

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

**πολυτεχνικη σχολη**

τμημα μηχανικων πληροφοριακων και επικοινωνιακων συστηματων

**Διαμόρφωση OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) – Εξομοίωση, και υλοποίηση σε SDR**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Τσουκαλά Δημήτριου

**Επιβλέπων :** Μαλιάτσος Κωνσταντίνος

**Μέλη εξεταστικής επιτροπής:**

Σάμος, Οκτώβριος 2023

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πρόλογος και ευχαριστίες

Πρώτη παράγραφος

Επόμενη παράγραφος....

© 2023

του

Τσουκαλά Δημήτριου

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1 Εισαγωγή 1

1.1 Εισαγωγή - Διαμορφώσεις 1

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής 2

1.2.1 <τίτλος υποενότητας> 2

1.3 <άλλες ενότητες> 2

1.4 Δομή της διπλωματικής 2

2 Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) 3

2.1 Εισαγωγή 3

2.2 Κανάλια χρονικής παραλλαγής 4

2.3 Linear time-variant κανάλια στους TF και DD τομείς 6

2.4 Το Delay-Doppler κανάλι 7

2.5 Διαμόρφωση OTFS 8

2.5.1 Διαμόρφωση χρόνου – συχνότητας 8

2.5.2 Λήψη σημάτων διαμορφωμένης χρονικής συχνότητας: Επαρκής Στατιστικά στοιχεία και παραμόρφωση καναλιών 10

2.5.3 Διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση OTFS 12

3 Διαμόρφωση στα ασύρματα 5G δίκτυα και στα νεότερα συστήματα 17

3.1 Εισαγωγή 17

3.2 Μοντέλο Συστήματος 22

3.2.1 Ανίχνευση μέγιστης πιθανότητας 22

3.3 Τύποι Διαμόρφωσης Δείκτη 23

3.3.1 Χωρική Διαμόρφωση 24

3.3.2 Γενικευμένη Χωρική Διαμόρφωση (GSM) 25

3.3.3 Space Shift Keying και Generalized Space Shift Keying 26

3.3.4 Media-Based Διαμόρφωση 27

3.4 Πολυδιάστατη Διαμόρφωση Ευρετηρίου 28

3.4.1 Space-Time IM 28

3.4.2 Διαμόρφωση που βασίζεται σε χωρικά διαμορφωμένα μέσα 29

Βιβλιογραφία 30

Παράρτημα Ι [ΤΙΤΛΟΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Ι] 31

Λίστα Σχημάτων

Εδώ προστίθεται ο κατάλογος σχημάτων.

Σε κάθε καταχώρηση εμφανίζεται η αρίθμηση, η λεζάντα, και η σελίδα.

Λίστα Πινάκων

Εδώ προστίθεται ο κατάλογος πινάκων.

Σε κάθε καταχώρηση εμφανίζεται η αρίθμηση, η λεζάντα, και η σελίδα.

Ακρωνύμια

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

Περίληψη

Η διπλωματική αυτή στοχεύει στη διερεύνηση των δυνατοτήτων της διαμόρφωσης Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, με έμφαση στην προσομοίωση και τον πειραματισμό με χρήση Software Defined Radios (SDRs). Η OTFS είναι μια νέα τεχνική διαμόρφωσης που μπορεί να μετριάσει τις επιπτώσεις της ολίσθησης Doppler και της εξασθένησης πολλαπλών διαδρομών (multipath), δύο σημαντικές απομειώσεις των σημάτων στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας.

Η εργασία θα περιλαμβάνει με τη διεξαγωγή ενδελεχούς ανασκόπησης της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με τη διαμόρφωση OTFS και τις πιθανές εφαρμογές της σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση θα καλύπτει τις θεμελιώδεις έννοιες της OTFS, τα χαρακτηριστικά του καναλιού, τη διάδοση του σήματος και τις επικρατούσες τεχνικές διαμόρφωσης στα συστήματα νέας γενιάς.

Έπειτα πραγματοποιείται ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης διαμόρφωσης OTFS χρησιμοποιώντας MATLAB. Τα μοντέλα προσομοίωσης θα σχεδιαστούν για να αξιολογούν την απόδοση της διαμόρφωσης OTFS όσον αφορά την ευρωστία στη μετατόπιση Doppler, την εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών και τον θόρυβο. Τα μοντέλα προσομοίωσης θα εξετάσουν διαφορετικά σενάρια, όπως διαφορετικές συνθήκες καναλιού, ισχύ μετάδοσης και σχήματα διαμόρφωσης, για να διερευνήσουν τον αντίκτυπο της διαμόρφωσης OTFS στην απόδοση του συστήματος.

Για πειραματισμό χρησιμοποιώντας SDR, θα χρησιμοποιηθεί το MATLAB για τη δημιουργία σημάτων διαμορφωμένων OTFS και τη μετάδοση τους μέσω του κατάλληλου toolbox χρησιμοποιώντας το υλικό SDR. Η πειραματική διάταξη θα περιλαμβάνει υλικό SDR, κεραίες στον πομπό και στον δέκτη για τη λήψη και την αποδιαμόρφωση των σημάτων OTFS. Η εγκατάσταση θα σχεδιαστεί για να αξιολογεί την επίδοση της διαμόρφωσης OTFS σε πραγματικό περιβάλλον, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά σενάρια, όπως διαφορετικές αποστάσεις, εμπόδια, κινητικότητα και παρεμβολές.

Για να συγκριθεί η επίδοση της διαμόρφωσης OTFS με άλλες τεχνικές διαμόρφωσης, όπως η OFDM, η εργασία θα χρησιμοποιήσει την προσομοίωση και τα πειραματικά αποτελέσματα για να αξιολογήσει την απόδοσή τους ως προς την ευρωστία στη μετατόπιση Doppler, την εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών και τον θόρυβο.

**Λέξεις Κλειδιά:** *OTFS, SDR*

Abstract

This thesis aims to investigate the possibilities of Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) modulation in wireless communication systems, with an emphasis on simulation and experimentation using Software Defined Radios (SDRs). OTFS is a new modulation technique that can mitigate Doppler shift and multipath attenuation, two major degradations of signals in  
wireless communication systems.

The work will involve conducting a thorough review of the existing literature on OTFS configuration and its potential applications in wireless communication systems. The literature review will cover the fundamental concepts of OTFS, channel characteristics, signal propagation and prevailing modulation techniques in next-generation systems.

OTFS configuration simulation models are then developed using MATLAB. Simulation models will be designed to evaluate the performance of the OTFS configuration in terms of robustness to Doppler shift, multipath fading and noise. Simulation models will consider different scenarios, such as different channel conditions, transmission power, and configuration schemes, to investigate the impact of OTFS configuration on system performance.

For experimentation using SDR, MATLAB will be used to generate OTFS modulated signals and transmit them through the appropriate toolbox using the SDR hardware. The experimental setup will include SDR hardware, antennas at the transmitter and at the receiver to receive and demodulate the OTFS signals. The facility will be designed to evaluate the performance of the OTFS configuration in a real environment, considering different scenarios such as different distances, obstacles, mobility and interference.

To compare the performance of OTFS modulation with other modulation techniques such as OFDM, the paper will use simulation and experimental results to evaluate their performance in terms of robustness to Doppler shift, multipath fading and noise.

**Keywords:** *OTFS, SDR*

# Εισαγωγή

## Εισαγωγή - Διαμορφώσεις

Τα 4G και τα 5G δίκτυα έχουν ενταχθεί στη καθημερινότητα μας και παίζουν βασικό ρόλο στην γρήγορη και αξίοπιστη επικοινωνία. Αυτά τα δίκτυα χρησιμοποιούν κυρίως OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) διαμόρφωση που είναι ένας τύπος διαμόρφωσης που η πληροφορία κατά τη μετάδοση της διαιρείται σε διαφορετικά κανάλια, χωρίς το κάθε κανάλι να επηρεάζεται από το άλλο.

Η OFDM διαμόρφωση παρά τα πλεονεκτήματα της δεν μπορεί να αποδώσει στις μελλοντικές επικοινωνίες με 6G. Αυτό συμβαίνει διότι, οι απαιτήσεις και οι ταχύτητες μετακίνησης αυξάνονται με τη πάροδο του χρόνου. Σε αυτό το πρόβλημα θα μας δώσει λύση η OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) διαμόρφωση, που μπορεί να αποδώσει με μικρό BER (Bit Error Rate) σε καταστάσεις με υψηλό δείκτη Doppler.

Η OTFS είναι μία 2D διαμόρφωση όπου μεταδίδει το ηλεκτρομαγνητικό σήμα σε Delay-Doppler δείκτη συντεταγμένων και είναι παρόμοια με άλλες διαμορφώσεις όπως η TDMA (Time-division multiple access), CDMA (Code-division multiple access), και OFDM. Στην ενότητα OTFS θα αναλύσουμε αναλυτικά τις πτυχές της.

## Αντικείμενο διπλωματικής

Σε αυτή τη διπλωματική, εμβαθύνουμε στον περίπλοκο κόσμο της διαμόρφωσης OTFS και κάνουμε συγκρίσεις με το OFDM. Ο πρωταρχικός μας στόχος είναι να αντιμετωπίσουμε κρίσιμες προκλήσεις στον τομέα της ασύρματης επικοινωνίας.

### Δήλωση προβλήματος

Αντιμετωπίζουμε τις πολύπλοκες περιπλοκές της διαμόρφωσης OTFS, ιδιαίτερα τη μοναδική του ικανότητα να μειώνει την καθυστέρηση και τη διάδοση Doppler σε απαιτητικά σενάρια επικοινωνίας. Στόχος μας είναι να επιτύχουμε μια βαθιά κατανόηση αυτών των περιπλοκών.

Φιλοδοξούμε να δημιουργήσουμε μια ουσιαστική αντιπαράθεση μεταξύ OTFS και OFDM, δύο σημαντικών σχημάτων διαμόρφωσης. Αυτό το εγχείρημα απαιτεί μια ενδελεχή ανάλυση των δυνατών, των αδυναμιών και των εφαρμογών τους στον πραγματικό κόσμο, θέτοντας έτσι τις βάσεις για τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων στο σχεδιασμό ασύρματων συστημάτων.

### Ανάλυση

Περιηγούμαστε σε αρχικά σε μία εκτεταμένη έρευνα και ανάλυση, που περιλαμβάνει μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας. Αυτή η διαδικασία μας επιτρέπει να αναπτύξουμε μια σταθερή θεωρητική βάση κατανοώντας τις μαθηματικές αρχές και τις πρακτικές εφαρμογές που στηρίζουν τη διαμόρφωση OTFS.

Η έρευνά μας υιοθετεί μια συστηματική προσέγγιση για τη σύγκριση των OTFS και OFDM, εφαρμόζοντας σχολαστικά κριτήρια αξιολόγησης και μετρήσεις απόδοσης για να αποδοθούν τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους.

Για να αντιμετωπίσουμε τις τεχνικές περιπλοκές της κωδικοποίησης και μετάδοσης σημάτων OTFS και OFDM μέσω προσομοιώσεων SDR και MATLAB, αξιοποιούμε εξειδικευμένες βιβλιοθήκες και εργαλεία, επιδεικνύοντας την τεχνογνωσία μας στην επεξεργασία σήματος, την ασύρματη επικοινωνία και την ανάπτυξη λογισμικού.

Οι διπλωματικές μας στρατηγικές επεκτείνονται σε αυστηρές διαδικασίες δοκιμών και επικύρωσης, διασφαλίζοντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία των ευρημάτων μας.

Αυτή η διατριβή χρησιμεύει ως οδηγός σε βάθος για τους αναγνώστες, παρέχοντας μια βαθιά κατανόηση της σημασίας και των τεχνικών προκλήσεων που είναι εγγενείς στην έρευνά μας στο πεδίο της ασύρματης επικοινωνίας και των τεχνικών διαμόρφωσης. Χρησιμοποιώντας διπλωματικές προσεγγίσεις επίλυσης προβλημάτων, προσπαθούμε να συνεισφέρουμε πολύτιμες γνώσεις στο πεδίο, προωθώντας έτσι την κατανόηση και την εφαρμογή των OTFS και OFDM σε πρακτικά συστήματα επικοινωνίας.

## Δομή της διπλωματικής

Αναλυτικές πληροφορίες και ανάλυση σχετικά με το OTFS παρουσιάζονται στην Ενότητα 2. Νέες διαμόρφωσεις στα 5G δίκτυα αναφέρονται στην Ενότητα 3. Τα πειράματα και κάποια simulations με OFDM, OTFS παρουσιάζονται στην Ενότητα 4.

# Orthogonal Time Frequency Space (OTFS)

## Εισαγωγή

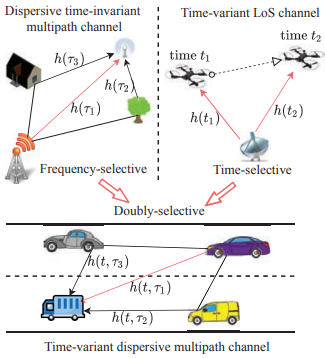
Τα 2G δίκτυα βασίζονταν κυρίως στο frequency domain multiple access (FDMA) και στο time domain multiple access (TDMA), τα 3G δίκτυα στο code division multiplexing (CDMA), και ακολουθούνται τα 4G και τα 5G ασύρματα δίκτυα όπου βασίζονται στην orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) διαμόρφωση. Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τα 6G δίκτυα που θα χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο βαθμό στις μελλοντικές τηλεπικοινωνίες.

Η 6η γενιά ασύρματων δικτύων είναι απαραίτητο να μπορεί να υποστηρίξει την γρήγορη και ακέραια επικοινωνία από δορυφόρους, τρένα μεγάλης ταχύτητας, αυτόνομα αυτοκίνητα, αεροπλάνα καθώς και όλες τις επικοινωνίες με υψηλό Doppler-delay. Ακόμα, αξίζει να αναφέρουμε τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας λόγω της συμφόρησης του φάσματος κάτω των 6 GHz, γεγονός που περιορίζει τη βελτίωση της χωρητικότητας και τη βιώσιμη εξέλιξη του συστήματος. Αυτός ο περιορισμός αναγκάζει τους παρόχους να χρησιμοποιούν ζώνες υψηλότερης συχνότητας, όπως τις ζώνες κυμάτων χιλιοστών (mmWave), όπου είναι διαθέσιμη σημαντική ποσότητα αχρησιμοποίητου φάσματος. Ωστόσο, η επικοινωνία σε αυτές τις ζώνες υψηλής συχνότητας δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις λόγω των διακυμάνσεων των καναλιών, ειδικά σε σενάρια υψηλής κινητικότητας. Ειδικότερα, η ερευνητική προσοχή αφιερώθηκε στον σχεδιασμό νέας κυματομορφής διαμόρφωσης για την επικοινωνία υψηλής κινητικότητας στα επόμενης γενιάς ασύρματα δίκτυα.

Τα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας που λειτουργούν σε υψηλές φέρουσες συχνότητες και υποστηρίζουν σενάρια υψηλής κινητικότητας αντιμετωπίζουν προκλήσεις λόγω των σημαντικών διασπορών Doppler που προκαλούνται από την κίνηση του πομπού, του δέκτη και των σκεδαστών. Η συμβατική τεχνική διαμόρφωσης πολυπλεξίας ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDM), η οποία έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε 4G και αναδυόμενα κυψελωτά συστήματα και δίκτυα WiFi 5G, δεν είναι κατάλληλη για σενάρια υψηλής κινητικότητας. Αυτό συμβαίνει επειδή το OFDM είναι ευαίσθητο σε παρεμβολές μεταξύ φορέων (ICI) και ζητήματα συγχρονισμού που ενισχύονται από τη διακύμανση του κανονικοποιημένου Doppler μεταξύ του υψηλότερου και του χαμηλότερου υποφορέα. Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, έχει προταθεί ένα νέο δισδιάστατο (2D) σχήμα διαμόρφωσης που ονομάζεται ορθογώνιος χώρος χρόνου-συχνότητας (OTFS) ως πιθανή λύση για επικοινωνίες υψηλής κινητικότητας. Σε αντίθεση με το OFDM, το OTFS είναι λιγότερο ευαίσθητο στο φαινόμενο Doppler, καθιστώντας το ιδανικό υποψήφιο για σενάρια υψηλής κινητικότητας. Χρησιμοποιεί χρόνο και συχνότητα για να δημιουργήσει έναν χώρο διαμόρφωσης 2D, επιτρέποντας την αναπαράσταση της κυματομορφής επικοινωνίας τόσο στον τομέα του χρόνου όσο και στη συχνότητα ταυτόχρονα. Αυτή η προσέγγιση παρέχει ανώτερη απόδοση σε σενάρια υψηλής κινητικότητας σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές διαμόρφωσης. Συνοπτικά, οι συμβατικές τεχνικές διαμόρφωσης όπως το OFDM δεν είναι κατάλληλες για επικοινωνίες υψηλής κινητικότητας λόγω των προκλήσεων που τίθενται από τα φαινόμενα Doppler και τα ζητήματα συγχρονισμού. Ωστόσο, το νέο σχήμα διαμόρφωσης OTFS προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη λύση δημιουργώντας έναν χώρο διαμόρφωσης 2D που είναι λιγότερο ευαίσθητος στο φαινόμενο Doppler και παρέχει ανώτερη απόδοση σε σενάρια υψηλής κινητικότητας.

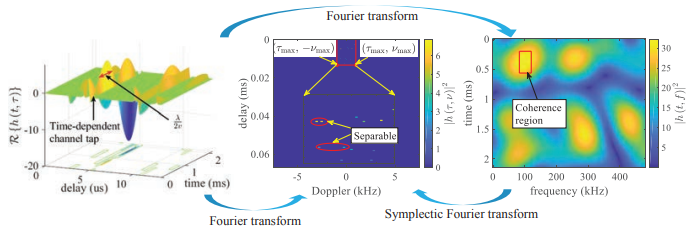
Η τεχνική διαμόρφωσης OTFS προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την παραδοσιακή διαμόρφωση OFDM. Σε αντίθεση με το OFDM, το οποίο διαμορφώνει πληροφορίες στον τομέα χρόνου-συχνότητας (TF), το OTFS διαμορφώνει πληροφορίες στον τομέα καθυστέρησης-Doppler (DD). Αυτό παρέχει υψηλό επίπεδο ανθεκτικότητας σε καθυστέρηση και ανθεκτικότητας Doppler, το οποίο είναι απαραίτητο για την υποστήριξη αξιόπιστης επικοινωνίας σε σενάρια υψηλής κινητικότητας. Επιπλέον, το OTFS μπορεί να επωφεληθεί από την πλήρη ποικιλομορφία, η οποία είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Εκτός από την ευρωστία του, το OTFS μπορεί να μετατρέψει ένα κανάλι μεταβλητής χρόνου σε ένα οιονεί αμετάβλητο δισδιάστατο κανάλι στον τομέα DD, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Ωστόσο, δεδομένου ότι τα περισσότερα σχέδια ασύρματων συστημάτων είναι προσανατολισμένα σε σενάρια χαμηλής κινητικότητας και χαμηλού φορέα, το OTFS εισάγει νέες προκλήσεις στην αρχιτεκτονική πομποδέκτη και στα αλγοριθμικά σχέδια. Για την πλήρη συνειδητοποίηση των πλεονεκτημάτων του OTFS, είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν θεμελιώδη ερευνητικά προβλήματα, όπως η εκτίμηση καναλιών, η ανίχνευση και τα σχέδια πολλαπλών κεραιών και πολλών χρηστών. Αυτές οι προκλήσεις απαιτούν προηγμένες τεχνικές, όπως αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, μεθόδους βελτιστοποίησης και προσαρμοστική επεξεργασία σήματος για να καταστεί δυνατή η αποτελεσματική και αξιόπιστη επικοινωνία σε σενάρια υψηλής κινητικότητας. Συνολικά, η τεχνική διαμόρφωσης OTFS προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές διαμόρφωσης, αλλά επίσης εισάγει νέες προκλήσεις που απαιτούν καινοτόμες ερευνητικές λύσεις. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων θα είναι κρίσιμη για την απελευθέρωση του πλήρους δυναμικού του OTFS και για την παροχή αξιόπιστης επικοινωνίας σε σενάρια υψηλής κινητικότητας. [1]

## Κανάλια χρονικής παραλλαγής

Υποθέτοντας ότι η παλμική απόκριση καναλιού (CIR) παραμένει σταθερή ή έχει μεγάλο χρόνο συνοχής, ένα γραμμικό σύστημα αμετάβλητου χρόνου (LTI) μπορεί να μοντελοποιήσει ασύρματα κανάλια. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1. Ακόμη και με την παρουσία πολλαπλών σκεδαστών, το CIR παραμένει αμετάβλητο ως προς το χρόνο, με αποτέλεσμα μια διάσπαρτη έξοδο καναλιού LTI που είναι μια θολή έκδοση του μεταδιδόμενου σήματος. Σε αυτό το σενάριο, ένα μονοδιάστατο CIR στον τομέα καθυστέρησης (h(t)) είναι αρκετό για να χαρακτηρίσει το κανάλι διασποράς χρόνου. Ο μετασχηματισμός Fourier (FT) του CIR στον τομέα καθυστέρησης παράγει μια συνάρτηση μεταφοράς καναλιού επιλεκτικής συχνότητας (CTF). Καθώς η διασπορά καθυστέρησης του CIR αυξάνεται, η επιλεκτικότητα του καναλιού αυξάνεται επίσης, καθώς η απόσταση μεταξύ του τομέα συχνότητας (FD) εξασθενεί είναι ανάλογη με το μήκος του CIR.

Εικόνα 1: Μια απεικόνιση μοντέλων καναλιών επιλεκτικών συχνοτήτων, χρονοεπιλεκτικών και διπλά επιλεκτικών καναλιών.[1]

Καθώς οι χρήστες γίνονται πιο κινητοί και η συχνότητα του φορέα αυξάνεται, η υπόθεση ότι η παλμική απόκριση καναλιού (CIR) είναι γραμμική χρονικά αμετάβλητη (LTI) μπορεί να μην είναι πλέον ακριβής. Ως εκ τούτου, οι ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στο μοντέλο καναλιών γραμμικής χρονικής μεταβλητής (LTV) σε σενάρια υψηλής κινητικότητας. Τα κανάλια LTV δημιουργούν μετατοπίσεις συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler, το οποίο προκαλεί μια φασματική κηλιδωμένη έκδοση του εκπεμπόμενου σήματος, γνωστή ως διασπορά συχνότητας. Τα κανάλια διασποράς συχνότητας είναι χρονικά επιλεκτικά και ο διαχωρισμός μεταξύ του τομέα χρόνου (TD) του καναλιού εξασθενεί αναλογικά με την εξάπλωση Doppler. Σε σενάρια υψηλής κινητικότητας, τα κανάλια LTV είναι συχνά διπλά διασκορπισμένα λόγω της κοινής παρουσίας πολλαπλών διαδρομών και φαινομένων Doppler, όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Σε τέτοια σενάρια, κάθε πάτημα της συνάρτησης CIR εξαρτάται από το χρόνο και κυμαίνεται ανάλογα με ρυθμός λ/(2n) μεταξύ διαδοχικών εξασθενειών TD, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, όπου το λ αντιπροσωπεύει το μήκος κύματος και v είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια δισδιάστατη συνάρτηση CIR h(t, t) στον τομέα χρονικής καθυστέρησης. Αντί να θεωρούμε τη διασπορά TD και FD ως ανεπιθύμητες βλάβες στα κανάλια, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους πρόσθετους βαθμούς ελευθερίας (DoF) των καναλιών διπλής διασποράς για να επιτύχουμε αξιόπιστες επικοινωνίες που υποστηρίζονται από τη διαφορετικότητα σε σενάρια υψηλής κινητικότητας.



Εικόνα 2: LTV κανάλια στο time-delay, TF, and DD domains.[1]

## Linear time-variant κανάλια στους TF και DD τομείς

Εκτός από τον τομέα χρονικής καθυστέρησης, τα κανάλια LTV μπορούν επίσης να περιγραφούν είτε στον τομέα χρονικής συχνότητας (TF) είτε στον τομέα καθυστέρησης Doppler (DD), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Για να τονίσουμε την επιλεκτικότητα TF, μπορούμε να λάβουμε το TF κανάλι τομέα, h(t, f), λαμβάνοντας τον μετασχηματισμό Fourier (FT) του h(t, t) ως προς την καθυστέρηση t. Σημειώστε ότι το h(t, f) αντιπροσωπεύει τον μιγαδικό συντελεστή του CTF σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή t και τη συχνότητα f. Ωστόσο, η απόκτηση καναλιών στον τομέα TF είναι δύσκολη λόγω του περιορισμένου χρόνου συνοχής και του εύρους ζώνης συνοχής (περιοχή συνοχής στο Σχήμα 2) των καναλιών LTV και θα απαιτούσε σημαντική επιβάρυνση σήματος. Για παράδειγμα, για ένα σύστημα πολυπλεξίας ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDM) με συχνότητα φορέα fc = 3,5 GHz, απόσταση υποφορέα Df = 15 kHz και υποστηρίζει σχετική ταχύτητα v = 300 km/h, η μέγιστη μετατόπιση Doppler είναι nmax = 972,22 Hz και η διάρκεια ενός συμβόλου OFDM που περιλαμβάνει ένα 20% κυκλικό πρόθεμα (CP) είναι 80 δευτερόλεπτα. Υποθέτοντας ότι ο χρόνος συνοχής του καναλιού είναι 1/(4nmax) = 257,14 s, ένα διάστημα συνοχής καναλιού μπορεί να φιλοξενήσει το πολύ τρία σύμβολα OFDM.

Όταν το FT εφαρμόζεται στο h(t, t) σε σχέση με το t, το προκύπτον κανάλι πεδίου DD ή η συνάρτηση διασποράς, h(t, n), παρέχει πληροφορίες για την ένταση των σκεδαστών με καθυστέρηση διάδοσης t και μετατόπιση συχνότητας Doppler n. Αυτή η αναπαράσταση αποτυπώνει τη φυσική της ραδιοδιάδοσης σε περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας. Το κανάλι LTV στην περιοχή DD έχει πλεονεκτικές ιδιότητες, όπως δυνατότητα διαχωρισμού, σταθερότητα, συμπαγή και δυνητικά αραιότητα, όπως φαίνεται στο Σχ. 2 και επεξηγείται περαιτέρω παρακάτω. Αυτές οι ιδιότητες μπορούν να αξιοποιηθούν για να διευκολυνθεί η αποτελεσματική εκτίμηση καναλιών και η ανίχνευση δεδομένων.

Κάποια χαρακτηριστικά της Doppler-delay μετάδοσης είναι:

* **Διαχωριστικότητα**: Μπορούμε να αποκαλύψουμε το διαθέσιμο κανάλι DoF καθώς στον Doppler τομέα μπορούμε να διαχωρίσουμε τις διαδρομές διάδοσης με την ίδια καθυστέρηση.
* **Σταθερότητα**: Τα DD κανάλια παρουσιάζουν πιο αργές διακυμάνσεις από τους time-delay ή τους TF τομείς. Μόνο κάποια δραστική αλλαγή μπορεί να προκαλέσει αναταραχή στο σήμα.
* **Συμπαγές**: Στα τυπικά ασύρματα κανάλια, το μέγιστο γινόμενο της καθυστέρησης και της εξάπλωσης Doppler (tmax και nmax) είναι μικρότερο ή ίσο με 1, όπως περιγράφεται στο [4]. Επομένως, το κανάλι τομέα DD h(t,n) έχει μια συμπαγή υποστήριξη (δηλαδή, ένα περιορισμένο εύρος τιμών) εντός των διαστημάτων [0, tmax] και [-nmax, nmax] κατά μήκος των διαστάσεων καθυστέρησης και Doppler, αντίστοιχα. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να είναι χρήσιμη για αποτελεσματική εκτίμηση καναλιού και ανίχνευση δεδομένων, καθώς μειώνει την πολυπλοκότητα της επεξεργασίας και της αποθήκευσης που απαιτείται για την αναπαράσταση του καναλιού.
* **Πιθανή αραιότητα**: Ο DD τομέας λαμβάνει μία αραιή απάντηση όταν υπάρχουν πολλοί διασκορπιστές κατά την μετάδοση του σήματος

## Το Delay-Doppler κανάλι

Η παλμική απάντηση h(τ, v) του καναλιού της βασικής ζώνης, με καθυστέρηση τ και Doppler ν. Με είσοδο το σήμα s(t), το λαμβανόμενο σήμα δίνεται από την Εξίσωση 1.

(1)

Η αναπαράσταση h(τ, ν) του καναλιού έχει μια πολύτιμη ιδιότητα που ονομάζεται "συμπαγής". Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν συνήθως μόνο λίγοι ανακλαστήρες στο κανάλι με σχετικές μετατοπίσεις Doppler, επομένως απαιτούνται λιγότερες παράμετροι για την εκτίμηση του καναλιού στον τομέα καθυστέρησης-Doppler σε σύγκριση με τον τομέα χρόνου-συχνότητας. Αυτή η αραιότητα του καναλιού στον τομέα καθυστέρησης-Doppler είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό σε πολλά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένου του LTE. Έχει σημαντικές επιπτώσεις για την εκτίμηση καναλιών, την εξισορρόπηση και την παρακολούθηση στην επεξεργασία του δέκτη.

Να σημειώσουμε ότι η εξίσωση (1) μπορεί να γραφτεί ως γραμμικός τελεστής Πh(·), από τη παλμική απάντηση με είσοδο το s(t) και απάντηση το r(t).

(2)

Η σχέση στην εξίσωση (1), η οποία περιγράφει την επίδραση του καναλιού στο μεταδιδόμενο σήμα, μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας τελεστής Πh που δρα στο σήμα s(t). Αυτή η αναπαράσταση ονομάζεται μετασχηματισμός Heisenberg στα μαθηματικά. Στη διαμόρφωση OTFS, ένας μετασχηματισμός Heisenberg εφαρμόζεται επίσης στα μεταδιδόμενα σύμβολα, με αποτέλεσμα έναν καταρράκτη δύο μετασχηματισμών Heisenberg στο λαμβανόμενο σήμα - ο ένας αντιστοιχεί στη διαμόρφωση OTFS και ο άλλος στο κανάλι. Εφαρμόζοντας έναν ισοσταθμιστή στην περιοχή καθυστέρησης-Doppler σε αυτή τη δομή του λαμβανόμενου σήματος, μπορεί να εξαχθεί η πλήρης ποικιλομορφία του καναλιού, με αποτέλεσμα ένα σχεδόν σταθερό κέρδος σε καθένα από τα μεταδιδόμενα σύμβολα και έναν απλό μηχανισμό για την ανάκτησή τους.

## Διαμόρφωση OTFS

Το σχήμα διαμόρφωσης OTFS περιλαμβάνει μια σειρά από δισδιάστατους μετασχηματισμούς στον πομπό και τον δέκτη. Αρχικά, ο πομπός αντιστοιχίζει τα σύμβολα πληροφοριών, τα οποία βρίσκονται στο δισδιάστατο πεδίο καθυστέρησης-Doppler, σε σύμβολα στον τομέα χρόνου-συχνότητας χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό αντίστροφου συμπλεκτικού μετασχηματισμού Fourier και παραθύρου. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται μετασχηματισμός OTFS. Στη συνέχεια, ο μετασχηματισμός Heisenberg εφαρμόζεται για τη μετατροπή του διαμορφωμένου σήματος συχνότητας χρόνου στο σήμα πεδίου χρόνου για μετάδοση μέσω του καναλιού. Στον δέκτη, εκτελούνται οι αντίστροφες λειτουργίες για την ανάκτηση των μεταδιδόμενων συμβόλων. Το λαμβανόμενο σήμα χρόνου μετασχηματίζεται πρώτα στο πεδίο χρόνου-συχνότητας χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Wigner, ο οποίος είναι το αντίστροφο του μετασχηματισμού Heisenberg. Τέλος, το λαμβανόμενο σήμα μετασχηματίζεται στην περιοχή καθυστέρησης-Doppler για αποδιαμόρφωση συμβόλων. Στις επόμενες ενότητες, θα συζητήσουμε τις συνιστώσες και τις γενικές ιδιότητες της διαμόρφωσης χρόνου-συχνότητας, τη συγκεκριμένη διαμόρφωση χρόνου-συχνότητας του OTFS και την επίδραση του καναλιού στα μεταδιδόμενα σύμβολα OTFS.

### Διαμόρφωση χρόνου – συχνότητας

Η διαμόρφωση χρόνου – συχνότητας έχει τα ακόλουθα στοιχεία:

* Ένα πλέγμα ή πλέγμα Λ στο πεδίο χρόνου-συχνότητας είναι ένα σύνολο σημείων που είναι ομοιόμορφα τοποθετημένα κατά μήκος των αξόνων χρόνου και συχνότητας, με τα διαστήματα απόστασης να αντιπροσωπεύονται από T και Δf, αντίστοιχα.

(3)

* Ένα πακέτο ριπής με συνολική διάρκεια NT δευτερόλεπτα και συνολικό εύρος ζώνης M ∆f Hz.
* Ένα σύνολο διαμορφωμένων συμβόλων X[n, m], n = 0, . . . , N − 1,   
  m = 0, . . . , M − 1 που θέλουμε να μεταδώσουμε σε μια δεδομένη ριπή πακέτου.
* Ένας παλμός εκπομπής, gtx(t), και ο αντίστοιχος παλμός λήψης, grx(t), θεωρούνται διορθογώνιοι εάν το εσωτερικό τους γινόμενο είναι αμετάβλητο στις μεταφράσεις σε χρόνο και συχνότητα, με τα διαστήματα των T και Δf αντίστοιχα.

(4)

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η ιδιότητα των σχημάτων παλμών να είναι διορθογώνια, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (4), είναι αυτή που επιτρέπει την εξάλειψη των παρεμβολών μεταξύ των συμβόλων κατά τη λήψη. Ένας διαμορφωτής χρόνου-συχνότητας που χρησιμοποιεί αυτά τα στοιχεία αντιστοιχίζει τα δισδιάστατα σύμβολα X[n, m] που βρίσκονται στο πλέγμα Λ σε μια μεταδιδόμενη κυματομορφή s(t) υπερθέτοντας λειτουργίες καθυστέρησης και διαμόρφωσης στην κυματομορφή παλμού gtx(t).

Η διαδικασία που περιγράφεται στο (5) ονομάζεται μετασχηματισμός Heisenberg του X[n, m]. Αυτή η τεχνική διαμόρφωσης είναι μια γενίκευση του μετασχηματισμού OFDM, ο οποίος αντιστοιχίζει διαμορφωμένα σύμβολα στον τομέα συχνότητας στο μεταδιδόμενο σήμα στο πεδίο χρόνου σε κάθε υποφορέα. Παρόμοια με τη λειτουργία καναλιού (1) που ερμηνεύεται ως τελεστής Heisenberg (2) που εφαρμόζεται στο μεταδιδόμενο σήμα s(t), η διαμόρφωση που περιγράφεται στο (5) μπορεί επίσης να ερμηνευτεί ως τελεστής Heisenberg ΠX(·) με παραμέτρους X[n, m] που εφαρμόζεται στο σχήμα παλμού gtx(t). Η διορθογώνια ιδιότητα των σχημάτων παλμών στο (4) εξαλείφει την παρεμβολή σταυροσυμβόλων κατά τη λήψη συμβόλων, η οποία θα συζητηθεί στην επόμενη υποενότητα.

(6)

Η ερμηνεία του τελεστή Heisenberg είναι χρήσιμη όταν εξετάζουμε το λαμβανόμενο σήμα, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός δύο τελεστών Heisenberg - ο ένας αντιστοιχεί στον διαμορφωτή και ο άλλος στο κανάλι. Δηλώνει ότι όταν δύο τελεστές Heisenberg, παραμετροποιημένοι από h1 και h2, εφαρμόζονται διαδοχικά σε μια κυματομορφή g(t), η προκύπτουσα έξοδος μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας απλός τελεστής Heisenberg που εφαρμόζεται στο g(t) με μια παράμετρο ίση με τη συνέλιξη του h1 και του h2. Ο απευθείας υπολογισμός μας δίνει:

(7)

Όπου το h(τ, ν) = h2(τ, ν)∗σ h1(τ, ν) είναι η στρεβλωμένη συνέλιξη των h1(τ, ν), h2(τ, ν), που ορίζεται ως:

(8)

Έπειτα εφαρμόζουμε το παραπάνω αποτέλεσμα στους τελεστές (6), (1) και προκύπτει το λαμβανόμενο σήμα

(9)

Όπου:

* **v(t)**: προσθετικός θόρυβος στην είσοδο του δέκτη
* **f(τ, ν)**: παλμική απόκριση του συνδυασμένου μετασχηματισμού που δίνεται από τη διακριτή στριμμένη συνέλιξη των X[n, m] και h(τ, ν):

(10)

Στην επόμενη υπό-ενότητα θα εξετάσουμε τα βήματα της επεξεργασίας στον παραλήπτη.

### Λήψη σημάτων διαμορφωμένης χρονικής συχνότητας: Επαρκής Στατιστικά στοιχεία και παραμόρφωση καναλιών

Για να ανιχνεύσει σύμβολα από το λαμβανόμενο σήμα, το αντίστοιχο φίλτρο χρησιμοποιεί παλμούς παραμορφωμένους από το κανάλι που μεταφέρουν πληροφορίες (υποθέτοντας ότι υπάρχει λευκός Gaussian θόρυβος στο κανάλι). Το φίλτρο υπολογίζει τη συνάρτηση διασταυρούμενης ασάφειας Agrx,r(τ, ν) υπολογίζοντας πρώτα το εσωτερικό γινόμενο του λαμβανόμενου σήματος με ένα αντίγραφο του παλμού εκπομπής με αντιστροφή χρόνου και συζευγμένο με συχνότητα:

(11)

Αυτή η συνάρτηση, όταν γίνεται δειγματοληψία στο πλέγμα Λ, δηλ. στο τ = nT και στο   
ν = m∆f, αποδίδει την αντίστοιχη έξοδο φίλτρου:

(12)

Η μαθηματική πράξη που περιγράφεται στην εξίσωση (12) είναι γνωστή ως μετασχηματισμός Wigner. Είναι η αντίστροφη λειτουργία του μετασχηματισμού Heisenberg που περιγράφεται στην εξίσωση (5) και χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των διαμορφωμένων συμβόλων από το λαμβανόμενο σήμα. Αυτό είναι παρόμοιο με το πώς χρησιμοποιείται ο αντίστροφος μετασχηματισμός OFDM για την εξαγωγή διαμορφωμένων συμβόλων από το λαμβανόμενο σήμα OFDM.

Ο στόχος είναι να βρεθεί η σύνδεση μεταξύ της εξόδου Y[n, m] του αντίστοιχου φίλτρου και της εισόδου X[n, m] στον πομπό. Όπως έχουμε δει προηγουμένως στο (9), η είσοδος r(t) στο φίλτρο αντιστοίχισης μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας τελεστής Heisenberg Πf(gtx(t)), ο οποίος εξαρτάται από την απόκριση παλμού f(τ, ν) και δρα σε το σχήμα παλμού grx(t) μαζί με το θόρυβο. Η έξοδος του φίλτρου αντιστοίχισης είναι:

(13)

Ο πρώτος όρος στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης είναι η έξοδος του αντιστοιχισμένου φίλτρου χωρίς θόρυβο, ενώ ο τελευταίος όρος είναι η συμβολή θορύβου, που συμβολίζεται ως V(τ, ν) = Agrx,v(τ, ν). Με άμεσο υπολογισμό, μπορούμε να δούμε ότι ο πρώτος όρος μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια στραμμένη συνέλιξη μεταξύ της δισδιάστατης παλμικής απόκρισης

f(τ, ν) και της συνάρτησης Agrx,gtx(τ, ν) όπως βλέπουμε παρακάτω.

(14)

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (10) στη (14) και με τη χρήση της (13) οδηγούμαστε στην από άκρη σε άκρη περιγραφή του καναλιού από τον τύπο:

(15)

Στην εργασία [3], εξηγείται ότι όταν το κανάλι είναι ιδανικό, η αντίστοιχη έξοδος φίλτρου μπορεί να ανακτήσει τέλεια τα μεταδιδόμενα σύμβολα, μαζί με τον θόρυβο. Αλλά στην περίπτωση ενός πιο γενικού καναλιού, μπορεί να μην είναι δυνατή η τέλεια ανάκτηση των μεταδιδόμενων συμβόλων. Ωστόσο, το δεύτερο θεώρημα στο έγγραφο δηλώνει ότι εάν το κανάλι έχει πεπερασμένη υποστήριξη και πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις, τότε η αντίστοιχη έξοδος φίλτρου μπορεί να ανακτήσει τα μεταδιδόμενα σύμβολα, αλλά με τη βοήθεια της απόκρισης συχνότητας καναλιού H[n, m] .

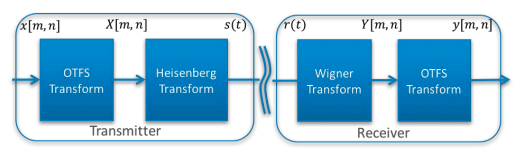
(16)

Όταν η αντίστοιχη έξοδος φίλτρου δίνεται από το Y[n, m] = H[n, m]X[n, m], δεν υπάρχει παρεμβολή από άλλα σύμβολα στο μεταδιδόμενο σύμβολο X[n, m] τη συγκεκριμένη στιγμή και συχνότητα. Αυτό σημαίνει ότι το λαμβανόμενο σύμβολο είναι το ίδιο με το σύμβολο που εκπέμπεται εκτός από έναν σύνθετο παράγοντα κλίμακας H[n, m]. Αυτό είναι παρόμοιο με αυτό που συμβαίνει με το OFDM όταν μεταδίδεται μέσω ενός αμετάβλητου ως προς τη συχνότητα καναλιού εξασθένησης. Ωστόσο, εάν η συνάρτηση ασάφειας είναι περίπου διορθογώνια στη γειτονιά του (T, Δf), τότε θα υπάρχει κάποια ελάχιστη παρεμβολή από άλλα σύμβολα.

Η διορθογωνικότητα, ή η έλλειψή της, και η υπολειπόμενη παρεμβολή διασταυρούμενων συμβόλων εξαρτώνται από τους παλμούς εκπομπής και λήψης gtx και grx. Το ξεθώριασμα H[n, m] που βιώνει κάθε σύμβολο X[n, m] είναι μια περίπλοκη έκφραση που είναι μια σταθμισμένη υπέρθεση εκθετικών. Στην επόμενη ενότητα, θα περιγραφούν οι συγκεκριμένοι μετασχηματισμοί που σχετίζονται με το OTFS ως διαμόρφωση χρόνου-συχνότητας, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου με τον οποίο αυτοί οι μετασχηματισμοί οδηγούν σε σταθερά κέρδη καναλιού για κάθε σύμβολο πληροφοριών.

### Διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση OTFS

Στο πλαίσιο της διαμόρφωσης και της αποδιαμόρφωσης OTFS, ο Συμβολικός Πεπερασμένος Μετασχηματισμός Fourier (SFFT) είναι μια τροποποιημένη έκδοση του μετασχηματισμού Fourier. Το SFFT ορίζεται ως ένας γραμμικός μετασχηματισμός που αντιστοιχίζει μια ακολουθία μιγαδικών αριθμών σε μια άλλη ακολουθία μιγαδικών αριθμών. Χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της αναπαράστασης τομέα χρόνου ενός σήματος στην αναπαράσταση του τομέα συχνότητας, αλλά σε αντίθεση με τον τυπικό μετασχηματισμό Fourier, περιλαμβάνει επίσης μια μετατόπιση συχνότητας στο μετασχηματισμό.



Εικόνα 3: Διάγραμμα μπλοκ διαμόρφωσης OTFS Πομπός και δέκτης.

Το SFFT ορίζεται χρησιμοποιώντας έναν συγκεκριμένο πίνακα που ονομάζεται συμπλεκτικός πίνακας και έχει ορισμένες ιδιότητες που το καθιστούν χρήσιμο για διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση OTFS. Μία από αυτές τις ιδιότητες είναι ότι το SFFT έχει σχεδόν σταθερό κέρδος καναλιού στα σύμβολα, πράγμα που σημαίνει ότι το φαινόμενο εξασθένισης που προκαλείται από το κανάλι σε κάθε σύμβολο είναι σχεδόν το ίδιο. Αυτό συμβαίνει επειδή το SFFT έχει μια ειδική δομή που του επιτρέπει να μετριάσει τη διασπορά χρόνου-συχνότητας που προκαλείται από το κανάλι. Χρησιμοποιώντας το SFFT στη διαμόρφωση και την αποδιαμόρφωση OTFS, μπορούμε να επιτύχουμε καλύτερη απόδοση σε δύσκολα ασύρματα περιβάλλοντα με κανάλια διακοπής που μεταβάλλονται χρονικά και επιλεκτικά στη συχνότητα.

Στην εργασία [2] δηλώνει το Xp[n, m] ως τη περιοδική έκφραση του X[n, m] με περίοδο (N,M). Η SFFT μετατροπή του Xp[n, m] γράφεται ως xp(k, l) = SFFT(Xp[n, m]) για

(17)

Η αντίστροφή μετατροπή είναι Xp[n, m] = SFFT−1(x[k, l]) για

(18)

Όπου l = 0, . . . , M − 1, k = 0, . . . , N – 1. Αν η υποστήριξη του X[n, m] είναι περιορισμένη στον χρόνο και στη συχνότητα στο Z0 = {(n, m); 0 ≤ m ≤ M − 1, 0 ≤ n ≤ N − 1} τότε Xp[n, m] = X[n, m] for (n, m) ∈ Z0 και η αντίστροφή μετατροπή (18) ανακτεί το αρχικό σήμα X[n, m]. Για τα X1[n, m], X2[n, m] οι περιοδικές 2D ακολουθίες με περίοδο (M, N) είναι,

(19)

Το σύμβολο ⊛ αντιπροσωπεύει την κυκλική συνέλιξη σε δύο διαστάσεις, η οποία είναι συγκρίσιμη με το πώς λειτουργεί ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier με τη συνέλιξη. Με αυτήν την υπό ενότητα, μπορούμε τώρα να εισαγάγουμε την έννοια του OTFS ως τεχνική διαμόρφωσης στον τομέα της συχνότητας χρόνου που περιλαμβάνει ένα επιπλέον στάδιο προ επεξεργασίας.

* **OTFS Διαμόρφωση**: Ας εξετάσουμε μια ομάδα συμβόλων QAM που είναι οργανωμένα σε μορφή πλέγματος 2D που συμβολίζεται ως x[k, l], όπου το k κυμαίνεται από 0 έως N-1 και το l κυμαίνεται από 0 έως M-1. Ο στόχος μας είναι να μεταδώσουμε αυτά τα σύμβολα χρησιμοποιώντας ένα σύστημα διαμόρφωσης χρόνου-συχνότητας που ορίζεται από το πλέγμα, τη ριπή πακέτων και τους διορθογώνιους παλμούς εκπομπής και λήψης που αναφέρονται στην Ενότητα III-A. Το OTFS, εκτός από αυτά τα στοιχεία, χρησιμοποιεί μια τετράγωνη συνάρτηση αθροίσματος που ονομάζεται μετάδοση με παράθυρα Wtx[n, m] που πολλαπλασιάζει τα σύμβολα διαμόρφωσης στον τομέα χρόνου-συχνότητας. Δεδομένων όλων αυτών των στοιχείων, μπορούμε να ορίσουμε τα διαμορφωμένα σύμβολα στο OTFS ως εξής:

(20)

Το μεταδιδόμενο σήμα s(t) προκύπτει με την εφαρμογή του μετασχηματισμού Heisenberg που ορίζεται στην εξίσωση (6) στη συνάρτηση gtx(t) πολλαπλασιαζόμενη με το γινόμενο των συμβόλων διαμόρφωσης που συμβολίζονται με X. Ο μετασχηματισμός Heisenberg με λειτουργία παραθύρου ονομάζεται μετασχηματισμός OTFS , και περιλαμβάνει έναν αντίστροφο συμπλεκτικό μετασχηματισμό. Η δεύτερη εξίσωση στη δήλωση εξηγεί πώς χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Heisenberg του gtx(t) χρησιμοποιώντας τα σύμβολα X[n, m] για να ληφθεί το μεταδιδόμενο σήμα s(t). Η διαμόρφωση OTFS επιτυγχάνεται με συνδυασμό αυτών των δύο μετασχηματισμών, όπως φαίνεται στα μπλοκ πομπού στο Εικόνα 3. Στη διαδικασία αποδιαμόρφωσης OTFS, χρησιμοποιείται μια διαφορετική αναπαράσταση που βασίζεται σε συναρτήσεις βάσης και συζητείται παρακάτω.

(21)

Η εξίσωση (21) υπονοεί ότι κάθε σύμβολο πληροφοριών x[k, l] πολλαπλασιάζεται με μια δισδιάστατη συνάρτηση βάσης bk,l[n, m] στον τομέα χρόνου-συχνότητας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διαμόρφωσης.

* **OTFS Αποδιαμόρφωση**: Υποθέτοντας ότι ο παραλήπτης χρησιμοποιεί μια συνάρτηση με τετραγωνικό αθροιστικό παράθυρο λήψης που συμβολίζεται ως Wrx[n,m], η διαδικασία αποδιαμόρφωσης περιλαμβάνει τις επόμενες διαδικασίες:
  1. Η εκτέλεση του μετασχηματισμού Wigner στο λαμβανόμενο σήμα παράγει

(22)

* 1. Χρησιμοποιήστε τη συνάρτηση παραθύρου Wrx[n, m] για να την εφαρμόσετε στη συνάρτηση χρόνου-συχνότητας Y[n,m], το αποτέλεσμα είναι η τροποποιημένη συνάρτηση YW[n,m]. Στη συνέχεια, εκτελέστε περιοδικότητα στο ληφθέν αποτέλεσμα για να δημιουργήσετε το περιοδικό (N, M) σήμα που συμβολίζεται ως Yp[n, m]:

(23)

* 1. Χρησιμοποιήστε τον συμπλεκτικό μετασχηματισμό Fourier στην περιοδική ακολουθία που συμβολίζεται ως Yp[n, m]:

(24)

* 1. Το τελικό βήμα μπορεί να γίνει κατανοητό ως προβολή των συμβόλων διαμόρφωσης χρόνου-συχνότητας στις δισδιάστατες ορθογώνιες συναρτήσεις βάσης που αντιπροσωπεύονται από bk,l(n, m) με τον ακόλουθο τρόπο:

(25)

Σύμφωνα με τα ευρήματα που παρουσιάζονται, η εκτιμώμενη ακολουθία x̂[k, l] των συμβόλων πληροφοριών, που αποκτάται μέσω αποδιαμόρφωσης, μπορεί να εκφραστεί ως η δισδιάστατη περιοδική συνέλιξη της ακολουθίας QAM εισόδου x[n, m] και μια διακριτική έκδοση της απόκρισης παλμών με παράθυρο που δηλώνεται ως hw(·):

(26)

Όπου,

(27)

To hw(ν′,τ′), αντιπροσωπεύει την κυκλική συνέλιξη της απόκρισης του καναλιού με μια συνάρτηση παραθύρου:

(28)

Στην εξίσωση (28), η συνάρτηση παραθύρου w(τ, ν) αντιστοιχεί στον συμπλεκτικό διακριτό μετασχηματισμό Fourier (SDFT) του παραθύρου χρονικής συχνότητας W[n, m], ο οποίος ορίζεται ως:

(29)

Λαμβάνοντας υπόψη το W[n, m] = Wtx[n, m] \* Wrx[n, m], όπου το W[n, m] αντιπροσωπεύει το γινόμενο των παραθύρων εκπομπής και λήψης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι καθώς το παράθυρο W[n, m] επεκτείνει την κάλυψή του ως προς το χρόνο και τη συχνότητα, η hw(·, ·) προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την απόκριση παλμού καναλιού h(·, ·).

Παρατηρώντας την εξίσωση (26), μπορούμε να συμπεράνουμε ότι μέσα σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο, κάθε αποδιαμορφωμένο σύμβολο x̂[l, k], όπου τα l και k είναι σταθερά, συναντά το ίδιο κέρδος καναλιού hw(0, 0) σε σχέση με το μεταδιδόμενο σύμβολο x[l, k]. Επιπλέον, η παρουσία διασταυρούμενων συμβόλων μειώνεται σημαντικά εάν

(30)

Η εκπλήρωση αυτής της συνθήκης βασίζεται στην καθυστέρηση του καναλιού και στην εξάπλωση Doppler, καθώς και στη σχεδίαση του παραθύρου. Για την εξαγωγή της πλήρους ποικιλομορφίας καναλιών, χρησιμοποιείται ένας ισοσταθμιστής στον δέκτη. Διάφορες αρχιτεκτονικές εξισορρόπησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό, και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης που παρουσιάζονται παρακάτω, χρησιμοποιείται εξισορρόπηση turbo.

# Διαμόρφωση στα ασύρματα 5G δίκτυα και στα νεότερα συστήματα

## Εισαγωγή

Ο αυξανόμενος αριθμός χρηστών κινητής τηλεφωνίας και η απαίτησή τους για εφαρμογές δεδομένων υψηλής ταχύτητας έχει οδηγήσει στην εξέλιξη των ασύρματων προτύπων. Από τα 2G σε 3G και 4G, κάθε γενιά έχει βελτιώσει σημαντικά τη φασματική απόδοση, επιτρέποντας την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών. Τα επερχόμενα δίκτυα 5G, που πλέον είναι διαθέσιμα στοχεύουν στην εκπλήρωση τρισδιάστατων στόχων που έχει θέσει η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU): βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση κινητής τηλεφωνίας (eMBB), μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής και εξαιρετικά αξιόπιστη χαμηλή λανθάνουσα επικοινωνία (uRLLC). Η επιτυχημένη εφαρμογή των δικτύων 5G αναμένεται να παρέχει απρόσκοπτη ασύρματη συνδεσιμότητα οποτεδήποτε και οπουδήποτε.

Ωστόσο, η επίτευξη των στόχων του 5G και των μελλοντικών ασύρματων συστημάτων είναι μια πρόκληση. Για να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση για επικοινωνία υψηλής ποιότητας και υψηλής ταχύτητας, ερευνητές και μηχανικοί στον ασύρματο τομέα έχουν εισαγάγει διάφορες έννοιες φυσικών επιπέδων όπως μαζική πολλαπλή έξοδος πολλαπλών εισόδων (MIMO), μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA), και διαμόρφωση δείκτη (IM). Αυτές οι έννοιες στοχεύουν στην ενίσχυση της φασματικής απόδοσης και της ενεργειακής απόδοσης των ασύρματων συστημάτων. Χρησιμοποιώντας αποτελεσματικά αυτές τις έννοιες, οι ερευνητές προσπαθούν να παρέχουν ταχύτερη και πιο αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία, διασφαλίζοντας παράλληλα τη βέλτιστη χρήση των πόρων.

Η τεχνολογία Massive-MIMO έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για την επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης (SE) και ενεργειακής απόδοσης (EE) σε ασύρματα συστήματα. Περιλαμβάνει τη χρήση μεγάλου αριθμού κεραιών στο σταθμό βάσης (BS) για την εξυπηρέτηση μικρότερου αριθμού χρηστών, συνήθως στην περιοχή των δεκάδων. Αυτή η διαμόρφωση οδηγεί σε σημαντικά κέρδη επεξεργασίας, με αποτέλεσμα βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα MIMO.

Ωστόσο, η πρακτική εφαρμογή του massive-MIMO θέτει προκλήσεις. Τόσο το BS όσο και το τερματικό χρήστη απαιτούν αποκλειστικούς πόρους επεξεργασίας σήματος, όπως αλυσίδες ραδιοσυχνοτήτων (RF), ενισχυτές ισχύος και κυκλώματα, για κάθε κεραία εκπομπής. Αυτό αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας και προσθέτει πολυπλοκότητα στην αρχιτεκτονική του πομπού. Επιπλέον, η αξιόπιστη ανίχνευση χωρικά πολυπλεξικών ροών πληροφοριών στον δέκτη καθίσταται κρίσιμη λόγω της παρουσίας ενδοκαναλικών παρεμβολών, οι οποίες αναφέρονται στις παρεμβολές που προκαλούνται από πολλαπλές ροές που μεταδίδονται από τις κεραίες του ίδιου χρήστη ή BS. Η υπέρβαση αυτών των προκλήσεων είναι απαραίτητη για την υλοποίηση του οράματος της εξαιρετικά αξιόπιστης επικοινωνίας χαμηλής καθυστέρησης (uRLLC) σε μαζικά συστήματα MIMO.

Από την άλλη πλευρά, η Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) είναι μια άλλη τεχνική που στοχεύει στη βελτίωση της φασματικής απόδοσης (SE) των ασύρματων συστημάτων χαλαρώνοντας την απαίτηση ορθογωνικότητας των πόρων σε πολλαπλή πρόσβαση. Σε αντίθεση με την ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (OMA), όπου σε κάθε χρήστη εκχωρούνται χωριστοί ορθογώνιοι πόροι, το NOMA επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται τους ίδιους πόρους χρόνου και συχνότητας για να μεταδίδουν ανεξάρτητες ροές πληροφοριών ταυτόχρονα.

Το NOMA μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ευρέως σε δύο τύπους: τομέας κώδικα NOMA (CD-NOMA) και τομέας ισχύος NOMA (PD-NOMA). Μεταξύ αυτών, το PD-NOMA έχει συγκεντρώσει σημαντικό ενδιαφέρον από ερευνητές λόγω των πιθανών εφαρμογών του σε συστήματα πέρα από 5G (B5G). Στο PD-NOMA, οι πληροφορίες από πολλούς χρήστες συνδυάζονται στον πομπό με διαφορετικά επίπεδα ισχύος ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού κάθε χρήστη.

Ωστόσο, στην πλευρά του δέκτη, οι χρήστες χρησιμοποιούν μια τεχνική που ονομάζεται διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (SIC) για να αποκωδικοποιήσουν τις αντίστοιχες ροές πληροφοριών τους. Το SIC είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει πρώτα την αποκωδικοποίηση του ισχυρότερου σήματος και την αφαίρεση του από το λαμβανόμενο σήμα για την αποκωδικοποίηση του ασθενέστερου σήματος. Ωστόσο, το SIC είναι επιρρεπές στη διάδοση σφαλμάτων, όπου τα σφάλματα στην αποκωδικοποίηση του ισχυρότερου σήματος μπορεί να επηρεάσουν την αποκωδικοποίηση των επόμενων ασθενέστερων σημάτων, οδηγώντας σε υποβάθμιση της απόδοσης.

Πρόσφατα, οι τεχνικές Διαμόρφωσης Δείκτη (IM) έχουν κερδίσει σημαντική προσοχή τόσο από ακαδημαϊκούς όσο και από βιομηχανικούς κύκλους. Αυτές οι τεχνικές προσφέρουν ελπιδοφόρες λύσεις για την επίτευξη φασματικής απόδοσης, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και απλοποιημένων αρχιτεκτονικών σχεδίων σε ασύρματα συστήματα. Οι προσεγγίσεις IM μετριάζουν την ανάγκη για αποκλειστικούς πόρους επεξεργασίας σήματος χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους πόρους, όπως κεραίες, υπο-φορείς στην Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM), χρονοθυρίδες και ακόμη και παρασιτικά στοιχεία όπως καθρέφτες RF, για την κωδικοποίηση πρόσθετων πληροφοριών.

Οι τεχνικές IM μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την ευρετηρίαση διαφορετικών πόρων. Μερικές από αυτές τις κατηγορίες περιλαμβάνουν:

1. Χωρική Διαμόρφωση (SM): Το SM χρησιμοποιεί τον χωρικό τομέα, όπου μεταφέρονται πρόσθετες πληροφορίες ενεργοποιώντας επιλεκτικά συγκεκριμένες κεραίες εκπομπής ενώ άλλες παραμένουν σε αδράνεια. Με την εκμετάλλευση των χωρικών διαστάσεων, το SM ενισχύει την ικανότητα μετάδοσης δεδομένων.
2. Γενικευμένη Χωρική Διαμόρφωση (GSM): Το GSM βασίζεται στο SM και επεκτείνει τις δυνατότητές του επιτρέποντας σε πολλαπλές κεραίες εκπομπής να είναι ενεργές ταυτόχρονα. Αυτό επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και βελτιωμένη φασματική απόδοση.
3. Πλήκτρο μετατόπισης διαστήματος (SSK): Το SSK χρησιμοποιεί τη μετατόπιση φάσης των ραδιοκυμάτων για την κωδικοποίηση πρόσθετων πληροφοριών. Ρυθμίζοντας τη φάση του μεταδιδόμενου σήματος, μπορούν να αναπαραστηθούν διαφορετικά σύμβολα, αυξάνοντας έτσι τη χωρητικότητα δεδομένων.
4. Διαμόρφωση δείκτη OFDM Sub-carrier Index (OFDM-IM): Το OFDM-IM αξιοποιεί τους υπο-φορείς σε ένα σύστημα OFDM για να μεταφέρει επιπλέον πληροφορίες. Με την επιλεκτική ενεργοποίηση συγκεκριμένων υπο-φορέων και τον συνδυασμό τους με παραδοσιακά σύμβολα δεδομένων, το OFDM-IM επιτυγχάνει βελτιωμένη φασματική απόδοση.
5. Διαμόρφωση βάσει μέσων (MBM): Το MBM εξερευνά μη συμβατικούς πόρους, όπως παρασιτικά στοιχεία όπως καθρέφτες ραδιοσυχνοτήτων, για να κωδικοποιήσει συμπληρωματικές πληροφορίες. Αυτοί οι αντισυμβατικοί πόροι χρησιμοποιούνται επιπλέον των συμβατικών πόρων για την αύξηση της συνολικής ικανότητας μετάδοσης.

Οι τεχνικές IM κωδικοποιούν επιπλέον bits πληροφοριών στους δείκτες των διαθέσιμων πόρων στον πομπό. Υπάρχουν δύο τύποι αντιστοιχίσεων: χαρτογράφηση ευρετηρίου και αντιστοίχιση συμβόλων. Η αντιστοίχιση ευρετηρίου εκχωρεί μερικά bit για την ενεργοποίηση συγκεκριμένων πόρων, σχηματίζοντας ένα μοτίβο ενεργοποίησης. Τα υπόλοιπα bits χρησιμοποιούνται για την επιλογή ενός σημείου αστερισμού από το αλφάβητο διαμόρφωσης. Αυτές οι συνδυασμένες πληροφορίες μεταδίδονται, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση συμβατικών δεδομένων που κωδικοποιούνται με διαμόρφωση και πρόσθετων πληροφοριών. Οι τεχνικές IM βελτιώνουν τη χρήση πόρων σε ασύρματα συστήματα, επιτρέποντας τη μετάδοση συμπληρωματικών πληροφοριών παράλληλα με τα συμβατικά δεδομένα. ()

Η έννοια του Index Modulation (IM) εισήχθη αρχικά ως Spatial Modulation (SM), όπου επιπλέον bits πληροφοριών κωδικοποιούνται κατά μήκος του δείκτη ενός μόνο ενεργού στοιχείου κεραίας. Αυτή η ενεργή κεραία χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πληροφοριών επιλέγοντας ένα σύμβολο από το συμβατικό αλφάβητο διαμόρφωσης. Η βελτίωση της φασματικής απόδοσης (SE) στο SM εξαρτάται από τον αριθμό των συνδυασμών της ενεργής κεραίας, ο οποίος αυξάνεται λογαριθμικά με τον αριθμό των κεραιών εκπομπής.

Ενώ το SM προσφέρει πλεονεκτήματα όπως η εξάλειψη των παρεμβολών μεταξύ των καναλιών, η απαίτηση μόνο μιας αλυσίδας ραδιοσυχνοτήτων (RF) και κανένας περιορισμός στον αριθμό των κεραιών λήψης, η SE του είναι περιορισμένη λόγω της χρήσης μόνο μιας ενεργής κεραίας. Για την ενσωμάτωση περισσότερων κομματιών πληροφοριών, εισήχθη η έννοια της Γενικευμένης Χωρικής Διαμόρφωσης (GSM), όπου μπορούν να είναι ενεργά πολλαπλά στοιχεία κεραίας. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερη SE καθώς αυξάνεται ο συνολικός αριθμός συνδυασμών ενεργών κεραιών. Ωστόσο, το GSM υποφέρει από παρεμβολές μεταξύ των καναλιών που προκαλούνται από πολλαπλές ενεργές κεραίες, καθιστώντας την αξιόπιστη ανίχνευση πληροφοριών δύσκολη και περίπλοκη.

Για την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας της ανίχνευσης σε SM και GSM, αναπτύχθηκε ένα απλούστερο σχήμα διαμόρφωσης που ονομάζεται Space Shift Keying (SSK). Στο SSK, μόνο μία κεραία είναι ενεργή, μεταδίδοντας το σύμβολο 1 αντί να επιλέγει ένα σύμβολο από το αλφάβητο διαμόρφωσης όπως στο SM και στο GSM. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη ανίχνευσης του μεταδιδόμενου συμβόλου από την ενεργή κεραία, με αποτέλεσμα ένα σχεδιασμό ανιχνευτή χαμηλής πολυπλοκότητας.

Μια άλλη τεχνική IM είναι η OFDM-IM, όπου η ευρετηρίαση εκτελείται μεταξύ των υπο-φορέων σε ένα σύστημα μετάδοσης Ορθογώνιας Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM). Ο μεγάλος αριθμός συνδυασμών ενεργών υπο-φορέων στο OFDM-IM επιτρέπει την αποτελεσματική μετάδοση πληροφοριών, χρησιμοποιώντας μόνο ένα υποσύνολο πιθανών συνδυασμών.

Πρόσφατα, το Media-Based Modulation (MBM) έχει προταθεί ως σχήμα IM. Στο MBM, πολλαπλοί καθρέφτες ραδιοσυχνοτήτων τοποθετούνται κοντά στην κεραία εκπομπής, δημιουργώντας διαφορετικές αντιλήψεις εξαφάνισης καναλιών για μετάδοση πληροφοριών. Η ευρετηρίαση σε MBM πραγματοποιείται με την ενεργοποίηση των κατόπτρων RF, προσφέροντας βελτιωμένη φασματική απόδοση σε σύγκριση με άλλες τεχνικές IM όπως SM, GSM και SSK.

A picture containing text, screenshot, diagram, font

Description automatically generated

Εικόνα 4: Χαρτογράφηση ευρετηρίου και συμβόλων.

Το IM σε συνδυασμό με το massive-MIMO έχει μεγάλες δυνατότητες για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης (SE) και της ενεργειακής απόδοσης (EE) σε μελλοντικά ασύρματα συστήματα. Προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη λύση για την επίτευξη επικοινωνίας χαμηλής κατανάλωσης και υψηλής αξιοπιστίας, που είναι σημαντικοί στόχοι σε ασύρματα συστήματα πέρα από 5G (B5G). Οι ερευνητές διερευνούν επίσης την έννοια του πολυδιάστατου IM (MIM), η οποία περιλαμβάνει το συνδυασμό πολλαπλών τεχνικών IM για τη μετάδοση μεγαλύτερης ποσότητας πληροφοριών μέσω πολλαπλής ευρετηρίασης.

Το MIM επεκτείνεται στην παραδοσιακή ιδέα IM ενσωματώνοντας πολλές τεχνικές IM μαζί. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση περισσότερων bits πληροφοριών μέσω πολλαπλών δεικτών, ξεπερνώντας τις δυνατότητες των συμβατικών IM. Αξιοποιώντας διαφορετικούς συνδυασμούς τεχνικών IM, το MIM ανοίγει νέες δυνατότητες για τη βελτίωση της απόδοσης και της αποτελεσματικότητας της επικοινωνίας. Επομένως, με βάση τους διαφορετικούς πιθανούς συνδυασμούς τεχνικών IM, το MIM μπορεί να ταξινομηθεί ως:

* Space-time IM (ST-IM);
* Διαμόρφωση που βασίζεται σε χωρικά διαμορφωμένα μέσα (SM-MBM).
* Γενικευμένη διαμόρφωση χωρικής διαμόρφωσης που βασίζεται σε μέσα (GSM-MBM).

Στα διάφορα σχήματα MIM που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα πρόσθετα bit πληροφοριών κωδικοποιούνται με την ταυτόχρονη ευρετηρίαση πολλών πόρων. Ένα τέτοιο σχήμα είναι το ST-IM, όπου η κεραία και οι χρονοθυρίδες ευρετηριάζονται μαζί, οδηγώντας σε αυξημένη αραιότητα στο διάνυσμα συμβόλων που εκπέμπεται. Ωστόσο, το ST-IM υποφέρει από χαμηλότερη φασματική απόδοση, καθώς χρησιμοποιεί πολλαπλές χρονοθυρίδες ενώ ενεργοποιεί μόνο ένα από αυτά.

A picture containing text

Description automatically generatedΔύο πολλά υποσχόμενες τεχνικές MIM είναι η SM-MBM και η GSM-MBM. Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούν ευρετηρίαση κεραίας και μοτίβα δραστηριότητας καθρέφτη ραδιοσυχνοτήτων για την κωδικοποίηση πληροφοριών. Προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις τόσο στην φασματική απόδοση όσο και στην αραιότητα στο διάνυσμα των μεταδιδόμενων συμβόλων. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα της διαδικασίας ανίχνευσης αυξάνεται σε αυτές τις τεχνικές MIM για να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση ρυθμού σφάλματος bit.

Εικόνα 5: Σχεδιασμός και απομάκρυνση ανιχνευτή.

Η ανίχνευση συμβόλων θέτει πρακτικές προκλήσεις στα συστήματα IM και MIM. Οι αλγόριθμοι ανίχνευσης περιλαμβάνουν δύο βασικά βήματα: την ανίχνευση των δεικτών που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση και την ανίχνευση των μεταδιδόμενων συμβόλων. Αυτά τα βήματα στη συνέχεια συνδυάζονται για να ληφθούν τα μεταδιδόμενα bits πληροφοριών μέσω απομάκρυνσης (Εικόνα 5). Σε αυτό το κεφάλαιο, εμβαθύνουμε στις λεπτομέρειες των σχημάτων ST-IM και SM-MBM, συμπεριλαμβανομένης της μαθηματικής τους διατύπωσης, και συζητάμε την ανίχνευση μέγιστης πιθανότητας (ML) για αυτά τα σχήματα.

## Μοντέλο Συστήματος

Σε αυτή την ενότητα, παρέχουμε μια σύντομη επισκόπηση των μαθηματικών εννοιών που σχετίζονται με το μαζικό σύστημα MIMO. Η κατανόηση αυτών των εννοιών είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου για συστήματα IM massive-MIMO στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου. Συζητάμε επίσης το βέλτιστο σχήμα ανίχνευσης που ονομάζεται ανίχνευση μέγιστης πιθανότητας (ML), το οποίο χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των μεταδιδόμενων πληροφοριών από το λαμβανόμενο διάνυσμα συμβόλων.

Ας εξετάσουμε ένα μαζικό σύστημα MIMO που αποτελείται από χρήστες Κ, όπου κάθε χρήστης έχει κεραίες εκπομπής Nt και έναν σταθμό βάσης (BS) εξοπλισμένο με κεραίες λήψης Nr για να εξυπηρετεί αυτούς τους χρήστες. Συγκεκριμένα, εστιάζουμε στο σενάριο ανερχόμενης ζεύξης για να εισαγάγουμε διαφορετικά σχήματα IM και MIM σε αυτό το κεφάλαιο. Σε κάθε χρήση καναλιού, ο χρήστης i μεταδίδει ένα διάνυσμα συμβόλου xi στο BS. Κάθε στοιχείο x(i,k) του xi, όπου το k κυμαίνεται από 1 έως Nt, επιλέγεται από ένα αλφάβητο διαμόρφωσης που συμβολίζεται ως A (π.χ., A = {−1 − 1i, −1 + 1i, 1 − 1i, 1 + 1i} για 4-QAM). Το ασύρματο κανάλι μεταξύ του ith χρήστη και του BS αντιπροσωπεύεται από το Hi, το οποίο έχει διαστάσεις Nr × Nt όπως φαίνεται στo Εικ. 6. Σημειώστε ότι οι διαστάσεις της μήτρας καναλιών ενδέχεται να διαφέρουν ανάλογα με τα διαφορετικά σχήματα άμεσων μηνυμάτων που συζητούνται σε αυτό το κεφάλαιο. Με αυτές τις παραδοχές και εκτιμήσεις, μπορούμε να εκφράσουμε το λαμβανόμενο διάνυσμα y ως εξής:

(31)

όπου n είναι ο προσθετικός λευκός Gaussian θόρυβος (AWGN) στον δέκτη, με το καθένα

στοιχείο που έχει την Gaussian κατανομή με μέσο μηδέν και διακύμανση σ2. H συνάρτηση (31) μπορεί επίσης να γραφτεί ως:

(32)

Όπου H=[H1, H2,…,HK] και x=[x1T, x2T,…, xKT]T είναι ο σύνθετος πίνακας καναλιών και το διάνυσμα συμβόλων που εκπέμπεται, αντίστοιχα.

### Ανίχνευση μέγιστης πιθανότητας

Ο βέλτιστος τρόπος ανίχνευσης των μεταδιδόμενων πληροφοριών από το λαμβανόμενο διάνυσμα συμβόλων είναι η διεξαγωγή διεξοδικής αναζήτησης σε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς διανυσμάτων συμβόλων μετάδοσης.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι κάθε στοιχείο x(i,k) για i = 1, 2, ..., K και k = 1, 2, ..., το Nt επιλέγεται από ένα αλφάβητο διαμόρφωσης με μέγεθος ||, το σύνολο από όλους τους δυνατούς συνδυασμούς του σύνθετου διανύσματος συμβόλων που εκπέμπεται x αποτελείται από διανύσματα συμβόλων | | KNt. Επομένως, ο ανιχνευτής ML στοχεύει να βρει το καλύτερο διάνυσμα συμβόλων πραγματοποιώντας αναζήτηση σε αυτό το σύνολο από |A|^KNt πιθανών διανυσμάτων μετάδοσης χρησιμοποιώντας τη μέτρηση κόστους μέγιστης πιθανότητας (ML). Η μέτρηση κόστους ML δίνεται απόA diagram of a channel

Description automatically generated with medium confidence:

Εικόνα 6: Σύστημα Massive-MIMO.

(33)

και η λύση ML δίνεται από:

(34)

Αυτό μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω ως:

(35)

(36)

Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών αυξάνεται εκθετικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών και ο αριθμός των κεραιών ανά χρήστη. Αυτή η εκθετική ανάπτυξη θέτει μια σημαντική υπολογιστική πρόκληση, καθιστώντας την εφαρμογή της ανίχνευσης ML μη πρακτική.

## Τύποι Διαμόρφωσης Δείκτη

Σε αυτή την ενότητα, εμβαθύνουμε στις θεμελιώδεις αρχές των SM, GSM, SSK και MBM, παρέχοντας τις απαραίτητες μαθηματικές διατυπώσεις και τα μπλοκ διαγράμματα. Επιπλέον, παρουσιάζουμε τον κανόνα ανίχνευσης ML για καθένα από αυτά τα σχήματα άμεσων μηνυμάτων, ο οποίος επιτρέπει τη βέλτιστη ανίχνευση των μεταδιδόμενων πληροφοριών. Ξεκινάμε εξερευνώντας το σχήμα SM και στη συνέχεια εμβαθύνουμε στην εκτεταμένη παραλλαγή του, το σχήμα GSM. Στη συνέχεια, εξετάζουμε το σχήμα SSK, το οποίο είναι μια απλοποιημένη έκδοση του SM με μειωμένη πολυπλοκότητα. Τέλος, εισάγουμε το σχήμα MBM, μια τεχνική που προτάθηκε πρόσφατα, με συνοπτικό τρόπο.

### Χωρική Διαμόρφωση

Η χωρική διαμόρφωση (SM) είναι μια αρχική τεχνική IM που εστιάζει στην ευρετηρίαση μεταξύ των κεραιών, χρησιμοποιώντας τη χωρική διάσταση. Στο SM, μόνο μία κεραία είναι ενεργή ανά πάσα στιγμή, με αποτέλεσμα διάφορα μοτίβα ενεργοποίησης κεραίας. Κάθε μοτίβο αντιπροσωπεύει μια ξεχωριστή διαμόρφωση ενεργών κεραιών (Di Renzo et al., 2011). Οι πληροφορίες που θα κωδικοποιηθούν συσχετίζονται με το μοτίβο ενεργοποίησης της κεραίας επιλέγοντας το κατάλληλο μοτίβο με βάση τα εισερχόμενα bit δεδομένων. Αυτή η διαδικασία απεικονίζεται στο Σχ. 7, όπου ο χαρτογράφος ευρετηρίου συνδέεται με τον χαρτογράφο κεραίας. Ο χαρτογράφος κεραίας ελέγχει το διακόπτη μεταξύ της αλυσίδας RF και της επιλεγμένης κεραίας, επιτρέποντας τη μετάδοση επεξεργασμένων πληροφοριών που προέρχονται από τη χαρτογράφηση συμβόλων για τον συγκεκριμένο χρήστη.

Ας εξετάσουμε έναν πομπό με κεραίες Nt. Σε αυτήν την περίπτωση, ο αριθμός των πιθανών μοτίβων ενεργοποίησης κεραίας, όπου επιλέγεται μία κεραία από τις διαθέσιμες κεραίες Nt, μπορεί να υπολογιστεί ωςA diagram of a mapper

Description automatically generated with low confidence .

Εικόνα 7: Μπλοκ διάγραμμα πομπού για SM.

Κατά συνέπεια, ο αριθμός των bit που απαιτούνται για την αναπαράσταση αυτών των μοτίβων είναι όπου δηλώνει τη λειτουργία δαπέδου.

Μόλις επιλεγεί η ενεργή κεραία, επιλέγεται ένα σύμβολο από το αλφάβητο διαμόρφωσης χρησιμοποιώντας το log2 || bits και μεταδίδεται μέσω της ενεργής κεραίας. Η φασματική απόδοση (SE) του SM, μετρούμενη ως bit ανά χρήση καναλιού (bpcu), υποδεικνύει τον συνολικό αριθμό των bit που μπορεί να μεταδοθεί από έναν μεμονωμένο χρήστη σε ένα σύστημα με K χρήστες. Ο συνολικός αριθμός των bit που μπορεί να μεταδοθεί από έναν μόνο χρήστη στο σύστημα χρήστη K δίνεται από:

(37)

Αυτά τα bit ηSM μπορούν να μεταφερθούν μέσω του διανύσματος συμβόλων που μεταδίδεται από τον χρήστη, ας πούμε ο ith χρήστης, το οποίο μπορεί να γραφτεί ως:

όπου η kth κεραία είναι ενεργή η οποία μεταδίδει ένα σύμβολο x(i,k) ∈ A. Ομοίως, κάθε χρήστης αντιστοιχίζει τα εισερχόμενα bits πληροφοριών σε ένα διάνυσμα εκπομπής για τη μεταφορά της πληροφορίας στο BS. Το διάνυσμα συμβόλων που λαμβάνεται στο BS μπορεί να γραφτεί ως:

που ξαναγράφεται ως

(38)

όπου το k διαφέρει για κάθε i ανάλογα με τις εισερχόμενες πληροφορίες. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ένα σύστημα με έναν χρήστη που έχει Nt = 4 και χρησιμοποιώντας διαμόρφωση BPSK, το σύνολο όλων των πιθανών διανύσματος μετάδοσης δίνεται από:

Ως εκ τούτου, η χρήση της διαμόρφωσης χωρικής μετατόπισης (SM) μας επιτρέπει να επιτύχουμε φασματική απόδοση (ηSM) 3 bit ανά χρήση καναλιού (bpcu). Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να μεταδώσουμε 1 bit χρησιμοποιώντας ένα σύμβολο από τη διαμόρφωση Binary Phase Shift Keying (BPSK) και άλλα 2 bit χρησιμοποιώντας ένα μεμονωμένο μοτίβο δραστηριότητας.

### Γενικευμένη Χωρική Διαμόρφωση (GSM)

Η Χωρική Πολυπλεξία (SM), η πιο βασική μορφή σχημάτων Πολυπλεξίας Πληροφοριών (IM), αντιμετωπίζει περιορισμούς στη Φασματική Απόδοση (SE) λόγω της εξάρτησής της από μία μόνο ενεργή κεραία. Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα, το Global System for Mobile Communications (GSM), μια βελτιωμένη και πιο φασματικά αποδοτική έκδοση του SM, προτείνει την ενεργοποίηση πολλαπλών κεραιών για ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων. Ωστόσο, σε αντίθεση με τη μετάδοση MIMO που βασίζεται σε χωρική πολυπλεξία (Multiple-Input Multiple-Output), δεν είναι όλες οι κεραίες ενεργές στο GSM.

Η αυξημένη SE στο GSM έρχεται σε βάρος της αυξημένης αρχιτεκτονικής πολυπλοκότητας. Αυτή η πολυπλοκότητα προκύπτει από την αναγκαιότητα αποκλειστικών αλυσίδων ραδιοσυχνοτήτων (RF) για κάθε ενεργή κεραία, όπως φαίνεται στο Εικόνα 8. Στο GSM, ας υποθέσουμε ότι από τις συνολικές διαθέσιμες κεραίες Nt, οι κεραίες Na είναι ενεργές. Κατά συνέπεια, ο συνολικός αριθμός των πιθανών μοτίβων ενεργοποίησης κεραίας στο GSM είναι .

Ο αριθμός των bit που απαιτούνται για την επιλογή ενός από αυτά τα μοτίβα ενεργοποίησης μπορεί να υπολογιστεί ως

Επιπλέον, κάθε μια από τις ενεργές κεραίες Na στο GSM εκπέμπει ένα σύμβολο που επιλέγεται από το αλφάβητο διαμόρφωσης . Αυτή η μετάδοση έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά Na log2 || κομμάτια πληροφοριών. Επομένως, ο συνολικός αριθμός των bit πληροφοριών που μπορεί να μεταδοθεί από έναν μόνο χρήστη GSM είναι

(39)

που όπως παρατηρούμε είναι αρκετά μεγαλύτερο από το SM σχήμα. Στο GSM το διάνυσμα μετάδοσης αποτελείται από από μεγάλο αριθμό μη μηδενικών εισόδων και μπορεί να γραφτεί ως

Όπου,

* έχουν επιλεχθεί από το αλφάβητο
* είναι οι δείκτες των ενεργών κεραιών στον χρήστη i

Το λαμβανόμενο διάνυσμα συμβόλων στο BS μπορεί τώρα να γραφτεί ως

(40)

A picture containing text, diagram, screenshot, plan

Description automatically generated

Εικόνα 8: Μπλοκ διάγραμμα πομπού του GSM.

### Space Shift Keying και Generalized Space Shift Keying

Το SSK (Single-antenna Selection) και το GSSK (Group Single-antenna Selection) αντιπροσωπεύουν απλουστευμένες εκδόσεις του SM και του GSM, αντίστοιχα. Στο SSK, μόνο μία κεραία είναι ενεργή και δεν μεταδίδει σύμβολα από ένα συμβατικό αλφάβητο διαμόρφωσης. Αντίθετα, η ενεργή κεραία στο SSK μεταδίδει έναν μόνο τύπο συμβόλου, συγκεκριμένα το σύμβολο "1", ενώ όλες οι άλλες κεραίες παραμένουν ανενεργές. Εάν ο συνολικός αριθμός των κεραιών συμβολίζεται ως Nt, τότε ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών ενεργών κεραιών στο SSK είναι , το οποίο μπορεί να μεταφέρει bit ταυτόχρονα.

Από την άλλη πλευρά, το GSSK περιλαμβάνει την ενεργοποίηση πολλαπλών κεραιών, παρόμοια με το GSM, αλλά αυτές οι ενεργές κεραίες εκπέμπουν επίσης το σύμβολο "1" αποκλειστικά. Στο GSSK, εάν οι κεραίες Na είναι ενεργές, τότε ο συνολικός αριθμός πιθανών συνδυασμών ενεργών κεραιών είναι .

Κατά συνέπεια, ο αριθμός των bit που μπορούν να μεταφερθούν επιλέγοντας ένα μοτίβο δραστηριότητας στο GSSK είναι bit κάθε φορά. Το διάνυσμα συμβόλων μετάδοσης στο SSK μπορεί να γραφτεί ως

,

και το λαμβανόμενο διάνυσμα συμβόλων στο SSK δίνεται από

Ομοίως, το διάνυσμα μετάδοσης στο GSSK μπορεί να γραφτεί ως

,

και το λαμβανόμενο διάνυσμα συμβόλων είναι

### Media-Based Διαμόρφωση

Το MBM (Mirror-based Modulation) είναι ένα σύστημα Πολυπλεξίας Πληροφοριών (IM) που εισήχθη πρόσφατα και χρησιμοποιεί μια μοναδική μέθοδο ευρετηρίασης σε παρασιτικά στοιχεία, γνωστά ως καθρέφτες RF. Αυτοί οι καθρέφτες ραδιοσυχνοτήτων είναι στρατηγικά τοποθετημένοι κοντά στις κεραίες εκπομπής. Με την επιλεκτική ενεργοποίηση και απενεργοποίηση αυτών των κατόπτρων ραδιοσυχνοτήτων, δημιουργούνται διαφορετικά μοτίβα εξαφάνισης καναλιών σε ένα μακρινό πεδίο μέσα σε ένα περιβάλλον πλούσιο σε σκέδαση. Η δραστηριότητα μεταγωγής των κατόπτρων καθορίζεται με βάση τα εισερχόμενα bit πληροφοριών.

Μόλις επιλεγεί ένα μοτίβο μεταγωγής για μια συγκεκριμένη κεραία, αυτή η κεραία προχωρά στη μετάδοση ενός συμβόλου που επιλέγεται από το αλφάβητο διαμόρφωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η βασική διαφορά μεταξύ MBM και άλλων σχημάτων IM είναι ότι όλες οι κεραίες σε MBM συμμετέχουν στη μετάδοση πληροφοριών.

Εάν υπάρχουν καθρέφτες RF mrf τοποθετημένοι κοντά σε μια κεραία, παράγει πιθανά μοτίβα ενεργοποίησης/απενεργοποίησης 2 mrf. Κατά συνέπεια, η επιλογή ενός συγκεκριμένου σχεδίου απαιτεί bits πληροφοριών mrf, τα οποία αυξάνονται γραμμικά με τον αριθμό των κατόπτρων RF. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη λογαριθμική αύξηση της χωρητικότητας πληροφοριών που παρατηρείται σε SM και GSM σχετικά με τον συνολικό αριθμό των κεραιών. Επιπλέον, εκτός από τα bit mrf, κάθε κεραία εκπέμπει ένα σύμβολο, συμβάλλοντας ένα επιπλέον log2 || bits πληροφοριών στη συνολική μεταφερόμενη πληροφορία. Επομένως, η συνολική SE ανά κεραία σε όρους bpcu στο σχήμα MBM είναι

A picture containing text, diagram, line, parallel

Description automatically generated

Εικόνα 9: Μπλοκ διάγραμμα πομπού MBM.

## Πολυδιάστατη Διαμόρφωση Ευρετηρίου

Σε αυτήν την ενότητα, εξερευνούμε ένα βελτιωμένο σχήμα Πολλαπλής Πληροφοριών (IM) που ονομάζεται MIM (Multiple-IM Integration), το οποίο συνδυάζει πολλαπλά σχήματα IM για την επίτευξη υψηλότερης φασματικής απόδοσης (SE). Ξεκινάμε εξετάζοντας το χωροχρονικό σχήμα IM, το οποίο χρησιμεύει ως το θεμελιώδες συστατικό του MIM. Βασιζόμενοι σε αυτό, επεκτείνουμε περαιτέρω την ιδέα για να συμπεριλάβουμε το χωρικό σχήμα MBM (Mirror-based Modulation), το οποίο επιτυγχάνει σημαντικά υψηλότερη SE σε σύγκριση με άλλα σχήματα IM και ακόμη και άλλες διαμορφώσεις MIM.

### Space-Time IM

Στο σχήμα χωροχρόνου IM, διάφοροι πόροι όπως χρονοθυρίδες και κεραίες στον πομπό χρησιμοποιούνται για την ευρετηρίαση, εκτός από τη μετάδοση συμβόλων που επιλέγονται από το αλφάβητο διαμόρφωσης. Ας εξετάσουμε τη διαθεσιμότητα των χρονοθυρίδων T και των κεραιών Nt για σκοπούς ευρετηρίασης.

Ο συνολικός αριθμός των πιθανών μοτίβων δραστηριότητας χρονικής θυρίδας δίνεται από το και για κάθε μοτίβο δραστηριότητας χρονικής θυρίδας, υπάρχουν δυνατά μοτίβα δραστηριότητας κεραίας . Ως αποτέλεσμα, ο αριθμός των bit που μπορούν να μεταφερθούν με ευρετηρίαση μεταξύ των χρονικών θυρίδων είναι και ο αριθμός των bit που μεταφέρονται με την ευρετηρίαση στις κεραίες είναι Τώρα, όταν πρόκειται για τα εισερχόμενα bits πληροφοριών, χωρίζονται σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος χρησιμοποιείται για την επιλογή της επιθυμητής χρονοθυρίδας, το δεύτερο μέρος χρησιμοποιείται για την επιλογή μιας συγκεκριμένης κεραίας και το τρίτο μέρος χρησιμοποιείται για την επιλογή ενός συμβόλου από το αλφάβητο διαμόρφωσης για μετάδοση. Το SE σε χωροχρόνο IM σε όρους bpcu είναι

### Διαμόρφωση που βασίζεται σε χωρικά διαμορφωμένα μέσα

Το SM-MBM (Space Multiplexing-Mirror-based Modulation) είναι ένα καινοτόμο σχήμα MIM που συνδυάζει τις αρχές της Space Multiplexing (SM) και Mirror-based Modulation (MBM) για την επίτευξη βελτιωμένης φασματικής απόδοσης (SE) που ξεπερνά αυτή τόσο του SM όσο και του MBM. Στο σχήμα SM-MBM, χρησιμοποιούμε έναν πομπό εξοπλισμένο με πολλαπλές κεραίες, με κάθε κεραία να συνοδεύεται από πολλαπλούς καθρέφτες ραδιοσυχνοτήτων τοποθετημένους σε κοντινή απόσταση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.

A diagram of a radio control system

Description automatically generated with low confidence

Εικόνα 10: Μπλοκ διάγραμμα πομπού SM-MBM.

Το SM-MBM χρησιμοποιεί τη μετάδοση πληροφοριών μέσω τριών στοιχείων: το μοτίβο ενεργοποίησης των κεραιών, το μοτίβο ενεργοποίησης των κατόπτρων και το σύμβολο που επιλέγεται από το αλφάβητο διαμόρφωσης. Χρησιμοποιώντας αυτά τα στοιχεία, το SM-MBM μπορεί να μεταφέρει έναν συνολικό αριθμό bit πληροφοριών ίσο με , όπου το Nt αντιπροσωπεύει τον συνολικό αριθμό των κεραιών και το mrf υποδηλώνει τον αριθμό των κατόπτρων κοντά σε κάθε κεραία. Επιπλέον, log2 || bit μεταφέρονται μέσω της επιλογής και της μετάδοσης ενός συμβόλου από το αλφάβητο διαμόρφωσης . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συνολική SE του σχήματος SM-MBM ως

# Εξομοίωση, και υλοποίηση σε SDR

## Εισαγωγή

Στο πλαίσιο αυτής της διατριβής, διερευνούμε τις κρίσιμες πτυχές της εξομοίωσης και της υλοποίησης σε λογισμικό (SDR) με τη βοήθεια του MATLAB, ενός ισχυρού εργαλείου που χρησιμοποιείται ευρέως στον ακαδημαϊκό χώρο και τη βιομηχανία για εργασίες επεξεργασίας σήματος και προσομοίωσης. Η εστίασή μας επικεντρώνεται σε δύο βασικά σχήματα διαμόρφωσης: στο OTFS και στο OFDM.

Η ακρίβεια και η προσαρμοστικότητα της ασύρματης επικοινωνίας είναι απαραίτητες και το SDR χρησιμεύει ως ισχυρό εργαλείο σε αυτή την προσπάθεια. Σε αυτό το κεφάλαιο εμβαθύνουμε στην πρακτική σφαίρα της εξομοίωσης που βασίζεται σε SDR, προσφέροντας πληροφορίες για την προσομοίωση και την ανάλυση OTFS και OFDM εντός του περιβάλλοντος MATLAB, παρέχοντας έτσι μια ολοκληρωμένη κατανόηση αυτών των σχημάτων διαμόρφωσης στο πλαίσιο SDR. Αυτή η προσέγγιση ενισχύει τις ερευνητικές σας συνεισφορές αξιοποιώντας τις δυνατότητες του MATLAB για έρευνες που βασίζονται σε SDR.

## Εξομοιώσεις με OFDM

### Πρώτη εξομοίωση

Αρχικά για να ελέγξουμε την ορθή λειτουργία των κεραιών τις τοποθετήσαμε σε απόσταση 1.5-2 μέτρων μεταξύ πομπού δέκτη και παρατηρήσαμε ότι το σφάλμα είναι μηδενικό. Το κέρδος του πομπού και του δέκτη τέθηκε στα 40dB και η συχνότητα στο 1 GHz.





### Δεύτερη εξομοίωση

Για τη δεύτερη εξομοίωση αυξήσαμε τη συχνότητα σε 2.4 GHz και προσθέσαμε ένα σακίδιο σαν εμπόδιο. Το BER σε αυτή την περίπτωση είναι 7.0175e-04.



### Τρίτη εξομοίωση

Σε αυτή την εξομοίωση προσθέσαμε σαν εμπόδιο ένα κομμάτι αλουμινόχαρτο μπροστά από τις κεραίες του πομπού και δέκτη. Το BER σε αυτή τη περίπτωση είναι 0.0228.

A table with a computer and a chair

Description automatically generated

### Τέταρτη εξομοίωση

#### Με σκεδαστή

Σε αυτή την περίπτωση προσθέσαμε σκεδαστή ανάμεσα από τις κεραίες όπως βλέπουμε παρακάτω. Για σκεδαστή χρησιμοποιήσαμε ένα κομμάτι αλουμινόχαρτο. Η συχνότητα εκπομπής είναι 2.5GHz και το BER είναι ίσο με μηδέν.

A table with a computer on it

Description automatically generated

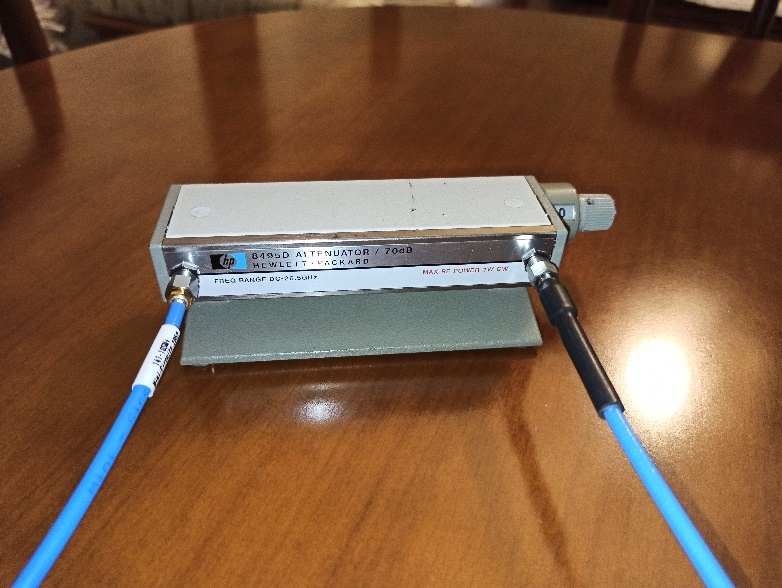
#### Χωρίς σκεδαστή

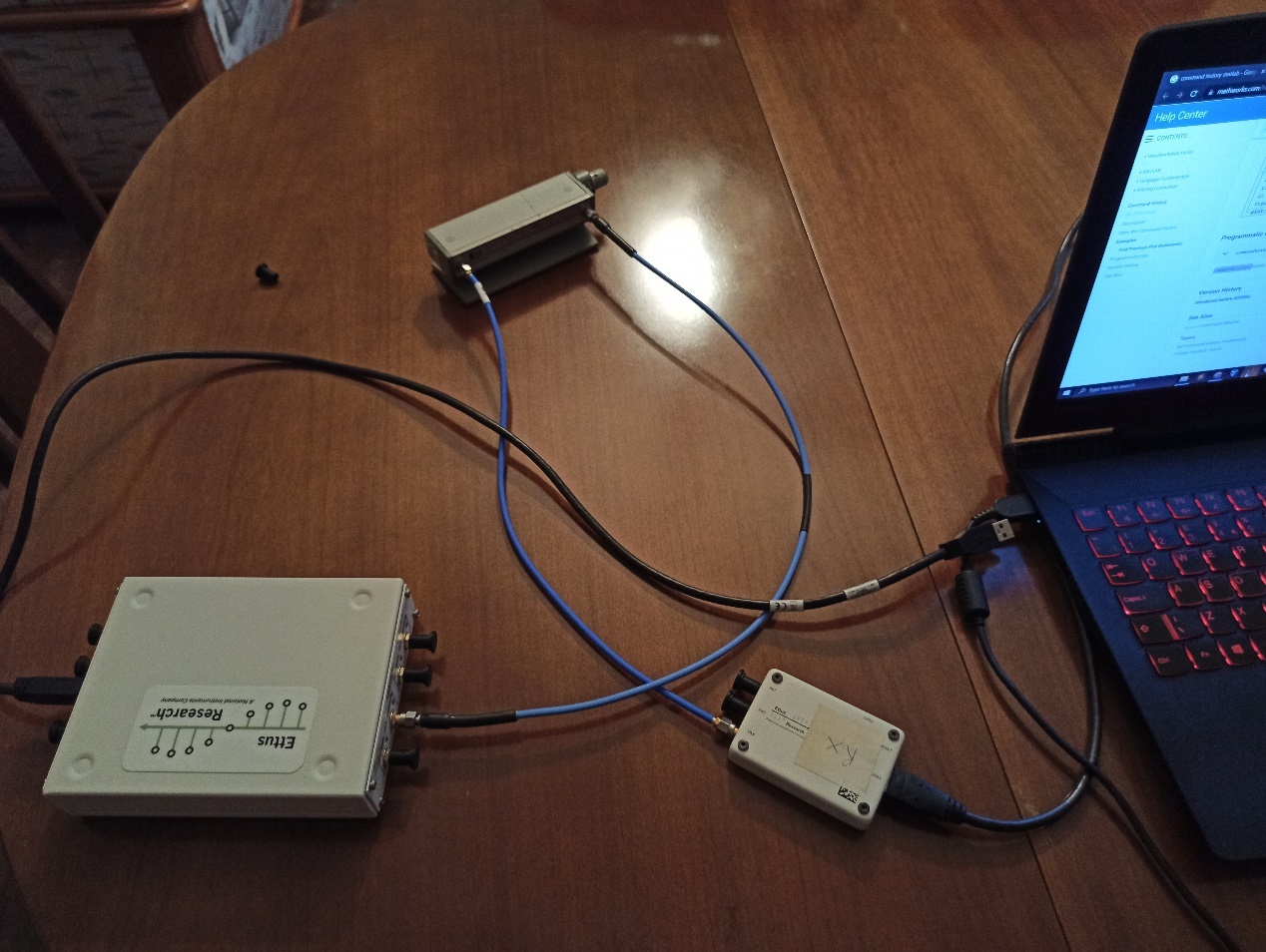
Έπειτα αφαιρέσαμε τον σκεδαστή και το BER έγινε 0.0391

A computer on a table

Description automatically generated

### Εξομοιώσεις με Attenuator

Με τη χρήση Attenuator κάναμε επιπλέον μετρήσεις με μείωση ισχύος 0 dB και 40 dB.

Αφαιρέσαμε τις κεραίες του πομπού και δέκτη, και συνδέσαμε τον attenuator.

#### Attenuator στα 0dB

Επιλέξαμε στον attenuator 0 dB loss και διακρίναμε τις περιπτώσεις που η κεραία πομπού έχει κέρδος 20 dB και 80 dB. Παρακάτω βλέπουμε και το αντίστοιχο διάγραμμα BER - Transmitter Gain από 20 έως 80 dB.

A graph with a red line

Description automatically generated

##### Κέρδος κεραίας πομπού 80 dB

Παρακάτω βλέπουμε το σήμα μας με κέρδος κεραίας πομπού στα 80 dB κατά την αποστολή και κατά την λήψη. Κατά την λήψη παρατηρούμε ότι το σήμα φτάνει στον πομπό συμπιεσμένο, αυτό συμβαίνει λόγω του υψηλού gain της κεραίας του πομπού.

A blue line graph with numbers

Description automatically generated

A blue line graph with numbers

Description automatically generated

A blue and white line graph

Description automatically generated

#### Attenuator στα 40dB

Έπειτα στον attenuator επιλέξαμε μείωση 40 dB. Παρακάτω βλέπουμε και το αντίστοιχο διάγραμμα BER - Transmitter Gain από 20 έως 60 dB. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνουμε το κέρδος της κεραίας του πομπού το σφάλμα μειώνεται.

A graph with a line

Description automatically generated

## Εξομοιώσεις με OTFS

### Εκπομπή pilot χωρίς Doppler

Αρχικά οι κεραίες τοποθετήθηκαν σε απόσταση 1-1.5 μέτρο χωρίς κάποιο εμπόδιο όπως βλέπουμε στην εικόνα παρακάτω.

A computer on a desk

Description automatically generated

Ο εκπεμπόμενος πιλότος είναι ένα 256-QAM σύμβολο που φαίνεται παρακάτω.

A graph of a pilot

Description automatically generated

Ο πιλότος που λάβαμε είναι

A graph of a pilot

Description automatically generated

### Εκπομπή pilot με Doppler

Για αυτό το πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένας ανεμιστήρας όπου τα φτερά του καλύφθηκαν με φύλλο αλουμινίου, για να είναι επιτυχής η προσομοίωση ανάκλασης των σημάτων με Delay-Doppler στον δέκτη.

A computer on a desk

Description automatically generated

Στο κανάλι παρατηρούμε ότι το Doppler και το Delay στο πεδίο 0 έως 10 είναι υψηλότερο και στα ακραία σημεία λαμβάνουμε μειωμένες τιμές.

A graph of a graph

Description automatically generated with medium confidence

Ο λαμβανόμενος πιλότος με Doppler έχει αυξημένες τιμές στις περιοχές γύρω από αυτόν, καθώς με τη χρήση του ανεμιστήρα το σήμα στάλθηκε στον δέκτη με μεγαλύτερη ταχύτητα σε σύγκριση με το προηγούμενο πείραμα.

A graph of a pilot

Description automatically generated

### Εκπομπή τεσσάρων 16-QAM συμβόλων χωρίς Doppler

Ακόμα στάλθηκαν 4 σύμβολα 16-QAM για τον έλεγχο της μεταβολής τους χωρίς Doppler. Στην επόμενη ενότητα θα δοκιμάσουμε το ίδιο πείραμα αλλά με Doppler για να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

Παρακάτω βλέπουμε τα σύμβολα πριν σταλθούν.

A graph of colored bars

Description automatically generated

Εδώ βλέπουμε τα λαμβανόμενα σύμβολα χωρίς Doppler και παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν πολλές μεταβολές.

A graph of a pilot

Description automatically generated

### Εκπομπή τεσσάρων 16-QAM συμβόλων με Doppler

Σε αυτήν την ενότητα θα χρησιμοποιήσουμε τον ανεμιστήρα με τα φύλλα αλουμινίου, παρακάτω βλέπουμε το λαμβανόμενο block στον δέκτη.

A graph of a graph of a pilot

Description automatically generated with medium confidence

### Σύγκριση Αποστολής data με ZP-OTFS χωρίς πιλότο και με full guard

Η διαφορά του ZP-OTFS χωρίς πιλότο με το full guard είναι ότι στην πρώτη περίπτωση τοποθετούμε μηδενικά στο τέλος του μπλοκ στο Delay-Doppler domain, ενώ στην δεύτερη περίπτωση τοποθετούμε στο κέντρο των μηδενικών και έναν πιλότο. Η δεύτερη περίπτωση είναι προφανώς πιο ανθεκτική στον θόρυβο. Στη παρακάτω εικόνα παρατηρούμε το Delay Doppler block κατά την μετάδοση και στις δύο περιπτώσεις.

A colorful cube with numbers

Description automatically generated

A colorful cube with numbers

Description automatically generated with medium confidence

Σε αυτό το πείραμα καθώς ήταν δύσκολη η δημιουργία του καναλιού σε πραγματικές συνθήκες, προσομοιώσαμε το κανάλι στο matlab. Παρακάτω βλέπουμε τα αποτελέσματα BER-SNR για το ZP-OTFS no pilot vs ZP-OTFS full guard.

A graph of a graph with red and blue lines

Description automatically generated

# Βιβλιογραφία

[1] WEI, Zhiqiang, et al. Orthogonal time-frequency space modulation: A promising next-generation waveform. IEEE wireless communications, 2021, 28.4: 136-144.

[2] R. Hadani et al., "Orthogonal Time Frequency Space Modulation," 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), San Francisco, CA, USA, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/WCNC.2017.7925924.

[3] A. Sayeed and B. Aazhang, “Joint multipath-Doppler diversity in mobile wireless communications,” IEEE Trans. Commun., Vol. 47, No. 1, pp. 123–132, Jan. 1999.

[4] P. Raviteja, K. T. Phan, Y. Hong, and E. Viterbo, "Interference cancellation and iterative detection for orthogonal time frequency space modulation," IEEE Transactions on Wireless Communications, DOI: 10.1109/TWC.2018.2860011 (Aug 2, 2018)

[5] P. Raviteja, Y. Hong, E. Viterbo, and E. Biglieri, "Practical Pulse-Shaping Waveforms for Reduced-Cyclic-Prefix OTFS," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 1, pp. 957-961, Jan. 2019

[6] P. Raviteja, Yi Hong, E. Viterbo, "OTFS Performance on Static Multipath Channels", IEEE Wireless Communications Letters, vol. 8, no. 3, pp. 745 -748, June 2019

[7] P. Raviteja, K. T. Phan, Yi Hong, "Embedded Pilot-Aided Channel Estimation for OTFS in Delay-Doppler Channels", IEEE Transactions on Vehicular Technology , vol. 68, no. 5, pp. 4906 - 4917, May 2019

[8] Tharaj Thaj and E. Viterbo, "Low-Complexity Linear Diversity-Combining Detector for MIMO-OTFS", IEEE Wireless Communications Letters, 2021z

[9] Mandloi, Manish, Arijit Datta, and Vimal Bhatia. "Index modulation techniques for 5g and beyond wireless systems." *5G and Beyond Wireless Systems: PHY Layer Perspective* (2021): 63-83.

[10] DELAY-DOPPLER COMMUNICATIONS Principles and Applications Yi Hong, Tharaj Thaj, Emanuele Viterbo

# Παράρτημα Ι [Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του OFDM]

# Παράρτημα ΙI [Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του OTFS]