



Τεχνικές μηχανικής μάθηση για εξαιρετικά αξιόπιστη ανίχνευση συμβόλων στις ασύρματες επικοινωνίες

Υψηλάντης Παναγιώτης

ΑΕΜ: 969

Επιβλέπων : Αλέξανδρος-Απόστολος Α. Μπουλογεώργος

Επίκουρος Καθηγητής

Κοζάνη 9/7/2024



Τεχνικές μηχανικής μάθηση για εξαιρετικά αξιόπιστη ανίχνευση συμβόλων στις ασύρματες επικοινωνίες

Υψηλάντης Παναγιώτης

ΑΕΜ: 969

Επιβλέπων : Αλέξανδρος-Απόστολος Α. Μπουλογεώργος

Επίκουρος Καθηγητής

Κοζάνη 9/7/2024

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο

Τεχνικές μηχανικής μάθησης για εξαιρετικά αξιόπιστη ανίχνευση συμβόλων στις ασύρματες επικοινωνίες. Machine learning for ultra-reliable symbol detection in wireless communications, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους ΔΕΠ του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών κ. Μπουλογεώργος Αλέξανδρος-Απόστολος Α.

αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. 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.

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

Copyright(C)Υψηλάντης Παναγιώτης, Μπουλογεώργος Αλέξανδρος Απόστολος,2024,
Κοζάνη

Περίληψη

Προχωρώντας προς την έκτη γενιά (sixth generation – 6G) ασυρμάτων επικοινωνιών, οι απαιτήσεις των συστημάτων σε φασματική αποδοτικότητα και ταχύτητα μετάδοσης συνεχώς αυξάνονται. Για να καλύψει τις ανάγκες αυτές τόσο η ερευνητική κοινότητα όσο και η βιομηχανία έστρεψαν την προσοχή τους σε δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση έχει να κάνει με την χρήση πιο πολύπλοκων σχημάτων μετάδοσης πληροφορίας. Η δεύτερη προσέγγιση που ακολουθείται είναι η δημιουργία διασυνδέσεων σε υψηλότερες περιοχές του φάσματος. Στις συχνότητες αυτές τα μήκη κύματος είναι αρκετά μικρά και καθώς ο σχεδιασμός των βασικών μονάδων των πομποδεκτών εξαρτάται από το μήκος κύματος οι ατέλειες οδηγούν σε σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας. Η ανίχνευση του συμβόλου μετατρέπεται σε μία εξαιρετική πολύπλοκη διαδικασία. Έχοντας αυτό ως βασικό κίνητρο, προτείνουμε μια προσέγγιση μηχανικής μάθησης, η οποία έχει ως βασικό στόχο να δώσει λύση στην ανίχνευση των συμβόλων βελτιώνοντας έτσι την απόδοση. Το μοντέλο του συστήματος είναι η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεση συχνότητας θεωρώντας τέλειο πομπό και δέκτη σε κανάλι διαλείψεων Rayleigh. Το σύστημα προσομοιώνεται για διαφορετικά επίπεδα ατελειών In-phase and Quadrature τόσο του πομπού όσο του δέκτη, ώστε να γίνει κατανοητό το όριο πάνω από το οποίο η επίδραση των ατελειών έχει σημαντική επίδραση στις επιδόσεις του συστήματος. Έχει αναπτυχθεί μια τεχνική εκτίμησης καναλιών Deep Learning, όπου η αποτελεσματικότητα του προσομοιώνεται και υλοποιείται για διάφορες πιλοτικές ρυθμίσεις κάτω από διαφορετικές παραμέτρους λειτουργίας. Το βαθύ νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε εκπαιδεύτηκε με δεδομένα που έχουν δεχτεί παραμορφώσεις από την μετάδοση. Τέλος συγκρίνει τις τεχνικές εκτίμησης Least Squares, Minimum Mean Square Error και το Deep Learning σχετικά με τον ρυθμό σφάλματος συμβόλων σε συνάρτηση με την ενέργεια ανά σύμβολο προς την πυκνότητα φάσματος θορύβου. Το Deep Learning αποδείχθηκε ισχυρότερο όταν χρησιμοποιούμε μικρούς πιλότους και όταν αυξάνεται η ανισορροπία.

Abstract

Moving on to the sixth generation (6G) wireless communications, the requirements of systems in terms of spectral efficiency and transmission speed are constantly increasing. To meet these needs both the research community and industry have turned their attention to two approaches. The first approach involves the use of more complex information transmission schemes. The second approach is to create interconnections in higher regions of the spectrum. At these frequencies the wavelengths are quite short and as the design of the transceiver base units is wavelength dependent the imperfections lead to a significant degradation in quality. The detection of the symbol becomes an extremely complex process. Having this as a key motivation, we propose a machine learning approach, which has the main goal of solving the symbol detection thereby improving the performance. The system model is the orthogonal frequency division multiplexing considering perfect transmitter and receiver in Rayleigh intermittent channel. The system is simulated for different levels of In-phase and Quadrature imperfections of both the transmitter and the receiver to understand the threshold above which the effect of imperfections has a significant impact on the system performance. A Deep Learning channel estimation technique has been developed, where its effectiveness is simulated and implemented for different pilot setups under different operating parameters. The deep neural network used was trained with data that has been deformed by transmission. Finally, it compares Least Squares, Minimum Mean Square Error and Deep Learning estimation techniques on the symbol error rate as a function of energy per symbol to noise spectrum density. Deep Learning proved to be stronger when using small pilots and when imbalance is increased.

Περιεχόμενα

<i>Επιβλέπων : Αλέξανδρος-Απόστολος Α. Μπουλογεώργος</i>	1
<i>Επιβλέπων : Αλέξανδρος-Απόστολος Α. Μπουλογεώργος</i>	2
Περίληψη.....	4
Abstract	5
1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Περιγραφή του θέματος.....	9
1.2 Σκοπός, συνεισφορά, και στόχοι της εργασίας	10
1.3 Ορισμός των όρων και εννοιών.....	10
1.3.1 Σύντομοί ορισμοί και συντομογραφίες.....	21
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	23
2.1 Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας και των προηγούμενων μελετών.....	23
2.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	24
2.1.3 Τεχνικές βελτίωσης της απόδοσης σε συστήματα OFDM	24
2.1.4 Τεχνικές machine learning για την βελτίωση της απόδοσης σε συστήματα OFDM.	25
2.2 Θεωρητικές προσεγγίσεις και πλαίσια ανάλυσης.....	26
2.2.1 OFDM model	26
2.2.2 Serial to parallel Conversion.....	26
2.2.3 Διαμόρφωση δεδομένων με QPSK	26
2.2.4 Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier.....	27
2.2.5 Εισαγωγή CP και IQ imbalance	27
2.2.6 Γεννήτρια OFDM.....	27
2.2.7 Κανάλι διαλείψεων Rayleigh.....	28
2.2.8 Δέκτης.....	28
2.3 Περιγραφή της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα.....	29
2.4 Ανάλυση των εργαλείων και της διαδικασίας που ακολουθήθηκαν.	38
2.4.1 Δημιουργία datasets.....	38
2.4.2 Machine learning μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε.....	39
3 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της έρευνας.....	43
3.1 Προσομοιώσεις	43
3.2 Συμπεράσματα.....	48
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	50

Λίστα εικόνων

Εικόνα 1 OFDM στο πεδίο του χρόνου και συχνότητα Πηγή A Survey on the Use of Deep Learning Techniques for UAV Jamming and Deception	11
Εικόνα 2 Παράδειγμα φάσματος OFDM (a) ένα μόνο υποκανάλι, (b) 5 φορές πηγή Implementation of PCCD-OFDM-ASK robust data transmission over GSM speech channel..	11
Εικόνα 3 Διάγραμμα αστερισμών (α) BPSK (β) QPSK (γ) 16 – QAM Πηγή Novel modulation techniques promise extended optical reach and capacity	12
Εικόνα 4 Φάσμα OFDM με τρεις ορθογώνιους υποφορείς Πηγή A review on cognitive radio for next generation cellular network and its challenges	13
Εικόνα 5 Προσθήκη κυκλικού προθέματος πηγή https://eclass.uowm.gr/modules/document/index.php?course=ICTE328&openDir=/5c66c6b2146Y/5e243bdb3FNb	14
Εικόνα 6 Παράδειγμα πλαισίου OFDM με 7 σύμβολα OFDM και N = 16 υποφορείς. Τα σήματα πιλότου σημειώνονται με μαύρο χρώμα Πηγή Circuit and system level design of OFDM receivers in the presence of phase noise	15
Εικόνα 7 Το πυκνοδομημένο Μανχάταν έχει αποδειχθεί ότι προσεγγίζει ένα περιβάλλον που ξεθωιάζει από το Rayleigh	16
Εικόνα 8 Ένα δευτερόλεπτο εξασθένησης Rayleigh με μέγιστη μετατόπιση Doppler 10 Hz πηγή https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_fading#/media/File:Rayleigh_fading_doppler_10Hz.svg	17
Εικόνα 9 Ένα δευτερόλεπτο εξασθένησης Rayleigh με μέγιστη μετατόπιση Doppler 100 Hz. Πηγή https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_fading#/media/File:Rayleigh_fading_doppler_100Hz.svg	17
Εικόνα 10 Τύποι αλγορίθμων εκτίμησης καναλιών. Πηγή Deep Learning Channel Estimation for OFDM 5G Systems with Different Channel Models	19

Εικόνα 11 Subcarrier που επικαλύπτονται Πηγή Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και πληροφορικής εργαστήριο σημάτων και τηλεπικοινωνιών	28
Εικόνα 12 OFDM model.....	28
Εικόνα 13 Ποσοστό σφάλματος συμβόλου για διαμόρφωση QPSK. Πηγή https://dsplog.com/2007/11/06/symbol-error-rate-for-4-qam/	35
Εικόνα 14 Δημιουργία των δεδομένων σε datasets.....	39
Εικόνα 15 Επίπεδα νευρωνικού δικτύου.Πηγή Deep Learning Channel Estimation for OFDM 5G Systems with Different Channel Models.....	40
Εικόνα 16 Βαθύ νευρωνικό δίκτυο για την εκτίμηση σύνθετου διανύσματος εισόδου. Πηγή Deep Learning Channel Estimation for OFDM 5G Systems with Different Channel Models..	40
Εικόνα 17 Επίπεδα του DNN	41
Εικόνα 18 Εκπαίδευση μοντέλου	41
Εικόνα 19 Διάγραμμα ρόης μοντέλου.....	42
Εικόνα 20 IRR 20dB 10000 packets 10 pilots	44
Εικόνα 21 IRR 20dB 10000 packets 64 pilots	44
Εικόνα 22 IRR 32.17dB 10000 packets 10 pilots	45
Εικόνα 23 IRR 32 10000 packest 64 pilots	45
Εικόνα 24 IRR 40 dB 10000 packets 10 pilots	46
Εικόνα 25 IRR 40dB 10000 packest 64 pilots	46
Εικόνα 26 IRR 48 10000 packets 10 pilots	47
Εικόνα 27 IRR 48dB 10000 packets 64pilots	47
Εικόνα 28 Χωρίς προσθήκη κυκλικού προθέματος.....	48

1. Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του θέματος

Προχωρώντας προς την έκτη γενιά (sixth generation – 6G) ασυρμάτων επικοινωνιών, οι απαιτήσεις των συστημάτων σε φασματική αποδοτικότητα και ταχύτητα μετάδοσης συνεχώς αυξάνονται. Για να καλύψει τις ανάγκες αυτές τόσο η ερευνητική κοινότητα όσο και η βιομηχανία έστρεψαν την προσοχή τους σε δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση έχει να κάνει με την χρήση πιο πολύπλοκων σχημάτων μετάδοσης πληροφορίας, όπως filter bank, single-carrier frequency division multiple access (SC-FDMA), κ.α. Μία τέτοια προσέγγιση απαιτεί βελτιωμένες τεχνικές ανίχνευσης συμβόλων, ώστε να μην παραβιαστούν τα όρια αξιοπιστίας, τα οποία ποσοτικοποιούνται από την πιθανότητα σφάλματος.

Η δεύτερη προσέγγιση που ακολουθείται είναι η δημιουργία διασυνδέσεων σε υψηλότερες περιοχές του φάσματος, όπως millimeter wave επικοινωνίες και επικοινωνίες στην ζώνη των THz. Στις συχνότητες αυτές τα μήκη κύματος είναι αρκετά μικρά και καθώς ο σχεδιασμός των βασικών μονάδων των πομποδεκτών εξαρτάται από το μήκος κύματος, μικρές κατασκευαστικές αναπόφευκτες ατέλειες οδηγούν σε σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας επικοινωνίας, που μεταφράζεται σε απώλεια της αξιοπιστίας του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, οι ατέλειες αυτές οφείλονται σε ατέλειες του διαμορφωτή και αποδιαμορφωτή I/Q του πομπού και του δέκτη, αντίστοιχα, των τοπικών ταλαντωτών, που προκαλούν φασικό θόρυβο, και της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των ενισχυτών ισχύων και του ενισχυτή χαμηλού θορύβου. Σαν αποτέλεσμα, η ανίχνευση του συμβόλου μετατρέπεται σε μία εξαιρετική πολύπλοκη διαδικασία.

Έχοντας αυτό ως βασικό κίνητρο, αρκετοί ερευνητές πρότειναν προσεγγίσεις μηχανικής μάθησης. Για παράδειγμα, στο [15], οι συγγραφείς προτείναν ένα Graph neural network (GNN) για την δημιουργία κατάλληλου κώδικα και αντίστοιχου ανιχνευτή στο δέκτη για την αντιμετώπιση των ατελειών του I/Q διαμορφωτή και αποδιαμορφωτή. Στο [16] οι συγγραφείς παρουσίασαν ένα νευρωνικό δίκτυο χρονικής καθυστέρησης πραγματικής αξίας το οποίο χρησιμοποιείται ως διαδικασία μετριάσμου σε ένα βήμα, απλοποιώντας έτσι τη διαδικασία αντιστάθμισης. Στο [17] παρουσιάστηκε ένα νευρωνικό δίκτυο πραγματικής αξίας με χρονική καθυστέρηση για την αντιστάθμιση της μη γραμμικότητας IQI και ενισχυτών. Τέλος, στο [18] παρουσιάστηκε μια ψηφιακή προ-διαμόρφωση βασισμένη σε νευρωνικό δίκτυο ως λύση για την αντιστάθμιση των επιπτώσεων της διασταυρούμενης συνομιλίας, της μη γραμμικότητας του ενισχυτή, του IQI και της αντιστάθμισης του συνεχούς ρεύματος.

Οι συγγραφείς των [15], [16], [17], [18] είχαν ως στόχο να χρησιμοποιήσουν μεθοδολογίες μηχανικής μάθησης για να αντισταθμίσουν την επίδραση των ατελειών του υλικού σε επίπεδο συμβόλου. Το ίδιο πρόβλημα αντιμετωπίστηκε στο [19] με χρήση τεχνικών auto-encoder. Οι συγγραφείς τεκμηρίωσαν δυο προσεγγίσεις για την εκπαίδευσή του mapper και demapper την συμβατική και την εκπαίδευση με βάση την ενίσχυση της μάθησης (RL). Το πρώτο χρησιμοποιεί τον βελτιστοποιητή Adam για να εκπαιδεύσει το TX και το στοχαστικό gradient descent (SGD) για να εκπαιδεύσει το RX, ενώ το δεύτερο χρησιμοποιεί το SGD για την εκπαίδευση τόσο του TX όσο και του RX και οι δύο προσεγγίσεις εκπαίδευσης έχουν σχεδιαστεί

για να ελαχιστοποιούν τη ρύπανση των καναλιών λόγω της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ του TX και του RX.

Οι παραπάνω δημοσιευμένες εργασίες αναφέρονται σε συστήματα τα οποία δεν λαμβάνουν υπόψιν πιο πολύπλοκα σχήματα μετάδοσης, όπως orthogonal frequency division modulation (OFDM), ή/και τις διαλείψεις των καναλιών. Όπως όμως καταγράφεται στις [20], [21], ακόμη και στην ζώνη των THz, όπου κατευθυντικές ζεύξεις υλοποιούνται, οι διαλείψεις παίζουν εξαιρετικά σημαντικό ρόλο. Η δημιουργία νέου τύπου ανιχνευτή, που θα είναι σε θέση να αντιμετωπίσει τόσο τις μεταβολές του καναλιού όσο και τις ατέλειες των σύγχρονων πομποδεκτών και θα λαμβάνει υπόψιν του τις ιδιαιτερότητες συστημάτων, όπως OFDM κρίνεται σημαντική.

1.2 Σκοπός, συνεισφορά, και στόχοι της εργασίας

Έχοντας ως κίνητρο τις παραπάνω παρατηρήσεις, η διπλωματική εργασία στοχεύει στην δημιουργία ενός πλαισίου μηχανικής μάθησης, που στοχεύει στην βελτίωση της ανίχνευσης του δέκτη. Συγκεκριμένα, και σε αντίθεση με τις προηγούμενες δημοσιευμένες εργασίες, η διπλωματική εργασία λαμβάνει υπόψιν και τις διαλείψεις του καναλιού, αλλά και τις ατέλειες των πομποδεκτών. Η τεχνική συνεισφορά και ο στόχος της εργασίας μπορεί να συνοψιστεί ως:

- Σχεδίαση μοντέλο σήματος OFDM θεωρώντας τέλειο πομπό και δέκτη σε κανάλι διαλείψεων Rayleigh.
- Προσομοίωση συστήματος OFDM θεωρώντας τέλειο πομπό και δέκτη σε κανάλι διαλείψεων Rayleigh. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται σαν το αναμενόμενο άνω όριο των επιδόσεων του συστήματος που σχεδιάζεται. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται σαν ένα βασικό σύστημα συγκρίσεων.
- Σχεδίαση μοντέλο σήματος που λαμβάνει υπόψιν του τις ατέλειες των I/Q διαμορφωτών και αποδιαμορφωτών. Το σχήμα μετάδοσης που χρησιμοποιείται είναι OFDM, και το κανάλι είναι διαλείψεων Rayleigh. Το σύστημα αυτό προσομοιώνεται για διαφορετικά επίπεδα ατελειών I/Q τόσο του πομπού όσο του δέκτη, ώστε να γίνει κατανοητό το όριο πάνω από το οποίο η επίδραση των ατελειών έχει σημαντική επίδραση στις επιδόσεις του συστήματος.

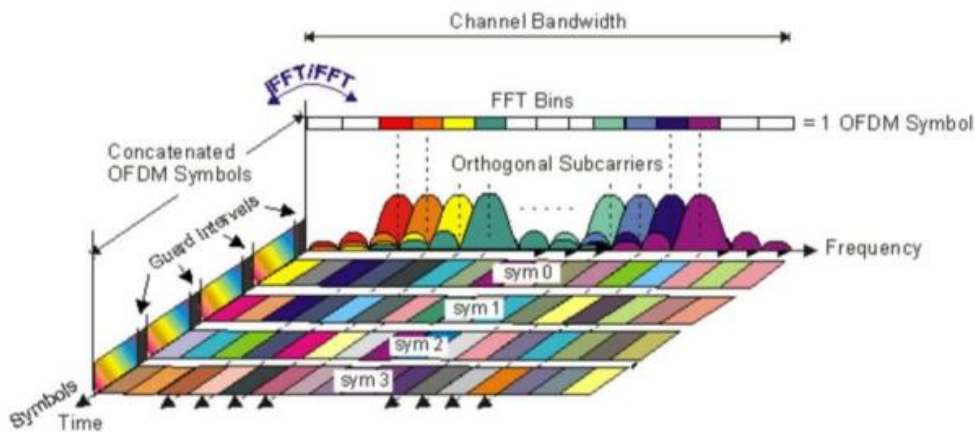
1.3 Ορισμός των όρων και εννοιών

Transmitter: Ο πομπός (transmitter) σε ένα σύστημα επικοινωνίας είναι υπεύθυνος για την μετάδοση στον αέρα χρησιμοποιώντας την τεχνική OFDM.

Receiver: Ο δέκτης είναι υπεύθυνος για την λήψη και την αποκωδικοποίηση των σημάτων που μεταδίδονται μέσω του καναλιού επικοινωνίας.

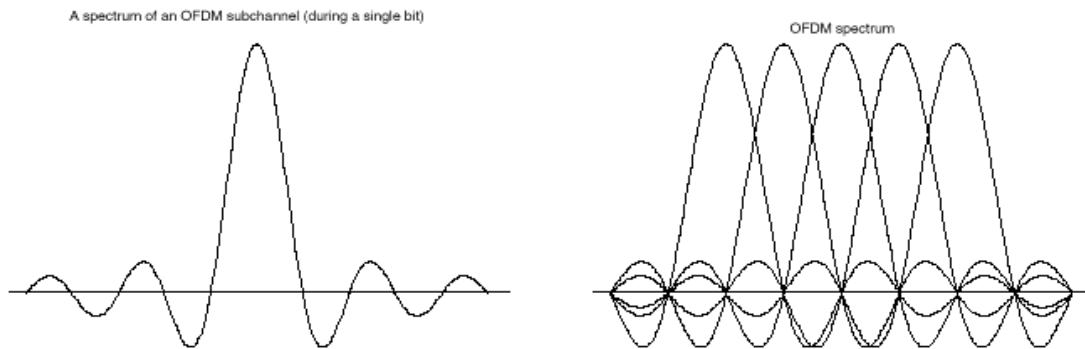
OFDM:

Είναι μια τεχνική πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται σε ασύρματες επικοινωνίες, κυρίως σε συστήματα ευρείας ζώνης όπως τα δίκτυα WIFI και τα κινητά τηλέφωνα (4G,5G). Η βασική ιδέα του είναι να μεταδίδει τα δεδομένα σε πολλαπλές φορητές συχνότητες, οι οποίες είναι να ορθογώνιες μεταξύ τους.



Εικόνα 1 OFDM στο πεδίο του χρόνου και συχνότητα Πηγή A Survey on the Use of Deep Learning Techniques for UAV Jamming and Deception

Το Σχήμα 1 δείχνει την παραγωγή και της αποδιαμόρφωση ενός σήματος με OFDM. Στο πεδίο της συχνότητας, έχουμε πολλά υποφέροντα που διαμορφώνονται ανεξάρτητα από τα απαιτούμενα δεδομένα. Όπου, αυτά μετατρέπονται σε σύμβολα OFDM στο πεδίο του χρόνου χρησιμοποιώντας Fourier (IFFT)



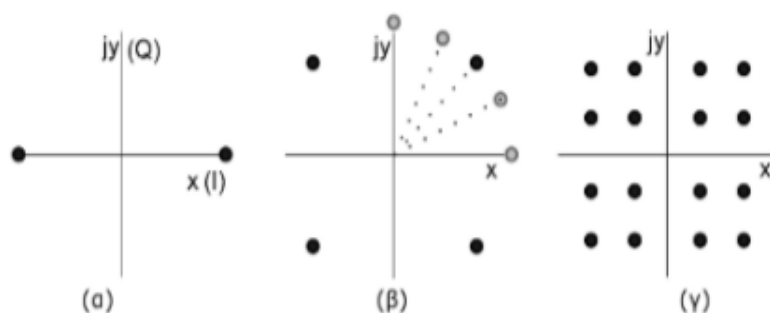
Εικόνα 2 Παράδειγμα φάσματος OFDM (a) ένα μόνο υποκανάλι, (b) 5 φορές πηγή Implementation of PCCD-OFDM-ASK robust data transmission over GSM speech channel.

Το φάσμα δεν είναι συνεχές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, αλλά έχει διακριτά δείγματα. Εάν ο FFT είναι χρονικά συγχρονισμένος, τα δείγματα συχνότητας του FFT αντιστοιχούν μόνο στις κορυφές των υποφερόντων, επομένως η επικαλυπτόμενη περιοχή συχνοτήτων μεταξύ των υποφερόντων δεν επηρεάζει τον δέκτη.

QPSK: Μια μορφή ψηφιακής διαμόρφωση σήματος που χρησιμοποιείται σε ψηφιακές επικοινωνίες. Είναι μια μέθοδος που κωδικοποιεί δυο bits σε κάθε σύμβολο. Τα bits αυτά αντιπροσωπεύονται από τις διακυμάνσεις στη φάση (phase) του φορέα. Στο QPSK, τα δυο bits διαμορφώνονται ως τέσσερα πιθανά σήματα, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μια διαφορετική γωνία φάσης του φορέα. Οι γωνίες φάσης που χρησιμοποιούνται είναι 0,90,180 και

270 μοίρες. Στα σήματα αυτά μπορεί να γίνει γραφική παράσταση σε διάγραμμα (QPSK constellation).

Η σταθερή QPSK αστερισμός έχει τέσσερα σημεία στον πραγματικό-φανταστικό χώρο, τα οποία αντιπροσωπεύουν ένα συνδυασμό δύο δυαδικών ψηφίων. Έτσι, κάθε σύμβολο QPSK μπορεί να λαμβάνει μία από τις τέσσερις πιθανές τιμές: $\{1 + j, -1 + j, -1 - j, 1 - j\}$. Επιπλέον, έχει την ιδιότητα να μεταφέρει τα bits κατά τον ίδιο χρόνο, ενώ παραμένει αποτελεσματικός ως προς τον χώρο του σήματος. Τέλος παραμένει ανθεκτικός στον θόρυβο και τις παραμορφώσεις του καναλιού.



Εικόνα 3 Διάγραμμα αστερισμών (α) BPSK (β) QPSK (γ) 16-QAM Πηγή Novel modulation techniques promise extended optical reach and capacity

Στο σχήμα 3 το διάγραμμα αστερισμού του QPSK έχει τέσσερα συνολικά σημεία και μεταδίδει δύο bits ανά σύμβολο. Η φασματική απόδοση ή ο αριθμός των μεταδιδόμενων bits ανά σύμβολο ορίζεται από την τάξη διαμόρφωσης m των συστημάτων $mQAM$ για παράδειγμα το QPSK είναι γνωστό ως 4qam, με την αύξηση της τάξης διαμόρφωσης έχουμε υψηλότερη φασματική απόδοση.

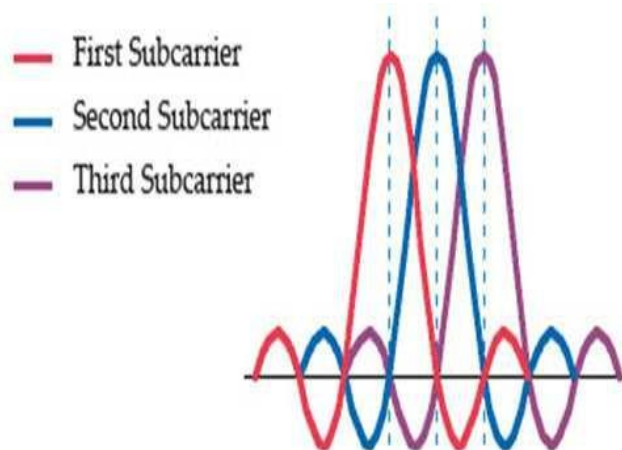
Noise: Ο πομπός παράγει σήμα το οποίο παραμορφώνεται από το κανάλι πριν φτάσει στο δέκτη. Οι διαδικασίες υποβάθμισης αναφέρονται γενικά σαν θόρυβος. Βασικό χαρακτηριστικό της υποβάθμισης είναι ότι περιορίζει το αξιοποιήσιμο εύρος ζώνης, άρα τον ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας (bitrate). Ο θόρυβος υπάρχει σε όλο το φάσμα συχνοτήτων και είναι συνεχής στο χρόνο. Ένα είδος θορύβου είναι ο πολλαπλασιαστικός που προκαλείται είτε από το σύστημα μετάδοσης/λήψης (π.χ κεραιές) είτε από μηχανισμούς απωλειών (π.χ. διαλείψεις).

Το άλλο είδος είναι ο προσθετικός που περιλαμβάνει τον θερμικό (π.χ. ενισχυτή), οι παρεμβολές (ανθρώπινης ή όχι προέλευσης) είναι και αυτές ένας είδος θορύβου. Επίσης ο ζωναπερατός, ο λευκός, στενής ζώνης και το μοντέλο του λευκού προσθετικού γκαουσιανού θορύβου (AWGN). Η εξάλειψή του μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος πετυχαίνοντας καλύτερη ποιότητα σήματος. Ένας τρόπος εξάλειψής είναι η αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος, ωστόσο αυξάνεται και αναλογικά το κόστος επικοινωνίας.

IQ imbalance: Οι ιδανικοί διαμορφωτές και αποδιαμορφωτές IQ παρέχουν δύο ορθογώνια κανάλια για το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του μιγαδικού σήματος. Ωστόσο, οι αναντιστοιχίες μεταξύ των κλάδων I και Q καταστρέφουν αυτή την ορθογωνιότητα και οδηγούν σε ανισορροπία IQ, η οποία υποβαθμίζει την ποιότητα του σήματος. Μπορεί κανείς να χωρίσει τις αναντιστοιχίες που προκαλούν την ανισορροπία IQ σε δύο ομάδες όσον αφορά τις επιρροές τους: 1) ανισορροπία IQ επίπεδης συχνότητας που προκαλεί ατελή διαφορά φάσης 90 και άνιση πλάτη των τοπικών ταλαντωτών I και Q, τα οποία είναι σταθερά σε όλο το εύρος ζώνης του σήματος, 2) ανισορροπία IQ επιλεκτικής συχνότητας που προκαλεί την αναντιστοιχία συστατικών στους κλάδους I και Q, (π.χ. ατελώς προσαρμοσμένα χαμηλοπερατά φίλτρα, τα οποία έχουν διαφορετικές αποκρίσεις συχνότητας σε όλο το εύρος ζώνης του σήματος).

Αυτές οι ανισορροπίες IQ οδηγούν σε επιβλαβείς παρεμβολές κατόπτρων και υποβαθμίζουν την απόδοση του συστήματος, (π.χ. BER, λόγο σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο (SINR), χωρητικότητα και EVM). Σε συστήματα πολλαπλών φορέων, όπως το OFDM, η ανισορροπία IQ δημιουργεί όρους ICI σε υποφορείς καθρέφτες). Γενικά, η ανισορροπία IQ υποβαθμίζει την απόδοση των τεχνικών εκτίμησης καναλιού. Συνοψίζοντας θα πρέπει να αντισταθμίζεται η ανισορροπία IQ για να πληρούνται οι απαιτήσεις των προτύπων.

Subcarrier: Το OFDM στηρίζεται στην ιδιότητα της ορθογωνικότητας δύο υπο-φερόντων (subcarriers), η οποία μας επιτρέπει την αδιάληπτη μετάδοση σε πολλούς υποφορείς σε στενό επικαλυπτόμενο εύρος ζώνης χωρίς να υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ τους.



Εικόνα 4 Φάσμα OFDM με τρεις ορθογώνιους υποφορείς Πηγή A review on cognitive radio for next generation cellular network and its challenges

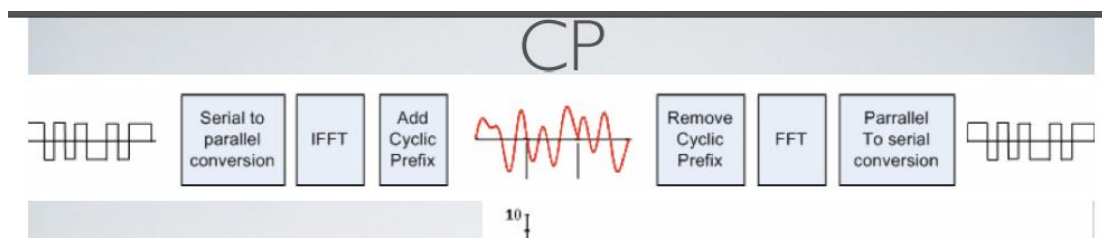
Το σχήμα 4 δείχνει ένα φάσμα OFDM με τρεις ορθογώνιους υποφορείς, κάθε χρώμα συμβολίζει ένα υποφορέα. Η ορθογωνιότητα προσφέρει σωστή διάταξη ώστε να μην παρεμβαίνουν μεταξύ τους αξιοποιώντας επίσης το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Packet: Ένα πακέτο δεδομένων είναι ουσιαστικά το φέρον σήμα μια κυματομορφή που θα μετατραπεί σε ψηφιακή μορφή και θα μεταδοθεί από τον πομπό στο δέκτη μέσω ενός καναλιού.

Εμπεριέχει δεδομένα χρήστη και δεδομένα ελέγχου, ουσιαστικά τα πρώτα είναι που ενδιαφέρουν τον χρηστή επειδή αυτό μεταφέρει το μήνυμα που τον ενδιαφέρει. Για την αξιόπιστη μετάδοση αυτής της πληροφορίας στον χρηστή στο πακέτο συμπεριλαμβάνονται αρκετές ακόμα πληροφορίες. Έτσι ένα πακέτο μεταφέρει δεδομένα συμβόλων, πιλοτικά σύμβολα και κενό μεταξύ πιλοτικών συμβόλων. Ο συνολικός αριθμός των bits εξαρτάται από τον αριθμό των OFDM συμβόλων, τον αριθμό των υποφορέων ανά OFDM σύμβολο και το σχήμα διαμόρφωσης, εμείς έχουμε QPSK 2 bits/Symbol.

$$\text{NumDataSym} \times \text{NumSC} \times \text{BitsPerSymbol}$$

CP: Το κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix) είναι ένα επιπλέον κομμάτι πληροφορίας που προστίθεται στην αρχή κάθε συμβόλου σε ένα σύστημα επικοινωνίας και επεκτείνουμε το σήμα ώστε να είναι 1,25 φορές μεγαλύτερο από το αρχικό, το πρόθεμα μπορεί να είναι μεταξύ 10-25% του συμβόλου. Σκοπός του κυκλικού προθέματος είναι να βελτιώσει την ανθεκτικότητα του σήματος στην παραμόρφωση που προκαλείται από την πολλαπλή διαδρομή και άλλες παραμορφώσεις στο κανάλι μετάδοσης. Η διαδικασία πρέπει να γίνει για κάθε carrier. Η εικόνα 6 δείχνει την προσθήκη κυκλικού προθέματος



Εικόνα 5 Προσθήκη κυκλικού προθέματος πηγή

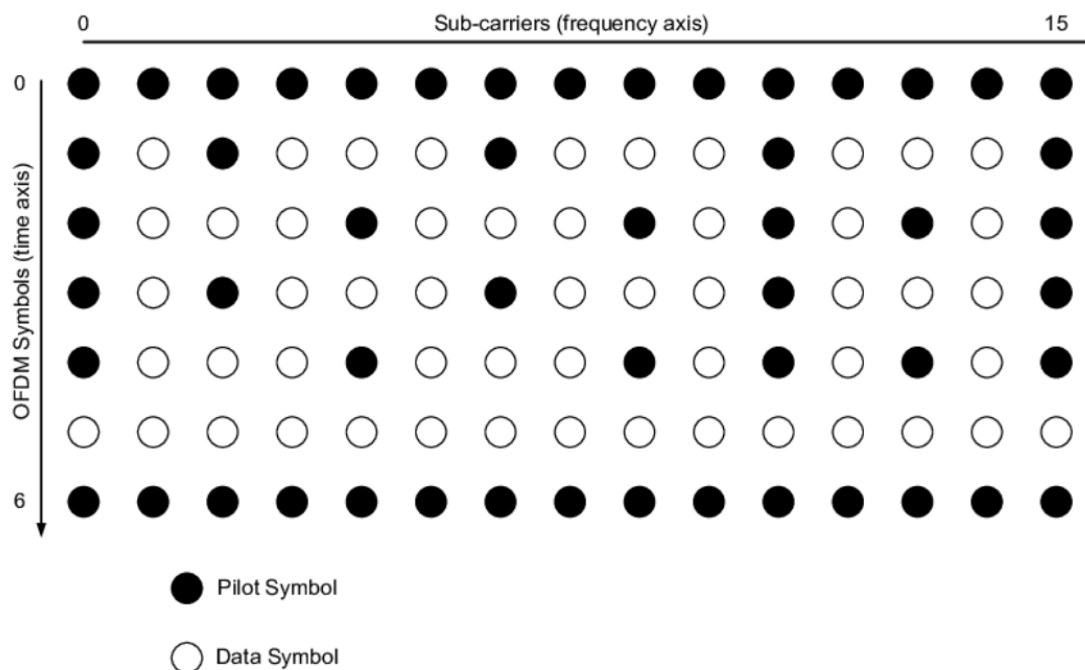
<https://eclass.uowm.gr/modules/document/index.php?course=ICTE328&openDir=/5c66c6b2146Y/5e243bdb3FNb>

Symbol: Στην διαμόρφωση QPSK για την μετάδοση ψηφιακών δεδομένων, κάθε σύμβολο μπορεί να αντιπροσωπεύει δυο bits. Στο OFDM κάθε σύμβολο να αντιστοιχεί σε μια σειρά από τις τιμές που αναπαριστούν την κατάσταση των διαφορετικών υποφορέων κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος.

Μετασχηματισμός Fourier (FFT): Ο FFT είναι ένας γρήγορος μετασχηματισμός Fourier που μετατρέπει ένα σήμα από τον χρόνο ή χώρο στο πεδίο της συχνότητας, αυτή η αναπαράσταση έχει φυσικά και αντιστροφή διαδικασία τον IFFT μετασχηματισμό. Οι μετασχηματισμοί Fourier είναι χρήσιμα εργαλεία σε πολλές επιστήμες όπως την μηχανική, τη μουσική και την πληροφορική. Σε ένα σύστημα OFDM χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό του σήματος, μετατρέπει τα δεδομένα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας και αντίστροφα. Τα δεδομένα μεταδίδονται από το πομπό σε παράλληλες ροές μέσω του καναλιού στο δέκτη.

PilotSym

Τα σήματα πιλότου και οι συμβολικές ακολουθίες πιλότου είναι σημαντικά στη διαδικασία εκτίμησης του καναλιού σε συστήματα επικοινωνίας, ιδιαίτερα σε συστήματα OFDM, είναι γνωστά και γίνονται γνωστά στο δέκτη. Η πολυπλεξία OFDM έχει μια συνεχή ροή πιλοτικών συμβόλων που δεν μεταφέρουν πραγματικά δεδομένα αλλά πληροφορίες μετάδοσης παραμέτρων σηματοδότησης. Η εκτίμηση καναλιού διευκολύνεται από την παρουσία πιλότων στην εικόνα 7 είναι παράδειγμα με την τοποθέτηση πιλότων σε OFDM πλαίσιο.



Εικόνα 6 Παράδειγμα πλαισίου OFDM με 7 σύμβολα OFDM και $N = 16$ υποφορείς. Τα σήματα πιλότου σημειώνονται με μαύρο χρώμα. Πηγή *Circuit and system level design of OFDM receivers in the presence of phase noise*

Path

Χρησιμοποιείται για να καθορίσει τον αριθμό των διαδρομών (paths) στο κανάλι επικοινωνίας στο σύστημα OFDM. Στα συστήματα επικοινωνίας, ο όρος "διαδρομή" αναφέρεται συνήθως σε διαφορετικούς τρόπους που μπορεί ένα σήμα να φτάσει από τον πομπό στο δέκτη.

Στο πλαίσιο του συστήματος, οι διαδρομές μπορεί να αντιστοιχούν σε διαφορετικούς πομποδέκτες, ανακλάσεις από τα εμπόδια ή άλλες παραμορφώσεις στο κανάλι.

Rayleigh Fading

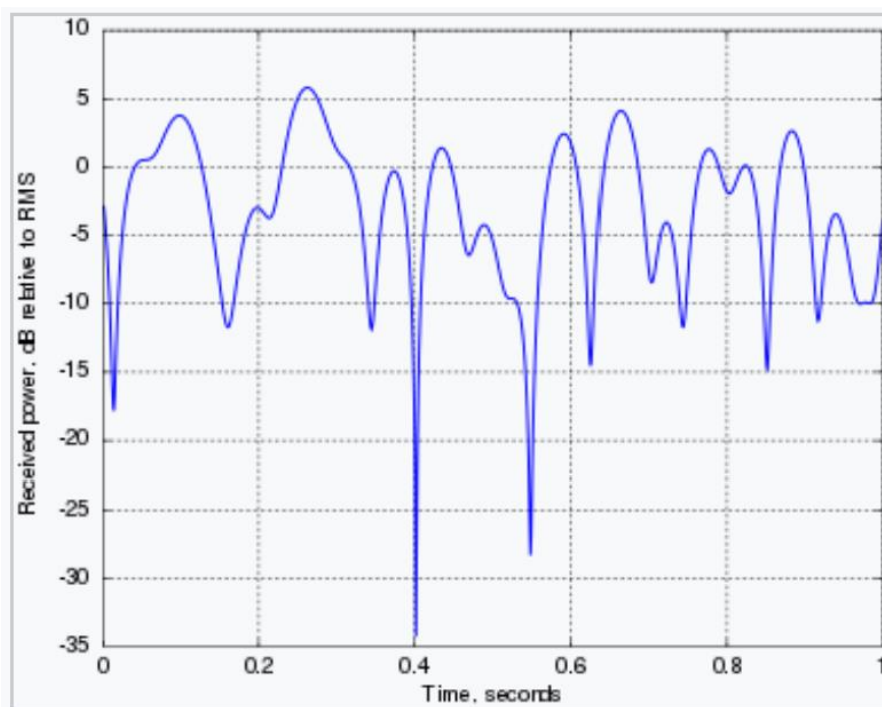
Το Rayleigh Fading είναι ένα στατιστικό μοντέλο για την επίδραση ενός περιβάλλοντος διάδοσης σε ένα ραδιοσήμα, όπως αυτό που χρησιμοποιείται στις ασύρματες συσκευές. Τα μοντέλα εξασθένισης Rayleigh υποθέτουν ότι το μέγεθος ενός σήματος που έχει περάσει από

ένα τέτοιο μέσο μετάδοσης (που ονομάζεται κανάλι επικοινωνίας) θα ποικίλλει τυχαία ή θα εξασθενήσει. Η εξασθένηση του Rayleigh θεωρείται ένα λογικό μοντέλο για τη διάδοση των τροποσφαιρικών και ιονόσφαιρων σημάτων, καθώς και την επίδραση των πολύ δομημένων αστικών περιβαλλόντων στα ραδιοσήματα. Είναι περισσότερο εφαρμόσιμη όταν δεν υπάρχει κυρίαρχη διάδοση κατά μήκος μιας οπτικής γραμμής μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Το Rayleigh fading είναι ένα λογικό μοντέλο όταν υπάρχουν πολλά αντικείμενα στο περιβάλλον που διασκορπίζουν το ραδιοσήμα πριν φτάσει στον δέκτη. Η απαίτηση να υπάρχουν πολλοί scatterers σημαίνει ότι το Rayleigh Fading μπορεί να είναι ένα χρήσιμο μοντέλο σε βαριά δομημένα κέντρα πόλεων όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ του πομπού και του δέκτη και πολλά κτίρια και άλλα αντικείμενα εξασθενούν, αντανακλούν και διαθλούν το σήμα.

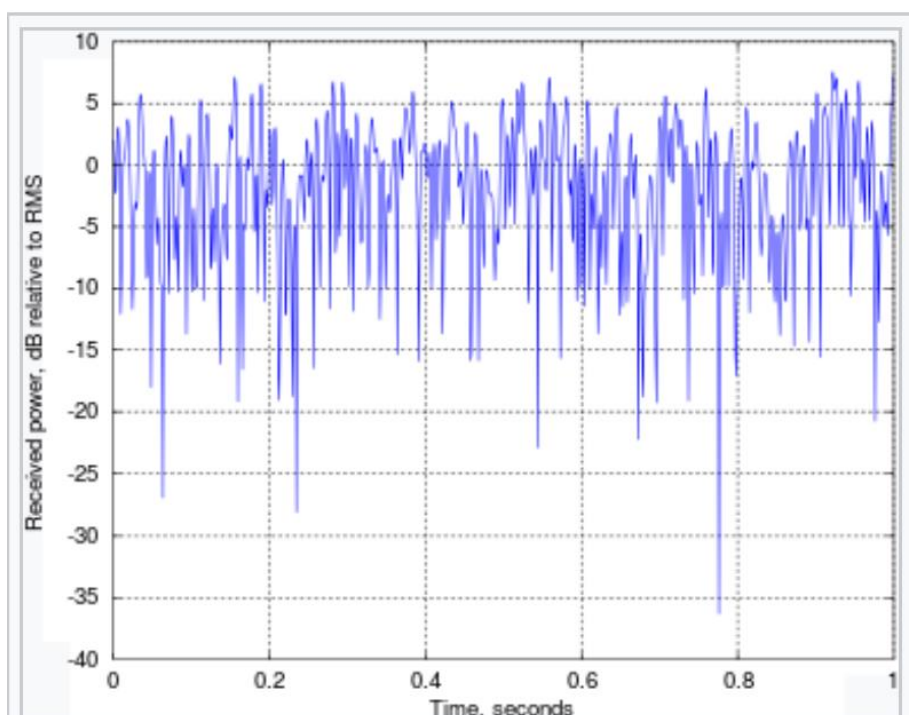


Εικόνα 7 Το πυκνοδομημένο Μανχάταν έχει αποδειχθεί ότι προσεγγίζει ένα περιβάλλον που ξεθωιάζει από το Rayleigh

Το πόσο γρήγορα εξασθενεί το κανάλι θα επηρεαστεί από το πόσο γρήγορα κινείται ο δέκτης ή/και ο πομπός. Η κίνηση προκαλεί μετατόπιση Doppler στα στοιχεία του λαμβανόμενου σήματος. Τα σχήματα δείχνουν τη διακύμανση ισχύος.



Εικόνα 8 Ένα δευτερόλεπτο εξασθένησης Rayleigh με μέγιστη μετατόπιση Doppler 10 Hz πηγή https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_fading#/media/File:Rayleigh_fading_doppler_10Hz.svg



Εικόνα 9 Ένα δευτερόλεπτο εξασθένησης Rayleigh με μέγιστη μετατόπιση Doppler 100 Hz. Πηγή https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_fading#/media/File:Rayleigh_fading_doppler_100Hz.svg

Το πόσο γρήγορα εξασθενεί το κανάλι θα επηρεαστεί από το πόσο γρήγορα κινείται ο δέκτης ή/και ο πομπός. Η κίνηση προκαλεί μετατόπιση Doppler στα στοιχεία του λαμβανόμενου σήματος. Τα σχήματα 10-11 δείχνουν τη διακύμανση ισχύος για 1 δευτερόλεπτο ενός

σταθερού σήματος μετά τη διέλευση από ένα κανάλι εξασθένισης Rayleigh μονής διαδρομής με μέγιστη μετατόπιση Doppler 10 Hz και 100 Hz.

Label

Ετικέτες που ανατίθενται σε κάθε σύμβολο της συνέλιξης για τον χειρισμό της ταξινόμησης σε ένα νευρωνικό δίκτυο. Οι ετικέτες (labels) αντιπροσωπεύουν τις σωστές απαντήσεις ή τις επιθυμητές εξόδους για κάθε σύνολο δεδομένων. Σε ένα πρόβλημα ταξινόμησης, για παράδειγμα, κάθε δείγμα μπορεί να έχει μια ετικέτα που υποδηλώνει την κατηγορία στην οποία ανήκει

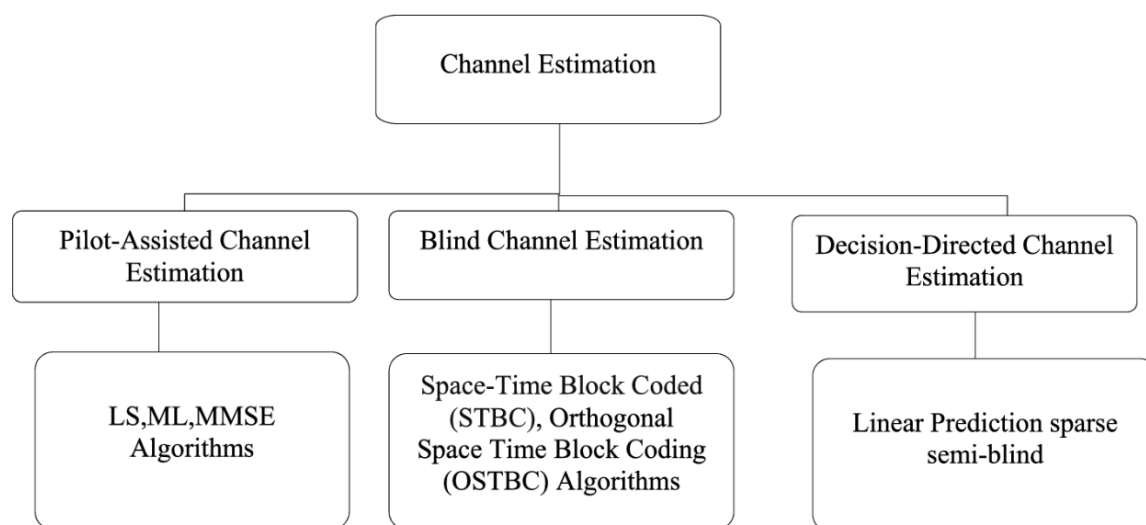
Feature

Τα χαρακτηριστικά είναι συνήθως αριθμητικά, άλλα και δομικά όπως συμβολοσειρές και γραφήματα χρησιμοποιούνται στην συντακτική αναγνώριση προτύπων. Η έννοια του χαρακτηριστικού σχετίζεται με αυτή της επεξηγηματικής μεταβλητής που χρησιμοποιείται σε στατιστικές τεχνικές όπως τη γραμμική παλινδρόμηση. Στη μηχανική χαρακτηριστικών δύο τύποι χρησιμοποιούνται συνήθως τα αριθμητικά και τα κατηγορηματικά:

Τα αριθμητικά χαρακτηριστικά οι συνεχείς τιμές που μπορούν να μετρηθούν σε μια κλίμακα, παραδείγματα αριθμητικών χαρακτηριστικών περιλαμβάνουν την ηλικία το ύψος το βάρος και το εισόδημα. Τα αριθμητικά χαρακτηριστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας σε αλγόριθμους μηχανικής μάθησης. Τα κατηγορηματικά χαρακτηριστικά είναι διακριτικές τιμές που μπορούν να ομαδοποιηθούν σε κατηγορίες, παραδείγματα κατηγορηματικών χαρακτηριστικών περιλαμβάνουν το φύλο το χρώμα και τον ταχυδρομικό κώδικα.

Ο τύπος του χαρακτηριστικού που χρησιμοποιείται στη μηχανική χαρακτηριστικών εξαρτάται από το συγκεκριμένο αλγόριθμο μηχανικής εκμάθησης που χρησιμοποιείται.

Στην περίπτωσή μας η συνάρτηση `getFeatureAndLabel` δημιουργεί ένα χαρακτηριστικό διάνυσμα από τα δεδομένα των πακέτων κατά την μετάδοση. Το feature vector περιλαμβάνει τόσο τον πραγματικό όσο και το φανταστικό μέρος των συμβόλων σε μια μονοδιάστατη μορφή.



Εικόνα 10 Τύποι αλγορίθμων εκτίμησης καναλιών. Πηγή *Deep Learning Channel Estimation for OFDM 5G Systems with Different Channel Models*

Η εκτίμηση καναλιών είναι η διαδικασία απόκτησης της απόκρισης του καναλιού επικοινωνίας, ώστε να διορθώνονται οι επιπτώσεις του στο μεταδιδόμενο σήμα. Οι μέθοδοι εκτίμησης καναλιών χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες εικόνα 12 εκτίμηση καναλιού με βοήθεια πιλότων, ανίχνευση καναλιού χωρίς πιλότους και εκτίμηση καναλιού κατευθυνόμενη από αποφάσεις

DL

Η τεχνική DL (Deep Learning) του Machine Learning είναι μια προηγμένη προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την εκμάθηση αναπαραστάσεων χρησιμοποιώντας πολλαπλά επίπεδα επεξεργασίας δεδομένων, η τεχνική αυτή βασίζεται κυρίως σε μοντέλα νευρωνικών δικτύων όπως τα βαθιά νευρωνικά δίκτυα. Κάθε επίπεδο στο βαθύ νευρωνικό δίκτυο αντιπροσωπεύει διαφορετικά χαρακτηριστικά των δεδομένων και εκπαιδεύεται να ανιχνεύει πολύπλοκα πρότυπα και χαρακτηριστικά. Η DL έχει επιδείξει εντυπωσιακή απόδοση σε πολλούς τομείς όπως της αναγνώρισης εικόνων, της επεξεργασίας φυσικής γλώσσας και της αναγνώρισης προτύπων

Οι βασικές λειτουργίες της τεχνικής:

- **Ανάλυση και εξαγωγή χαρακτηριστικών:** Τα βαθιά νευρωνικά δίκτυα μπορούν να αναλύσουν τα δεδομένα και να εξάγουν χαρακτηριστικά με αυτόματο τρόπο.
- **Αυτόματη μάθηση χωρίς χειροκίνητη επεξεργασία χαρακτηριστικών:** Η DL μπορεί να μάθει τις αναπαραστάσεις χωρίς την ανάγκη χειροκίνητης επιλογής χαρακτηριστικών.
- **Εκμάθηση ιεραρχικών αναπαραστάσεων:** Τα διαφορετικά επίπεδα που δικτύου μπορούν να εκμεταλλευτούν ιεραρχικές δομές στα δεδομένα.
- **Εκτέλεση σε μεγάλο όγκο δεδομένων:** Είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την εκπαίδευση σε μεγάλα σύνολα δεδομένων και επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων

MMSE

Το ελάχιστο μέσο τετράγωνο σφάλμα (MMSE) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία σήματος, στα στατιστικά συμπεράσματα και σε άλλα πεδία για την εκτίμηση των τιμών ενός άγνωστου σήματος με βάση ένα σύνολο θορυβωδών μετρήσεων. Ο στόχος του MMSE είναι να ελαχιστοποιήσει το μέσο τετράγωνο σφάλμα (MSE) μεταξύ του εκτιμώμενου σήματος και του αληθινού σήματος. Ο εκτιμητής MMSE είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική στην επεξεργασία σήματος, στα συστήματα επικοινωνίας και σε άλλα πεδία που περιλαμβάνουν την εκτίμηση ενός σήματος από μετρήσεις θορύβου. Ορισμένες εφαρμογές του εκτιμητή MMSE περιλαμβάνουν:

- **Εκτίμηση καναλιού:** Στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, ο εκτιμητής MMSE χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της απόκρισης παλμού καναλιού από το λαμβανόμενο σήμα.
- **Απενεργοποίηση θορύβου εικόνας και βίντεο:** Ο εκτιμητής MMSE χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του θορύβου από εικόνες και βίντεο υπολογίζοντας το αρχικό σήμα από τις μετρήσεις θορύβου.
- **Βελτίωση ομιλίας:** Ο εκτιμητής MMSE χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της ποιότητας των σημάτων ομιλίας αφαιρώντας τον θόρυβο και άλλες παραμορφώσεις.
- **Αναγνώριση συστήματος:** Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των παραμέτρων του συστήματος με βάση τα σήματα εισόδου και εξόδου.
- **Επεξεργασία ραντάρ και σόναρ:** Ο εκτιμητής MMSE χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της εμβέλειας, της ταχύτητας και της κατεύθυνσης ενός στόχου από το λαμβανόμενο σήμα ραντάρ ή σόναρ.

LS

Η μέθοδος Least Squares χρησιμοποιείται για την εκτίμηση παραμέτρων σε μοντέλα μη γραμμικής παλινδρόμησης. Στην ουσία προσπαθεί να βρει τις βέλτιστες τιμές για τα βάρη μοντέλων ώστε να ελαχιστοποιηθεί το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών. Η τεχνική είναι μια απλή μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά σε περιπτώσεις όπου οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών και η συνάρτηση κόστους είναι γραμμική, ή σε περιπτώσεις όπου η λύση που προκύπτει από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι αποδεκτή από τεχνικής άποψης.

1.3.1 Σύντομοί ορισμοί και συντομογραφίες

NumSC (Number of Subcarrier): Ο αριθμός των υποφορέων στο σύστημα OFDM. Κάθε υποφορέας μεταφέρει δεδομένα.

NumPilotSym (Number of Pilot Symbols): Ο αριθμός από πιλότους σύμβολα που περιέχονται σε κάθε OFDM πακέτο

NumDataSym (Number of Data Symbols): Ο αριθμός των συμβόλων δεδομένων που περιέχονται σε κάθε OFDM πακέτο

Real Data: Περιέχει τα πραγματικά μέρη του σήματος

ImagData: Περιέχει τα φανταστικά μέρη του σήματος

TargetLabel: Περιέχει δυαδικές ετικέτες, όπου 1 υποδεικνύει ότι το δείγμα ανήκει στην επιθυμητή κλάση

SNR: Η σχέση σήμα προς θόρυβο (SNR Signal to Noise Ratio) σε ένα σύστημα επικοινωνίας είναι ένας δείκτης που μετρά τη σχέση μεταξύ της ισχύος του σήματος και του θορύβου σε ένα κανάλι επικοινωνίας συνήθως μετριέται σε μονάδες ντεσιμπέλ (dB).

SER: Ο όρος αναφέρεται στο Symbol Error Rate (αριθμός σφάλματος συμβόλου) για ένα σύστημα επικοινωνίας. Ο αριθμός αυτός μετράει το ποσοστό των συμβόλων που μεταδόθηκαν με σφάλμα σε σχέση με τον αριθμό των συνολικών μεταδιδόμενων συμβόλων.

BER: Το Bit Error Rate μετράει το ποσοστό των λανθασμένων bits σε ένα σύστημα επικοινωνίας.

ES_NO_dB: Είναι η SNR σε dB.

ES_NO: Είναι η SNR ως κληρονομικός λόγος (linear ratio).

No: Είναι η ισχύς του θορύβου.

NoiseVar: Είναι η διασπορά του θορύβου.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας και των προηγούμενων μελετών

Ιστορική αναδρομή

Τα συστήματα OFDM έχουν μια ενδιαφέρουσα ιστορία που εκτείνεται πίσω αρκετές δεκαετίες ας δούμε μια συνοπτική αναδρομή:

- **Αρχές:**

Δεκαετία του 1970:

Η έρευνα για το OFDM στα τέλη της δεκαετίας του 1970 αναδείχθηκε ως μέθοδο μείωσης των παρεμβολών σε ευρυζωνικές επικοινωνίες.

Δεκαετία του 1980:

Έγινε περισσότερο επιθετικό στην έρευνα, ειδικά όσον αφορά στις εφαρμογές τους στις ψηφιακές τηλεοπτικές μεταδόσεις, κυρίως λόγω της αντοχής τους στις παρεμβολές.

Δεκαετία του 1990:

Είναι το κύριο σύστημα μετάδοσης για πολλά πρότυπα επικοινωνιών όπως το ADSL για το ίντερνετ και το DVB-T για την ψηφιακή τηλεόραση.

Δεκαετία του 2000:

Η χρήση του επεκτάθηκε σε ασύρματα δίκτυα όπως, το Wi-Fi (στο πρότυπο 802.11a/g/n/ac) και σε κινητές επικοινωνίες όπως τα 4G και το 5G.

- **Εφαρμογές:**

Ψηφιακή τηλεόραση (DVB-T/DVB-T2/DVB0S2): Η μετάβαση από τις αναλογικές στις ψηφιακές μεταδόσεις έγινε δυνατή χάρη OFDM.

Ψηφιακές κινητές επικοινωνίες(4G/5G): Οι ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και η απόδοση των κινητών δικτύων βελτιώθηκαν σημαντικά με την εφαρμογή του.

Ασύρματο ίντερνετ: Οι ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα Wi-Fi βελτιώθηκαν σημαντικά.

Ψηφιακός ήχος και βίντεο (Streaming): Η μετάδοση αρχείων ήχου και βίντεο μέσω διαδικτύου είναι δυνατή λόγω της υψηλής μετάδοσης .

Συνοψίζοντας το OFDM έχει εξελιχθεί από ένα αρχικό συνδυασμό φορέων σε ένα κύριο εργαλείο για ευρυζωνικές επικοινωνίες και μεταδόσεις πολυμέσων σε διάφορα μέσα επικοινωνίας.

2.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

➤ Πλεονεκτήματα του OFDM

Αντοχή στις παραμορφώσεις και στις εξασθενίσεις πολλαπλών διαδρομών (MultiPath Fading): Η διαίρεση του σήματος σε πολλαπλούς υποφορείς και η χρήση της διαμόρφωσης πολλαπλών φορέων καθιστά το σύστημα ανθεκτικό στις παραμορφώσεις.

Αποδοτική χρήση του φάσματος: Επιτρέπει την αποδοτική χρήση του φάσματος επικοινωνίας καθώς οι υποφορείς είναι αμοιβαίοι ανακυκλώσιμοι.

Ευελιξία στο διαχωρισμό και τη διαχείριση των υποφορέων: Επιτρέπει εύκολα στο διαχωρισμό των δεδομένων σε διαφορετικούς υποφορείς και τη δυναμική διαχείριση τους ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού.

Ανθεκτικότητα στην παρασιτική επίδραση και το θόρυβο : Η δομή του μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά παράσιτες επιδράσεις και θόρυβο.

Συμβατότητα με τις τεχνολογίες MIMO: Το OFDM είναι συμβατό με τις τεχνολογίες MIMO, που βελτιώνουν την απόδοση των ασύρματων επικοινωνιών μέσω της χρήσης πολλαπλών κεραιών.

➤ Μειονεκτήματα του OFDM:

Υψηλές απαιτήσεις σε συγχρονισμό: Η χρήση πολλαπλών φορέων απαιτεί ακριβή συγχρονισμό των φορέων ιδίως σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο ή παραμόρφωση.

Υψηλό στατιστικό και δυναμικό κόστος υλοποίησης: Η υλοποίηση του απαιτεί σύνθετους πομποδέκτες και αλγόριθμους συγχρονισμού που μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλό κόστος εξοπλισμού.

Ευαισθησία στην καταστροφή απόστασης-απωλειών: Οι μεγάλες αποστάσεις-απώλειες μπορούν να οδηγήσουν σε απώλειες σήματος και μείωση της απόδοσης.

2.1.3 Τεχνικές βελτίωσης της απόδοσης σε συστήματα OFDM

Τεχνικές μείωσης PAPR για βελτίωση της απόδοσης σε συστήματα OFDM

Η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας είναι μια ελκυστική τεχνολογία στην ασύρματη επικοινωνία. Η υψηλή ανάλογη ισχύος κορυφής προς μέση (PARP) είναι ένα από τα πιο απαιτητικά ζητήματα στα συστήματα OFDM. Το υψηλό PARP αναγκάζει τον ενισχυτή υψηλής ισχύος να λειτουργεί στη γραμμική του περιοχή με μεγάλο δυναμικό εύρος, όπου η απόδοση ισχύος είναι πολύ χαμηλή. Μειώνοντας το PART βλέπουμε αύξηση στην απόδοση. Το Selected Mapping (SLM) είναι μια τεχνική που υπόσχεται τη μείωση του PARP. Η προτεινόμενη τεχνική είναι μια τροποποίηση του συμβατικού SLM.

Βελτίωση απόδοσης μέσω αλγόριθμου εκτίμησης καναλιών μειωμένης πολυπλοκότητας για συστήματα 4G OFDM

Οι αλγόριθμοι εκτίμησης καναλιών διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στα συστήματα επικοινωνίας τρίτης γενιάς για την υποστήριξη της αποτελεσματικής χρήσης του φάσματος. Η εξέλιξη από 3G σε 4G απαιτεί υψηλή ταχύτητα δεδομένων και ένα σύστημα χαμηλής πολυπλοκότητας. Ένα θορυβώδες σφάλμα εκτίμησης καναλιού και ανάδρασης εισάγει ατελείς πληροφορίες κατάστασης καναλιού (CSI). Αυτή η τεχνική εισάγει ένα τροποποιημένο σύνολο βέλτιστων ορίων SNR χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Levenberg Marquardt (LM) και χρησιμοποιείται στην επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και βελτιώνει τις μέσες φασματικές αποδόσεις.

Βέλτιστο μοτίβο πιλότου συμβόλου με διάφορα κριτήρια.

Στο παρελθόν πολλοί ερευνητές προσπαθούσαν να βρουν ένα βέλτιστο μοτίβο πιλότου συμβόλου με διάφορα κριτήρια στο [1], [2], οι συγγραφείς επέλεξαν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) ενός εκτιμητή καναλιού ως συνάρτηση κόστους για τον σχεδιασμό των μοτίβων πιλοτικού σύμβολο. Έδειξαν ότι τα πιλοτικά σύμβολα με ίση τροφοδοσία και με ίση απόσταση μεταξύ τους οδηγούσαν στο χαμηλότερο MSE. Οι συγγραφείς των [3], [4], πρότειναν ένα σχεδιασμό προτύπων που μεγιστοποιεί τη χωρητικότητα του καναλιού. Οι συγγραφείς του [5], θεώρησαν την επιπεδότητα του MSE της εκτίμησης καναλιού ως συνάρτηση κόστους για τον προσαρμοστικό πιλοτικό σχεδιασμό τους η προτεινόμενη λύση εφαρμόστηκε με έναν εκτιμητή καναλιού LMMSE και μία προσέγγιση LMSSE. Οι συγγραφείς του [6], πρότειναν μια προσαρμοστική πυκνότητα πιλότου που εξαρτάται από τις μεταβολές του καναλιού και ικανοποιεί ένα θεώρημα δειγματοληψίας Nyquist προκειμένου να διατηρηθεί η απόδοση εκτίμησης καναλιού. Οι συγγραφείς του [7] πρότειναν ένα πλαίσιο για το σχεδιασμό προσαρμοστικών πιλοτικών προτύπων που μεγιστοποιεί την απόδοση του συστήματος το πλαίσιο προορίζεται για οποιοδήποτε γραμμική μέθοδο εκτίμησης καναλιού. Επιπλέον ο προτεινόμενος σχεδιασμός μεγιστοποιεί την επίδοση απόδοσης και όχι την επίδοση εκτίμησης καναλιού όπως προτείνεται στις ήδη υπάρχουσες μεθόδους.

2.1.4 Τεχνικές machine learning για την βελτίωση της απόδοσης σε συστήματα OFDM.

Deep Learning Aided Estimation: Στο [8], οι ερευνητές διερεύνησαν ένα πλαίσιο βαθιάς μάθησης για μαζική εκτίμηση καναλιού MIMO και κατεύθυνσης άφιξης (DOA). Στο [9], οι συγγραφείς παρουσίασαν ένα πλαίσιο βαθιάς μάθησης για την καταπολέμηση των ατελειών του καναλιού στον προκωδικοποιητή και τη βελτίωση της ισοστάθμισης στο δέκτη σε ένα σύστημα πολλαπλών κεραιών υπερ ευρείας ζώνης. Οι συγγραφείς του [10], διερεύνησαν αρχιτεκτονική βαθιάς μάθησης δυο σταδίων για την εκτίμηση καναλιού MIMO χρησιμοποιώντας μικρότερο μήκος πιλότου από τον αριθμό των κεραιών εκπομπής. Η έρευνα στο [11], διερεύνησε ένα βαθύ νευρωνικό δίκτυο για την εκτίμηση και την περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας των χονδροειδώς κβαντισμένων σημάτων σε ένα μαζικό σύστημα MIMO με χαμηλής και υψηλής ανάλυσης με αναλογικούς και ψηφιακούς μετατροπείς (ADC). Στο [12], οι συγγραφείς παρουσίασαν αλγόριθμο βασισμένο στο DL με την ονομασία ChannelNet για την εκτίμηση του καναλιού, θεωρώντας την απόκριση χρόνου-συχνότητας ενός καναλιού εξασθένησης ως 2D-εικόνα και

εφάρμοσαν περαιτέρω το νευρωνικό δίκτυο συνελιξής (CNN) για την εκτίμηση της κατάστασης ολόκληρου του καναλιού.

Στο [13],³⁰ προτείνεται κωδικοποιητής και αποκωδικοποιητής βάσεων βαθιάς μάθησης για τη βελτίωση της αποδοτικότητας ανακατασκευής της ανατροφοδότησης CSI. Οι ερευνητές του [14],³¹ διερεύνησαν την ικανότητα ενός βαθιού νευρωνικού δικτύου για τη βελτίωση της βαθμονόμησης του καναλιού μεταξύ της άνω και της κάτω ζεύξης

2.2 Θεωρητικές προσεγγίσεις και πλαίσια ανάλυσης

Το μοντέλο του συστήματος είναι μετάδοση και λήψη σήματος ενός χρήστη μέσω ασύρματου καναλιού χρησιμοποιώντας ως τεχνική πολυπλεξίας το OFDM. Συγκεκριμένα το μοντέλο περιγράφει τη διαδικασία μετάδοσης των πακέτων από τον πομπό στον δέκτη μέσω του καναλιού, καθώς και τις διάφορες τεχνικές που φέρει το σήμα με σκοπό η προσομοίωση να ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο σε πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος.

2.2.1 OFDM model

Το σύστημα OFDM μοντελοποιήθηκε με τη χρήση του MATLAB ώστε να είναι δυνατή η μεταβολή και η δοκιμή διαφόρων παραμέτρων του συστήματος. Ο στόχος της προσομοίωσης ήταν να μετρηθεί το SER (symbol error rate) προς την πυκνότητα φάσματος θορύβου E_s/N_0 υπό διαφορετικές συνθήκες και να επιτραπεί να δοκιμαστούν τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι αξιολόγησης. Για την αξιολόγηση της ανίχνευσης συμβόλων και της εκτίμησης του καναλιού χρησιμοποιήθηκαν οι παραδοσιακοί μέθοδοι ανίχνευσης LS,MMSE και καθώς επίσης και το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο.

2.2.2 Serial to parallel Conversion

Αρχικά έχουμε την είσοδο των δεδομένων στη σειριακή μορφή τα οποία τα μετατρέπουμε σε παράλληλη με τη μορφή subcarriers. Ανάλογα με τον τύπο διαμόρφωσης καθορίζονται και τα subcarriers. Η σειριακή ροή δεδομένων εισόδου διαμορφώνεται στο μέγεθος λέξης που απαιτείται για τη μετάδοση, 4 bits/λέξη για QPSK, και μετατοπίζεται σε παράλληλη μορφή. Στη συνέχεια, τα δεδομένα μεταδίδονται παράλληλα αναθέτοντας κάθε λέξη δεδομένων σε ένα φέρον στη μετάδοση.

2.2.3 Διαμόρφωση δεδομένων με QPSK

Τα δεδομένα που πρόκειται να μεταδοθούν σε κάθε φέρον κωδικοποιούνται διαφορεικά με τα προηγούμενα σύμβολα και στη συνέχεια αντιστοιχίζονται σε ένα QPSK μορφή. Επειδή η διαφορεική κωδικοποίηση απαιτεί αρχική αναφορά φάσης, ένα επιπλέον σύμβολο προστίθεται στην αρχή για το σκοπό αυτό. Τα δεδομένα σε κάθε σύμβολο αντιστοιχίζονται στη συνέχεια σε μια γωνία φάσης με βάση τη μέθοδο διαμόρφωσης. Για την QPSK οι γωνίες φάσης χρησιμοποιούνται οι 0, 90, 180 και 270 μοίρες. Η χρήση του phase shift keying παράγει ένα

σήμα σταθερού πλάτους και επιλέχθηκε για την απλότητα και για να μειωθούν τα προβλήματα με διακυμάνσεις πλάτους λόγω εξασθένησης.

2.2.4 Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier

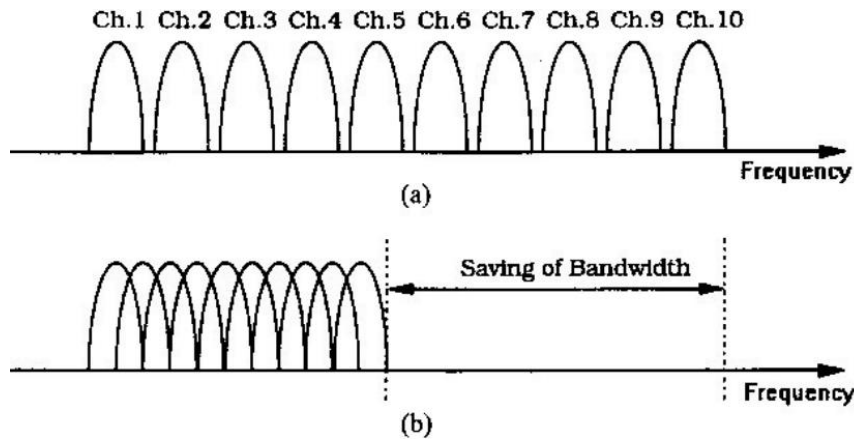
Αφού υπολογιστεί το απαιτούμενο φάσμα, χρησιμοποιείται αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier για την εύρεση της αντίστοιχης χρονικής κυματομορφής.

2.2.5 Εισαγωγή CP και IQ imbalance

Σκοπός του κυκλικού προθέματος είναι να βελτιώσει την ανθεκτικότητα του σήματος στην παραμόρφωση που προκαλείται από την πολλαπλή διαδρομή και άλλες παραμορφώσεις στο κανάλι μετάδοσης. Η διαδικασία πρέπει να γίνει για κάθε carrier. Επίσης η προσθήκη της ανισοροπίας μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του συστήματος αισθητά δημιουργώντας έτσι ένα μοντέλο που ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες. Τα προβλήματα που δημιουργεί είναι αύξηση του SER, παρενέργειες μεταξύ υποφορέων και μειωμένη απόδοση καναλιού. Έτσι μια προσομοίωση μπορούμε να γνωρίζουμε άμα χρειάζεται διόρθωση στο υλικό είτε στο λογισμικό ή γένικα κάποιο καλιμπράρισμα στο σύστημα.

2.2.6 Γεννήτρια OFDM

Για την επιτυχή παραγωγή OFDM, η σχέση μεταξύ όλων των φορέων πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά ώστε να διατηρείται η ορθογωνιότητα των φορέων. Για το λόγο αυτό, το OFDM παράγεται επιλέγοντας πρώτα το απαιτούμενο φάσμα, με βάση την είσοδο δεδομένων και του χρησιμοποιούμενου σχήματος διαμόρφωσης. Σε κάθε φορέα που πρόκειται να παραχθεί ανατίθενται κάποια δεδομένα προς μετάδοση. Το απαιτούμενο πλάτος και φάση του φέροντος υπολογίζεται στη συνέχεια με βάση το QPSK. Το απαιτούμενο φάσμα μετατρέπεται στη συνέχεια πίσω στο σήμα του στο πεδίο του χρόνου χρησιμοποιώντας έναν αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier.. Ο IFFT εκτελεί τον μετασχηματισμό πολύ αποτελεσματικά και παρέχει έναν απλό τρόπο διασφάλισης ότι τα παραγόμενα σήματα φορέα είναι ορθογώνια. Στο OFDM τα φάσματα των subcarriers επικαλύπτονται χωρίς να προκαλείται το φαινόμενο ICI (Inter Carrier Interference), για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει οι υποφέρουσες να είναι μαθηματικά ορθογώνιες. Στο σχήμα 13 στο a οι subcarriers είναι ορθογώνιοι αξιοποιώντας όλο το διαθέσιμο φάσμα ενώ στο b επικαλύπτονται.



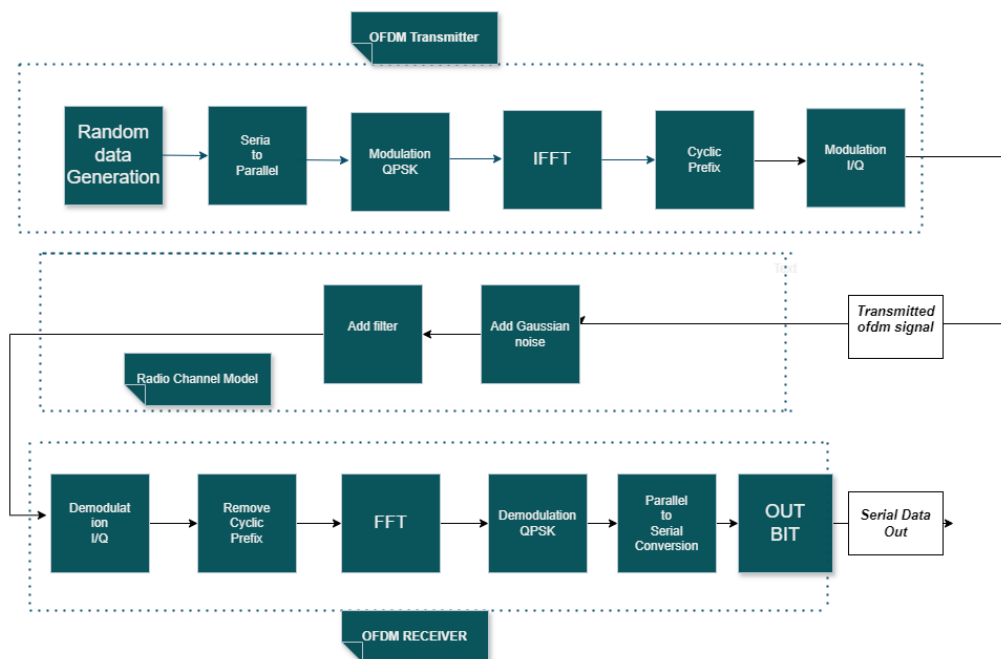
Εικόνα 11 Subcarrier που επικαλύπτονται Πηγή Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και πληροφορικής εργαστήριο σημάτων και τηλεπικοινωνιών

2.2.7 Κανάλι διαλείψεων Rayleigh

Το κανάλι εξασθένησης Rayleigh είναι ένα χρήσιμο μοντέλο πραγματικών φαινομένων στις ασύρματες επικοινωνίες. Αυτά τα φαινόμενα περιλαμβάνουν φαινόμενα σκέδασης πολλαπλών διαδρομών, χρονική διασπορά και μετατοπίσεις Doppler που προκύπτουν από τη σχετική κίνηση μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Αυτοί οι παράγοντες μειώνουν την ισχύ του σήματος.

2.2.8 Δέκτης

Ο δέκτης κάνει ουσιαστικά την αντίστροφη λειτουργία του πομπού. Το κυκλικό πρόθεμα αφαιρείται. Ο FFT κάθε συμβόλου είναι για να βρεθεί το αρχικό μεταδιδόμενο φάσμα. Η γωνία φάσης κάθε φέροντος μετάδοσης εκτιμάται στη συνέχεια και μετατρέπεται πάλι στη λέξη δεδομένων με αποδιαμόρφωση της λαμβανόμενης φάσης. Οι λέξεις δεδομένων συνδυάζονται στη συνέχεια στην ίδια λέξη μεγέθους με τα αρχικά δεδομένα.



Εικόνα 12 OFDM model

2.3 Περιγραφή της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα

PhaseShift

Το PhaseShift είναι ένας πίνακας ή ένα διάνυσμα που περιέχει τους παράγοντες μετατόπισης φάσης για κάθε πακέτο στο σύστημα OFDM. Αυτοί οι παράγοντες μπορεί να χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν τυχαίες φάσεις στο κάθε πακέτο στην επικοινωνία.

Μαθηματικά, μπορούμε να περιγράψουμε τον πίνακα PhaseShift ως εξής:

Έστω ότι έχουμε έναν πίνακα PhaseShift με διαστάσεις $1 \times \text{NumPacket}$, όπου NumPacket είναι ο αριθμός των πακέτων στο σύστημα OFDM.

Ο πίνακας PhaseShift περιέχει τις τυχαίες τιμές φάσης για κάθε πακέτο. Οι τιμές αυτές μπορεί να είναι σε ακτίνια ή σε μοίρες, ανάλογα με την εφαρμογή.

Έτσι, μαθηματικά, ο πίνακας PhaseShift μπορεί να περιγραφεί ως:

PhaseShift=[$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{\text{NumPacket}}$]

Όπου κάθε ϕ_i είναι η τυχαία τιμή φάσης για το πακέτο i .

FFT και IFFT

Οι μετασχηματισμοί FFT και IFFT χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων επικοινωνίας και της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος.

FFT (Fast Fourier Transform)

Ο μετασχηματισμός μετατρέπει ένα σήμα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Με μαθηματική περιγραφή, μπορούμε να τον περιγράψουμε ως εξής:

Έστω ότι έχουμε ένα σήμα $x[n]$ μήκους N όπου $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. Ο FFT του σήματος $x[n]$, που συμβολίζεται με $X[k]$, ορίζεται ως:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi kn/N}$$

όπου:

- $K = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.
- j είναι η μιγαδική μονάδα.
- e είναι η βάση του φυσικού λογάριθμου.
- N είναι το μήκος του σήματος.

IFFT (Inverse Fast Fourier Transform): Ο μετασχηματισμός IFFT εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία του FFT δηλαδή μετατρέπει ένα σήμα από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου. Μαθηματικά ο ορίζεται ως εξής:

Έστω ότι έχουμε ένα σήμα $X[k]$ στο πεδίο της συχνότητας όπου $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. Ο IFFT του σήματος $X[k]$, που συμβολίζεται με $x[n]$, ορίζεται ως:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j2\pi kn/N}$$

όπου:

- $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.
- j είναι η μιγαδική μονάδα.
- e είναι η βάση του φυσικού λογάριθμου.

N είναι το μήκος του σήματος.

Cyclic Prefix - CP

Η προσθήκη κυκλικής προθέρμανσης σε ένα σήμα συνήθως γίνεται για να αντιμετωπιστεί η παραμόρφωση που προκύπτει από την απόδοση του καναλιού και να εξασφαλιστεί η ορθή λήψη του σήματος από το δέκτη. Ας θεωρήσουμε ένα σήμα OFDM με μήκος συμβόλου N και μήκος CP N_{cp} . Το σήμα που θα μεταδοθεί είναι η συνένωση του σήματος και των δεδομένων. Η μαθηματική περιγραφή της προσθήκης CP είναι η ακόλουθη: Έστω ότι έχουμε τα δεδομένα στο πεδίο του χρόνου, τα οποία αναπαρίστανται από την ακολουθία $x(n)$, όπου $n \equiv 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

Η προσθήκη της CP σημαίνει ότι τα τελευταία N_{cp} δείγματα των δεδομένων $x(n)$ θα προστεθούν στην αρχή του συμβόλου, δημιουργώντας έτσι έναν κυκλικό πρόθεμα.

Έστω $x_{CP}(n)$ τα δεδομένα CP προστίθενται στην αρχή του συμβόλου. Αυτά τα δεδομένα είναι τα τελευταία N_{CP} δείγματα του σήματος $x(n)$.

Έτσι, το συνολικό σήμα που μεταδίδεται είναι η συνένωση του CP και των δεδομένων, δηλαδή:

$$x_{transmitted}(n) \equiv \begin{cases} x_{CP}(n), & \text{για } N_{CP} \leq n < 0 \\ x(n), & \text{για } 0 \leq n < N \end{cases}$$

όπου $x_{transmitted}(n)$ είναι το συνολικό σήμα που μεταδίδεται και N_{CP} είναι το μήκος του κυκλικού προθέματος.

Αντίστοιχα:

Η αφαίρεση του κυκλικού προθέματος σε συστήματα OFDM είναι μια διαδικασία όπου το CP που προστέθηκε στην αρχή κάθε συμβόλου αφαιρείται πριν την ανάλυση του σήματος. Αυτό είναι απαραίτητο για την αφαίρεση της προσθετικής επικάλυψης μεταξύ των συμβόλων και την επαναφορά του αρχικού σήματος.

Η μαθηματική περιγραφή της αφαίρεσης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

Έστω ότι έχουμε έναν πίνακα y που αντιπροσωπεύει ένα σήμα OFDM με CP. Ο πίνακας y έχει διαστάσεις $N \times P$, όπου N είναι το μήκος κάθε συμβόλου OFDM μαζί με το CP και P το πλήθος των συμβόλων.

Για να αφαιρέσουμε το CP από κάθε σύμβολο πρέπει να επιλέξουμε μόνο τα δεδομένα του συμβόλου, αγνοώντας το CP. Έτσι, για κάθε σύμβολο p η αφαίρεση του CP μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως εξής:

Έστω, L το μήκος του CP και x το σύμβολο OFDM με CP. Αντιστοίχως x έχει μήκος N και περιλαμβάνει το CP και τα δεδομένα του συμβόλου.

Τότε μετά την αφαίρεση του CP το σύμβολο x μπορεί να εκφραστεί ως:

$$x_{data} \equiv x(L+1:N)$$

όπου x_{data} είναι τα δεδομένα του συμβόλου χωρίς το CP.

Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για κάθε σύμβολο του πίνακα y , μπορούμε να αφαιρέσουμε το CP από όλα τα σύμβολα και να παραμείνουμε τα δεδομένα του αρχικού σήματος.

Ανισορροπία IQ

Θα περιγράψουμε την ανισορροπία IQ και την επίδρασή της στο σήμα μετάδοσης. Οι πληροφορίες που θα μεταδοθούν είναι ένα σύνθετο σήμα:

$$x = x_i + jx_q$$

$$y = \operatorname{Re} \left\{ x e^{j2\pi f_c t} \right\}$$

$$= x_i \cos(2\pi f_c t) - x_q \sin(2\pi f_c t)$$

Στον πομπό οι πληροφορίες x_i αποστέλλονται $\cos(2\pi f_c t)$ και $-\sin(2\pi f_c t)$

Στον δέκτη πολλαπλασιάζουμε το σήμα $y \cos(2\pi f_c t)$ και $-\sin(2\pi f_c t)$ ακολουθούμε το low pass filtering (LPF) για να εξάγουμε, \hat{x}_i \hat{x}_q .

Από τριγωνικές ταυτότητες :

$$\int_0^T \cos(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_c t) dt = \frac{1}{2} [1 + \cos(4\pi f_c t)],$$

$$\int_0^T \sin(2\pi f_c t) \sin(2\pi f_c t) dt = \frac{1}{2} [1 - \cos(4\pi f_c t)],$$

$$\int_0^T \cos(2\pi f_c t) \sin(2\pi f_c t) dt = 0$$

Τα μαθηματικά για την εξαγωγή των μαθηματικών στον δέκτη είναι τα εξής:

$$\hat{x}_i = \int_0^T y \cos(2\pi f_c t) dt$$

$$\int_0^T [x_i \cos(2\pi f_c t) - x_q \sin(2\pi f_c t)] \cos(2\pi f_c t) dt$$

$$= \frac{x_i}{2}$$

Ομοίως για το Q-arm,

$$\hat{x}_q = \int_0^T y - \sin(2\pi f_c t)$$

$$\int_0^T [x_i \cos(2\pi f_c t) - x_q \sin(2\pi f_c t)](-\sin(2\pi f_c t))$$

$$= \frac{x_q}{2}$$

Ανισοροπία φάσης στην διαμόρφωση IQ

Σε έναν ιδανικό διαμορφωτή IQ, η διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση του I και του Q είναι 90 μοίρες, με αποτέλεσμα τη χρήση $\cos(2\pi f_c t)$ και $\sin(2\pi f_c t)$ για την αποστολή x_i και x_q .

Όταν υπάρχει ανισοροπία φάσης, η διαφορά μπορεί να μην είναι ακριβώς 90 μοίρες. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι $\cos(2\pi f_c t)$ για x_i και $\sin(2\pi f_c t)$ για αποστολή x_q

Ανισοροπία πλάτους στη διαμόρφωση IQ

Όταν υπάρχει ανισοροπία πλάτους, υπάρχει μικρή διακύμανση στο πλάτος αυτών των ημιτονοειδών και συνημιτονοειδών βραχιόνων στον διαμορφωτή. Αυτό μπορεί να μοντελοποιηθεί ως χρήση $\cos(2\pi f_c t)$ για αποστολή x_i και χρήση $(1 + \alpha)\sin(2\pi f_c t)$ για αποστολή x_q , όπου α η σταθερά βρίσκεται μεταξύ 0 και 1.

Το σήμα μετάδοσης συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης της ανισοροπίας φάσης και πλάτους είναι:

$$y = x_i \cos(2\pi f_c t) - x_q(1 + \alpha)\sin(2\pi f_c t + \varphi)$$

Υποθέτοντας ότι έχουμε ιδανικό αποδιαμορφωτή IQ στον δέκτη, για να εξαγάγουμε, \hat{x}_i και \hat{x}_q αντίστοιχα.

$$\hat{x}_i = \int_0^T y \cos(2\pi f_c t)$$

$$= \int_0^T [x_i \cos(2\pi f_c t) - x_q(1 + \alpha)\sin(2\pi f_c t + \varphi)] \cos(2\pi f_c t)$$

$$= \frac{1}{2} [x_i - x_q (1 + a) \sin(\varphi)]$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_q &= \int_0^T y(-\sin(2\pi f_c t)) \\ &= \int_0^T [x_i \cos(2\pi f_c t) - x_q (1 + a) \sin(2\pi f_c t + \varphi)] (-\sin(2\pi f_c t)) \\ &= \frac{1}{2} [x_q (1 + a) \cos(\varphi)] \end{aligned}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις καταλήγουμε στο συμπέρασμα, το επιθυμητό σήμα παραμορφώνεται με την παρουσία της ανισοροπίας IQ.

Συνολική πιθανότητα σφάλματος συμβόλου

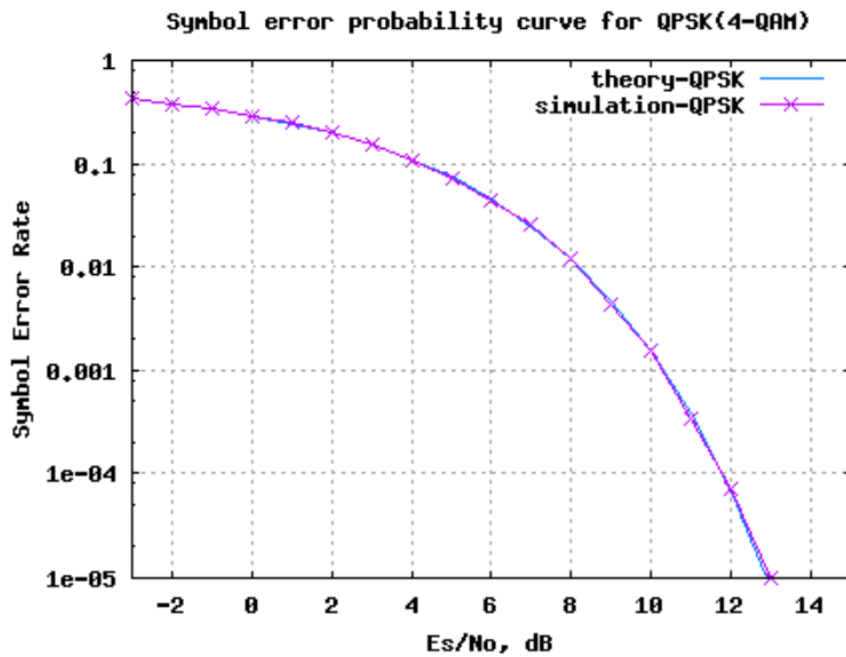
Η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου (SER) για QPSK είναι η εξής:

$$P_e = 2Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right) - \left[Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right)\right]^2$$

Όπου

E_s είναι η ενεέργεια ανα σύμβολο

Για υψηλότερες τιμές του SNR η προσέγγιση είναι : $P_e = 2Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right)$.



Εικόνα 13 Ποσοστό σφάλματος συμβόλου για διαμόρφωση QPSK. Πηγή <https://dsplog.com/2007/11/06/symbol-error-rate-for-4-qam/>

BER QPSK

Ο αστερισμός του QPSK συμβολίζεται ως εξής:

$$x = \left\{ \frac{[(2i - 1) + (2q - 1)j]\sqrt{E_s}}{\sqrt{2}}, i = 0,1, q = 0,1 \right\}$$

Η εκτίμηση του καναλιού δεν είναι τέλεια. Για να υπολογίσουμε το BER του πιο σημαντικού bit (MSB) του συμβόλου του αστερισμού θεωρούμε δύο σύμβολα αστερισμού

$$\frac{(1+j)\sqrt{E_s}}{\sqrt{2}} \text{ και } \frac{(1-j)\sqrt{E_s}}{\sqrt{2}}, \text{ που στάλθηκαν έχουν διαφορετικό BER λόγω ατελούς CSI.}$$

Αυτό είναι διαφορετικό από την τέλεια περίπτωση CSI που συνήθως αποστέλλεται μόνο ένα σύμβολο λόγω της συμμετρίας του αστερισμού και του ορίου απόφασης.

Το όριο απόφασης για το MSB του συμβόλου QPSK είναι ο πραγματικός άξονας και το BER MSB του υποφορέα είναι

$$P_{b1(i)} = \frac{1}{2} \left(P \left\{ \text{Im}[Y_i \hat{H}^*] < 0 \mid x_i^d = \frac{(1+j)\sqrt{E_s}}{\sqrt{2}} \right\} + \right. \\ \left. P \left\{ \text{Im}[Y_i \hat{H}^*] < 0 \mid x_i^d = \frac{(-1+j)\sqrt{E_s}}{\sqrt{2}} \right\} \right)$$

Ομοίως υπολογίζουμε το BER του λιγότερο σημαντικού bit (LSB)

$$P_{b2(i)} = \frac{1}{2} \left(P \left\{ \text{Im}[Y_i \hat{H}^*] < 0 \mid x_i^d = \frac{(1+j)\sqrt{E_s}}{\sqrt{2}} \right\} + \right. \\ \left. P \left\{ \text{Im}[Y_i \hat{H}^*] < 0 \mid x_i^d = \frac{(-1+j)\sqrt{E_s}}{\sqrt{2}} \right\} \right)$$

Τελικά ο μέσος όρος BER σε όλους τους υποφορείς είναι:

$$P_b = \frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{N-1} [P_{b1(i)} + P_{b2(i)}]$$

OFDM

Μετάδοση Ορθογώνιας Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM) που ορίζεται σύμφωνα με την προδιαγραφή IEEE 802.11a .

$\frac{1}{T}$ είναι ο ελάχιστος διαχωρισμός συχνότητας για δύο ημιτονοειδής με αυθαίρετες φάσεις οι οποίες είναι ορθογώνιες.

T είναι η περίοδος των συμβόλων. Στην OFDM μετάδοση χρησιμοποιούνται πολλαπλά ημιτονοειδή με διαχωρισμό συχνότητας τα οποία εκφράζονται ως εξής:

$$g_k(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} e^{\frac{j2\pi kt}{T}} w(t), \text{ όπου}$$

$k = 0, 1, \dots, k-1$ αντιστοιχούν στην συχνότητα του ημιτονοειδούς και

$w(t) = u(t) - u(t-T)$ είναι ένα ορθογώνιο παράθυρο πάνω στο $[0, T)$

Μαθηματικά το σήμα μετάδοσης είναι:

$$s(t) = a_0 g_0(t) + a_1 g_1(t) + \dots + a_{k-1} g_{k-1}(t)$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_0^{K-1} a_k g_k(t) \\
&= \frac{1}{\sqrt{T}} \sum_0^{K-1} a_k e^{\frac{j2\pi kt}{T}} w(t)
\end{aligned}$$

Το άθροισμα όλων των διαμορφωμένων ημιτονοειδών προστίθεται και το προκύπταν σήμα αποστέλλεται ως $s(t)$.

Rayleigh fading Channel.

Το μοντέλο εξασθένισης Rayleigh είναι ένα στατιστικό μοντέλο για την επίδραση του περιβάλλοντος διάδοσης σε ένα ραδιοσήμα. Είναι ένα ορθολογικό μοντέλο όταν υπάρχουν πολλά αντικείμενα που διασκορπίζουν το μεταδιδόμενο σήμα. Επίσης όταν υπάρχουν πολλά μονοπάτια γίνεται εφαρμογή του κεντρικού οριακού θεωρήματος. Το κάθε μονοπάτι μπορεί να μοντελοποιηθεί ως κυκλικά συμμετρική σύνθετη τυχαία μεταβλητή Gauss με τον χρόνο ως μεταβλητή. Χρησιμοποιεί την κατανομή Rayleigh για να συμπληρώσει τις μεθόδους με μηδενική μέση τιμή και φάση μεταξύ 0 και 2π ακτίνια ομοιόμορφα κατανεμημένα.

Η μορφή της κυκλικά συμμετρικής σύνθετης κανονικής τυχαίας μεταβλητής είναι η εξής:

$$Z = X + jY$$

Όπου X πραγματικό και Y είναι το φανταστικό μέρος, οι οποίες είναι ανεξάρτητες και πανομοιότυπα κατανεμημένες κανονικές τυχαίες μεταβλητές με μηδενική μέση τιμή.

Για μια κυκλικά συμμετρική σύνθετη τυχαία μεταβλητή ισχύει

$$E[Z] = 0 \text{ και } E[|Z|^2] = 2\sigma^2$$

Το μέτρο $|Z|$, το οποίο έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad r \geq 0$$

Αυτό ονομάζεται *Rayleigh* τυχαία μεταβλητή.

Το μοντέλο καναλιού *Rayleigh fading*, επίσης γνωστό ως *Non-line of sight (Non-LOS)*, είναι καλό σε ένα σύνθετο περιβάλλον όπου δεν υπάρχει γραμμή οπτικής επαφής (*LoS*) μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Πιθανώς, η ανάκλαση, η περίθλαση και η σκέδαση είναι αναπόφευκτες.

Εκτίμηση *LS*, *MMSE*

Χρησιμοποιώντας τα σύμβολα πιλότου και τα ληφθέντα σύμβολα, η εκτίμηση *LS* του καναλιού υπολογίζεται ως εξής:

$$\hat{H}_{LS}[k] = \frac{Y_p[k]}{X_p[k]}$$

όπου $Y_p[k]$ το ληφθέν σήμα πιλότου και το $X_p[k]$ το γνωστό σύμβολο πιλότου για το υποφορέα k

Επίσης η εκτίμηση του καναλιού με *MMSE* υπολογίζεται ως εξής:

$$\hat{H}_{MMSE} = R_{HH} (R_{HH} + \frac{\sigma^2}{P_p} I)^{-1} \hat{H}_{LS}$$

όπου R_{HH} είναι ο πίνακας αυτοσυσχέτισης του καναλιού, σ^2 η διακύμανση του θορύβου και P_p η ισχύς του πιλότου.

2.4 Ανάλυση των εργαλείων και της διαδικασίας που ακολούθηθηκαν.

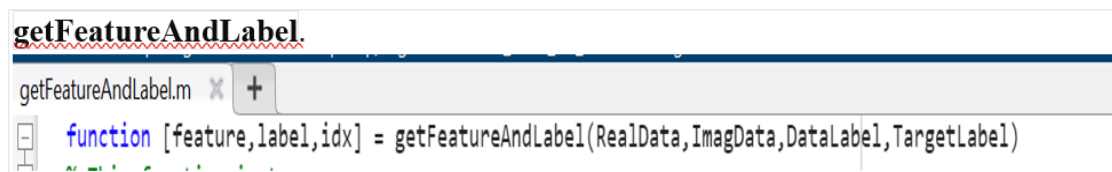
2.4.1 Δημιουργία *datasets*

Για τη δημιουργία δεδομένων εκπαίδευσης και επικύρωσης για το μοντέλο βαθιάς μάθησης του συστήματος μας τα δεδομένα συλλέγονται για ένα μόνο υποφορέα που επιλέγεται με βάση μια προκαθορισμένη μετρική. Ο πομπός στέλνει πακέτα στον δέκτη, όπου κάθε πακέτο περιέχει ένα σύμβολο πιλότου OFDM και ένα σύμβολο δεδομένων OFDM. Τα σύμβολα δεδομένων μπορούν να παρεμβάλλονται στην ακολουθία πιλότου. Κάθε δείγμα εκπαίδευσης περιέχει όλα τα σύμβολα σε ένα λαμβανόμενο πακέτο.

Σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης είναι το σύνολο δεδομένων παραδειγμάτων που χρησιμοποιούνται για την διαδικασία της εκμάθησης και της προσαρμογής των παραμέτρων. Αντίστοιχα το σύνολο δεδομένων επικύρωσης είναι ένα σύνολο δεδομένων παραδειγμάτων που

χρησιμοποιούνται για τον συντονισμό των υπερπαραμέτρων (ρυθμός εκμάθησης ή η επιλογή του βελτιστοποιητή που καθορίζει λεπτομέρειες της διαδικασίας εκμάθησης) . Προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολική προσαρμογή είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα σύνολο δεδομένων επικύρωσης εκτός από τα σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης και δοκιμής. Για παράδειγμα, εάν αναζητηθεί ο καταλληλότερος ταξινομητής για το πρόβλημα, τότε το σύνολο δεδομένων επικύρωσης χρησιμοποιείται για να συγκριθούν οι επιδόσεις τους και να αποφασίσουν ποιο θα ακολουθήσουν τα δεδομένα δοκιμής. Η χρήση των δεδομένων επικύρωσης είναι μόνο για την αξιολόγηση της απόδοσης.

Τα σύμβολα δεδομένων χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του καναλιού, είναι τυχαία και διαμορφώνονται ανάλογα με τον υποφορέα που έχει επιλεγεί στην κλάση διαμόρφωσης ενώ τα σύμβολα πιλότων είναι προκαθορισμένα και τα δυο αποτελούνται από πραγματικούς και φανταστικούς αριθμούς. Για να μπορέσουμε να επεξεργαστούμε τα δεδομένα τα μετατρέπουμε από πίνακες σε διανύσματα.



```
getFeatureAndLabel.m
function [feature,label,idx] = getFeatureAndLabel(RealData,ImagData,DataLabel,TargetLabel)
```

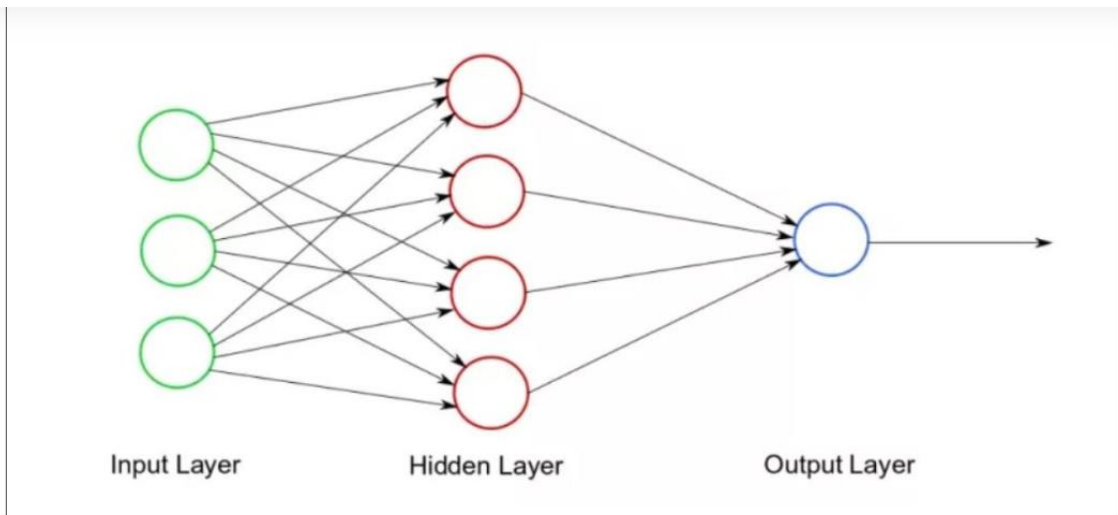
Εικόνα 14 Δημιουργία των δεδομένων σε datasets

Η συνάρτηση έχει τέσσερις εισόδους: τα πραγματικά , τα φανταστικά δεδομένα, τις ετικέτες των δεδομένων (DataLabel) και τη συγκεκριμένη ετικέτα στόχο (TargetLabel) που θέλουμε να εξάγουμε. Η ετικέτα διαμόρφωσης QPSK έχει κάθε σύμβολο που αντιπροσωπεύει την κλάση του. Τα χαρακτηριστικά (Features) είναι τα πραγματικά και φανταστικά μέρη των λαμβανόμενων σημάτων OFDM. Για να εξάγουμε το feature, label και idx πρέπει να ακολουθήσουμε μια συγκεκριμένη διαδικασία.

Αρχικά πρέπει να ορίσουμε τις διαστάσεις των δεδομένων, δηλαδή των αριθμό των συμβόλων και των υποφορέων, η διάσταση του διανύσματος των δεδομένων είναι διπλάσια των στοιχείων διότι περιλαμβάνει και φανταστικούς και πραγματικούς αριθμούς, μετά προχωράμε στη εύρεση πακέτων με την ετικέτα στόχο, επιλέγουμε μόνο τα πακέτα με το επιλεγμένο idx. Στην συνέχεια προχωράμε στην συλλογή των δεδομένων που αποτελούνται από πραγματικά και φανταστικά μέρη , τα οποία αναδιατάσσονται και μετασχηματίζονται ώστε να συμπεριφέρονται ως τα χαρακτηριστικά του dataset. Στο τέλος θα δημιουργηθεί ένας πίνακας ετικετών που είναι υπεύθυνος για την εκπαίδευση του DNN και την ανίχνευση συμβόλων.

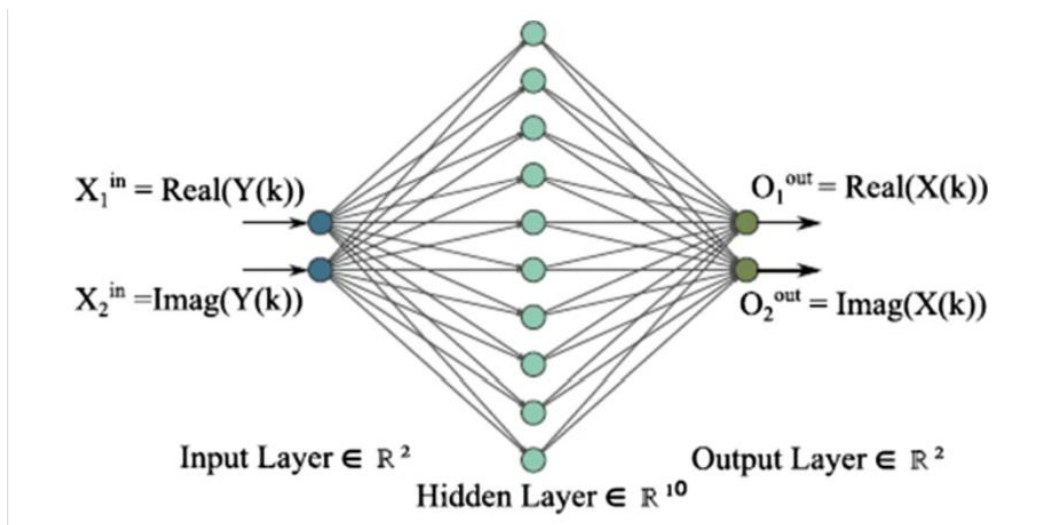
2.4.2 Machine learning μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε

Τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από επίπεδα (layers) διασυνδεδεμένων κόμβων, ή τεχνητών νευρώνων, που επεξεργάζονται διάφορες πληροφορίες και εξάγουν ένα αποτέλεσμα με βάση ένα σύνολο δεδομένων που έχουν εκπαιδευτεί. Ένα βασικό νευρωνικό δίκτυο έχει διασυνδεδεμένους τεχνητούς νευρώνες σε τρία επίπεδα: επίπεδο εισόδου (input layer), κρυμμένο επίπεδο (hidden layer) και επίπεδο εξόδου (output layer) εικόνα 17.



Εικόνα 15 Επίπεδα νευρωνικού δικτύου. Πηγή *Deep Learning Channel Estimation for OFDM 5G Systems with Different Channel Models*

Το ληφθέν και το αρχικό σήμα συλλέχθηκαν ως δεδομένα εκπαίδευσης, ένα πακέτο OFDM γίνεται πλέον η είσοδος στο μοντέλο DL. Έπειτα προχωράμε στην διαδικασία της δημιουργίας του διανύσματος χαρακτηριστικών που αποτελείται από πραγματικές και φανταστικές τιμές τις οποίες τις συνδυάζουμε για να δημιουργήσουμε ένα διάνυσμα πραγματικών δεδομένων εικόνα 18.



Εικόνα 16 Βαθύ νευρωνικό δίκτυο για την εκτίμηση σύνθετου διανύσματος εισόδου. Πηγή *Deep Learning Channel Estimation for OFDM 5G Systems with Different Channel Models*

Αυτά τα διανύσματα τροφοδοτούνται ως είσοδος στα επίπεδα (layers) του DNN. Το νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από διάφορα επίπεδα όπου στο έκαστο εκτελείται μια διαφορετική επεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα στο μοντέλο μας υπάρχουν πέντε επίπεδα επεξεργασίας όπως βλέπουμε και στην εικόνα 19 από το κώδικά μας.

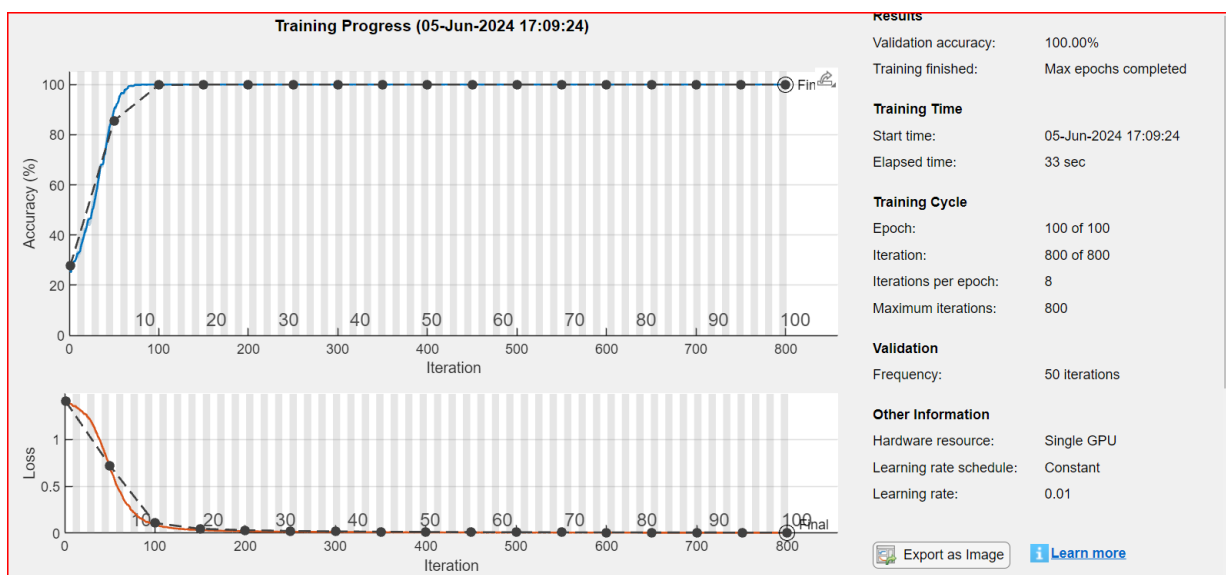
%% Form DNN layers

```
Layers = [ ...  
    sequenceInputLayer(InputSize)  
    lstmLayer(NumHiddenUnits, 'OutputMode', 'last')  
    fullyConnectedLayer(NumClass)  
    softmaxLayer  
    classificationLayer];
```

Εικόνα 17 Επίπεδα του DNN

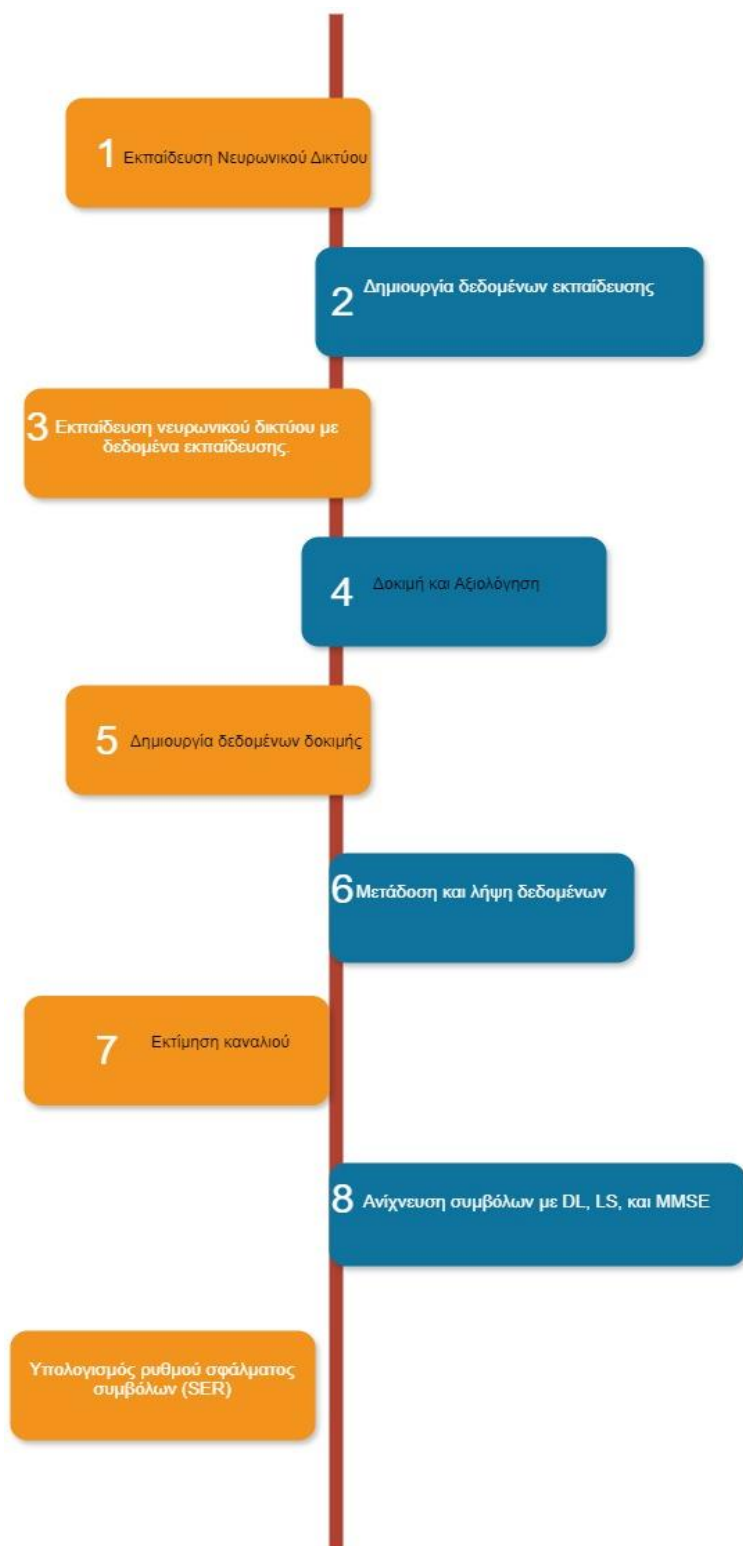
Πιο αναλυτικά το `sequenceInputLayer` ορίζει το μέγεθος της εισόδου στο δίκτυο και καθορίζει τη διάσταση του διανύσματος εισόδου, βασική λειτουργία είναι να δέχεται σειριακά δεδομένα εισόδου και τα προετοιμάζει για το επόμενο στρώμα. Το LSTM στρώμα επεξεργάζεται σειριακά δεδομένα, διατηρώντας πληροφορίες από προηγούμενα χρονικά βήματα, κάτι που είναι κρίσιμο για την ανάλυση χρονικών ακολουθιών όπως τα OFDM σήματα. Μετατρέπει την έξοδο του LSTM στρώματος σε ένα διάνυσμα με μήκος ίσο με τον αριθμό των κλάσεων, προετοιμάζοντας το για την κατηγοριοποίηση. Το `fullyConnectedLayer` είναι ένα πλήρως συνδεδεμένο στρώμα, το οποίο συνδέει κάθε νευρώνα στο προηγούμενο στρώμα με κάθε νευρώνα σε αυτό το στρώμα. Η συνάρτηση `softmax` μετατρέπει τις τιμές της εξόδου σε πιθανότητες, εξασφαλίζοντας ότι το άθροισμά τους είναι ίσο με 1, αυτό είναι χρήσιμο για την κατηγοριοποίηση, καθώς κάθε τιμή αντιπροσωπεύει την πιθανότητα η είσοδος να ανήκει σε μια συγκεκριμένη κλάση. Τελος το `classificationLayer` υπολογίζει τη συνάρτηση απώλειας κατά την εκπαίδευση και τη χρησιμοποιεί για την ενημέρωση των βαρών του δικτύου. Επίσης, χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης του δικτύου κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης και της δοκιμής.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο `adam` και εκπαιδεύεται για 100 εποχές ο ρυθμός εκμάθησης έχει οριστεί στο 0,01 ενώ το όριο της διαβάθμισης ορίζεται στο 1 για να αποφευχθεί έκρηξη διαβάθμισης. Το δίκτυο εκπαιδεύεται με καθορισμένες επιλογές εκπαίδευσης χρησιμοποιώντας τη λειτουργία `trainNetwork`.



Εικόνα 18 Εκπαίδευση μοντέλου

Το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύτηκε με επιτυχία, επιτυγχάνοντας 100% ακρίβεια τόσο στα δεδομένα εκπαίδευσης όσο και στα δεδομένα επικύρωσης εικόνα 20. Η απώλεια μειώθηκε σημαντικά και παρέμεινε κοντά στο μηδέν μετά τις πρώτες επαναλήψεις.



Εικόνα 19 Διάγραμμα ρόης μοντέλου

3 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της έρευνας

3.1 Προσομοιώσεις

Παράμετροι	Προδιαγραφές
Αριθμός υποφομεταφορέων	64
Αριθμός πιλότων	64-10
Αριθμός μπλοκ OFDM	10.000
Αριθμός μονοπατιών	20
Μήκος κυκλικού προθέματος	16
Αστερισμός σημάτων	QPSK
Μοντέλο καναλιού	Rayleigh Fading
Εκτιμητές	DL,LS,MMSE

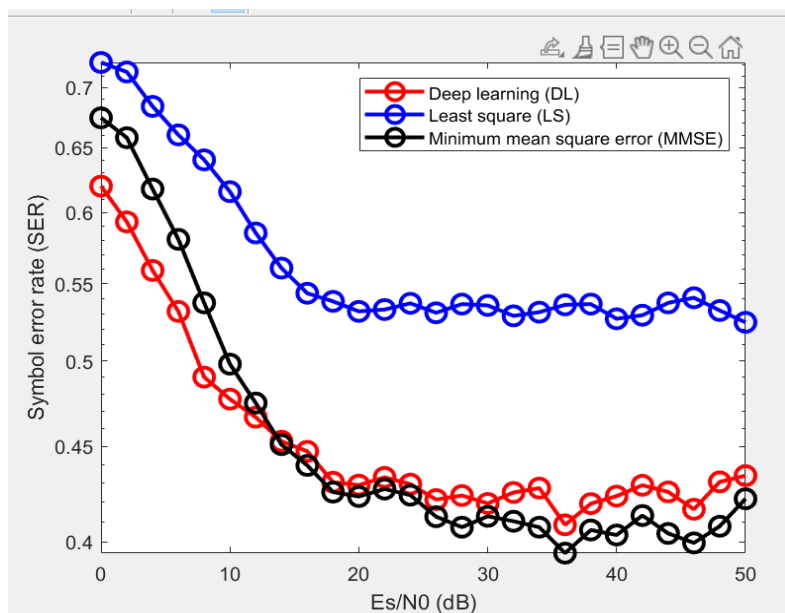
Στα παρακάτω αποτελέσματα παρατηρούμε την αναλογία SER προς SNR για το σήμα OFDM υπό την διαμόρφωση QPSK σε ένα κανάλι εξασθένισης Rayleigh. Συγκρίνονται οι επιδόσεις τριών μεθόδων εκτίμησης DL,MMSE,LS παραμετροποιώντας το IQ imbalance και τους πιλοτικούς υπομεταφορείς. Ο στόχος μας είναι το IRR να κυμαίνεται από -20 έως -50 db, για να το πετύχουμε αυτό πρέπει να επιλέξουμε κατάλληλες τιμές για τις ασυμμετρίες στην ενίσχυση και την φάση.

Οι συντελεστές IQI K_1 και K_2 μπορούν να ληφθούν ως εξής:

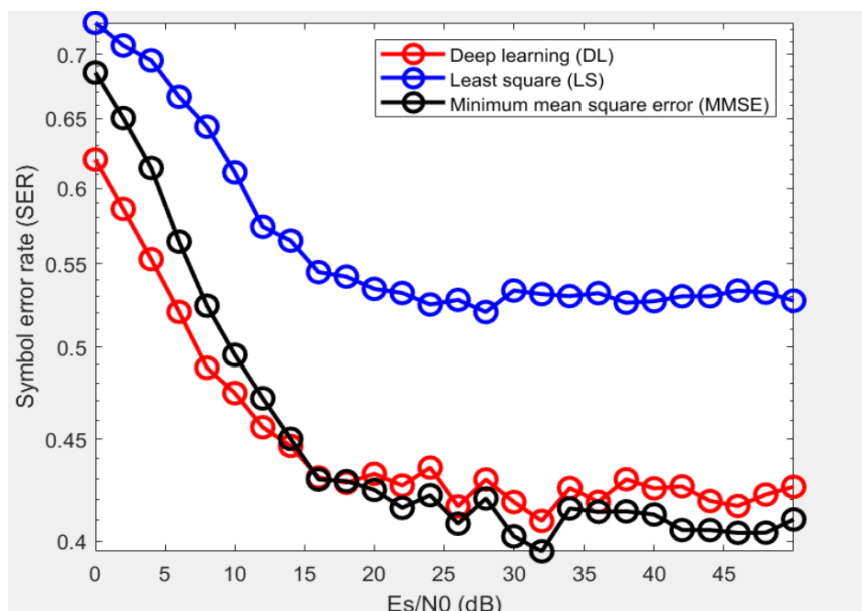
$$K_1 = \frac{1+\varepsilon e^{-j\theta}}{2} \quad \text{και} \quad K_2 = \frac{1-\varepsilon e^{+j\theta}}{2}$$

με ε και θ να υποδηλώνουν την αναντιστοιχία πλάτους και φάσης αντίστοιχα, για τέλεια προσαρμογή I/Q οι παράμετροι γίνονται $\varepsilon = 1$, $\theta = 0$ επομένως, στην περίπτωση αυτή, σύμφωνα με $K_1 = 1$ και $K_2 = 0$. Οι συντελεστές K_1 και K_2 συνδέονται μέσω $K_1 = 1 - K_2$ (IRR), ο οποίος καθορίζει το ποσό της εξασθένισης της ζώνης συχνοτήτων της εικόνας, δηλαδή $IRR = \frac{|K_1|^2}{|K_2|^2}$

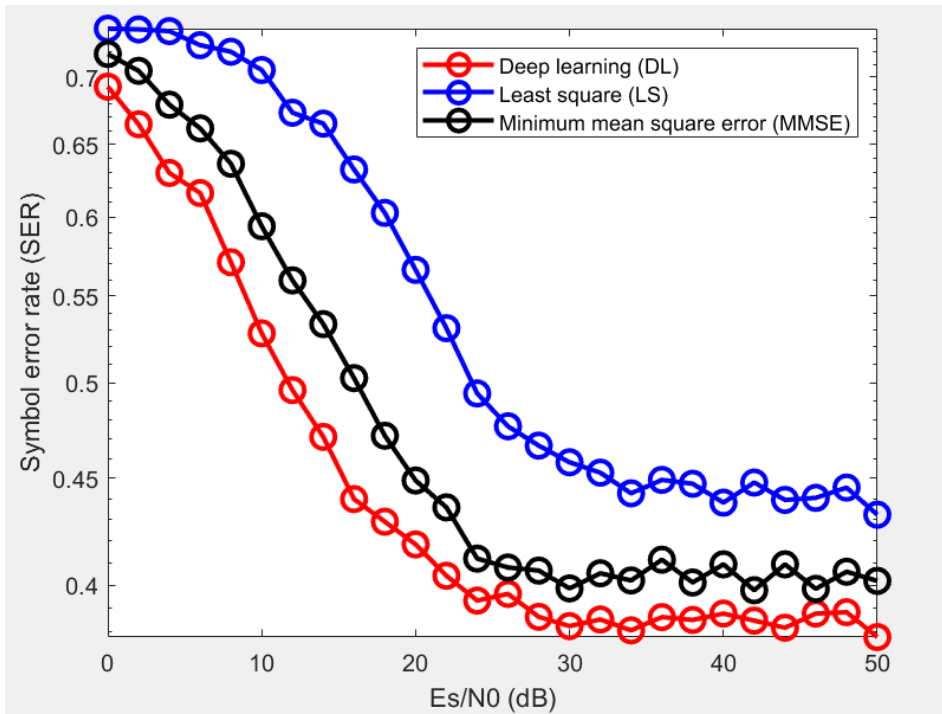
Στις παρακάτω εικόνες γίνεται μια σύγκριση στους αλγορίθμους, παραμετροποιώντας τον αριθμό των πακέτων και των πιλοτικών υπομεταφορέων καθώς επίσης το μέγεθος και την φάση IQ ανισορροπίας. Βελτίωση στην απόδοση παρατηρείται με την μείωση των πιλοτικών υπομεταφορέων καθώς επίσης και με την αύξηση της ανισορροπίας IQ. Στο επίπεδο (0-10dB) όλες έχουν υψηλό SER, αλλά η DL και η MMSE αρχίζουν να ξεχωρίζουν. Στα υπόλοιπα επίπεδα η DL δείχνει να έχει το μικρότερο SER



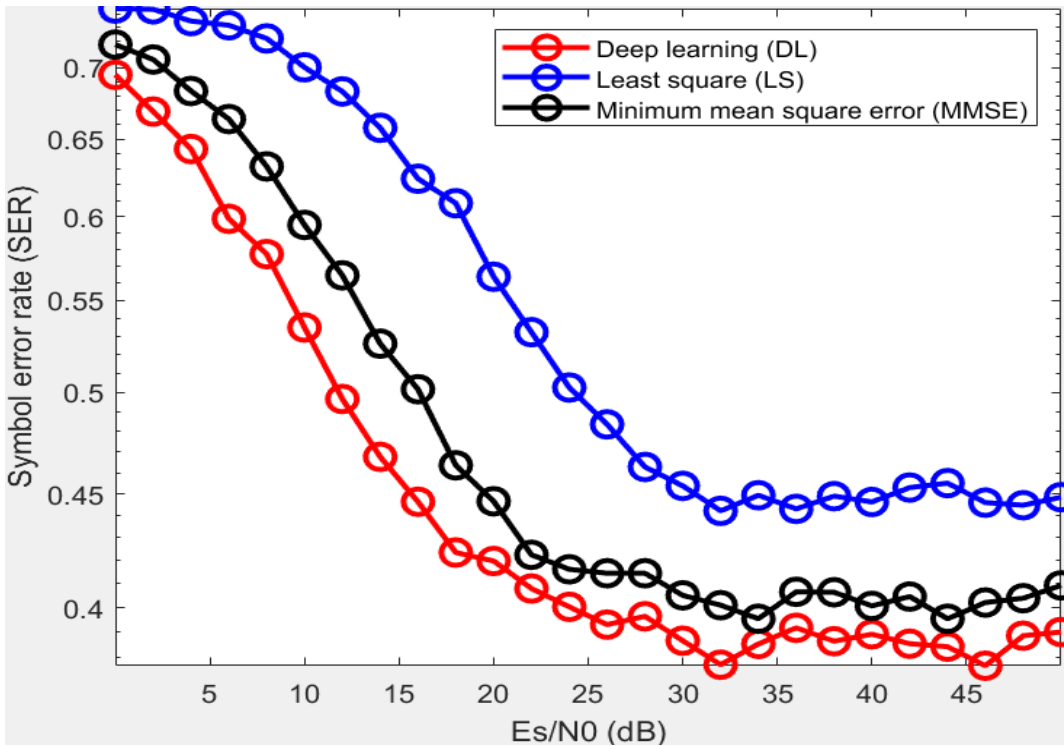
Εικόνα 20 IRR 20dB 10000 packets 10 pilots



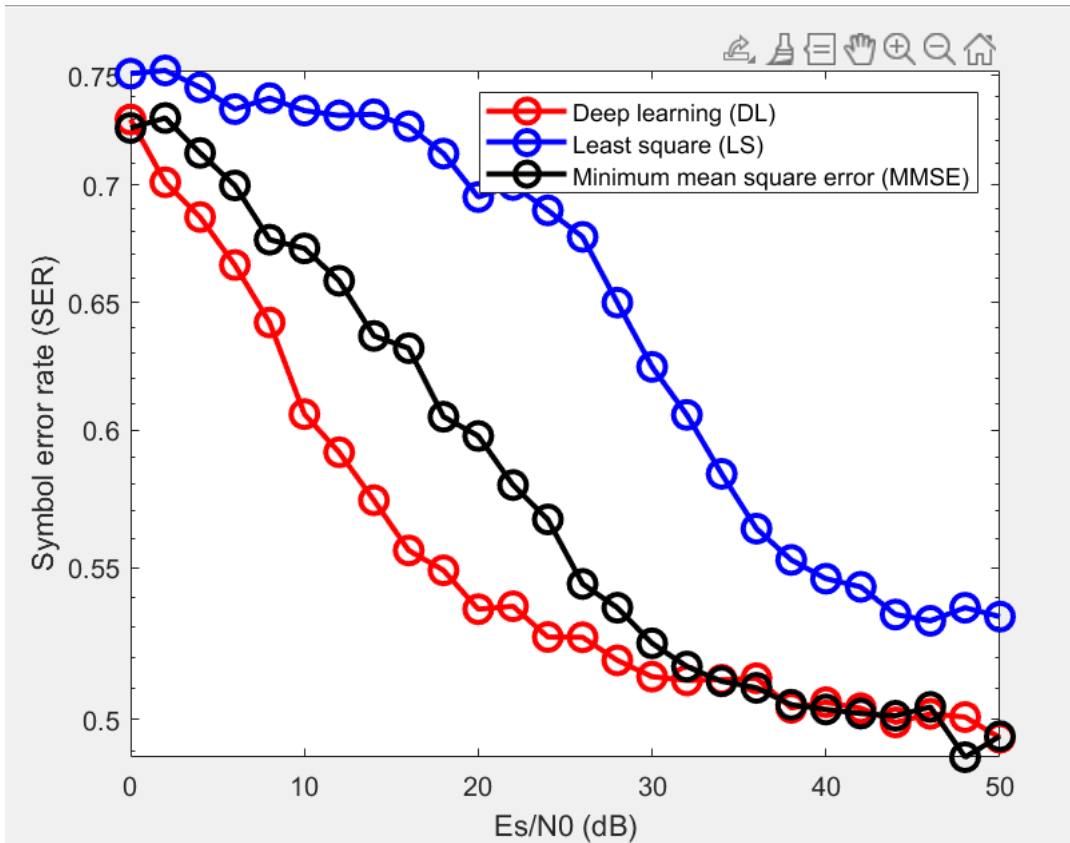
Εικόνα 21 IRR 20dB 10000 packets 64 pilots



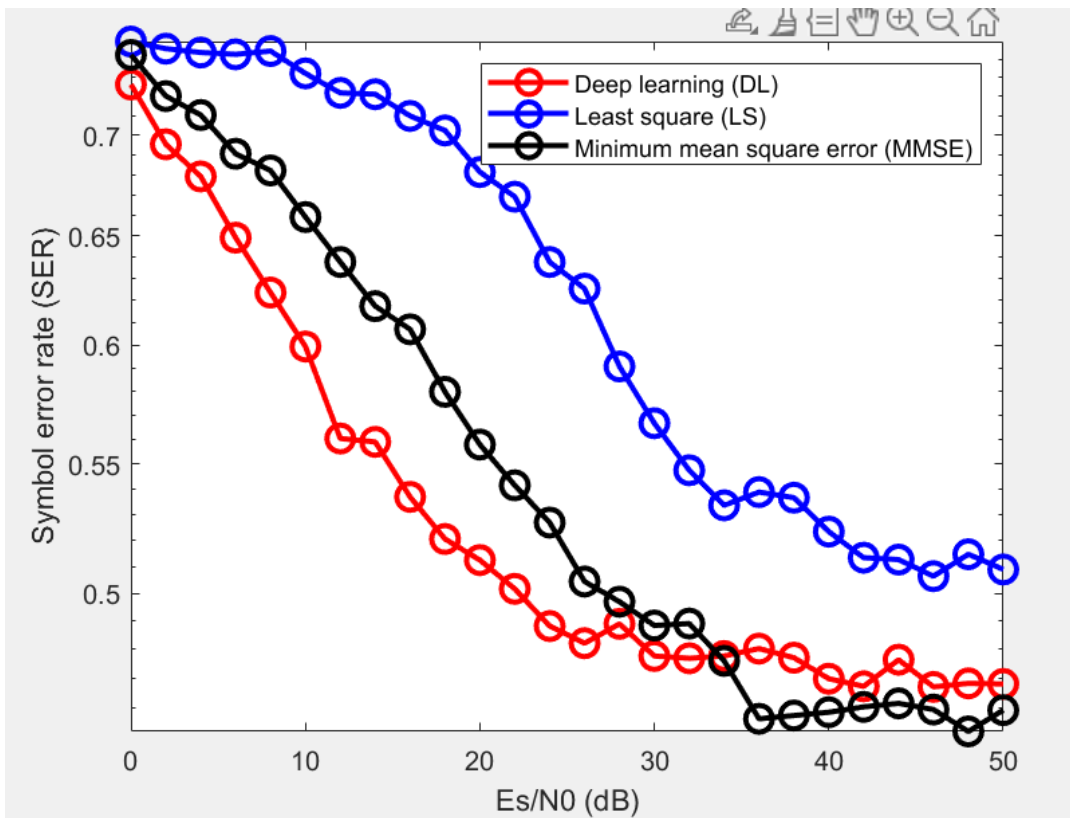
Εικόνα 22 IRR 32.17dB 10000 packets 10 pilots



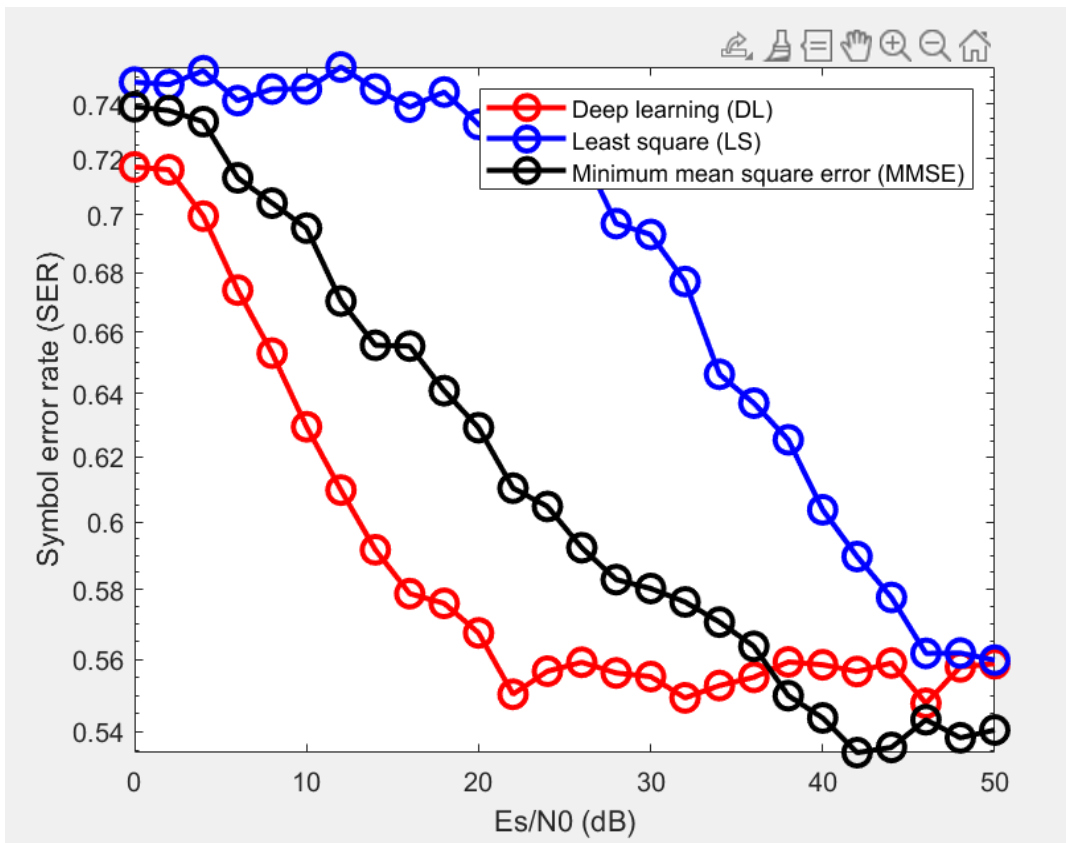
Εικόνα 23 IRR 32 10000 packest 64 pilots



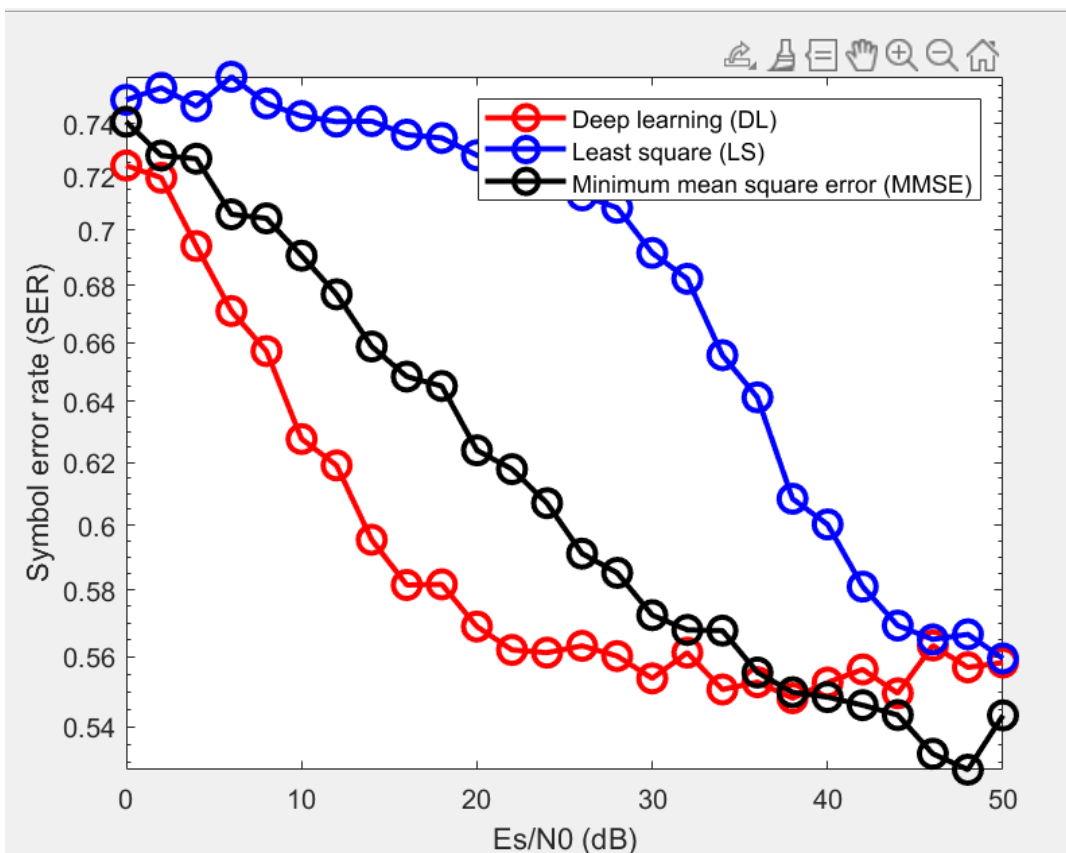
Εικόνα 24 IRR 40 dB 10000 packets 10 pilots



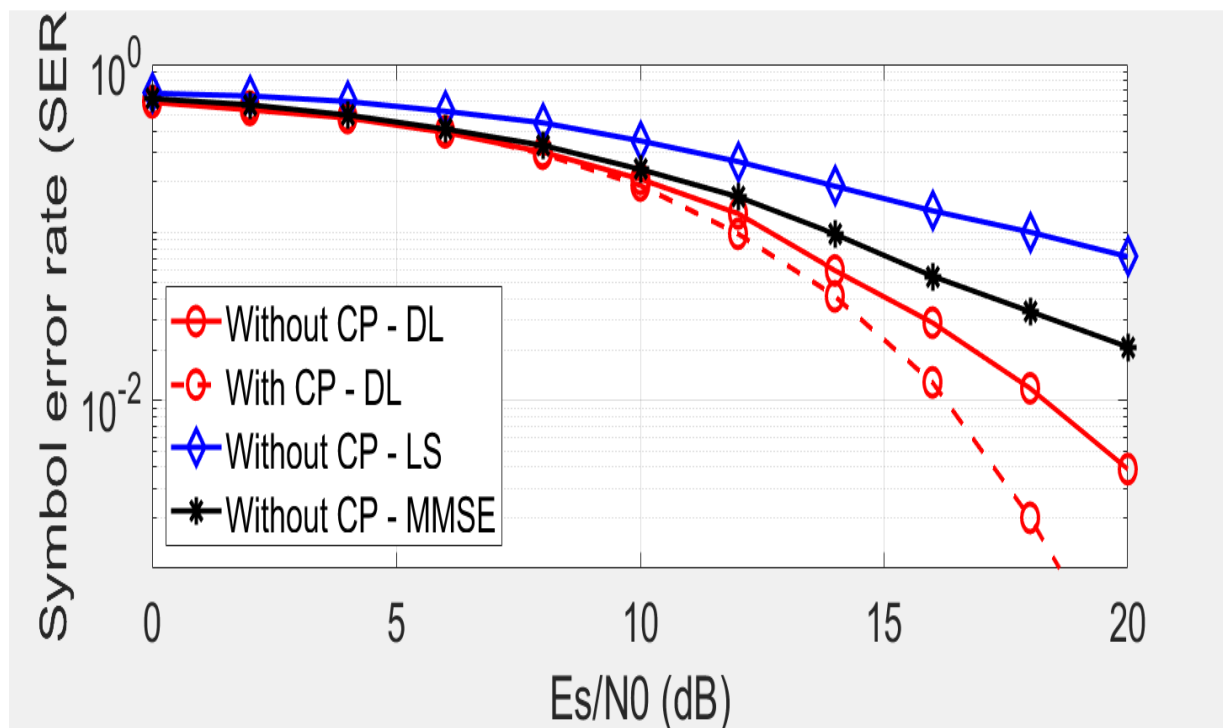
Εικόνα 25 IRR 40dB 10000 packetest 64 pilots



Εικόνα 26 IRR 48 10000 packets 10 pilots



Εικόνα 27 IRR 48dB 10000 packets 64pilots



Command Window

6

Εικόνα 28 Χωρίς προσθήκη κυκλικού προθέματος

Στην εικόνα 23 παρατηρούμε την επίδραση του CP στο DL, η απόδοση φαίνεται να αυξάνεται με την προσθήκη του CP.

3.2 Συμπεράσματα

Σε αυτό το άρθρο έχει αναπτυχθεί μια τεχνική εκτίμησης καναλιών DL, που βασίζεται στο αλγόριθμο Adam για την εκπαίδευση του DNN σε ένα σύστημα OFDM με κανάλι διαλείψεων Rayleigh. Η αποτελεσματικότητα του προσομοιώνεται και υλοποιείται για διάφορες πιλοτικές ρυθμίσεις κάτω από διαφορετικές παραμέτρους λειτουργίας με την χρήση του Matlab. Η ανάλυση του ρυθμού σφάλματος συμβόλων SER σε συνάρτηση με τον λόγο E_s/N_0 συγκρίνει τις τεχνικές εκτίμησης LS, MMSE. Η τεχνική DL έχει εκπαιδευτεί με δεδομένα εκπαίδευσης και επικύρωσης που δημιουργήθηκαν από στην παρούσα έρευνα.

Το DL αποδείχθηκε ισχυρότερο όταν χρησιμοποιούμε μικρούς πιλότους για την εκτίμηση του καναλιού, επίσης σχετικά με το IQ imbalance παρατηρήθηκε όσο αυξάνεται σε dB παρατηρούμε καλύτερη απόδοση στο σύστημα, σημαντική παράμετρος είναι και η προσθήκη CP.

Η μείωση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος που απαιτείται για την εκτίμηση, μαζί με τον χρόνο που απαιτείται για την εκπαίδευση του μοντέλου είναι δύο κρίσιμα θέματα για την

εξέταση του DL σε ασύρματες επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο. Εν ολίγοις, το DL στις ασύρματες επικοινωνίες είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος.

Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Negi, R., & Cioffi, J. (1998). PILOTTONE SELECTION FOR CHANNEL ESTIMATION IN A MOBILE OFDM SYSTEM. In IEEE Transactions on Consumer Electronics (Vol. 44, Issue 3).
2. Barhumi, I., Leus, G., & Moonen, M. (2003). Optimal training design for MIMO OFDM systems in mobile wireless channels. IEEE Transactions on Signal Processing, 51(6), 1615–1624. <https://doi.org/10.1109/TSP.2003.811243>
3. Hassibi, B., & Hochwald, B. M. (2003). How much training is needed in multiple-antenna wireless links? IEEE Transactions on Information Theory, 49(4), 951–963. <https://doi.org/10.1109/TIT.2003.809594>
4. Adireddy, S., Tong, L., & Viswanathan, H. (2002). Optimal placement of training for frequency-selective block-fading channels. IEEE Transactions on Information Theory, 48(8), 2338–2353. <https://doi.org/10.1109/TIT.2002.800466>
5. Xie, J. (n.d.). A constant envelope variation of OFDM waveform. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26686.79688>
6. Wang, Jinkuan., & Wang, Bin. (2010). 2010 International Conference on Computer Design and Applications : Qinhuangdao, Hebei, China, June 25-27, 2010. IEEE.
7. Simko, M., Diniz, P. S. R., Wang, Q., & Rupp, M. (2013). Adaptive pilot-symbol patterns for MIMO OFDM systems. IEEE Transactions on Wireless Communications, 12(9), 4705–4715. <https://doi.org/10.1109/TWC.2013.081413.121998>
8. Huang, H., Yang, J., Huang, H., Song, Y., & Gui, G. (2018). Deep learning for super-resolution channel estimation and doa estimation based massive MIMO system. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 67(9), 8549–8560. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2851783>
9. Zia, M. U., Xiang, W., Huang, T., & Naqvi, I. H. (2022). Deep Learning-Aided TR-UWB MIMO System. IEEE Transactions on Communications, 70(10), 6579–6588. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3199489>
10. Chun, C. J., Kang, J. M., & Kim, I. M. (2019). Deep Learning-Based Channel Estimation for Massive MIMO Systems. IEEE Wireless Communications Letters, 8(4), 1228–1231. <https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2912378>
11. Gao, S., Dong, P., Pan, Z., & Li, G. Y. (2019). Deep Learning Based Channel Estimation for Massive MIMO with Mixed-Resolution ADCs. IEEE Communications Letters, 23(11), 1989–1993. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2936393>
12. Soltani, M., Pourahmadi, V., Mirzaei, A., & Sheikhzadeh, H. (2019). Deep Learning-Based Channel Estimation. IEEE Communications Letters, 23(4), 652–655. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2898944>
13. Wen, C. K., Shih, W. T., & Jin, S. (2018). Deep learning for massive MIMO CSI feedback. IEEE Wireless Communications Letters, 7(5), 748–751. <https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2818160>
14. ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). (2019). IEEE.
15. Mitsiou, L., Trevlakis, S., Tsiolas, A., Vergados, D. J., Michalas, A., & Boulogeorgos, A. A. A. (2023). Can graph neural network-based detection mitigate the impact of

- hardware imperfections? 2023 International Balkan Conference on Communications and Networking, BalkanCom 2023.
<https://doi.org/10.1109/BalkanCom58402.2023.10167895>
16. Wang, D., Aziz, M., Helaloui, M., & Ghannouchi, F. M. (2019). Augmented Real-Valued Time-Delay Neural Network for Compensation of Distortions and Impairments in Wireless Transmitters. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 30(1), 242–254. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2018.2838039>
 17. Wu, Y., Member, S., Gustavsson, U., Graell Amat, A. I., Member, S., & Wymeersch, H. (2022). Low Complexity Joint Impairment Mitigation of I/Q Modulator and PA Using Neural Networks. *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, 40(1). <https://doi.org/10.1109/globecom42002>
 18. Jaraut, P., Rawat, M., & Ghannouchi, F. M. (2018). Composite Neural Network Digital Predistortion Model for Joint Mitigation of Crosstalk, I/Q Imbalance, Nonlinearity in MIMO Transmitters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66(11), 5011–5020. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2869602>
 19. Boulogeorgos, A.-A. A., & Alexiou, A. (2023). *Training Terahertz Wireless Systems to Battle I/Q Imbalance*. <http://arxiv.org/abs/2306.01611>
 20. Papatotiriou, E. N., Boulogeorgos, A. A. A., & Alexiou, A. (2023). Outdoor THz fading modeling by means of gaussian and gamma mixture distributions. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33598-x>
 21. Papatotiriou, E. N., Boulogeorgos, A. A. A., Haneda, K., de Guzman, M. F., & Alexiou, A. (2021). An experimentally validated fading model for THz wireless systems. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98065-x>
 22. Mohammadian, A., & Tellambura, C. (2021). RF Impairments in Wireless Transceivers: Phase Noise, CFO, and IQ Imbalance - A Survey. *IEEE Access*, 9, 111718–111791. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3101845>
 23. Taware, R., & Biradar, T. D. (2013). BER Performance Analysis of SSB-QPSK over AWGN and Rayleigh Channel. In *International Journal of Computer Applications*.
 24. Performance analysis of different modulation schemes using OFDM techniques in Rayleigh fading channel. (2011). *International Journal of Fundamental Physical Sciences*, 1(1), 22–27. <https://doi.org/10.14331/ijfps.2011.330006>
 25. Alkamil, A. D. E., Hassan, O. T. A., Hassan, A. H. M., & Abdalla, W. F. M. (2021, February 26). Performance Evaluations Study of OFDM under AWGN and Rayleigh Channels. *Proceedings of: 2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering, ICCCEEE 2020*. <https://doi.org/10.1109/ICCCEEE49695.2021.9429660>
 26. Omijeh, B. (n.d.). *Bit Error Rate and Signal to Noise Ratio Performance Evaluation of OFDM System with QPSK and QAM M-array Modulation Scheme in Rayleigh, Rician and AWGN Channel Using MATLAB/Simulink*. www.iiste.org
 27. Krishna, Sai et al. "Performance Evaluation of OFDM System with Rayleigh, Rician and AWGN Channels." (2013).
 28. Taware, R., Biradar, T.D., Rao, K.V., Babu, A.S., Gupta, S., Sharma, H., Jeon, C., Kadrić, E., Saraswat, H., Mishra, S.K., & Sharma, G. (2013). BER Performance Analysis of SSB-QPSK over AWGN and Rayleigh Channel.
 29. <https://dsplog.com/2008/02/03/understanding-an-ofdm-transmission/>
 30. <https://dsplog.com/2008/02/17/cyclic-prefix-in-orthogonal-frequency-division-multiplexing/>
 31. Mohammed, A.S.M., Taman, A.I.A., Hassan, A.M. *et al.* Deep Learning Channel Estimation for OFDM 5G Systems with Different Channel Models. *Wireless Pers Commun* **128**, 2891–2912 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11277-022-10077-6>

32. Kamboj, A., & Kaushik, G. (2012). Study & Simulation of O.F.D.M System.
33. Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks): Ορισμός & Εφαρμογές. (2024). ανακτήθηκε June 11, 2024, από bigblue.academy/gr/neuronika-diktua
34. Sequence input layer - MATLAB. (2024). ανακτήθηκε June 11, 2024, από www.mathworks.com
35. Long Short-Term Memory Neural Networks - MATLAB & (2024). ανακτήθηκε June 11, 2024, από www.mathworks.com