. Εδώ μπορούμε να αλλάξουμε αυτή την τιμή με κάποια τιμή που γνωρίζουμε εμείς ένας σταθμός δηλαδή που ξέρουμε ότι το σήμα του είναι πολύ ισχυρό στην περιοχή μας παραδείγματος χάριν αν θέλαμε να βάλουμε το 97,1 που για την περιοχή της Λάρισας είναι ο party FM θα έπρεπε να βάλουμε 97.1e6 στις ιδιότητες της πηγής USRP στην κατηγορία General και να αλλάξουμε το Ch0 Center Freq (hz) στην τιμή της επιλογής μας. Αν και στη δική μας περίπτωση δεν είναι αναγκαίο καθώς έχω φτιάξει ειδικό ποτενσιόμετρο το οποίο κατά τη λειτουργία του όλου συστήματος έχετε τη δυνατότητα να δουλέψει ως ποτενσιόμετρο και ο χρήστης να αλλάξει τις τιμές οποιαδήποτε στιγμή έτσι ώστε να πιάνει και άλλους σταθμούς έτσι ακριβώς όπως λειτουργεί και ένα ραδιόφωνο αυτό είναι κάτι το οποίο θα το δούμε στο τέλος. Αυτή η συμπλήρωση εδώ γίνεται μόνο και μόνο για να μπορεί να γίνει σωστά η μεταγλώττιση του συστήματος και να εξαφανιστούν οι κοκκινίλες που διαβάζει το πρόγραμμα ως λάθος παραμετροποίηση. Στη συνέχεια μεταβαίνουμε στην πρόσθετες επιλογές παραμετροποίησης του Low Pass Filter στην

κατηγορία με τις γενικές επιλογές θα παραμετροποιήσουμε τις συχνότητες δειγματοληψίας καθώς είναι πάρα πολύ μεγάλες για τη δικιά μας υλοποίηση και θα βάλουμε στο πεδίο Sample Rate $400e3$ με τετρακόσιους χιλιοκύκλους. Ακόμα θα παραμετροποιήσουμε το cutoff Freq με ένα Bandwidth περίπου 25 χιλιοκύκλων αν και είναι χαμηλό για Wide Band FM εφόσον όμως δεν περνάει και stereo θα το αφήσουμε τόσο. Επίσης θα βάλουμε στο πεδίο Transition Width το πιο αντικατοπτρίζει μια πτώση που θα καταχωρήσουμε εμείς ίση με $2e3$. Αφού γίνουν και αυτές οι παραμετροποιήσεις θα παρατηρήσουμε ότι έχουν φύγει και όλα τα κόκκινα από το μπλοκ του φίλτρου. Έπειτα θα περάσουμε στον WBFM εδώ θα πρέπει να παραμετροποιήσουμε το Quadrature Rate καταχωρώντας την τιμή $400e3$ ενώ στο Audio Decimation θα βάλουμε την τιμή 66 και θα εξηγήσουμε αργότερα το γιατί. Επόμενο στοιχείο που θα χρειαστεί να εξετάσουμε είναι οι ιδιότητες του μπλόκ Audio Sink. Εδώ θα χρειαστεί να επιλέξουμε στον ενισχυτή μας το Audio του Laptop – Desktop 48 Khz συχνότητα δειγματοληψίας. Κάπου εδώ είμαστε σχεδόν έτοιμοι θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο βασικός σκελετός έχει υλοποιηθεί και μένουν μόνο κάποιες μικρές ρυθμίσεις εμφάνισης, επέκτασης και μεταγλώττισης. Τέλος θα πρέπει να το αποθηκεύσουμε με λατινικούς χαρακτήρες και η κατάληξη του αρχείου θα πρέπει να είναι .grc σε περίπτωση που είναι διαφορετική το αρχείο δεν θα τρέξει ποτέ. Αφού αποθηκευτεί τότε μόλις κλείσει το αναδυόμενο παράθυρο αποθήκευσης το πρόγραμμά μας αρχίζει να τρέχει σε περίπτωση που έχουμε πολλά παράσιτα τότε καλό θα ήταν να βάλουμε και την κεραία μας σε μια καλή θέση (εικόνα15). Για οποιαδήποτε αλλαγή μετά την πρώτη φορά αποθήκευσης θα πρέπει να κάνουμε Generate the flow graph και να προσέξουμε τυχόν error ή Warnings τα οποία μπορεί να προκύψουν και αφού τα διορθώσουμε τότε θα κάνουμε Execute the flow graph. Κάπου εδώ έχουμε φτιάξει ένα σύστημα SDR δεκτή και Spectrum. Στη δικιά μας περίπτωση θεώρησα ορθό να βελτιώσω το όλο σύστημα αναπτύσσοντας με κάποια επιπλέον μπλοκ ένα πιο γραφικό περιβάλλον στο χρήστη το οποίο να έχει τη δυνατότητα να κάνει Autoscale , να έχει ποτενσιόμετρο για την επιλογή του σταθμού, να έχει ένα κουμπί για να σταματάει η λειτουργία του αλλά και ένα κουμπί προσαρμογής της διαμόρφωσης. Επιπλέον πρόσθεσα ρυθμίσεις των αξόνων έτσι ώστε μέσα από το spectrum να διαμορφώνουμε το άλλο μας διάγραμμα εκεί που η συχνότητα είναι υψηλή ώστε να αποφύγουμε τυχόν θορύβους και κουμπιά παραμετροποίησης RF gain .

Παρακάτω παραθέτω ένα δείγμα κώδικα σε python όπου αν το διαμορφώσουμε κατάλληλα μπορεί να δουλέψει για οποιαδήποτε πηγή όπως και για την οικονομική λύση rtl που προανέφερα (το έχω παραδώσει στον επιβλέποντα):

Virtual Instrument Engineering Workbench) καθώς και τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά που παρέχει αυτό το πρόγραμμα διότι με αυτό κάναμε τις επόμενες δυο υλοποιήσεις που αναφέρονται στα επόμενα 2 κεφάλαια. Η μία είναι παρόμοια με την προηγούμενη αλλά αντί για δέκτης λειτουργεί το σύστημα ως πομπός και έχει τη δυνατότητα να εκπέμπει στα FM ενώ η τελευταία μας υλοποίηση είναι η διαγραμματική-γραφική απεικόνιση της διαμόρφωσης QAM. Επομένως το λογισμικό LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) στην ουσία είναι ένα περιβάλλον προγραμματισμού ή αλλιώς μια πλατφόρμα ανάπτυξης συστημάτων και έχει δημιουργηθεί από την ίδια εταιρεία που είναι και το USRP μας η οποία είναι η National Instruments NI. Το εν λόγω πρόγραμμα χρησιμοποιείται περισσότερο για την υλοποίηση εφαρμογών που καλό θα ήταν να δοκιμαστούν και να προσομοιωθούν, πρέπει να κατασκευαστούν σε πραγματικό χρόνο αλλά και για μετρήσεις-ελέγχους δεδομένων καθώς προσφέρεται απίστευτα γρήγορη πρόσβαση. Το περιβάλλον του λογισμικού είναι πολύ φιλικό προς το χρήστη και διατίθεται και για Windows και για macOS και για android. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται και σε Windows Servers εννοώ οι απαιτήσεις των συστημάτων δεν χρειάζεται απαραίτητα να είναι μεγάλες, σύμφωνα με την επίσημη ιστοσελίδα της NI για παραθυρικά περιβάλλοντα χρειάζεται τουλάχιστον 6 GB μνήμη στο σκληρό δίσκο, 2Gb μνήμη τυχαίας προσπέλασης. Από επεξεργαστική ισχύς μπορεί να γίνει δουλειά και με έναν επεξεργαστή από το 2016 και έπειτα αυτό βέβαια διαφέρει ανάλογα το πρότζεκτ που θέλουμε να υλοποιήσουμε και δεν αφορά μόνο την επεξεργαστική ισχύς αλλά και τις μνήμες καθώς αν θέλουμε να υλοποιήσουμε ένα ποιο βαρύ πρότζεκτ θα χρησιμοποιηθούν περισσότεροι πόροι επομένως θα χρειαστεί και ένα καλύτερο υπολογιστικό σύστημα.

3.3.1 Ιδιότητες και τα Χαρακτηριστικά του LabVIEW

Ξεκινώντας με τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του προγράμματος το βασικότερο θα έλεγα ότι ήταν η επιφάνεια εργασίας δηλαδή το γραφικό αλλά και το προγραμματιστικό περιβάλλον του. Δηλαδή αυτό που το κάνει τόσο ξεχωριστό είναι πώς βασίζεται κυρίως σε ένα γραφικό προγραμματιστικό περιβάλλον το οποίο λειτουργεί με διαγράμματα ροής δεδομένων που ονομάζονται και αποθηκεύονται με την κατάληξη Vis. Δηλαδή όπως είδαμε και στο GNU Radio δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να συνδέσουν γραφικά μπλόκ κώδικα αλλά και να γράψουν ή αν θέλουν καθαρό κώδικα παραδείγματος χάριν στη γλώσσα προγραμματισμού C που είναι αποδεκτή από το πρόγραμμα. Όλα αυτό κάνει την πλατφόρμα πολύ αποδοτική και με την πάροδο των χρόνων έχει διαπιστωθεί από

τους χρήστες ότι είναι και ταχύτατη καθώς σε υλοποιήσεις με όγκο δεδομένων έχει αποδειχθεί ότι μπορεί και συλλέγει αλλά και να αναλύει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο πολύ γρήγορα. Ένα άλλο θετικό του προγράμματος εκτός του ότι έχει άπειρες δυνατότητες και λειτουργίες είναι ότι υποστηρίζεται η ενσωμάτωση με πολύ εξοπλισμό και όργανα υλικού Hardware με διάφορα πρωτόκολλα όπως το πρωτόκολλο GPIB, το πρωτόκολλο USB και το πρωτόκολλο Ethernet που χρησιμοποιήσαμε και εμείς στις υλοποιήσεις μας. Κάτι ακόμα που χρησιμοποιήσαμε και εμείς στις 2 υλοποιήσεις μας είναι ότι παρέχει εικονικά όργανα που είναι πλήρως παραμετροποιήσιμα ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τα ρυθμίσει ανάλογα με τις ανάγκες του για να μετρήσει οτιδήποτε χρειαστεί αλλά και να το εικονοποιήσει διαγραμματικά. Στα πλεονεκτήματά του προγράμματος πρέπει να προσθέσουμε τη διαλειτουργικότητα που έχει με άλλες γλώσσες προγραμματισμού δηλαδή έχει την ικανότητα να ενσωματώσει γλώσσες προγραμματισμού όπως η C,C++,Python, MATLAB. Τέλος το συγκεκριμένο πρόγραμμα διακρίνεται και από πιο ισχυρά εργαλεία ανάλυσης και σχεδίασης καθώς και για τις δυνατότητες που δίνει στο χρήστη να σχεδιάζει σήματα και να λέει δεδομένα κάτι που είναι πολύ κρίσιμο ειδικά στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, βοηθάει επίσης ακαδημαϊκούς χρήστες όπως βοήθησε και εμένα.

Χρήσεις και Εφαρμογές

Όπως ήδη μπορείτε να καταλάβετε οι δυνατότητες του προγράμματος είναι πολύ μεγάλες όπως και οι χρήσεις και οι εφαρμογές που μπορεί να καλύπτει. Αναφορικά με το συγκεκριμένο πρόγραμμα μπορούμε να αναπτύξουμε πρωτότυπα σχέδια που χρησιμοποιούνται σε συσκευές και συστήματα καθώς και να τα ελέγξουμε. Μπορούμε να κάνουμε άπειρες δοκιμές ή μετρήσεις ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και συσκευών. Όμως περισσότερο χρησιμοποιείται σε εργαστήρια και εκτενείς έρευνες πανεπιστημίων για πειράματα και αναλύσεις δεδομένων. Ένας ακόμα τομέας που βρίσκει εφαρμογή είναι η αυτοματοποίηση που μπορεί και προσφέρει καθώς πολλοί το χρησιμοποιούν για τον έλεγχο και την αυτοματοποίηση βιομηχανικών διαδικασιών και αυτό γιατί μπορεί και αναλύει δεδομένα μέσα από αισθητήρες ενώ παράλληλα βγάζει ακριβείς αποτελέσματα.

3.4 FM Transmitter

3.4.1 Πομπός FM (Frequency Modulation)

Ένας πομπός FM (Frequency Modulation) ουσιαστικά είναι μια συσκευή που έχει την δυνατότητα και είναι κατασκευασμένη να εκπέμπει σήματα ραδιοσυχνότητας RF δια μέσου της λειτουργίας της διαμόρφωσης της συχνότητας μεταφοράς κύματος ανάλογα με το σήμα ήχου. Ένας πομπός δεν λειτουργεί απαραίτητα για δεδομένα ήχου αλλά χρησιμοποιείται κυρίως στη ραδιοφωνία και δουλειά του είναι να μεταδίδει ήχο υψηλής ποιότητας σε μακρινές αποστάσεις.[15]

3.4.2 Λειτουργία – Χαρακτηριστικά – Εφαρμογές

Ξεκινώντας με τις λειτουργίες του, λειτουργεί εκπέμποντας διαμορφωμένο σήμα RF το οποίο μεταδίδεται στον αέρα με την υποβοήθηση της κεραίας του πομπού και όσοι βρίσκονται εντός της εμβέλειας που μπορεί και εκπέμπει η κεραία έχουν τη δυνατότητα να κάνουν λήψη των σημάτων fm που εκπέμπονται. Χρησιμοποιεί κύματα μεταφοράς δηλαδή το σήμα του ήχου μπορεί και ενσωματώνεται μέσα στο κύμα μεταφοράς, όμως ένα κύμα μεταφοράς είναι υψηλής συχνότητας και η μορφή του σήματός του είναι ημιτονοειδές, επίσης αυτό το κύμα εκπέμπεται μέσω κεραίας από τον πομπό. Βασικό στοιχείο των λειτουργιών είναι η διαμόρφωση της συχνότητας όπου ο χρήστης μπορεί και διαμορφώνει τη συχνότητα του κύματος μεταφοράς έναντι με το σήμα του ήχου πρέπει να σημειωθεί ότι η διαμόρφωση της συχνότητας αντέχει το θόρυβο αλλά και τις όποιες παρεμβολές προκύψουν γεγονός που την κάνει μια εξαιρετική επιλογή για τον τομέα της ραδιοφωνίας. Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι ότι οι πομποί έχουν τη δυνατότητα να μεταδίδουν στερεοφωνικό ήχο δηλαδή χρησιμοποιούν στερεοφωνική διαμόρφωση και αυτή η χρήση επιτρέπει τη δυνατότητα μετάδοσης 2 ξεχωριστών καναλιών. Το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτεται είναι από 88 MHz – 108 MHz ενώ η ισχύς εκπομπής ανέρχεται σε λίγα μόνο milliwatts όσον αφορά πομπούς μικρής εμβέλειας όπως είναι και αυτό στις υλοποιήσεις μας ενώ αντίθετα επαγγελματική σταθμοί ραδιοφωνίας χρησιμοποιούν αρκετά Kilowatts. Τέλος, θα πρέπει να προσέξουμε ότι το εύρος κάλυψης εξαρτάται από την ισχύ του πομπού την κεραία του πομπού αλλά και τις περιβαλλοντικές συνθήκες δηλαδή έχει παρατηρηθεί υπό συνθήκες βροχής το σήμα μειώνεται κατά πολύ ιδιαίτερα όταν η βροχή είναι πυκνή και έντονη. Στον τομέα των εφαρμογών έχει αποδειχθεί ότι επί το πλείστον η ραδιοφωνία καταλαμβάνει την πρώτη θέση χρήσης καθώς σχεδόν όλοι οι

πομποί FM χρησιμοποιούνται για την εκπομπή ραδιοφωνικών σταθμών και μέσα σε αυτούς εμπεριέχονται εκπομπές πάσης φύσης παραδείγματος χάριν εκπαιδευτικά προγράμματα, ειδήσεις ,ζωντανές εκδηλώσεις ,αθλητικά κ.α . Στη δεύτερη θέση είναι τα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση ήχου και δεδομένων και στην τρίτη θέση τι είναι η ερασιτεχνική ραδιοφωνία.

4 Υλοποίηση συστήματος FM Transmitter με LabView

Εφόσον αναλύσαμε τι είναι το πρόγραμμα LabVIEW τι δυνατότητες έχει και τι χαρακτηριστικά παρέχει αλλά και το τι ακριβώς είναι ένας πομπός FM. Εδώ θα αναλύσουμε την υλοποίηση εκπομπής με την υποβοήθηση του προγράμματος LabVIEW. Αρχικά αφού το έχουμε εγκαταστήσει σωστά και ελέγχουμε ότι το πρόγραμμα μπορεί και επικοινωνεί με τη συσκευή μας τότε μπορούμε να προχωρήσουμε με την υλοποίηση. Το συγκεκριμένο εγχείρημα συστήματος που προσπάθησα να υλοποιήσω περιλαμβάνει ένα πλήρως λειτουργικό πομπό FM ο οποίος έχει τη δυνατότητα να μεταδίδει σήματα ήχου σε καθορισμένη συχνότητα την οποία την επιλέγουμε μέσα από το πρόγραμμα όμως προτού θα πρέπει το σήμα ήχου το οποίο θα εισάγουμε να έχει μετατραπεί στην κατάλληλη κωδικοποίηση αρχείου καθώς το USRP δεν δέχεται αρχεία οποιασδήποτε μορφής. Εν ολίγοις ο πομπός χρησιμοποιεί τη συσκευή USRP ως μέσο εκπομπής και το λογισμικό μας βοηθάει να ελέγχουμε τη διαμόρφωση του σήματος. Το τελικό μας σύστημα χρησιμοποιείται για εκπαιδευτικούς σκοπούς και για πειραματικές εφαρμογές στον τομέα των ασύρματων τηλεπικοινωνιών.[13]

4.1 Μετατροπή ήχου σε audio και ανάλυση συστήματος

Για να μπορέσει να δουλέψει η υλοποίηση μας, κατά την έναρξη λειτουργίας θα ζητήσει να επιλεγεί ένα αρχείο. Το αρχείο που θα πρέπει να εισαχθεί θα πρέπει να είναι κατάλληλα κωδικοποιημένο ώστε να μπορέσει να τρέξει το σύστημα του πομπού διαφορετικά θα παρουσιάσει σφάλμα και το λογισμικό δεν θα τρέξει. Κατά κύριο λόγο όλα τα αρχεία ήχου κατηγοριοποιούνται σε κάποιες μορφές κωδικοποίησης όπου κάθε μια προσφέρει κάτι το ιδιαίτερο. Παρακάτω γίνεται μια ανάλυση όλων των τύπων αρχείων ο λόγος που επιλέγουμε τη συγκεκριμένη κωδικοποίηση για να τρέξει στο σύστημά μας.

- .AAC: Ξεκινώντας με την .AAC (Advanced Audio Coding File) όπου προσφέρει ένα συμπιεσμένο τύπου αρχείο και δυνατότητες βελτίωσης ποιότητας με σκοπό την αποδοτικότερη κωδικοποίηση, παρέχει απλό τύπου φίλτρα και κάνει ευκολότερο το χειρισμό των συχνοτήτων άνω των 16 KHz.
- .AIF (Audio Interchange File Format) : ο συγκεκριμένος τύπος αρχείου είναι σχεδόν ίδιος με τον .WAV που είναι και αυτός που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση, προσφέρει ένα τυπικό αρχείο ψηφιακού δίσκου και έχει δειγματοληψία 44,1 KHz ενώ είναι 16bit προσφέροντας 2 κανάλια για στέρεο.
- .IFF (Interchange File Format) : αυτός ο τύπος αρχείου έχει τη δυνατότητα να περιέχει και κείμενο - εικόνα - ήχο συνήθως δεν χρησιμοποιείται μόνος του καθώς υποστηρίζει άλλους τύπους αρχείων και άλλα προγράμματα.
- .MID (MIDI File) : σε αυτό τον τύπο αρχείου εμπεριέχονται μουσικά δεδομένα δηλαδή παρουσιάζονται νότες πότε, που και πόσο δυνατά έπαιξαν αλλά και δεδομένα ελέγχου γενικότερα αναφέρεται σε ηχητικά δεδομένα και έχει και δικιά του επέκταση.
- .WMA (Windows Media Audio File) : αυτός ο τύπος αρχείου κατασκευάστηκε από την Microsoft είναι σχεδόν ίδιο με ένα αρχείο mp3 και έχει τη δυνατότητα να μετατραπεί σε πολλές άλλες μορφές κυρίως όμως χρησιμοποιείται για την αναπαραγωγή μουσικής στο διαδίκτυο.
- .MP3: αυτός είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους τύπους αρχείων προσφέρει παρόμοια ποιότητα με αυτή των CD σε στερεό των 16bit με τη βασική διαφορά σύγκρισης αποθήκευσης χώρου, δηλαδή καταλαμβάνει περίπου το 1/10 του χώρου σε σύγκριση με ένα αρχείο .WAV ή με ένα .AIF.
- .WAV (Wave Audio File) : άφησα για το τέλος την κωδικοποίηση του αρχείου που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση όπου είναι ένας ψηφιακός τύπος αρχείου για την αποθήκευση κυματοειδών δεδομένων και επιτρέπεται για αποθήκευση με διάφορα δείγματα και ρυθμούς. Τέλος βρίσκουν χρήση στην αποθήκευση αρχείων ήχου ποιότητας και προσφέρουν σε σχέση με τις άλλες κωδικοποιήσεις περισσότερες λειτουργίες.

Συνοψίζοντας οποιαδήποτε κωδικοποίηση αρχείου έχουμε θα πρέπει να την μετατρέψουμε σε .WAV για να μπορέσει να την διαβάσει το σύστημά μας και να αναπαραχθεί στον πομπό. Αυτό μπορεί εύκολα να επιτευχθεί είτε με έναν online μετατροπέα είτε με τη χρήση λογισμικό μετατροπής κωδικοποιήσεων ήχου.

Ανάλυση Συστήματος FM transmitter

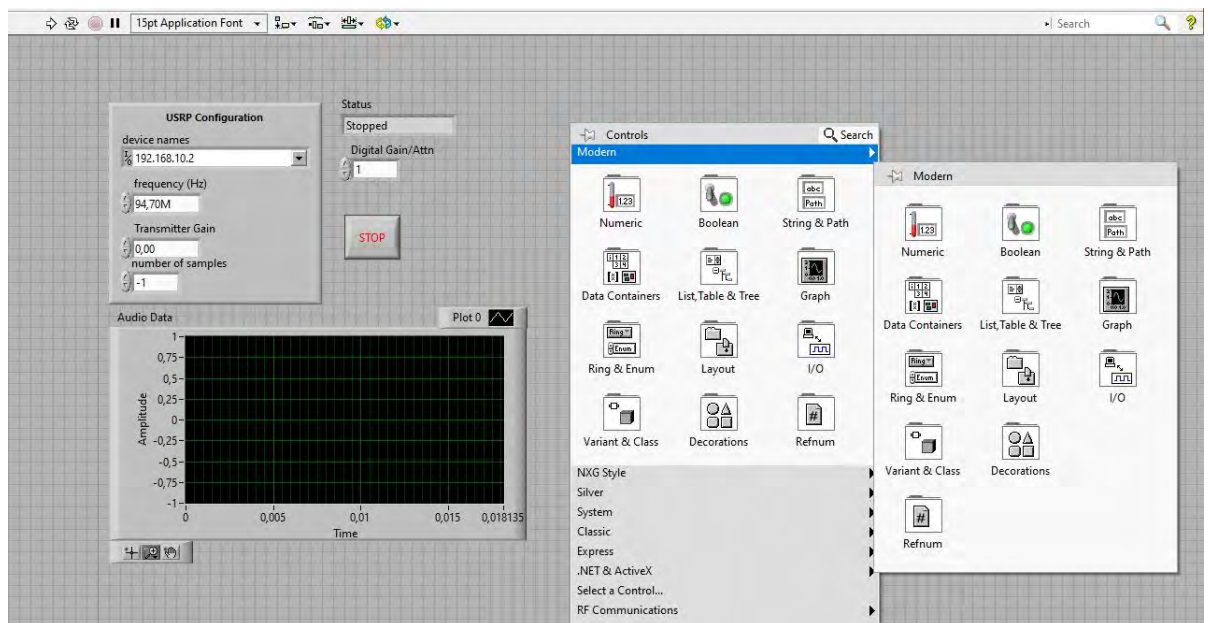
Παρακάτω αναφέρεται περιεκτικά η ανάλυση του συστήματος-διαγράμματος της εκπομπής που υλοποιήθηκε στην πλατφόρμα του LabVIEW.

Ξεκινώντας θα πρέπει να βρούμε την πηγή μας USRP για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να κατευθυνθούμε στην καρτέλα Functions έπειτα πηγαίνουμε στο πεδίο Instrument I/O εκεί θα μας απεικονίζεται μια εικόνα με ένα λεκτικό Instr Drivers , στην επόμενη καρτέλα θα βρούμε ένα εικονίδιο που ονομάζεται NI -USRP και θα το επιλέξουμε. Αφότου το επιλέξουμε ψάχνουμε το εικονίδιο που αναγράφει Tx μόλις το βρούμε θα εμφανιστούν 4 επιλογές με 4 διαφορετικά εικονίδια τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε και θα τα μεταφέρουμε στην επιφάνεια εργασίας του διαγράμματος μας. Αναφορικά αυτά θα χρησιμέψουν στην εκπομπή, στο Configure της συσκευής και του σήματος ,στην επιλογή της μετάδοσης δηλαδή το ένα εκ των 4 μας δίνει την δυνατότητα να καθορίσουμε τον τύπο των δεδομένων και τέλος άλλο ένα για το κλείσιμο της μετάδοσης. Το επόμενο βήμα είναι να βρούμε το μπλοκ που αναγράφει η ετικέτα του Tx Session να κάνουμε δεξί κλικ και να εμφανίσουμε το πεδίο που αναγράφει Create Control αυτό γίνεται για να γράφει η ip της συσκευής μας στο περιβάλλον του χρήστη και να αναγνωρίζεται κάθε φορά ποια συσκευή χρησιμοποιείτε. Έπειτα γίνονται οι απαραίτητες συνδέσεις μεταξύ τους όπως φαίνεται και στη φωτογραφία του παραδείγματος της υλοποίησης. Κατά αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιούμε τη δημιουργία Create Control όπου είναι απαραίτητη (αυτό καλό θα ήταν να γίνει αφού πραγματοποιηθούν οι ενώσεις). Σίγουρα θα χρειαστούμε ένα Create Control στο USRP configure Signal για να παραμετροποιούμε το gain και ακόμη ένα στην αρμόζουσα σύνδεση για το πεδίο της συχνότητας. Σειρά έχει η επανάληψη και για να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε ένα While Loop καλό θα ήταν να ανακατευθυνθούμε πάλι στα Functions και να επιλέξουμε Structures και έπειτα θα μας εμφανιστεί η επιλογή While Loop με γκριζα γραμμή όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της φωτογραφίας ότι είναι και μέσα δηλαδή συμπεριλαμβάνεται στο While Loop. Αφού δημιουργήσουμε ένα μεγάλο ορθογώνιο μέσα στον CDB Cluster κάνουμε δεξί κλικ πάνω στο While Loop που μόλις προσθέσαμε και τσεκάρουμε την επιλογή Stop If True εάν δεν είναι επιλεγμένη και κάνουμε μια δημιουργία της επιλογής Create Control έτσι ώστε να μας εμφανιστεί το κόκκινο κουμπί που έχω προσθέσει κάτω δεξιά στο διάγραμμα για τη διακοπή της λειτουργίας. Επόμενο βήμα είναι να μεταφερθούμε πάλι στα Functions αυτή τη φορά όμως θα πάμε στην κατηγορία Signal Processing έπειτα επιλέγουμε Wfm Generation και μετά

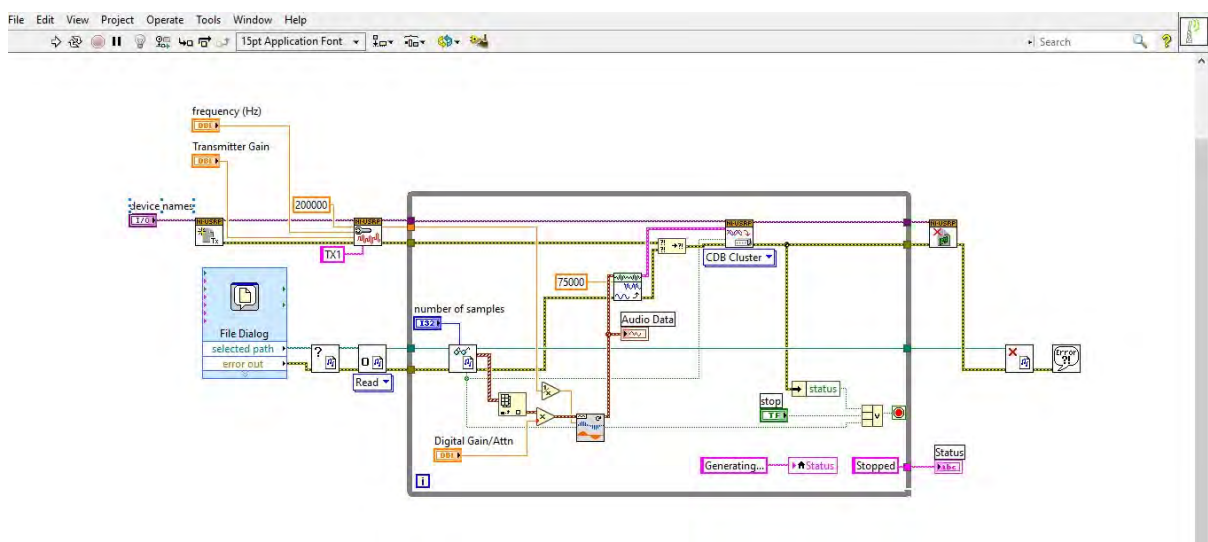
στα Basic FunGen και εκτελούμε τις απαραίτητες συνδέσεις και τις δημιουργίες των απαιτούμενων Create Control. Έπειτα μεταφερόμαστε στο Front Panel , επιλέγουμε Graph έπειτα Waveform Graph και αυτό για να μας εμφανιστεί κυματογράφος στην επιφάνεια του χρήστη και να έχουμε την δυνατότητα διαγραμματικής απεικόνισης των δεδομένων ήχου. Αφού βάλουμε το Waveform Graph θα παρατηρήσουμε ότι πάνω αριστερά έχει εμφανιστεί και το ανάλογο εικονίδιο στην επιφάνεια του Block Diagram το οποίο θα πρέπει να βάλουμε μέσα στο While Loop και να το ενώσουμε κατάλληλα. Για την ορθή λειτουργία του θα χρειαστεί να παραμετροποιήσουμε τα πεδία της συχνότητας και του κέρδους καθώς και να έχουμε εγκαταστήσει σωστά τις ρυθμίσεις της κεραίας μας όπως και να την έχουμε ενώσει στη σωστή θύρα της συσκευής. Αφού γίνουν όλες οι απαραίτητες παραμετροποιήσεις – ρυθμίσεις και τρέξουμε το πρόγραμμα τότε θα μας εμφανιστεί ένα παράθυρο διαλόγου, εκεί θα πρέπει να επιλέξουμε το κατάλληλα διαμορφωμένο αρχείο ήχου .wav. Τέλος θα ήθελα να σημειωθεί ότι ο τρόπος λειτουργίας του εν λόγω συστήματος μοιάζει αρκετά με αυτόν του δέκτη οπότε τυχόν μπλοκ τα οποία δεν περιγράφονται βελτιώνουν την αποδοτικότητα του συστήματος και δεν έχουν αναλυθεί εκτενώς για να αποφευχθεί η επανάληψη, καθώς είναι αδύνατον να περιγράψει επακριβώς όλη η διαδικασία χτισίματος του πομπού.

4.2 Προβολή Διαγράμματος και τρόπος λειτουργίας του συστήματος

Παρακάτω απεικονίζονται οι φωτογραφίες του διαγράμματος και η επιφάνεια εργασίας του χρήστη καθώς και κάποιες από τις εργαλειαθήκες που χρησιμοποιήθηκαν. Αναφορικά στο πεδίο Device names αναγράφονται τα στοιχεία της συσκευής USRP και στο πεδίο Frequency δηλώνουμε τη συχνότητα που θέλουμε να λειτουργήσει ο πομπός δηλαδή τη συχνότητα που θέλουμε να εκπέμψουμε. Υπάρχουν και κάποιες επιπλέον λειτουργίες όσον αφορά το κέρδος τα δείγματα και ένα κουμπί διακοπής του προγράμματος. Καθώς έχουν προστεθεί γραφική απεικόνιση και ένα πεδίο που δηλώνει τη λειτουργία του συστήματος.



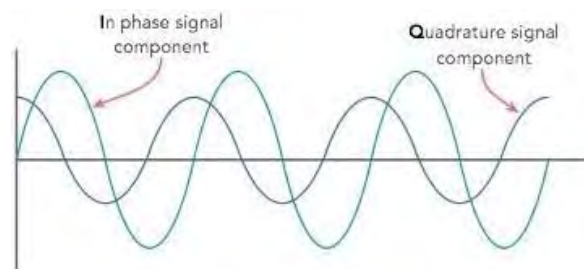
Εικόνα 4 Εικόνα Υλοποίησης Transmitter



Εικόνα 4.1 Εικόνα Υλοποίησης διαγράμματος

5 Υλοποίηση M-QAM Transmitter - Receiver

Ξεκινώντας με κάποιες ορολογίες και ορισμούς της QAM (Quadrature Amplitude Modulation) ή αλλιώς στα ελληνικά διαμόρφωσης πλάτους τετράγωνου. Η QAM μπορεί να συνδυάζει το πλάτος και τις αλλαγές φάσης και να δίνει πλέον χωρητικότητα καθώς χρησιμοποιείται κυρίως για την επικοινωνία δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα μπορεί και σχεδιάζει μια μορφή διαμόρφωσης που έχει τη δυνατότητα να κρατά υψηλά επίπεδα αποτελεσματικότητας στη χρήση του φάσματος και αυτό το επιτυγχάνει μέσα από το πλάτος όσο και κάποια συστατικά της φάσης. Χρησιμοποιείται κυρίως σε αναλογικές μεταδόσεις και σε στερεοφωνικές μεταδόσεις AM οι οποίες χρησιμοποιούνταν κατά κόρον στο παρελθόν, ενώ σήμερα χρησιμοποιούνται σε πολύ συγκεκριμένες ειδικότητες. Στα θετικά της διαμόρφωσης είναι ότι παρέχει μια από τις πιο αποτελεσματικές μορφές για δεδομένα και αν παρατηρήσουμε χρησιμοποιείται στα κινητά τηλέφωνα, στα ασύρματα δίκτυα Wi-Fi αλλά και σε πολλές άλλες μορφές λογισμικών και συστημάτων υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης. Ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά του είναι ότι στο σήμα υπάρχουν 2 φορές μετατοπισμένη κατάφαση 90 μοιρών δηλαδή μοιάζει με ημιτονοειδές και συνημιτονοειδές καθώς κατά κάποιο τρόπο συνεργάζονται μεταξύ τους κάπως έτσι προκύπτει διαφορά φάσης 90 μοιρών ενώ το ένα σήμα ονομάζεται I (In Phase) και το άλλο είναι το quadrature ή Q. Επομένως το σήμα που προκύπτει τελικά συντελείται από το Q και τις παραλλαγές του πλάτος και της φάσης, άρα λόγω των παραλλαγών πολλές φορές μπορεί να δημιουργηθεί και μια μίξη της διαμόρφωσης πλάτους και φάσης (εικόνα 5).

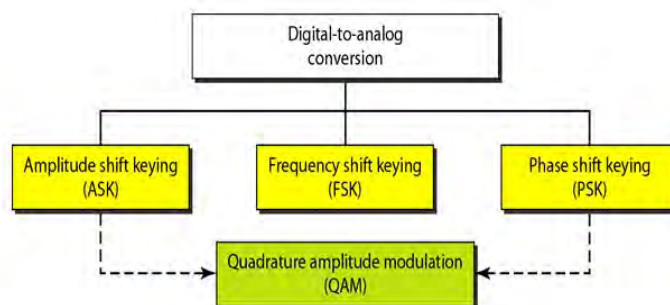


Εικόνα 5 μίξη της διαμόρφωσης πλάτους και φάσης

Πηγή Εικόνας : <https://fmuser.net/content/?7549.html>

Το παραπάνω σήμα προκύπτει από έναν συνδυασμό και των 2 φορέων. Κάτι εξίσου σημαντικό είναι ότι κατά τη χρήση της διαμόρφωσης του πλάτους τετράγωνο αυτή προέρχεται από ένα διαμορφωμένο σήμα ευθείας πλάτους μια πλευρική ζώνη η οποία έχει ένα σχετικά πεισμένο που μπορεί και να πιάνει το διπλάσιο εύρος ζώνης του σήματος διαμόρφωσης όπως όμως πολύ εύκολα μπορούμε να καταλάβουμε αυτό αποτελεί μεγάλη σπατάλη στις διαθέσιμες φασματικές συχνότητες. Η QAM μπορεί να φέρει σε ισορροπία αν τοποθετήσει 2 ανεξάρτητα σήματα του φορέα της διπλής πλευρικής ζώνης τα οποία όμως συνυπάρχουν στο ίδιο φάσμα με ένα κοινό σήμα φορέα διπλής πλευρικής ζώνης υπό πίεση.

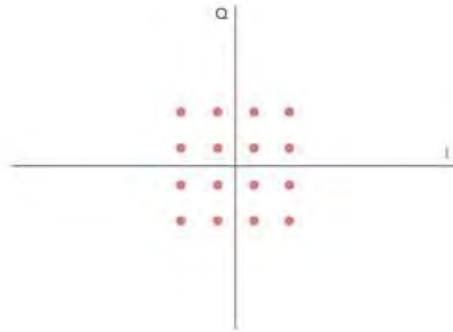
Υπάρχουν 2 είδη διαμορφώσεων QAM η αναλογική και η ψηφιακή μορφή αυτών και κατά κύριο λόγο και οι 2 επιτρέπουν τη μετάδοση πολλαπλών αναλογικών σημάτων σε ένα φορέα. Παραδείγματα χρήσεων των διαμορφώσεων είναι ότι χρησιμοποιούνται σε τηλεοπτικά συστήματα PAL, NTSC επιτρέπεται η μεταφορά των στοιχείων των χρωμάτων και γενικά των πληροφοριών που μεταφέρουν τα χρώματα. Επιπροσθέτως, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ραδιοφώνων με τα συστήματα C-QUAM. Πάντα μιλάμε για στερεοφωνικό ραδιόφωνο AM. Όσον αφορά τις ψηφιακές μορφές της QAM χρησιμοποιούνται περισσότερο στην επικοινωνία δεδομένων με συστήματα ραδιοεπικοινωνιών τα οποία συγκροτούνται με την τεχνολογία της κυψελοειδής μορφής όπως για παράδειγμα τα LTE που υλοποιούνται με ασύρματα συστήματα, ένα άλλο παράδειγμα είναι το 802.11 Wi-Fi και άλλα περισσότερα που χρησιμοποιούν τη διαμόρφωση QAM. Παρακάτω παραθέτω και ένα διάγραμμα το οποίο δείχνει τις ψηφιακές σε αναλογικές τεχνικές μετατροπής.



Εικόνα 5.1 Ψηφιακές – Αναλογικές τεχνικές μετατροπής

Πηγή εικόνας : https://www.researchgate.net/figure/Digital-Modulation-Types_fig7_323258413

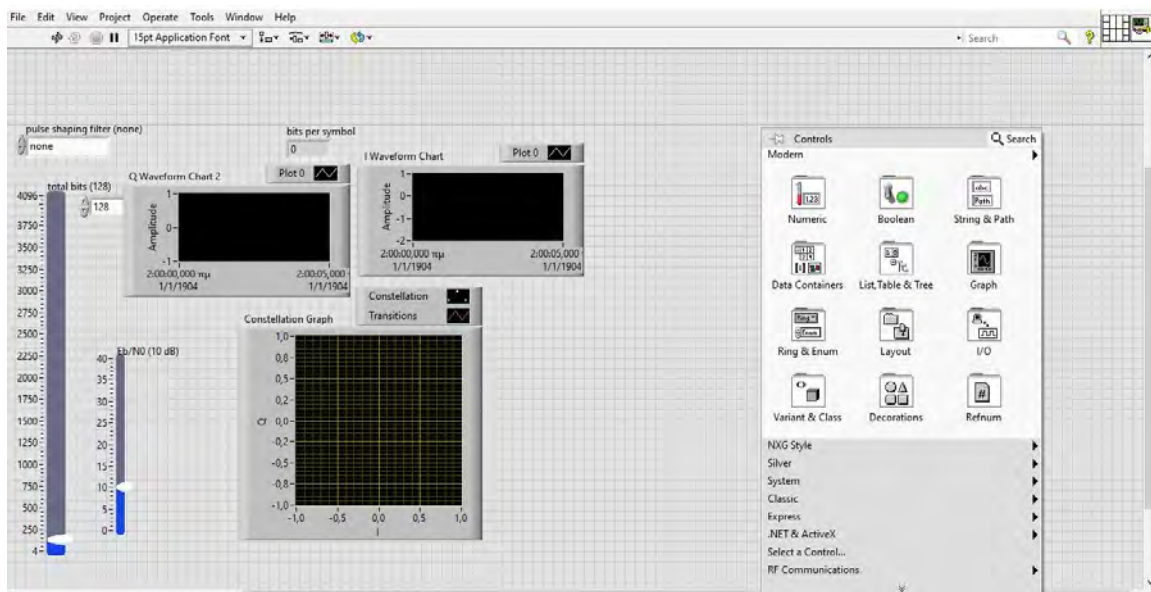
Κατά τη χρήση της ψηφιακής μετάδοσης σε εφαρμογές επικοινωνιών ή σε εφαρμογές ραδιοφώνου η διαμόρφωση QAM έχει την δυνατότητα να μεταφέρει σε πολύ μεγάλους ρυθμούς τα δεδομένα με συγκεκριμένα σχήματα διαμορφωμένου πλάτους και φάσης. Αυτά τα σήματα δουλεύουν με μηδέν ή ένα και με καθορισμένες τιμές φάσης και πλάτους παρακάτω μπορούμε να δούμε και ένα από τα πιο γνωστά διαγράμματα αστερισμού όπου χωρίζονται σε διαφορετικές στιγμές και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μόνο ένα σήμα να μεταφέρει σε πάρα πολύ υψηλούς ρυθμούς τα δεδομένα.



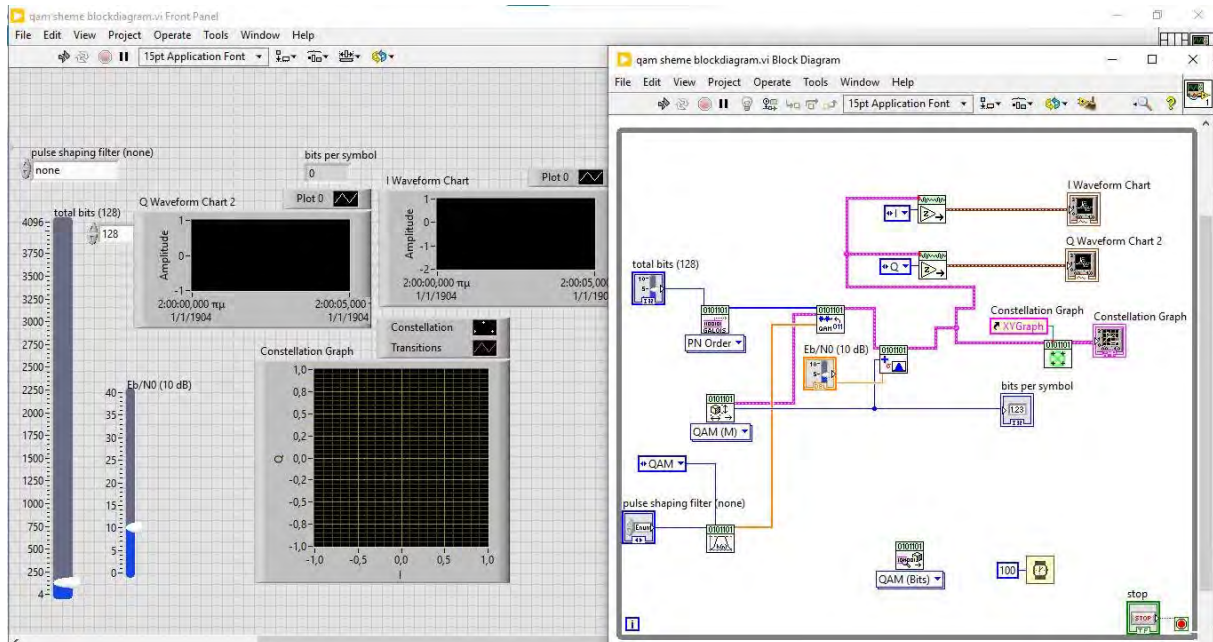
Εικόνα 5.2 Διάγραμμα αστερισμού για ένα σήμα 16QAM που δείχνει τη θέση των διαφορετικών σημείων

Όπως μπορούμε να δούμε και στην παραπάνω εικόνα 5.2 του αστερισμού οι συγκεκριμένες κουκκίδες ή αλλιώς οι αστερισμοί που είναι τοποθετημένοι με συγκεκριμένο τρόπο διατεταγμένα στο τετράγωνο με αποστάσεις που ισαπέχουν οριζόντια και κάθετα. Η μορφή η πληροφορίας των δεδομένων είναι δυαδική και η πιο κοινή μορφή της διαμόρφωσης QAM είναι εκεί που ο αστερισμός μπορεί να σχηματίσει ένα απόλυτο τετράγωνο με ίσα σημεία παραδείγματος χάριν 2, 4, 16, 64 και ούτω καθεξής. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σημεία που είναι πιο κοντά μεταξύ τους είναι πιθανότερα να εμπέσουν σε σφάλματα καθώς είναι πιο ευαίσθητα σε θόρυβο και δεδομένα, επίσης χρησιμοποιείται διαμόρφωση υψηλότερης τάξης εντούτοις αυτό φαίνεται στη διαμόρφωση σε πλεονεκτική θέση διότι υπάρχουν περισσότερα από ένα σημεία εντός του αστερισμού επομένως επιτυγχάνεται η μετάδοση περισσότερων bits / σύμβολο. Το αρνητικό όμως είναι ότι τα σημεία αστερισμού είναι πολύ κοντά μεταξύ τους άρα ο σύνδεσμος μπορεί να δεχθεί θόρυβο πολύ εύκολα. Ως εκ τούτου όλες οι εκδόσεις της διαμόρφωσης QAM μπορεί να είναι υψηλότερης τάξης όμως βρίσκουν χρήση μόνο όταν υπάρχει ανάγκη για υψηλή αναλογία σήματος προς θόρυβο.

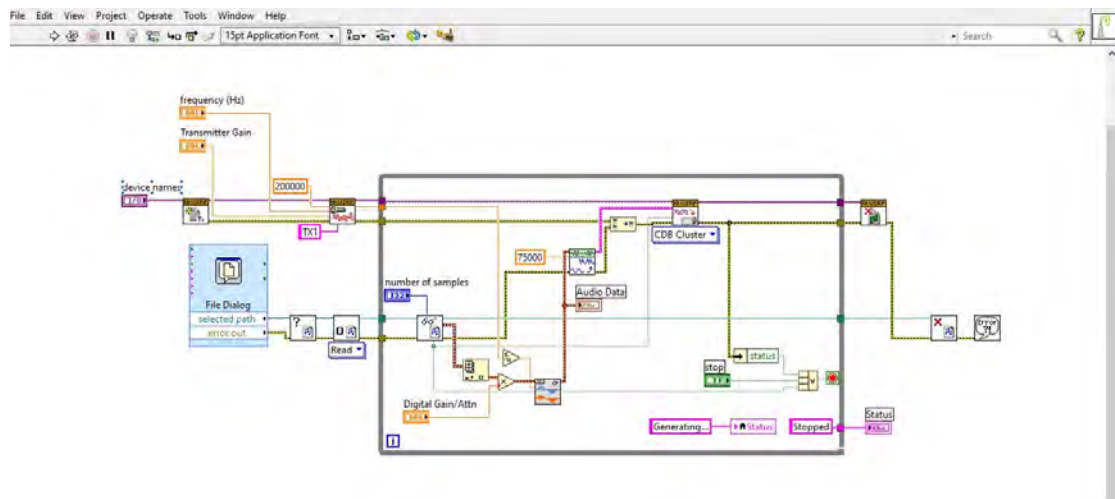
Η πιο χαμηλή λειτουργική-έκδοση είναι η 16QAM όμως μπορούμε να συναντήσουμε και στην 2QAM και να έχουν και οι 2 το ίδιο δυαδικό κλείσιμο της φάσης.



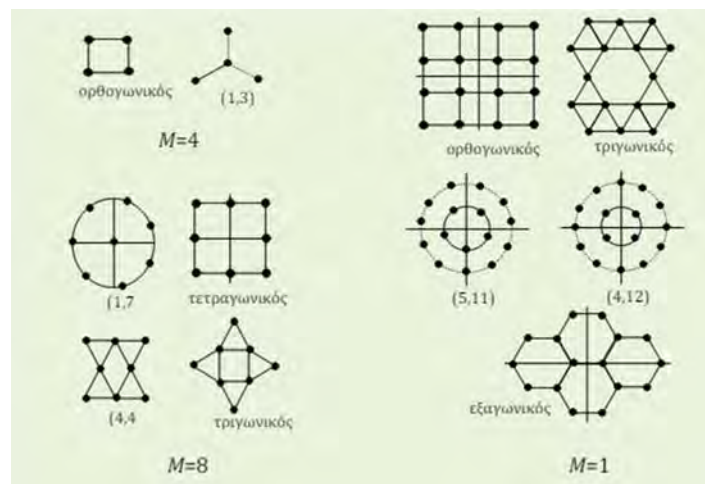
Εικόνα 5.3 Υλοποίηση QAM



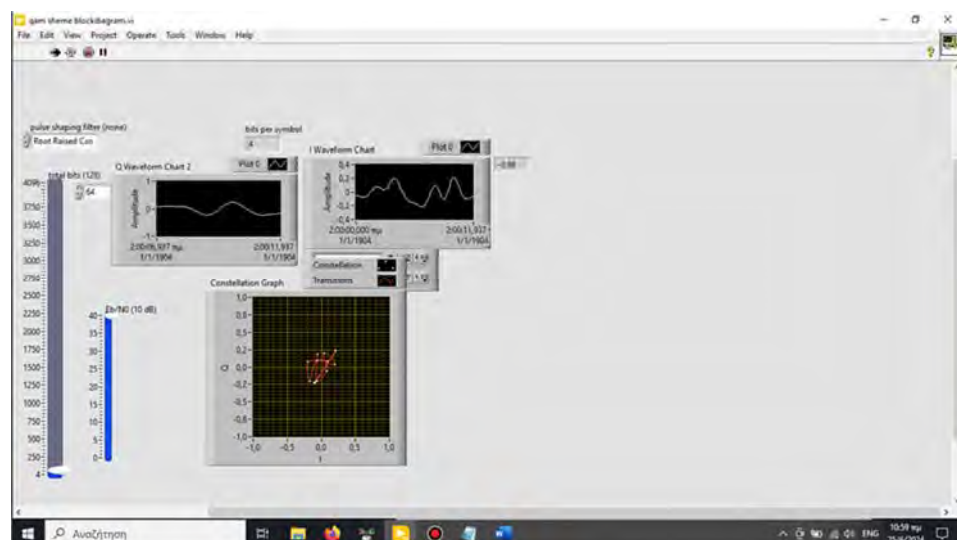
Εικόνα 5.4 Υλοποίηση QAM



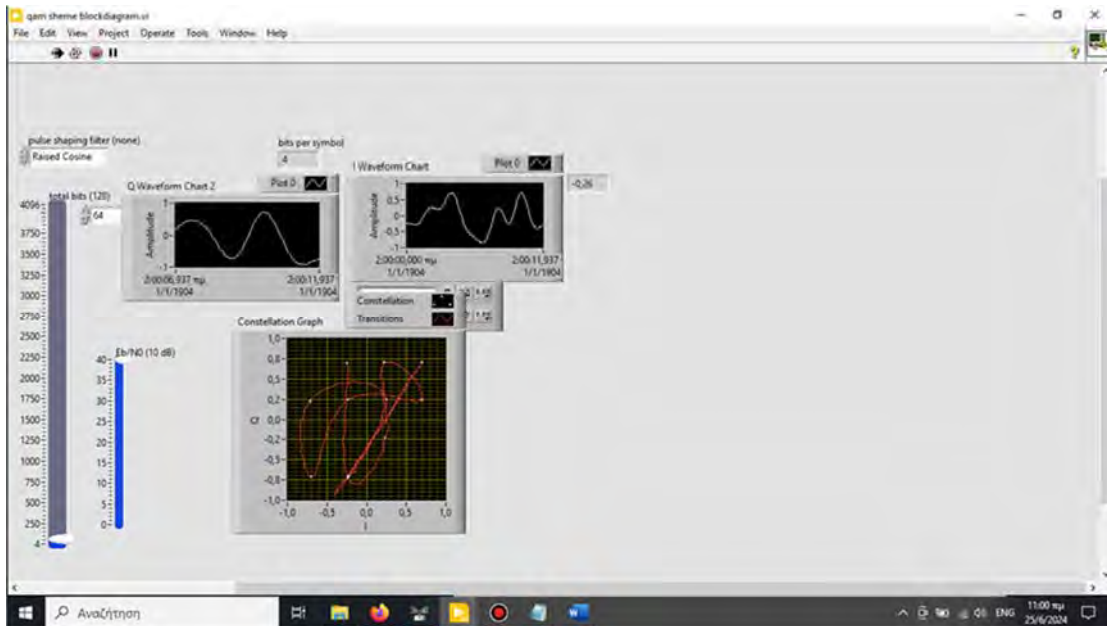
Εικόνα 5.5 Υλοποίηση διαγράμματος QAM



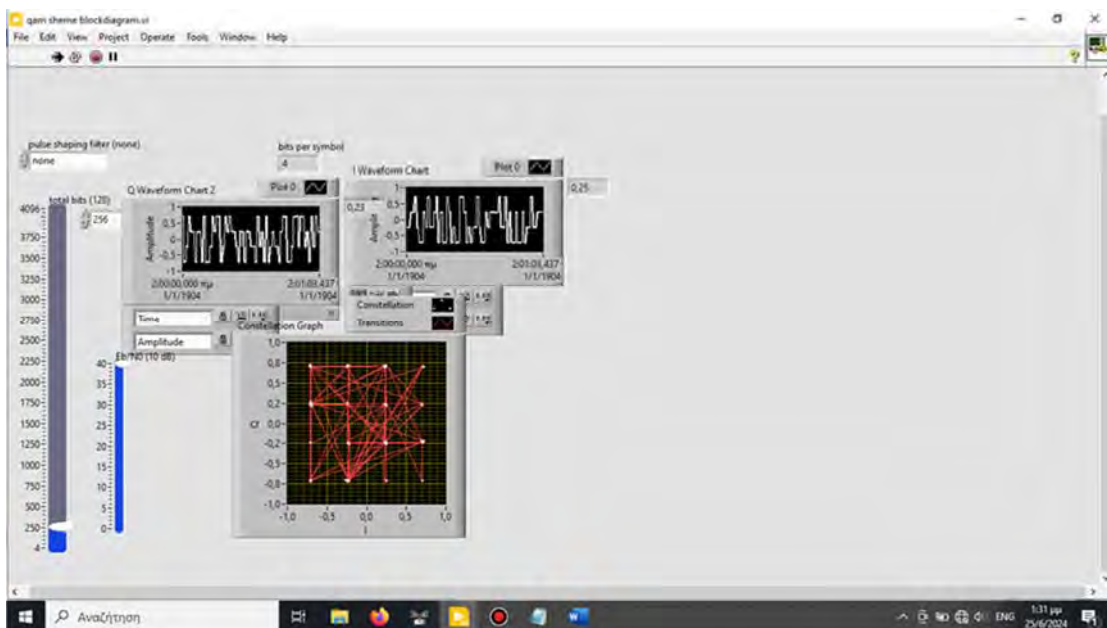
Εικόνα 5.6 Σηματικοί αστερισμοί QAM



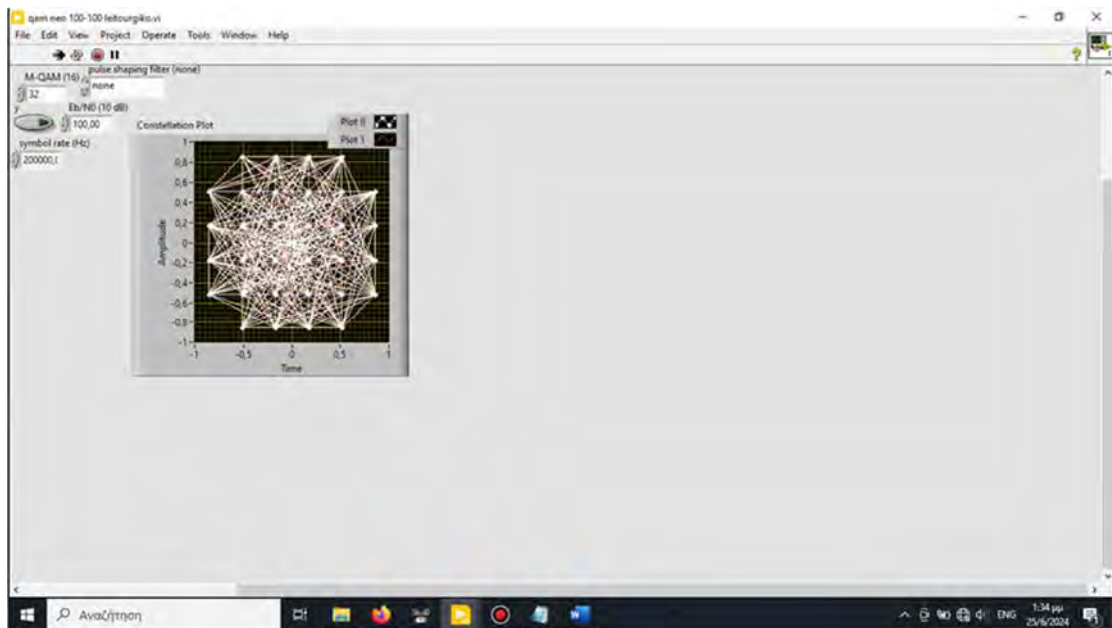
Εικόνα 5.7 Υλοποίηση QAM 2^{ος} τρόπος



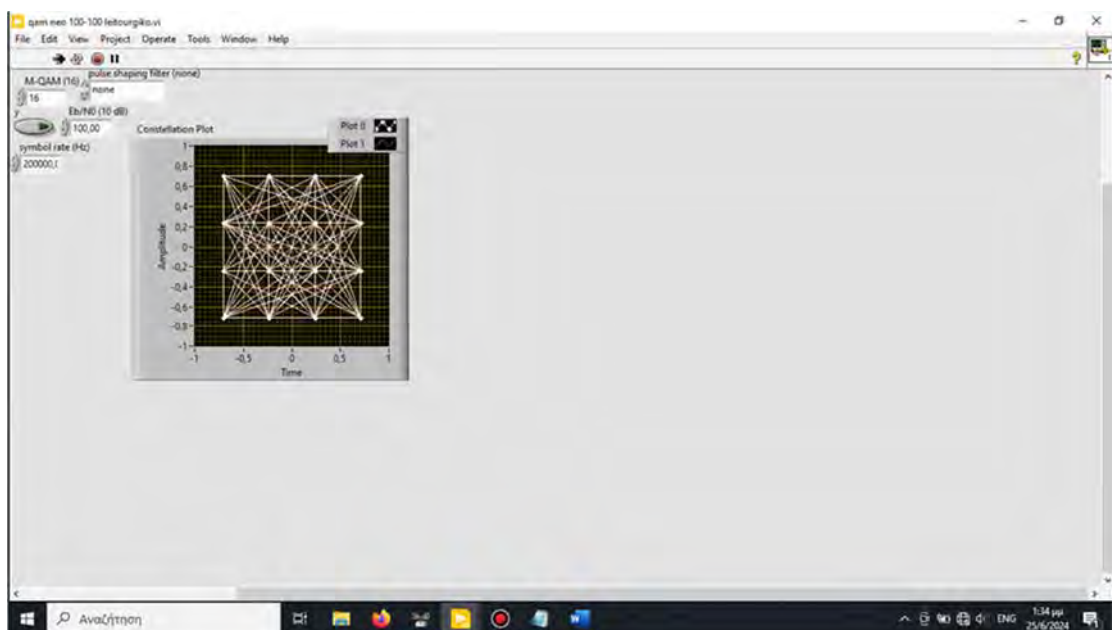
Εικόνα 5.8 Υλοποίηση QAM 2^{ος} τρόπος



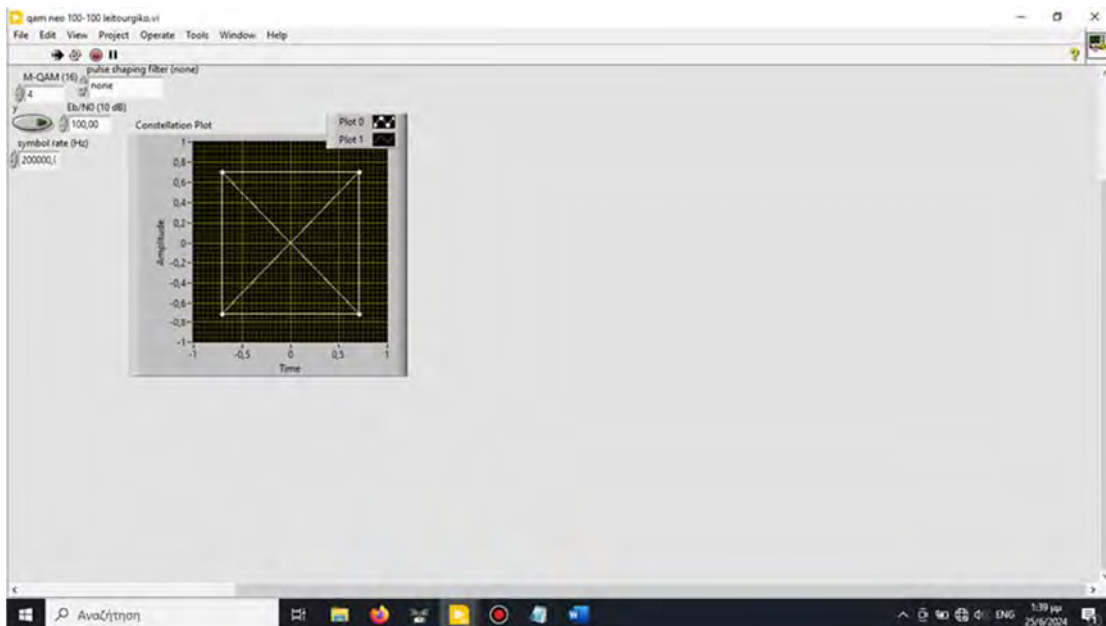
Εικόνα 5.9 Υλοποίηση QAM 2^{ος} τρόπος



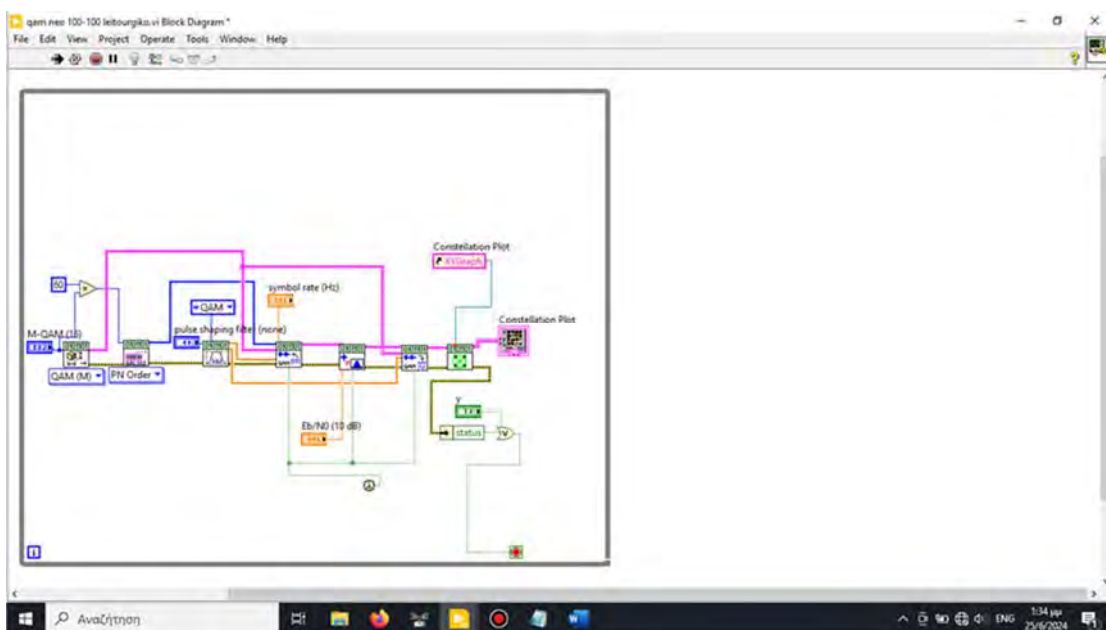
Εικόνα 5.10 Υλοποίηση QAM 2^{ος} τρόπος



Εικόνα 5.11 Υλοποίηση QAM 2^{ος} τρόπος



Εικόνα 5.12 Υλοποίηση QAM 2^{ος} τρόπος



Εικόνα 5.13 Διαγραμματική Υλοποίηση QAM 2^{ος} τρόπος

5.1 Σύγκριση διαμόρφωσης QAM με άλλες διαμορφώσεις

Εφόσον αναπτύχθηκε η σχηματική και γραφική απεικόνιση και αναλύθηκε εκτενέστερα η διαμόρφωση QAM σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια σύγκριση με άλλες διαμορφώσεις

και θα περιγραφούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά καθώς θα γίνει και η σύγκριση των διαφόρων μορφών διαμορφώσεων.

Αρχικά η διαμόρφωση 2QAM μοιάζει αρκετά με την BPSK καθώς έχουν πανομοιότυπο δυαδικό κλείσιμο φάσης όπως και η 4QAM έχουν το ίδιο τετράγωνο με την QPSK. Για την 8QAM πρέπει να πούμε ότι δεν είναι τόσο διαδεδομένη και δεν έχει ιδιαίτερη χρήση και αυτό οφείλεται την απόδοση και στον αριθμό των σφαλμάτων φέρουν τα ίδια αποτελέσματα με την 16QAM δηλαδή είναι καλύτερη για μισό dB. Ενώ ο ρυθμός δεδομένων είναι περίπου 3/4 από ότι της 16QAM. Ενώ αυτό οφείλεται ξεκάθαρα στο σχηματισμό αστερισμού όπου στη μία περίπτωση είναι ορθογώνιος ενώ στην άλλη τετράγωνος.

1. Σε σύγκριση με την ASK (Amplitude Shift Keying) που διαμορφώνει το πλάτος του σήματος μεταφοράς ανάλογα με το ψηφιακό δεδομένο και που είναι πολύ πιο ευαίσθητη στο θόρυβο και στις παρεμβολές η QAM είναι πιο σύνθετη πιο αποδοτική και συνδυάζει πλάτους και φάσης για να μεταφέρετε δεδομένα παράλληλα είναι πιο ανθεκτική στο θόρυβο.
2. Σε σύγκριση με την FSK (Frequency Shift Keying) που διαμορφώνει τους σήμα μεταφοράς για να αναπαραστήσει ψηφιακά δεδομένα είναι πιο ανθεκτικοί στο θόρυβο από την ASK γιατί επηρεάζεται λιγότερο ο θόρυβος πλάτος και αυτό την κάνει και πιο απλή στην υλοποίηση ενώ πάλι η QAM είναι πιο ανθεκτικές στο θόρυβο και πιο αποδοτική στο φάσμα γιατί μπορεί να μεταφέρει περισσότερα δεδομένα ανά Hz εύρους ζώνης
3. Σε σύγκριση με την Phase Shift Keying (PSK) είναι περισσότερο πολυπλοκότερη στην υλοποίηση με την ASK και την PSK, όμως η QAM είναι πιο αποδοτική στο φάσμα, είναι πολυπλοκότερη από την PSK όμως έχει υψηλότερη απόδοση δεδομένων και είναι ανθεκτικότερη στο θόρυβο

Άρα η QAM είναι κατάλληλη για εφαρμογές χρειάζονται υψηλή ταχύτητα δεδομένων και αποδοτικότητα φάσματος ενώ είναι πιο πολύπλοκη, αλλά οι ASK, FSK είναι το ίδιο χρήσιμες σε εφαρμογές με χαμηλότερες απαιτήσεις εύρους ζώνης και πολυπλοκότητας.

Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Όπως όλες οι διαμορφώσεις έτσι και η QAM παρουσιάζει θετικά και αρνητικά. [16] Ξεκινώντας με την ευαισθησία στο θόρυβο λόγω των καταστάσεων και του διαγράμματος μπορούμε εύκολα να κατανοήσουμε ότι όσο πιο κοντά μεταξύ τους είναι τότε θα απαιτείται και χαμηλότερο επίπεδο θορύβου. [17] Σε πολλές περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί η

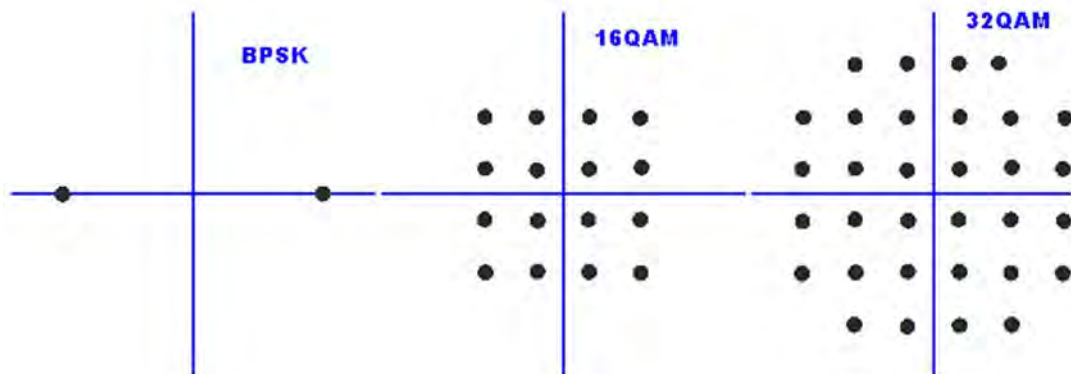
χρήση περιοριστικών ενισχυτών για την καταστολή των θορύβων που παρουσιάζεται στο πλάτος με σκοπό τη βελτίωση του ήχου διότι δέκτες χρησιμοποιούν τη διαμόρφωση φάσης ή συχνότητας (Όχι στην QAM). Ακόμα αν παρατηρήσουμε ένα σύρμα φάσης που ενισχύεται από έναν ραδιοπομπό θα δούμε ότι δεν γίνεται χρήση γραμμικών ενισχυτών ενώ όταν χρησιμοποιούμε την QAM παρουσιάζεται ένα συστατικό πλάτους, όμως η γραμμικότητα πρέπει να παραμείνει. Το αρνητικό της υπόθεσης είναι ότι οι γραμμικοί ενισχυτές δεν είναι και τόσο ικανοί και εκτός αυτού χρησιμοποιούν περισσότερους πόρους και ενέργεια πράγμα που το κάνει αναποτελεσματικό σε κινητές εφαρμογές. Εν κατακλείδι η διαμόρφωση βρίσκει λύση στην διαδικασία μεταφοράς με υπερύψηλό ρυθμό δεδομένων αν και αυτό προϋποθέτει το ρίσκο το υψηλού SNR για την αποκωδικοποίηση στον δέκτη παράλληλα εκτός από το μεγάλο SNR θα χρειαστούν τεχνικές και αλγόριθμοι front end υψηλότερης διαμόρφωσης ειδικά στους χρόνους, στις συχνότητες και στα κανάλια για να αποφευχθούν τα σφάλματα. Επιπλέον στα μειονεκτήματα θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι χρειάζεται υψηλής γραμμικής ενισχυτής ισχύος στον πομπό.[16], [17]

Τύπος Διαμόρφωσης	Bits/Σύμβολο	Σφάλματα	Περιπλοκότητα
OOK	1	0,5	Χαμηλή
BPSK	1	1	Μέτρια
QPSK	2	0,71	Μέτρια
16QAM	4	0,23	Υψηλή
64QAM	6	0,1	Υψηλή

Πίνακας 1: Ο παραπάνω πίνακας συγκρίνει διάφορες μορφές μορφοποίησης

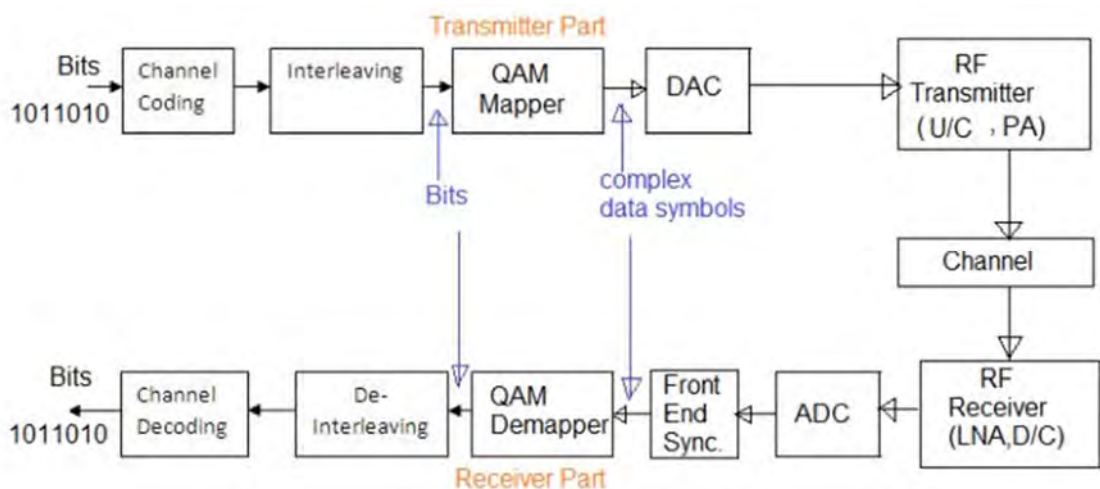
Διαμορφώσεις	Bits/Σύμβολο	Ρυθμός
BPSK	1	1
QPSK	2	1/2
8PSK	3	1/3
16QAM	4	1/4
32QAM	5	1/5
64QAM	6	1/6

Πίνακας 2 :Ο παρακάτω πίνακας δίνει μια περίληψη των συντελεστών λίγο διαφορετικές μορφές QAM και PSK.



Εικόνα 5.7 Τα διαγράμματα δείχνουν διαγράμματα αστερισμού για μια ποικιλία μορφών της διαφοροποίησης

Στα πλαίσια της σύγκρισης θεωρήσα ορθό να αναλυθεί διαγραμματικά αλλά και λεκτικά η διαδικασία της 64-QAM Mapping – Demmapping



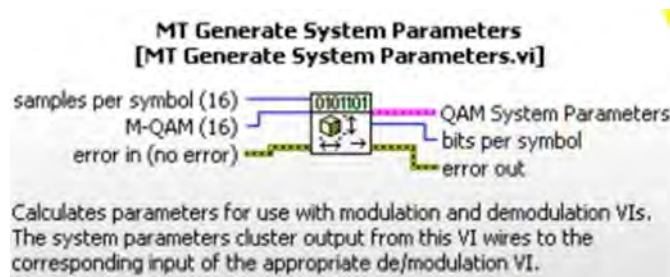
Εικόνα 5.8 64-QAM Mapping – Demmapping

Αρχικά όπως φαίνεται και στο διάγραμμα η διαμόρφωση QAM είτε είναι 16,64 ή οποιαδήποτε άλλη εφαρμόζεται στα δυαδικά bit εισαγωγής. Γενικότερα όμως θα μπορούσαμε να πούμε ότι βασική επιδίωξη της QAM είναι η μετατροπή των bit τα οποία εισάγονται να μετατρέπονται σε πολύπλοκα σύμβολα που αναπαριστούν το πλάτος / φάσης της κυματομορφής. Εφόσον αναφερόμαστε στην 64 QAM η συγκεκριμένη διαμόρφωση χρειάζεται 6bit για τον πομπό. Έπειτα η μετατροπή των bit σε σύμβολα πηγαίνει στον πομπό

και τα σύμβολα όταν μετατρέπονται σε bits γίνονται στον δέκτη. Το διάγραμμα δείχνει τη θέση της χαρτογράφησης QAM Στον πομπό και αντίστοιχα στον δέκτη κατά τη διαδικασία της αποσυμπίεσης εφόσον έχει επιτευχθεί η διόρθωση του καναλιού και όλες οι άλλες βλάβες που μπορεί να προκύψουν από τα εισαγόμενα σύμβολα βασικής ζώνης. Όλη η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται πριν από την μετατροπή RF και για αυτό το λόγο απαιτείται χρήση δυναμικού ενισχυτή στο άκρο της μετάδοσης.

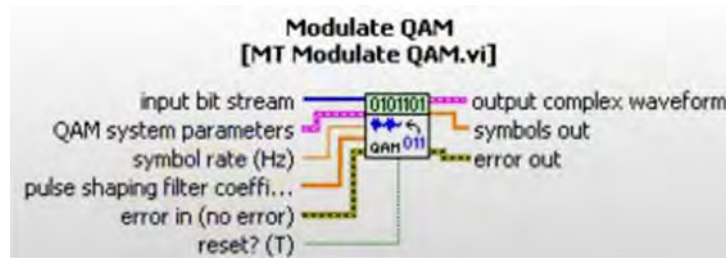
Ανάλυση υλοποίησης γραφικής απεικόνισης QAM στο LabVIEW

Αφού δημιουργήσουμε ένα καινούργιο project θα περιηγηθούμε στην καρτέλα των Function μετά θα πάμε στα Addons θα επιλέξουμε το κουμπί Modulation και μετά Digital και εκεί πάλι Modulation, μόλις πατήσουμε και αυτό θα μας ανοίξει μια καρτέλα με όλες τις διαμορφώσεις που περιέχει το πρόγραμμα οι οποίες είναι η ASK, PAM, QAM, FSK, MSK, PSK, CPM , επιλέγουμε MT Modulate QAM. Το επόμενο που θα χρειαστούμε βρίσκεται στην κατηγορία utilities και ονομάζεται Sys Params, στην ίδια καρτέλα θα βρούμε και το Filter Coefficients και το MT Generate Bits (καρτέλα digital) . Έπειτα μεταφερόμαστε στην επιφάνεια του Block Diagram και παραμετροποιούμε το Generate System Parameters στην διαμόρφωση QAM (Βλέπε Φωτογραφία για τα inputs-outputs και λειτουργία).



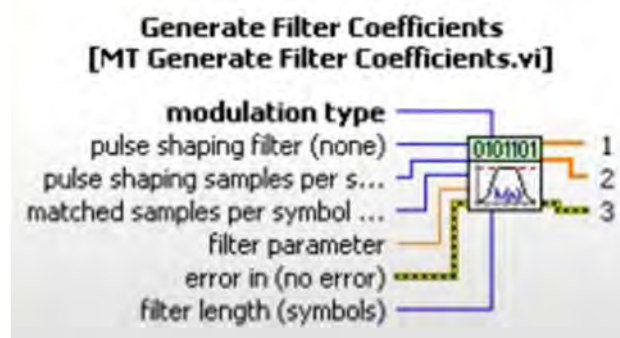
Εικόνα 5.9 MT Generate System Parameters

Στη συνέχεια επιλέγουμε το μπλοκ Generate System Parameters (εικόνα 5.9) κάνουμε δεξί κλικ και έπειτα δημιουργούμε Create -> Indicator καθώς ενώνουμε την πάνω δεξιά έξοδο στην είσοδο του MT Modulate που τοποθετήσαμε προηγουμένως , αυτό είναι απαραίτητο για τον modulator ,να έχει QAM system parameters όπως σας δείχνω και στην φωτογραφία (βλέπε εικόνα).



Εικόνα 5.10 Modulate QAM

Σε συνέχεια ενώ με την είσοδο του Modulate QAM (εικόνα 5.10) με την output bit stream του MT Generate Bits. Συνδέουμε επίσης το pulse shaping filter coefficient (εικόνα 5.11) του Mt modulate QAM με την έξοδο του MT Generate Filter.

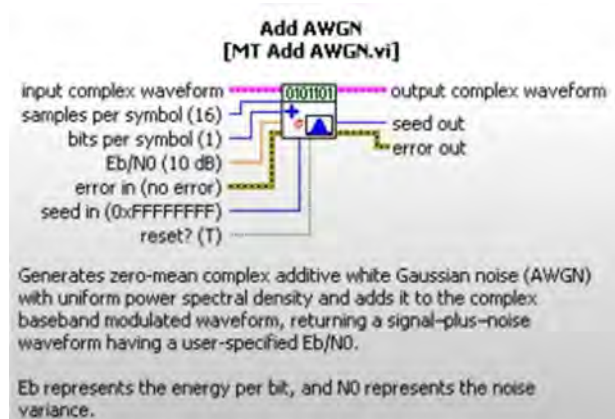


Εικόνα 5.11 Filter coefficient

Εδώ χρειάζεται να καθορίσουμε τον τύπο του pulse shaping filter άρα χρειαζόμαστε τα δείγματα ανά σύμβολο. Από το MT Generate Filter δημιουργούμε Create-> Constant και επιλέγουμε την QAM ενώ στην είσοδο δημιουργούμε Create->Control με τις προκαθορισμένες τιμές. Παρακάτω παραθέτω τις λειτουργίες του MT generate bits που θα χρειαστεί να δημιουργηθεί Create -> Control για να εμφανιστεί και στο front panel. Εκεί θα προσέξουμε να είναι τα συνολικά Bits 128. Μετά ανοίγουμε τα Utilities και επιλέγουμε Get Complex IQ Component για να απεικονιστεί ο τομέας χρόνου από το σήμα. Ακόμα θα προσθέσουμε από την ίδια καρτέλα MT Get Complex IQ Component ενώ θα δημιουργήσουμε Create ->Constant στην φάση I και αντίστοιχα ένα για την φάση Q. Τώρα θα συνδέσουμε την έξοδο του MT Modulate QAM με το την είσοδο δεδομένων του I από το IQ data Complex και στην ίδια ένωση θα βάλουμε και την Q. Με αυτό τον τρόπο έχουμε δύο τύπους εξόδων.

Επόμενο βήμα είναι βάλουμε το κατάλληλο γράφημα απεικόνισης για να γίνει αυτό θα πρέπει να πάμε στο controls να επιλέξουμε Graph Indicator-> Graph (όπως ακριβώς κάναμε και στον πομπό) με αυτό τον τρόπο έχουμε απεικόνιση κυματομορφής γραφικά. Με τον ίδιο τρόπο βάζουμε άλλο ένα, το πρώτο θα ονομαστεί I και το δεύτερο Q. Τα ενώνουμε κατάλληλα (στην μέση) από τα MT Complex IQ και για το I και για το Q.

Επόμενο βήμα είναι να ανοίξουμε το Controls -> Modulation-> Digital-> Constellation Graph για να φτιάξουμε το επόμενο μας διάγραμμα, εδώ θα χρειαστεί να ενώσουμε τη γραμμή εξόδου του MT Modulate με την είσοδο wave του Constellation Graph. Μόλις φθάσουμε σε αυτό το σημείο ήδη μπορούμε να τρέξουμε το πρόγραμμά μας εφόσον έχει στηθεί ο βασικός σκελετός και μόλις το κάνουμε αυτό θα παρατηρήσουμε ότι στο Front Panel έχουμε τη δυνατότητα να παραμετροποιήσουμε τον αριθμό των συνολικών bits και των bits / σύμβολο έτσι ανάλογα θα αλλάζουν και τα διαγράμματα. Έπειτα θα χρειαστεί να βάλουμε όλα μας στο διάγραμμα σε ένα While Loop και για να γίνει αυτό θα πάμε στα Functions -> Structures και θα επιλέξουμε While Loop. Το επόμενο που θα προσθέσουμε είναι ένα ρολόι (wait) που θα βρούμε στα Function-> Timing -> Wait, μόλις το βάλουμε θα κάνουμε ένα Create-> Constant με σκοπό να ελέγχουμε την ώρα εναλλαγής και να προλαβαίνουμε να βλέπουμε σταδιακά καθώς τρέχει το πρόγραμμα όλες τις μορφές που θα απεικονιστούν στο σύστημα. Για διευκόλυνση αντικαταστάθηκε το απλό πεδίο των συνολικών bits καθώς τη θέση του πήρε ένα pointer Slide έτσι ώστε να γίνονται ευκολότερα οι εναλλαγές των αριθμών σε σχέση με την γραφική απεικόνιση. Αν κάνουμε δεξί κλικ στον Pointer Slider μπορούμε να επιλέξουμε Visible items-> Digital έτσι ώστε να μπορούμε να βλέπουμε ακριβώς τον αριθμό και όχι στο περίπου βλέποντας απλά τις διακυμάνσεις της μπάρας καθώς τέτοιες μετρήσεις είναι πολύ σημαντική η ακρίβεια. Θα χρειαστεί να ρυθμίσουμε τις μέγιστες τιμές του slider σε 4096 για το μέγιστο και 4 για το ελάχιστο. Έπειτα θα περιηγηθούμε στα Function-> Addons -> Modulation-> Digital-> Impairments-> Add AWGN (βλέπε εικόνα 5.12 για την λειτουργία) με σκοπό την μείωση του λευκού Gaussian θορύβου. Εδώ το ενώνουμε μεταξύ της εξόδου QAM και του Constellation Graph, παράλληλα δημιουργούμε Create-> Control για να μπορούν να παραμετροποιηθούν τα επίπεδα θορύβου.



Εικόνα 5.12 AWGN

Τέλος θα χρειαστεί να προσθέσουμε ένα αποδιαμορφωτή και ένα μπλοκ που ονομάζεται Generate Synchronization Parameters , ενώ θα πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα για την διαμόρφωση QAM.

Εφόσον γίνουν όλα αυτά θα έχουμε την ικανότητα μέσα από το περιβάλλον υλοποίησης που φτιάξαμε να αυξομειώνουμε τον συνολικό αριθμό για τα Bits και κατ' αυτό τον τρόπο μας δίνεται η δυνατότητα αναπαράστασης σε πραγματικό χρόνο η γραφική απεικόνιση της διαμόρφωσης. Επιπρόσθετα μπορούμε να ρυθμίσουμε το θόρυβο και να δούμε τη γραφική απεικόνιση από τους κυματογράφους και από το Constellation Graph καθώς παράλληλα ρυθμίζουμε τις παραμέτρους μας. Όπως μπορούμε να δούμε και στις εικόνες 5.7-5.13 έχει γίνει και δεύτερος τρόπος υλοποίησης στο LabView όπου υπάρχει επιλογή Pulse shaping filter , ενώ αλλάζοντας στο πεδίο M-QAM μπορούμε να δούμε διαγραμματικά μέσα από το Constellation Plot ρυθμίζοντας κατάλληλα το Symbol Rate και τον θόρυβο τις μετρήσεις τις οποίες καθορίσαμε, βασική διαφορά με την υλοποίηση ένα είναι ότι στην ουσία το σύστημα δεν τρέχει real time αλλά δείχνει περισσότερο στατικές εικόνες επίσης δεν είναι αναγκαστικό να τρέχει με τη συσκευή όπως στην υλοποίηση ένα που δεν μπορεί να λειτουργήσει χωρίς το USRP καθώς είναι αναπόσπαστο κομμάτι της υλοποίησης. Ακόμα μια βασική διαφορά είναι ότι στην υλοποίηση ένα μπορούμε να δούμε συγκρίνοντας τα φίλτρα στο Q και στο I διαγράμματα ημιτονοειδές οι τετραγωνικούς παλμούς στα αντίστοιχα Waveform Chart.

6 Συμπεράσματα

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μέρα με τη μέρα η εξέλιξη της τεχνολογίας επιδρά όλο και περισσότερο στην καθημερινή μας ζωή. Τα συστήματα SDR (Software Defined Radio) φαίνεται ότι μπορούν να προσφέρουν εξίσου σημαντική εξέλιξη σε πολλούς τομείς. Η καλπάζουσα ανάπτυξη των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων και συστημάτων έχει φέρει πολλά θετικά καθώς με την πάροδο των χρόνων έχουν συνεισφέρει και αυτά με τον τρόπο τους και δεν είναι απλά μηχανήματα που μεταδίδουν και λαμβάνουν ήχο ή εικόνα σε έναν πομπό και ένα δέκτη. Όπως διαπιστώθηκε υπάρχουν διάφοροι τρόποι και μηχανισμοί διάδοσης των τηλεπικοινωνιών. Βάσει της έρευνας και των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο είχαν ως στόχο το σχεδιασμό, τον προγραμματισμό καθώς και την υλοποίηση ενός συστήματος επικοινωνίας ασύρματου δέκτη και πομπού χρησιμοποιώντας τουλάχιστον 2 λογισμικά ενώ θα μπορούσαν να υλοποιηθούν με ένα παρόλα αυτά επέλεξα την παρουσίαση και των δύο. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που βοήθησε ήταν μια εξέχουσα συνεννόηση που είχα με τον καθηγητή μου Γεώργιο Καρέτσο καθώς μου εμπιστεύτηκε όλον αυτόν τον εξοπλισμό που αν δεν τον είχα δεν θα μπορούσα να κάνω τίποτα από όλα αυτά με αποτέλεσμα όλος αυτός ο προγραμματισμός και η υλοποίηση της έρευνας να ήταν ακόμη ένα όνειρο. Τέλος θα ήθελα να επισημάνω ότι και οι 3 υλοποιήσεις πραγματοποιήθηκαν για ερευνητικούς-ακαδημαϊκούς σκοπούς. Σίγουρα όλο αυτό το ταξίδι ο πρόσφερε πάρα πολλές γνώσεις και επιθυμία να ασχοληθώ με το θέμα μελλοντικά, ίσως με λίγη διαφορετική υλοποίηση. Επόμενος στόχος του συστήματος θα ήταν να μπορεί το σύστημα να καταγράφει ζωντανά δεδομένα ήχου και να αναμεταδίδει αυτόματα με χρήση τεχνητής νοημοσύνης. Αυτό που μου έμεινε όμως καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου είναι πως τα μηχανήματα δεν είναι απλά μηδέν και ένα όπως λέμε αλλά έχουν και αυτά τη δικιά τους προσωπικότητα

Βιβλιογραφία

- [1] “Ασύρματο δίκτυο - Βικιπαίδεια.” Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%83%CF%8D%CF%81%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF_%CE%B4%CE%AF%CE%BA%CF%84%CF%85%CE%BF
- [2] “Ασύρματο Δίκτυο WiFi: Ταχύτητα & Αξιοπιστία,” AIC, Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.aic.gr/asymtato-diktyo-wifi/>
- [3] “4-Vivlio-Windows-1”.
- [4] Μ. Λογοθέτης, Π. Σχολή, Τ. Ηλεκτρολόγων, Μ. Και, Τ. Υπολογιστών, and Σ. Επικοινωνιών, “Ενότητα 6: Δέκτες-Ραδιοφωνία AM-FM,” 2011. Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/EE789/%CE%94%CE%99%CE%91%CE%A6%CE%91%CE%9D%CE%95%CE%99%CE%95%CE%A3%20%CE%98%CE%95%CE%A9%CE%A1%CE%99%CE%91%CE%A3/%CE%9C%CE%AC%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE%B1%206.pdf>
- [5] “Ραδιοερασιτεχνισμός και Ακτινοβολία Ανιχνευση Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων Radar αεροδρομίων μετρήσεις ακτινοβολίας.” Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: <https://aktinovolia.net/hamradio.html>
- [6] Μ. Λογοθέτης, Π. Σχολή, Τ. Ηλεκτρολόγων, Μ. Και, Τ. Υπολογιστών, and Σ. Επικοινωνιών, “Ενότητα 6: Δέκτες-Ραδιοφωνία AM-FM”.
- [7] “USRP device Getting Started Guide - NI.” Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-292x-getting-started/page/overview.html>
- [8] IEEE Computer Society. LAN/MAN Standards Committee. and Institute of Electrical and Electronics Engineers., “IEEE standard for information technology part 11, wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications,” p. 1184, 2007.
- [9] “Τι είναι νόμιμο και τι παράνομο στα CB – RFNews | SV1RVP.” Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: <https://rfnews.gr/%CF%84%CE%B9->

%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-
 %CE%BD%CF%8C%CE%BC%CE%B9%CE%BC%CE%BF-
 %CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CF%84%CE%B9-
 %CF%80%CE%B1%CF%81%CE%AC%CE%BD%CE%BF%CE%BC%CE%B
 F-%CF%83%CF%84%CE%B1-cb/

- [10] “Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών | Δικτυακός Τόπος Διαβουλεύσεων.” Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: <http://www.opengov.gr/yyme/?c=2965>
- [11] “USRP-2920 Specifications - NI.” Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-2920-specs/page/specs.html>
- [12] “MIMO Cable | Ettus Research, a National Instruments Brand | The leader in Software Defined Radio (SDR).” Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.ettus.com/all-products/mimo-cbl/>
- [13] T. B. Welch and S. Shearman, “Teaching software defined radio using the USRP and LabVIEW,” *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, pp. 2789–2792, 2012, doi: 10.1109/ICASSP.2012.6288496.
- [14] Institute of Electrical and Electronics Engineers. and IEEE Signal Processing Society., “2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing : proceedings : March 25-30, [2012], Prague Congress Center, Prague, Czech Republic,” 2012.
- [15] A. Marwanto, M. A. Sarijari, N. Fisal, S. K. S. Yusof, and R. A. Rashid, “Experimental study of OFDM implementation utilizing GNU radio and USRP - SDR,” *Proceedings - MICC 2009: 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications with a Special Workshop on Digital TV Contents*, pp. 132–135, 2009, doi: 10.1109/MICC.2009.5431480.
- [16] “ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ο : Ψηφιακή Διαμόρφωση QAM και PSK Σύνοψη.”
- [17] “Τι είναι το QAM: Διαμόρφωση πλάτους τετραγώνου-Προμηθευτής News-FMUSER FM / TV Broadcast One-Stop.” Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: <https://el.fmuser.net/content/?7549.html>