



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Σχολή Τεχνολογίας

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

Εξομοίωση του προτύπου

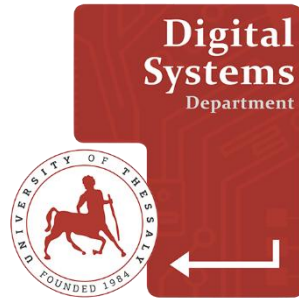
IEEE 802.11 ad

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΒΗΣΣΑΡΙΟΥ(ΑΜ:3121067)

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Χαικάλης, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΛΑΡΙΣΑ, Οκτωβριος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY

School of Technology

Digital Systems Department

Emulator of the IEEE 802.11 ad standard

BACHELOR THESIS

SOTIRIOS VISSARIOY(AM:3121067)

Supervisor: *KONSTANTINOS CHAIKALIS, Associate Professor*

LARISSA, OKTOBER 2025

Υπεύθυνη Δήλωση περί Ακαδημαϊκής Δεοντολογίας και Πνευματικών Δικαιωμάτων

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

Ο/Η Δηλών/ούσα

(Υπογραφή)

ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΒΗΣΣΑΡΙΟΥ

10/9/2025

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Κωνσταντίνος Χαϊκάλης

Αναπληρωτής Καθηγητής,

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Όμηρος Ιατρέλης

Επίκουρος Καθηγητής,

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Απόστολος Ξενάκης

Επίκουρος Καθηγητής,

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ημερομηνία έγκρισης: 16-10-25

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στην παρουσίαση του πρωτοκόλλου ασύρματης επικοινωνίας 802.11ad, το οποίο αποτελεί ένα πρωτότυπο και προηγμένο πρότυπο στο πεδίο των δικτύων. Στο πλαίσιο της μελέτης, θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι τεχνικές προδιαγραφές, οι βασικές λειτουργίες και οι καινοτομίες του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου. Επιπλέον, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, με στόχο την αξιολόγηση της απόδοσης και της αποτελεσματικότητας του προτύπου σε διάφορα σενάρια χρήσης. Η εργασία αποσκοπεί στη βαθύτερη κατανόηση του 802.11ad και στη διερεύνηση της δυναμικής του για τη βελτίωση των σύγχρονων δικτύων επικοινωνίας.

Abstract

This undergraduate thesis focuses on the IEEE 802.11ad wireless communication protocol, an innovative and advanced standard in the field of networking. Within the scope of this study, the technical specifications, core functionalities, and key innovations of the protocol are presented in detail. Furthermore, an analysis of simulation results is conducted to evaluate the performance and efficiency of the standard under various use-case scenarios. The objective of this work is to provide a deeper understanding of 802.11ad and to investigate its potential for enhancing modern communication networks.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον Καθηγητή Κωνσταντίνο Χαϊκάλη, επιβλέποντα της παρούσας πτυχιακής εργασίας, για την πολύτιμη επιστημονική καθοδήγηση, την αμέριστη υποστήριξη και τις εύστοχες παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της μελέτης. Η συνεισφορά του υπήρξε καθοριστική για την ορθή μεθοδολογική προσέγγιση και την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας, καθώς και την οικογένεια μου για την αδιάκοπη βοήθεια τους.

Με εκτίμηση,

Σωτήριος Βησσαρίου

10/10/25

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	VII
ABSTRACT	IX
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	XI
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	XIII
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	3
2.1 ΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (WLANs) ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 802.11	3
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ IEEE 802.11	4
2.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ WLANs	6
2.3.1 Δομή και βασικές συνιστώσες ενός WLAN.....	6
2.3.2 Το Επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο (MAC Layer)	8
2.3.3 Το Φυσικό Επίπεδο (PHY Layer)	9
2.3.4 ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) και Ενεργειακή Απόδοση.....	9
2.4 Η ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΤΩΝ 60 GHz (MMWAVE)	10
2.5 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 802.11AD	11
2.6 ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	13
3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	
ΜΕ 2 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ.....	15
3.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ	15
3.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ MATLAB	16
3.2.1 Ενοποιημένο περιβάλλον ανάλυσης και οπτικοποίησης:.....	16
3.2.2 Πλούσια βιβλιοθήκη τηλεπικοινωνιακών συναρτήσεων:	16
3.2.3 Επεκτασιμότητα και παραμετροποίηση:.....	17
3.3 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΕΣ MATLAB	17
3.3.1 Βασικά εργαλεία.....	18
3.3.2 Ρυθμίσεις και προετοιμασία	18

3.3.3	Παραμετροποίηση εργαλείων	18
3.4	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	19
3.4.1	Σενάριο ελέγχου προσομοίωσης QPSK σε κανάλι AWGN	20
3.4.2	Σενάριο Παραγωγής waveform IEEE 802.11ad	22
4	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΣΕΝΑΡΙΑ	
	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	25
4.1	Άσκηση μελέτης της σχέσης BER–SNR	25
4.2	ΣΕΝΑΡΙΟ THROUGHPUT–DISTANCE	27
4.3	ΣΕΝΑΡΙΟ BEAM MISALIGNMENT	31
4.4	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ DISTANCE AND MISALIGNMENT ON THROUGHPUT” ..	32
4.5	ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ BEAM TRAINING OVERHEAD ΣΤΟ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ THROUGHPUT.....	35
5	ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΠΟΛΛΕΣ	
	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ	39
5.1	ΣΕΝΑΡΙΟ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ QPSK, 16-QAM ΚΑΙ 32-QAM.....	40
5.2	ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ LOS ΚΑΙ NLOS ΣΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ IEEE 802.11AD ...	42
5.3	ΣΕΝΑΡΙΟ (MULTI-USER): TIME DIVISION MULTIPLE ACCESS & BEAM TRAINING OVERHEAD	45
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	49
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	51

1 Εισαγωγή

Η συνεχής ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών έχει οδηγήσει στην ανάγκη για δίκτυα που είναι ικανά να παρέχουν εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, μειωμένες καθυστερήσεις και μεγαλύτερη αξιοπιστία. Τα τελευταία χρόνια, τα πρότυπα του οργανισμού IEEE 802.11 έχουν καθιερωθεί ως η βασική τεχνολογία για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs), γνωστά και ως Wi-Fi. Από την πρώτη έκδοση του 1997 μέχρι σήμερα, τα πρότυπα αυτά έχουν εξελιχθεί σημαντικά, ενσωματώνοντας νέες μεθόδους μετάδοσης και συχνότητες με σκοπό την ενίσχυση της χωρητικότητας και την υποστήριξη σύγχρονων εφαρμογών πολυμέσων.

Αρχικά, το πρότυπο 802.11b παρείχε ταχύτητες έως 11 Mbps στη ζώνη των 2,4 GHz, ενώ οι επόμενες εκδόσεις 802.11a και 802.11g αύξησαν τον ρυθμό μετάδοσης στα 54 Mbps αξιοποιώντας τη διαμόρφωση OFDM. Η εξέλιξη συνεχίστηκε με το 802.11n, το οποίο εισήγαγε την τεχνική MIMO (Multiple-Input- Multiple-Output), αυξάνοντας τη χωρητικότητα των δικτύων. Τα πρότυπα 802.11ac και 802.11ax (Wi-Fi 5 και Wi-Fi 6 αντίστοιχα) προσέφεραν ακόμη μεγαλύτερες βελτιώσεις στην απόδοση, τη σταθερότητα και την ενεργειακή αποδοτικότητα.

Μία από τις πιο σημαντικές επεκτάσεις αυτής της οικογένειας είναι το IEEE 802.11ad, γνωστό και ως WiGig, το οποίο λειτουργεί στη ζώνη των 60 GHz που προσφέρει εύρος καναλιού 2,16 GHz και παρέχει ταχύτητες που μπορούν να φτάσουν έως 6,8 Gbps. Το συγκεκριμένο πρότυπο ανήκει στην κατηγορία των δικτύων millimeter wave (mmWave) και χρησιμοποιεί τεχνικές όπως το beamforming, το Time Division Multiplexing (TDM) και Frequency Division Multiplexing (FDM) για να επιτύχει αξιόπιστη επικοινωνία σε πολύ υψηλές συχνότητες, όπου τα φαινόμενα εξασθένησης είναι εντονότερα. Η αξιοποίηση της ζώνης των 60 GHz έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς συνδυάζει τη δυνατότητα μετάδοσης πολύ μεγάλων όγκων δεδομένων με χαμηλή καθυστέρηση (latency). Οι ίδιες φυσικές αρχές που υιοθετεί το 802.11ad εμφανίζονται επίσης σε πιο σύγχρονες τεχνολογίες, όπως τα 5G και 6G δίκτυα, καθιστώντας τη μελέτη του προτύπου ιδιαίτερα επίκαιρη. Ταυτόχρονα, η χρήση των beamforming antennas και του dynamic beam alignment δημιουργεί νέες ερευνητικές δυνατότητες στην αποδοτική διαχείριση

καναλιών και στην εξοικονόμηση ενέργειας. Η παρούσα πτυχιακή εργασία επιδιώκει τη μελέτη και ανάλυση του προτύπου IEEE 802.11ad, τόσο από θεωρητικής πλευράς όσο και μέσω πρακτικής εφαρμογής με τη χρήση του περιβάλλοντος MATLAB.

Αρχικά αναλύονται οι κύριες αρχές λειτουργίας των ασύρματων δικτύων Wi-Fi και η θέση του προτύπου 802.11ad στην οικογένεια των προτύπων IEEE 802.11. Στη συνέχεια, εξετάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του προτύπου, όπως το φυσικό επίπεδο (PHY), οι τεχνικές διαμόρφωσης και μετάδοσης, καθώς και οι μηχανισμοί ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC). Στο πρακτικό μέρος της εργασίας, γίνεται αξιοποίηση του εργαλείου IEEE 802.11ad PHY Waveform Generation API του MATLAB, το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία και ανάλυση παραδειγμάτων των σημάτων. Αυτή η ανάλυση συμβάλλει στην πιο βαθιά κατανόηση των τεχνικών χαρακτηριστικών του προτύπου και στη σύνδεση της θεωρίας με την εφαρμογή. Τέλος, η εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των συμπερασμάτων που προέκυψαν, καθώς και με προτάσεις για μελλοντική έρευνα, όπως η μελέτη του επόμενου προτύπου IEEE 802.11ay, το οποίο επεκτείνει τις δυνατότητες του 802.11ad σε ακόμη υψηλότερες επιδόσεις. Στο υπόλοιπο της πτυχιακής, η δομή είναι η εξής:

Κεφάλαιο 2: Εξετάζεται το θεωρητικό πλαίσιο των ασύρματων δικτύων και η τεχνολογική πρόοδος των προτύπων IEEE 802.11, εστιάζοντας στο 802.11ad.

Κεφάλαιο 3: Περιγράφονται αναλυτικά τα εργαλεία και το περιβάλλον εργασίας που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του MATLAB και τελειώνει με 2 ενδεικτικά σενάρια.

Κεφάλαιο 4: Γίνεται ανάλυση και παρουσίαση της υλοποίησης, συνοδευόμενη από γραφήματα, waveforms και κώδικα.

Κεφάλαιο 5: Παρουσιάζονται απαιτητικότερα σενάρια με περισσότερες μεταβλητές συνοδευόμενα από κώδικα και διαγράμματα.

Κεφάλαιο 6: Συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική επέκταση.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίζεται η παρούσα πτυχιακή εργασία. Ξεκινά με μια συνοπτική αναδρομή στην εξέλιξη των προτύπων IEEE 802.11 και τη βασική αρχιτεκτονική των ασύρματων τοπικών δικτύων (WLANs), προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα το πρότυπο IEEE 802.11ad. Στη συνέχεια αναλύονται τα κύρια χαρακτηριστικά του προτύπου, τόσο στο φυσικό επίπεδο (PHY) όσο και στο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC), καθώς και οι τεχνολογικές αρχές των επικοινωνιών στη ζώνη των 60 GHz (millimeter wave).

2.1 Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs) και το πρότυπο IEEE 802.11

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα αποτελούν πλέον τη βασική μορφή πρόσβασης στο Διαδίκτυο για φορητές συσκευές, υπολογιστές και οικιακές εφαρμογές. Η σειρά προτύπων IEEE 802.11, που καθορίζει τις προδιαγραφές λειτουργίας των WLANs, έχει εξελιχθεί σε παγκόσμιο βιομηχανικό πρότυπο, εξασφαλίζοντας την διαλειτουργικότητα μεταξύ συσκευών από διαφορετικούς κατασκευαστές (Xiao, 2008). Τα WLANs προσφέρουν πρόσβαση στο δίκτυο χωρίς καλώδια, επιτρέποντας την ελεύθερη μετακίνηση των χρηστών εντός μιας περιοχής κάλυψης. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε γραφεία, πανεπιστήμια και κατοικίες, ενώ επεκτείνονται και σε βιομηχανικές και ιατρικές εφαρμογές, όπου η ευελιξία και η επεκτασιμότητα είναι κρίσιμες (Xiao, 2008).

Ο κύριος σκοπός της οικογένειας 802.11 είναι η αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία σε περιορισμένες αποστάσεις, με τρόπο παρόμοιο με τα ενσύρματα τοπικά δίκτυα Ethernet. Η επιτυχία του Wi-Fi οφείλεται στην εύκολη εγκατάσταση, το χαμηλό κόστος εξοπλισμού και τη συνεχή εξέλιξη των προτύπων, που προσφέρουν αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης και καλύτερη φασματική αποδοτικότητα. Σύμφωνα με τον Gast (2012), η σειρά προτύπων IEEE 802.11 έχει κατορθώσει να καλύψει σχεδόν όλες τις ανάγκες

ασύρματης πρόσβασης τόσο στις απλές οικιακές εφαρμογές όσο και στα μεγάλα εταιρικά και βιομηχανικά δίκτυα.

Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες μικρής εμβέλειας, όπως το Bluetooth, που προορίζονται για απλή ανταλλαγή δεδομένων ή για δίκτυα αισθητήρων χαμηλής ισχύος, τα WLANs σχεδιάστηκαν για να προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και ευρεία συνδεσιμότητα. Αυτό καθιστά το Wi-Fi κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλος όγκος δεδομένων, όπως βίντεο υψηλής ευκρίνειας, τηλεδιάσκεψη ή σύνδεση πολλών χρηστών σε κοινό τοπικό δίκτυο.

Η κατανόηση της βασικής αρχιτεκτονικής των WLANs είναι απαραίτητη για την ερμηνεία των τεχνολογικών εξελίξεων που παρουσιάζονται στα επόμενα πρότυπα της σειράς 802.11. Η ιστορική εξέλιξη αυτών των προτύπων αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

2.2 Ιστορική εξέλιξη των προτύπων IEEE 802.11

Η εξέλιξη των ασύρματων τοπικών δικτύων ξεκίνησε τη δεκαετία του 1990, όταν το IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) δημιούργησε το 802.11 με σκοπό τη δημιουργία ενός ενιαίου προτύπου ασύρματης επικοινωνίας για τοπικά δίκτυα.

Το αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 δημοσιεύτηκε το 1997 και παρείχε ρυθμούς μετάδοσης 1 ή 2 Mbps στη ζώνη 2,4 χρησιμοποιώντας τεχνικές διασποράς φάσματος (FHSS και DSSS). Παρότι οι επιδόσεις ήταν περιορισμένες, το 802.11 έθεσε τις βάσεις για την ανάπτυξη της αγοράς Wi-Fi, εισάγοντας τους μηχανισμούς MAC και PHY που διατηρούνται έως σήμερα. Ακολούθησαν διαδοχικές επεκτάσεις. Κάθε νέα έκδοση στοχεύει είτε στην αύξηση του ρυθμού μετάδοσης είτε στη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ενεργειακής αποδοτικότητας.

Όπως επισημαίνει ο Xiao (2008), η δυνατότητα επεκτασιμότητας του προτύπου επέτρεψε την ενσωμάτωση νέων τεχνικών, όπως το OFDM, το MIMO και το beamforming, χωρίς να απαιτείται πλήρης ανασχεδίαση της αρχιτεκτονικής. Η εικόνα 1

παρουσιάζει συνοπτικά τη χρονολογική εξέλιξη και τα βασικά χαρακτηριστικά των σημαντικότερων προτύπων 802.11.

Έκδοση	Έτος	Ζώνη (GHz)	Μέγιστη ταχύτητα	Κύρια χαρακτηριστικά
802.11b	1999	2.4	11 Mbps	DSSS, ευρεία διάδοση Wi-Fi στο οικιακό περιβάλλον
802.11a	1999	5	54 Mbps	OFDM, βελτίωση φασματικής απόδοσης
802.11g	2003	2.4	54 Mbps	Συμβατότητα με b + OFDM
802.11n	2009	2.4/5	600 Mbps	MIMO, channel bonding, frame aggregation
802.11ac	2013	5	>1 Gbps	160 MHz κανάλια, MU-MIMO
802.11ax	2019	2.4/5	~10 Gbps	OFDMA, TWT, υψηλή πυκνότητα χρηστών
802.11ad	2012	60	~6.8 Gbps	mmWave, beamforming, κατευθυντικές ζεύξεις

Εικόνα 1: Η εξέλιξη του 802.11 ανά χρόνο με την ζώνη(GHz),την μέγιστη ταχύτητα και κάποια χαρακτηριστικά. (Πηγή: προσαρμογή από Xiao 2008)

Η μετάβαση από το 802.11b στα 802.11g σήμαινε την υιοθέτηση της τεχνικής OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), η οποία ενίσχυσε σημαντικά τον ρυθμό μεταφοράς και την αποδοτικότητα του φάσματος. Η εμφάνιση του 802.11n το 2009 αποτέλεσε ορόσημο για τα WLAN, καθώς καθιέρωσε τη χρήση πολλαπλών κεραιών (MIMO) και την συγχώνευση καναλιών, επιτυγχάνοντας ταχύτητες έως 600 Mbps. Τα 802.11ac και 802.11ax (Wi-Fi 5 και Wi-Fi 6) αντίστοιχα, επέκτειναν το εύρος καναλιού σε 80 και 160 GHz και εισήγαγαν τεχνικές OFDMA και πολλαπλής πρόσβασης (MU-MIMO), επιτρέποντας τη συνύπαρξη πολλών χρηστών στο διαδίκτυο χωρίς σημαντική πτώση της απόδοσης.

Σύμφωνα με τους Perahia και Gong (2011), η επόμενη λογική κίνηση ήταν η μετάβαση σε νέα φάσματα συχνοτήτων με μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος. Η ζώνη των 60 GHz, που χρησιμοποιείται στο πρότυπο IEEE 802.11ad, προσφέρει κανάλια εύρους 2.16 GHz δηλαδή περίπου εκατό φορές μεγαλύτερα από εκείνα των προηγούμενων εκδόσεων,

επιτρέποντας την υλοποίηση ασύρματων ζεύξεων πολυ-Gbps. Η εισαγωγή του 802.11ad δεν αντιπροσωπεύει μόνο μια αύξηση ταχύτητας αλλά μια θεμελιώδη αλλαγή στην προσέγγιση: από την πολυκατευθυντική εκπομπή στις χαμηλές συχνότητες προς τις κατευθυντικές συνδέσεις mmWave, όπου η ενέργεια εκπομπής συγκεντρώνεται σε στενές δέσμες μέσω beamforming (Rappaport, 2015). Η τεχνολογία αυτή θα αποτελέσει τη γέφυρα μεταξύ των παραδοσιακών δικτύων Wi-Fi και των νεότερων δικτύων κινητών επικοινωνιών 5G και 6G.

Η ιστορική εξέλιξη των προτύπων 802.11 δείχνει τη συνεχή προσπάθεια του IEEE να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις για μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης και υψηλότερη αποδοτικότητα. Από τα πρώτα δίκτυα των 1 Mbps μέχρι τις ζεύξεις πολλαπλών Gbps του 802.11ad, η ομάδα του 802.11 έχει εξελίξει και το φυσικό αλλά και το λογικό επίπεδο επικοινωνίας, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα συμβατότητα με τις παλαιότερες εκδόσεις. Η επόμενη ενότητα εστιάζει στη δομή και λειτουργία των WLANs ώστε να κατανοηθεί καλύτερα πώς οι μηχανισμοί του προτύπου 802.11 εφαρμόζονται πρακτικά και πώς τροποποιούνται σύμφωνα με το 802.11ad.

2.3 Αρχιτεκτονική και λειτουργία των WLANs

Η αρχιτεκτονική των ασύρματων τοπικών δικτύων βασίζεται σε ένα σύνολο επιπέδων και υπηρεσιών που καθορίζουν τη ροή των δεδομένων από τη συσκευή του χρήστη μέχρι το δίκτυο κορμού. Συγκεκριμένα, το IEEE 802.11 ακολουθεί πιστά το μοντέλο OSI (Open Systems Interconnection), εστιάζοντας κυρίως στα επίπεδα Physical (PHY) και το Medium Access Control (MAC). Αυτά τα στρώματα είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία αξιόπιστης ασύρματης επικοινωνίας, καθώς εξασφαλίζουν τη σωστή μετάδοση και τη δίκαιη κατανομή του κοινού καναλιού, επιτρέποντας στους χρήστες να έχουν ομαλή και αξιόπιστη ασύρματη συνδεσιμότητα. Xiao (2008).

2.3.1 Δομή και βασικές συνιστώσες ενός WLAN

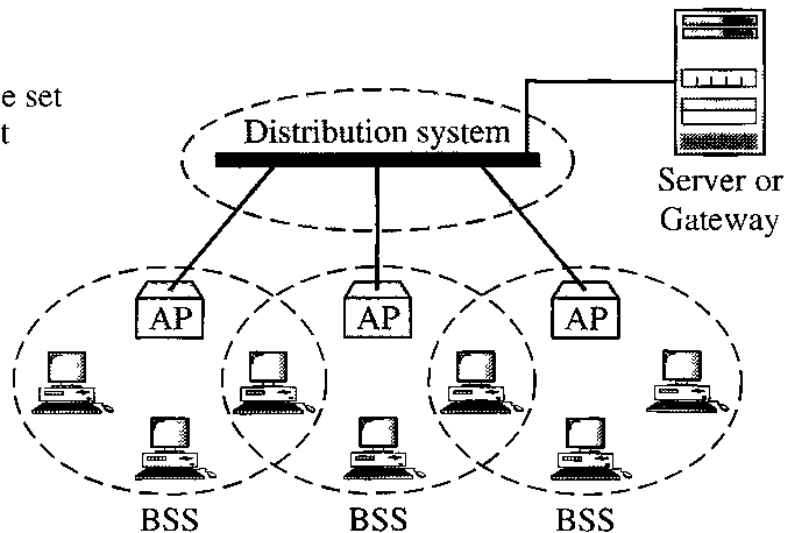
Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN) είναι συνήθως δομημένο γύρω από ένα θεμελιώδες στοιχείο γνωστό ως Basic Service Set (BSS). Ένα BSS αποτελείται από ένα ή περισσότερα stations (STA), δηλαδή ασύρματους σταθμούς, οι οποίοι επικοινωνούν χρησιμοποιώντας κοινό κανάλι ραδιοσυχνότητας. Όταν στο δίκτυο υπάρχει ένα Access

Point (AP), ενεργεί ως κεντρικός συντονιστής, διαχειριζόμενος την επικοινωνία μεταξύ των σταθμών και συχνά συνδέοντας το WLAN με ενσύρματα δίκτυα. Αυτή η διαμόρφωση ονομάζεται infrastructure BSS επειδή βασίζεται στο AP για να διευκολύνει την επικοινωνία και να επεκτείνει την εμβέλεια του δικτύου. Αντίθετα, εάν δεν εμπλέκεται το AP, οι σταθμοί επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, δημιουργώντας αυτό που ονομάζεται ανεξάρτητο δίκτυο BSS ή ad-hoc. Αυτή η ρύθμιση επιτρέπει στις συσκευές να συνδέονται απευθείας χωρίς να χρειάζονται ενδιάμεση συσκευή, κατάλληλη για μικρά, προσωρινά δίκτυα. (Xiao, 2008).

Για την επέκταση της κάλυψης και τη διευκόλυνση της κινητικότητας, πολλά BSS μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους μέσω των AP, σχηματίζοντας ένα Extended Service Set (ESS). Το ESS επιτρέπει στους χρήστες να μετακινούνται ελεύθερα σε διαφορετικές περιοχές εντός της εμβέλειας του δικτύου, χωρίς να χάνουν τη σύνδεσή τους καθώς περιφέρονται από το ένα BSS στο άλλο. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται roaming. Η διασύνδεση των APs με το ενσύρματο δίκτυο πραγματοποιείται μέσω του Distribution System (DS), που εξασφαλίζει τη δρομολόγηση των πλαισίων δεδομένων ανάμεσα στα επιμέρους BSS (Gast, 2012). Η βασική αρχιτεκτονική απεικονίζεται συνήθως με δύο επίπεδα:

- το ασύρματο τμήμα (wireless segment), που περιλαμβάνει τα BSS, και
- το ενσύρματο υπόβαθρο (wired backbone), που συνδέει τα σημεία πρόσβασης με τον server ή το Διαδίκτυο. Αυτή η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική ενισχύει την ευελιξία, την επεκτασιμότητα και τη χρηστικότητα των WLAN σε διάφορα περιβάλλοντα.

ESS: Extended service set
BSS: Basic service set
AP: Access point



Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική ενός WLAN (BSS – ESS)

2.3.2 Το Επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο (MAC Layer)

Στην ασύρματη επικοινωνία, το επίπεδο Medium Access Control (MAC) παίζει καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση του τρόπου πρόσβασης των συσκευών στο κοινόχρηστο ασύρματο κανάλι. Σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα που χρησιμοποιούν το CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) για να ανιχνεύουν τις συγκρούσεις, τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν μια παραλλαγή που ονομάζεται CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) η οποία είναι απαραίτητη επειδή η ανίχνευση συγκρούσεων σε ασύρματα περιβάλλοντα είναι πιο δύσκολη.

Σύμφωνα με τον Gast Πριν από τη μετάδοση δεδομένων, κάθε σταθμός ελέγχει πρώτα το κανάλι για να βεβαιωθεί ότι είναι ελεύθερο. Εάν το κανάλι είναι καθαρό, ο σταθμός περιμένει για ένα χρονικό διάστημα DIFS (Distributed Interframe Space) και έπειτα ξεκινά ένα τυχαίο backoff timer, το οποίο μετράει αντίστροφα πριν ο σταθμός αρχίσει να εκπέμπει. Όταν ο μετρητής μηδενιστεί χωρίς να υπάρξει άλλη εκπομπή, η μετάδοση πραγματοποιείται. Μετά την επιτυχή λήψη, ο δέκτης στέλνει μια επιβεβαίωση ACK (Acknowledgement). Αυτός ο μηχανισμός μειώνει σημαντικά την πιθανότητα σύγκρουσης, διασφαλίζοντας πιο δίκαιη πρόσβαση στο μέσο. Προηγμένα πρότυπα όπως το 802.11e ενισχύουν αυτή τη διαδικασία εισάγοντας την ιεράρχηση προτεραιοτήτων και contention-free περιόδων (PCF/HCF), διασφαλίζοντας ότι η κυκλοφορία υψηλής προτεραιότητας, όπως η φωνή και το βίντεο, μεταδίδονται πιο αποτελεσματικά.

2.3.3 Το Φυσικό Επίπεδο (PHY Layer)

Το φυσικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή των δεδομένων του MAC σε ηλεκτρομαγνητικά σήματα. Οι πρώτες εκδόσεις του προτύπου 802.11 χρησιμοποιούσαν κυρίως τεχνικές Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) και Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS), οι οποίες βοήθησαν στον μετριασμό των παρεμβολών, αλλά είχαν περιορισμούς στους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και στην αξιοπιστία του συστήματος. Οι μεταγενέστερες εξελίξεις εισήγαγαν το OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ενισχύοντας την αντίσταση σε παρεμβολές και πολυδιόδυση, αυξάνοντας έτσι την απόδοση δεδομένων.

Πιο πρόσφατα πρότυπα, όπως τα 802.11n και 802.11ac, ενσωματώνουν την τεχνολογία MIMO (Multiple Input Multiple Output), η οποία χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες για την ενίσχυση της χωρητικότητας και της ταχύτητας. Επιπλέον, το πρότυπο 802.11ad λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων των 60 GHz, χρησιμοποιώντας μεθόδους Single-Carrier και OFDM για την επίτευξη εξαιρετικά υψηλών ρυθμών δεδομένων κατάλληλων για εφαρμογές μικρής εμβέλειας και υψηλού εύρους ζώνης.(Perahia & Gong, 2011).

2.3.4 ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) και Ενεργειακή Απόδοση

Η ανάπτυξη μηχανισμών Quality of Service (QoS) στο πρότυπο IEEE 802.11e υποκινήθηκε κυρίως από την αυξανόμενη ζήτηση για υποστήριξη πολυμέσων και εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο μέσω ασύρματων τοπικών δικτύων (WLANs). Τα παραδοσιακά WLAN δεν είχαν την ικανότητα να δίνουν προτεραιότητα σε δεδομένα ευαίσθητα στον χρόνο, με αποτέλεσμα συχνά να έχουν υποβαθμισμένη απόδοση για τη φωνή ,κακή ποιότητα για το βίντεο και άλλες υπηρεσίες ευαίσθητες σε καθυστέρηση.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό, το 802.11e εισήγαγε αρκετές βασικές βελτιώσεις, συμπεριλαμβανομένης της Enhanced Distributed Channel Access (EDCA), η οποία δημιουργεί προτεραιότητες στην κίνηση δεδομένων όπου κάθε κατηγορία έχει διαφορετικούς χρόνους αναμονής και η φωνή και το βίντεο μεταδίδονται γρηγορότερα. Επιπλέον, το πρότυπο ενσωμάτωσε το Hybrid Coordination Function (HCF), στο οποίο Ο Access Point (AP) λειτουργεί ως Hybrid Coordinator (HC), διαχειριζόμενος τόσο την ανταγωνιστική όσο και την ελεγχόμενη πρόσβαση. Ενσωματώθηκαν επίσης λειτουργίες εξοικονόμησης ενέργειας, επιτρέποντας στις συσκευές να εισέλθουν σε καταστάσεις

ύπνου σε περιόδους αδράνειας, επεκτείνοντας σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Η αρχιτεκτονική WLAN, που βασίζεται στα επίπεδα PHY και MAC, χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνικές όπως μηχανισμούς διαμόρφωσης, κωδικοποίησης και ελέγχου πρόσβασης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης, της αξιοπιστίας και της ενεργειακής απόδοσης σε διαφορετικά ασύρματα περιβάλλοντα. Η κατανόηση αυτής της δομής είναι απαραίτητη για την ερμηνεία των βελτιώσεων που εισάγει το IEEE 802.11ad, το οποίο αξιοποιεί νέες συχνότητες και beamforming για να επιτύχει ταχύτητες πολλών gigabit ανά δευτερόλεπτο.

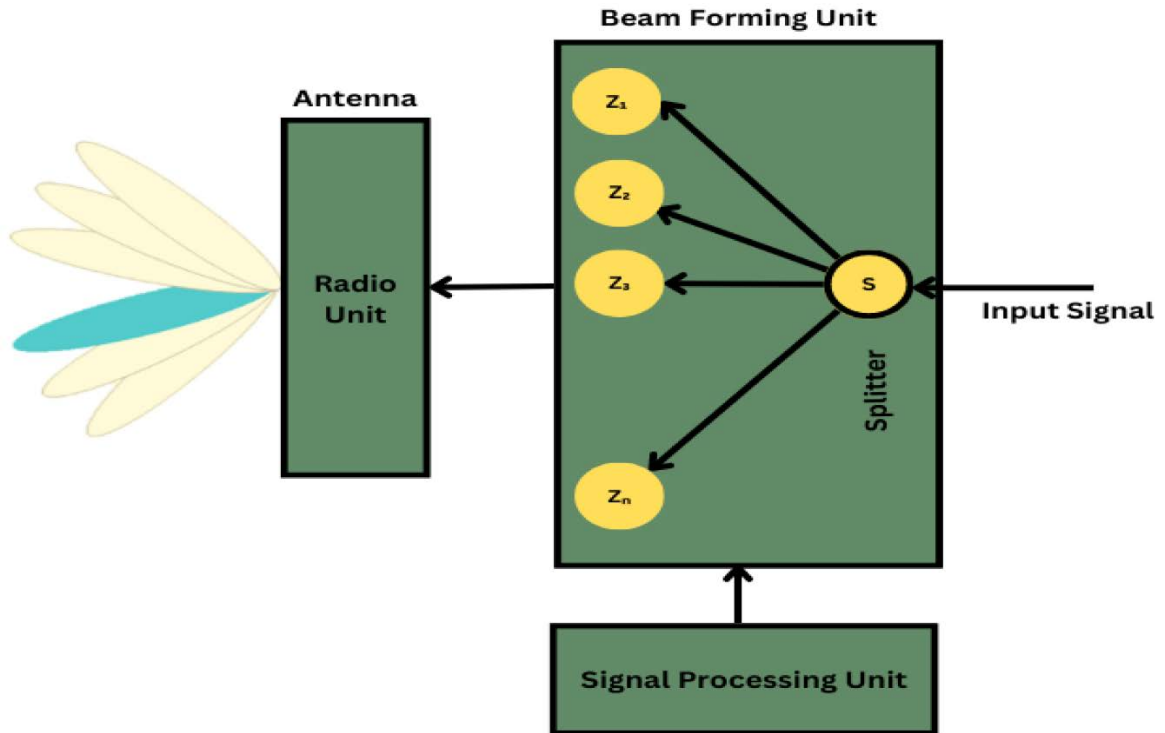
2.4 Η μετάβαση στη ζώνη των 60 GHz (mmWave)

Το πρότυπο IEEE 802.11ad σηματοδότησε μια σημαντική πρόοδο στην ασύρματη επικοινωνία φέρνοντας το Wi-Fi στη ζώνη των 60 GHz αξιοποιώντας το ευρύ φάσμα των millimeter waves (mmWave). Αυτό το νέο πρότυπο παρέχει περισσότερο από 7 GHz διαθέσιμου εύρους ζώνης, επιτρέποντας κανάλια 2.16 GHz και ρυθμούς δεδομένων πολλών gigabit που υπερβαίνουν κατά πολύ εκείνους που προσφέρονται από προηγούμενα πρότυπα όπως το 802.11n και το 802.11ac. Το αυξημένο εύρος ζώνης επιτρέπει την εξαιρετικά γρήγορη μετάδοση δεδομένων, καθιστώντας το ιδανικό για απαιτητικές εφαρμογές όπως ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας, εικονική πραγματικότητα και μεγάλες μεταφορές δεδομένων.

Ωστόσο, η λειτουργία σε τόσο υψηλές συχνότητες παρουσιάζει προκλήσεις. Η ζώνη των 60 GHz αντιμετωπίζει σημαντική εξασθένηση του σήματος λόγω του free-space path loss (FSPL), της απορρόφησης οξυγόνου και εμποδίων όπως τοίχοι και έπιπλα, γεγονός που περιορίζει την αποτελεσματική εμβέλεια σε λίγα μόλις μέτρα. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα φαινόμενα, το 802.11ad εισήγαγε τη χρήση κατευθυντικών κεραιών και μηχανισμών beamforming τα οποία εστιάζουν το μεταδιδόμενο σήμα απευθείας προς τον δέκτη, ενισχύοντας σημαντικά το κέρδος ζεύξης κατά 20–30 dB και βελτιώνοντας την ποιότητα του σήματος μειώνοντας τις παρεμβολές (Rappaport, 2015).

Επιπλέον, το beamforming ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές από άλλες συσκευές και περιβαλλοντικούς παράγοντες, διασφαλίζοντας μια πιο αξιόπιστη και υψηλό link capacity σε μικρές αποστάσεις. Έτσι, το 802.11ad δεν αποτελεί απλώς μια ταχύτερη

εκδοχή του Wi-Fi, αλλά μια τεχνολογική μετάβαση προς επικοινωνίες υψηλής συχνότητας, που αξιοποιούν τις ιδιότητες των mmWave για πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, χαμηλή καθυστέρηση και αποδοτική χρήση του spectrum, ανοίγοντας τον δρόμο για την υιοθέτηση παρόμοιων τεχνικών στα δίκτυα 5G και 6G.



Εικόνα 3 :beamforming(Πηγή: MDPI 2023)

2.5 Το πρότυπο IEEE 802.11ad

Το πρότυπο IEEE 802.11ad, γνωστό και ως WiGig, εισήχθη επίσημα το 2012 ως μια πρωτοποριακή πρόοδος στην τεχνολογία των ασύρματων επικοινωνιών. Σημάδεψε το πρώτο σύστημα Wi-Fi που χρησιμοποίησε τη ζώνη συχνοτήτων των 60 GHz, ανοίγοντας νέες δυνατότητες για μεταφορά δεδομένων εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας. Χάρη στον καινοτόμο σχεδιασμό του, το 802.11ad υποστηρίζει θεωρητικούς ρυθμούς δεδομένων έως και 6,8 Gbps, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη και αξιόπιστη ασύρματη συνδεσιμότητα. Το πρότυπο χρησιμοποιεί μεγάλα κανάλια 2,16

GHz, τα οποία διευκολύνουν την επικοινωνία υψηλής απόδοσης και χαμηλής καθυστέρησης. Για να φιλοξενήσει διαφορετικά περιβάλλοντα, το 802.11ad προσφέρει δύο λειτουργίες φυσικού επιπέδου:

- Η λειτουργία Single-Carrier (SC) είναι βελτιστοποιημένη για απλούστερα περιβάλλοντα, παρέχοντας αποτελεσματική μετάδοση με ελάχιστη πολυπλοκότητα.
- Αντίθετα, η λειτουργία (OFDM) υποστηρίζει μετάδοση πολλαπλών καναλιών, κατάλληλη για πιο περίπλοκα ή παρεμποδισμένα περιβάλλοντα.

Και οι δύο λειτουργίες χρησιμοποιούν κωδικοποίηση Low-Density Parity-Check (LDPC) για να εξασφαλίσουν ισχυρή διόρθωση σφαλμάτων και χρησιμοποιούν προηγμένα σχήματα διαμόρφωσης, όπως 32-QAM, για μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης. Στο επίπεδο Medium Access Control (MAC), η επικοινωνία οργανώνεται σε Beacon Intervals, τα οποία χωρίζονται σε προγραμματισμένες Service Periods (SP) και ανταγωνιστικές Contention-Based Access Periods (CBAP), προσφέροντας ισορροπία ανάμεσα σε σταθερή και δυναμική πρόσβαση (Xiao, 2008).

Η βασική καινοτομία του προτύπου είναι η χρήση κατευθυντικών κεραιών και μηχανισμών beamforming, που επιτρέπουν τον σχηματισμό στενών δεσμών εκπομπής και λήψης, αυξάνοντας το κέρδος ζεύξης και μειώνοντας τις παρεμβολές (Perahia & Gong, 2011). Η διαδικασία beam training περιλαμβάνει τα στάδια Sector Level Sweep (SLS) και Beam Refinement Protocol (BRP), εξασφαλίζοντας βέλτιστη ευθυγράμμιση μεταξύ συσκευών ακόμη και σε dynamic environments. Αυτή η δομή επιτρέπει συντονισμένες και αποτελεσματικές ανταλλαγές δεδομένων, υποστηρίζοντας τις δυνατότητες υψηλής ταχύτητας του προτύπου και επιτρέποντας απρόσκοπτη ροή πολυμέσων, gaming και άλλες εφαρμογές έντασης εύρους ζώνης.

Συνολικά, το IEEE 802.11ad καθιέρωσε το beamforming ως βασική συνιστώσα των mmWave συστημάτων, παρέχοντας εξαιρετικά γρήγορη συνδεσιμότητα μικρής εμβέλειας για τον σύγχρονο ψηφιακό κόσμο, θέτοντας τα θεμέλια για τα μελλοντικά πρότυπα 802.11ay και τις ασύρματες τεχνολογίες της επόμενης γενιάς.

2.6 Σύνοψη κεφαλαίου

Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια περιεκτική επισκόπηση της ανάπτυξης των προτύπων IEEE 802.11, παρακολουθώντας την εξέλιξή τους από τις βασικές συνδέσεις χαμηλής ταχύτητας σε ασύρματα δίκτυα αιχμής πολλαπλών Gbps. Ξεκινά με την εξέταση της εξέλιξης των τεχνολογιών WLAN, εστιάζοντας στις βελτιώσεις τόσο στο φυσικό επίπεδο (PHY) όσο και στο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μεσαίου (MAC). Ένα σημαντικό μέρος της συζήτησης είναι αφιερωμένο στην πρόσφατη στροφή προς τη χρήση της ζώνης συχνοτήτων των 60 GHz, η οποία επιτρέπει εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων μέσω επικοινωνίας mmWave.

Το κεφάλαιο επισημαίνει βασικά χαρακτηριστικά, όπως η χρήση των beamforming antennas και προηγμένες τεχνικές beamforming που βελτιώνουν την ποιότητα του σήματος και μειώνουν τις παρεμβολές. Επιπλέον, διερευνά τις αρχές στις οποίες βασίζεται το πρότυπο IEEE 802.11ad, δίνοντας έμφαση στην ικανότητά του να παρέχει εξαιρετικά γρήγορη ασύρματη συνδεσιμότητα. Συνολικά, το κεφάλαιο προσφέρει μια λεπτομερή εικόνα για το πώς τα πρότυπα WLAN συνεχίζουν να εξελίσσονται, επιτρέποντας όλο και πιο απαιτητικές εφαρμογές και καλύπτοντας τις απαιτήσεις των χρηστών του διαδικτύου.

Η κατανόηση αυτών των αρχών είναι ουσιώδης για την ανάπτυξη του πλαισίου προσομοίωσης που ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο, όπου περιγράφονται τα εργαλεία και η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκαν στο περιβάλλον MATLAB.

3 Περιγραφή Συστήματος και Περιβάλλοντος Προσομοίωσης με 2 ενδεικτικά σενάρια.

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μελέτη του προτύπου IEEE 802.11ad μέσω προσομοίωσης σε περιβάλλον MATLAB. Αρχικά παρουσιάζεται το αντικείμενο και το πρόβλημα που επιχειρεί να αντιμετωπίσει η εργασία, στη συνέχεια αναλύονται τα λογισμικά εργαλεία και οι παράμετροι του περιβάλλοντος εργασίας, ενώ τέλος περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε και παρατίθεται 2 ενδεικτικά σενάρια προσομοίωσης για την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του συστήματος. Η ενότητα αυτή συνδέει το θεωρητικό πλαίσιο του προηγούμενου κεφαλαίου με την πρακτική υλοποίηση που παρουσιάζεται στο επόμενο.

3.1 Αντικείμενο της πτυχιακής

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη και αξιολόγηση του προτύπου IEEE 802.11ad, το οποίο λειτουργεί στη ζώνη των 60 GHz (mmWave) με στόχο την επίτευξη ρυθμών μετάδοσης πολλών gigabit ανά δευτερόλεπτο. Το βασικό πρόβλημα που εξετάζεται αφορά το πώς οι ιδιαιτερότητες της διάδοσης σε αυτές τις συχνότητες όπως η αυξημένη εξασθένηση, το blockage sensitivity και η ανάγκη για κατευθυντική εκπομπή επηρεάζουν την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα της ζεύξης. Στόχος είναι η ανάπτυξη ενός αναπαραγωγικού πλαισίου προσομοίωσης σε περιβάλλον MATLAB, που να επιτρέπει τη μελέτη του συστήματος σε επίπεδο φυσικού στρώματος (PHY). Μέσω αυτού, υπολογίζονται και συγκρίνονται δείκτες απόδοσης όπως ο Bit Error Rate (BER), ο Packet Error Rate (PER) και ωφέλιμο throughput, υπό διαφορετικές συνθήκες καναλιού, αποστάσεων, επιπέδων SNR και καταστάσεων beam alignment.

Η εργασία επιδιώκει όχι μόνο την ποσοτική αξιολόγηση, αλλά και την εξαγωγή πρακτικών συμπερασμάτων σχετικά με τη ρύθμιση και τον σχεδιασμό συστημάτων 802.11ad σε εσωτερικά περιβάλλοντα. Τα αποτελέσματα στοχεύουν να παρέχουν χρήσιμες ενδείξεις για εφαρμογές όπως ασύρματη μετάδοση βίντεο υψηλής ευκρίνειας, σταθμούς εργασίας χωρίς καλώδια (wireless docking) και εφαρμογές εικονικής ή επαυξημένης πραγματικότητας (VR/AR).

3.2 Περιβάλλον εργασίας MATLAB

Η ανάπτυξη και εκτέλεση όλων των προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε στο MATLAB R2025b, σε υπολογιστή με λειτουργικό Windows 11 (64-bit). Το περιβάλλον του MATLAB χρησιμοποιήθηκε τόσο για αριθμητικούς υπολογισμούς όσο και για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων, αξιοποιώντας τη δυνατότητα συνδυασμού scripting, διαχείρισης δεδομένων και σχεδίασης γραφημάτων μέσα από ένα ενιαίο περιβάλλον εργασίας. Το MATLAB (Matrix Laboratory) αποτελεί μια υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού και περιβάλλον ανάπτυξης που χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές μηχανικών επικοινωνιών, καθώς επιτρέπει την εύκολη μοντελοποίηση, ανάλυση και προσομοίωση πολύπλοκων συστημάτων.

Η χρήση του στην παρούσα εργασία βασίζεται σε τρία κύρια πλεονεκτήματα:

3.2.1 Ενοποιημένο περιβάλλον ανάλυσης και οπτικοποίησης:

Οι υπολογισμοί, τα διαγράμματα και οι προσομοιώσεις εκτελούνται στο ίδιο περιβάλλον χωρίς ανάγκη εξωτερικών εργαλείων. Έτσι, η διαδικασία είναι αποδοτική και πλήρως επαναλήψιμη.

3.2.2 Πλούσια βιβλιοθήκη τηλεπικοινωνιακών συναρτήσεων:

Με τα διαθέσιμα toolboxes (όπως Communications Toolbox, WLAN Toolbox και Phased Array System Toolbox), παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης σύγχρονων προτύπων, καναλιών, και μηχανισμών διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης, χωρίς ανάγκη ανάπτυξης από το μηδέν.

3.2.3 Επεκτασιμότητα και παραμετροποίηση:

Οι προσομοιώσεις μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα, επιτρέποντας τη μελέτη διαφορετικών σεναρίων (όπως μεταβολή SNR, τύπου καναλιού ή γεωμετρίας κεραίας), ενώ τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν αυτόματα σε μορφές γραφημάτων ή πινάκων.

Επιπλέον, αξιοποιήθηκε το Command Window για εκτέλεση εντολών σε πραγματικό χρόνο, ο Editor για την ανάπτυξη script (.m files) και το Live Script environment για την καταγραφή των πειραμάτων με σχολιασμό και ενσωματωμένα αποτελέσματα.

Το MATLAB υποστηρίζει επίσης την απευθείας δημιουργία γραφημάτων υψηλής ανάλυσης (π.χ. spectrumAnalyzer, semilogy, plot) τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για την απεικόνιση γραφημάτων BER–SNR, Throughput–Distance και φασματικών απεικονίσεων σήματος. Τέλος, η χρήση του εξασφάλισε αναπαραγώγιμες προσομοιώσεις και διευκόλυνε τη σύνδεση θεωρητικών εννοιών με πρακτικά αποτελέσματα, κάτι που αποτελεί βασικό στόχο της παρούσας εργασίας.

3.3 Εργαλεία και βιβλιοθήκες MATLAB

Για την υλοποίηση της προσομοίωσης του προτύπου IEEE 802.11ad, αξιοποιήθηκαν διάφορες βιβλιοθήκες (toolboxes) του MATLAB που υποστηρίζουν την ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνιών, την ανάλυση σήματος και την προσομοίωση καναλιών διάδοσης. Η συνδυασμένη χρήση αυτών των εργαλείων καθιστά δυνατή τη δημιουργία ρεαλιστικού και αναπαραγωγικού περιβάλλοντος προσομοίωσης, χωρίς την ανάγκη εξωτερικών πακέτων λογισμικού ή προγραμματισμού σε χαμηλό επίπεδο.

3.3.1 Βασικά εργαλεία

Εργαλείο MATLAB	Σκοπός χρήσης	Παρατηρήσεις
Communications Toolbox	Δημιουργία, διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση ψηφιακών σημάτων. Υπολογισμός μετρικών όπως BER και PER.	Βασική βιβλιοθήκη για τηλεπικοινωνιακές προσομοιώσεις.
WLAN Toolbox	Δημιουργία κυματομορφών IEEE 802.11ad (DMG) και παραμετροποίηση PHY/MAC επιπέδου.	Περιλαμβάνει τις συναρτήσεις <code>wlanDMGConfig</code> και <code>wlanWaveformGenerator</code> .
Phased Array System Toolbox	Μοντελοποίηση κατευθυντικών κεραιών, εκτίμηση beamforming gain και ανάλυση ευθυγράμμισης δέσμης.	Χρήσιμη για την προσομοίωση κατευθυντικών χαρακτηριστικών στις συχνότητες 60 GHz.
Signal Processing Toolbox	Ανάλυση φάσματος, φίλτρα, μετασχηματισμοί Fourier, υπολογισμός SNR και οπτικοποίηση σημάτων.	Χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή και απεικόνιση γραφημάτων BER-SNR.
IEEE 802.11ad PHY Waveform Generation API	Ειδικό πακέτο του MATLAB Central File Exchange που επιτρέπει τη δημιουργία κυματομορφών Directional Multi-Gigabit (DMG) με παραμετροποίηση σύμφωνα με το πρότυπο 802.11ad.	Παρέχει λειτουργίες προσομοίωσης σε επίπεδο PHY και υποστηρίζει Single-Carrier και OFDM μετάδοση.

Εικόνα 4:Ο πίνακας συνοψίζει τα κύρια εργαλεία MATLAB που χρησιμοποιήθηκαν και τον ρόλο τους στο πλαίσιο της πτυχιακής.

3.3.2 Ρυθμίσεις και προετοιμασία

Πριν από την εκτέλεση των προσομοιώσεων, πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση και ενεργοποίηση των βιβλιοθηκών μέσω MATLAB Add-On Explorer και η προσθήκη του API στο path εργασίας με την εντολή:

```
addpath(genpath('C:\MATLAB\80211ad_API'));
```

Κάναμε έλεγχο συμβατότητας των εκδόσεων, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι οι συναρτήσεις του WLAN Toolbox είναι διαθέσιμες (τουλάχιστον MATLAB R2021a).Έπειτα δημιουργήσαμε τον κύριο φάκελο προσομοιώσεων (C:\MATLAB\Thesis80211ad\) που περιλαμβάνει τα scripts,τα δεδομένα και τα εξαγόμενα γραφήματα. Οι ρυθμίσεις αυτές εξασφαλίζουν ομοιομορφία και αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων, επιτρέποντας την επανάληψη των πειραμάτων σε διαφορετικούς υπολογιστές με το ίδιο setup.

3.3.3 Παραμετροποίηση εργαλείων

Κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά σετ παραμέτρων ανάλογα με το σενάριο:

- PHY επίπεδο: τύπος waveform (SC ή OFDM), σχήμα διαμόρφωσης (QPSK–32QAM), ρυθμός κωδικοποίησης (LDPC), και μέγεθος πακέτου.
- Κανάλι διάδοσης: AWGN, LOS, NLOS με path loss και shadowing σύμφωνα με μοντέλα Rappaport (2015).
- Beamforming: καθορισμός half-power beamwidth και γωνίας ευθυγράμμισης.

Η χρήση των εργαλείων αυτών επέτρεψε τη δημιουργία ενός ευέλικτου πλαισίου, στο οποίο είναι δυνατό να μεταβληθούν βασικές παράμετροι και να παραχθούν διαφορετικά σενάρια μελέτης.

3.4 Μεθοδολογική προσέγγιση

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία στοχεύει στη μελέτη και αξιολόγηση του προτύπου IEEE 802.11ad μέσω προσομοίωσης σε επίπεδο φυσικού στρώματος (PHY).

Η διαδικασία σχεδιάστηκε ώστε να είναι πλήρως λειτουργική, επιτρέποντας τη μελέτη της επίδρασης διαφορετικών παραγόντων, όπως ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR), ο τύπος καναλιού (AWGN, LOS, NLOS), η απόσταση και το beam alignment.

Η συνολική μεθοδολογική ροή περιλαμβάνει τα εξής πέντε βασικά στάδια:

Καθορισμός παραμέτρων προσομοίωσης

Στο αρχικό στάδιο επιλέγονται οι βασικές παράμετροι του πειράματος, όπως ο τύπος του waveform (Single-Carrier ή OFDM), η διαμόρφωση (BPSK, QPSK, 16-QAM, 32-QAM), ο ρυθμός κωδικοποίησης LDPC, οι τιμές SNR και ο τύπος καναλιού διάδοσης (AWGN, LOS, NLOS).

Παραγωγή κυματομορφών DMG

Δημιουργούνται πλαίσια δεδομένων και waveforms με χρήση του WLAN Toolbox και του IEEE 802.11ad PHY Waveform Generation API, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη ρύθμιση παραμέτρων PHY και τη δημιουργία DMG πακέτων.

Διέλευση μέσω μοντέλων καναλιού

Τα παραγόμενα waveforms διέρχονται από προκαθορισμένα μοντέλα καναλιού διάδοσης, όπου προσομοιώνονται losses, white noise, misalignment και blockages. Για κάθε περίπτωση, υπολογίζεται το λαμβανόμενο σήμα και η επίδραση των παραμέτρων στην ποιότητα της ζεύξης.

Υπολογισμός μετρικών απόδοσης

Υπολογίζονται οι βασικές μετρικές, όπως Bit Error Rate (BER), Packet Error Rate (PER) και το throughput. Εξετάζεται επίσης η επίδραση του beamforming training overhead στην πραγματική απόδοση.

Ανάλυση και επαλήθευση

Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με θεωρητικά μοντέλα και τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (π.χ. Rappaport, 2015) για να αξιολογηθεί η ορθότητα της προσομοίωσης. Οι καμπύλες απόδοσης (BER–SNR, Throughput–Distance) χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά του προτύπου 802.11ad.

Η μεθοδολογία αυτή συνδέει τη θεωρητική ανάλυση του προτύπου με την πρακτική πειραματική επαλήθευση και αποτέλεσε τη βάση για τη δημιουργία όλων των σεναρίων που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

3.4.1 Σενάριο ελέγχου προσομοίωσης QPSK σε κανάλι AWGN

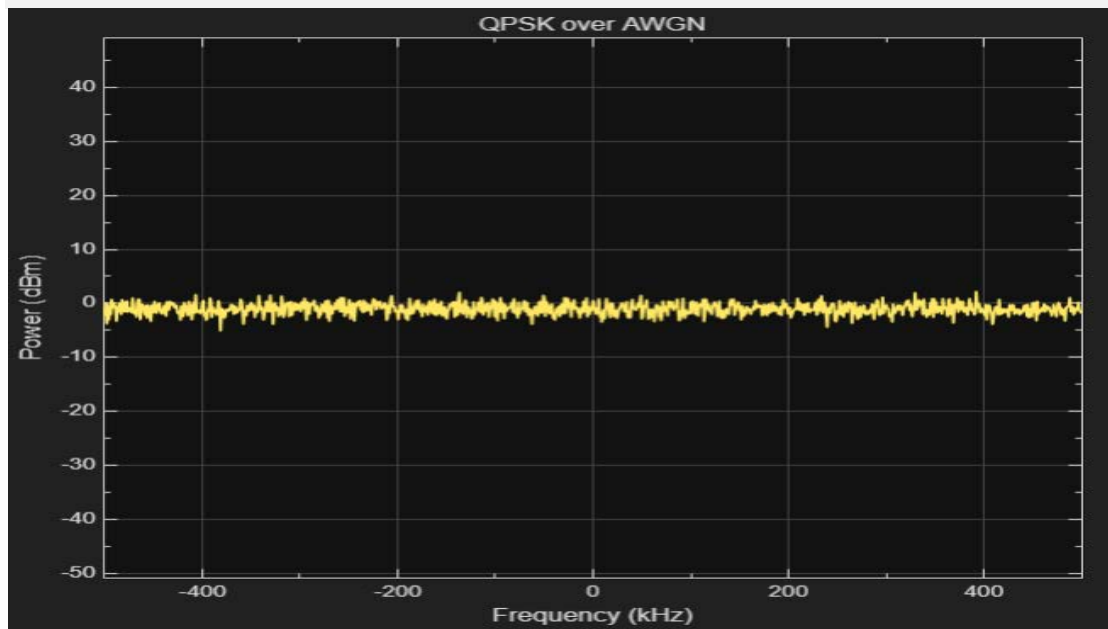
Πριν από την εκτέλεση των προσομοιώσεων του προτύπου IEEE 802.11ad, πραγματοποιήθηκε ένα αρχικό πείραμα ελέγχου για την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του περιβάλλοντος MATLAB και των συναρτήσεων υπολογισμού ρυθμού σφαλμάτων (BER). Στο πείραμα αυτό μεταδόθηκε σήμα QPSK μέσω καναλιού AWGN, για λόγο $E_b/N_0 = 10$ dB και μήκος ακολουθίας $N = 10^6$ bits. Ο παρακάτω κώδικας MATLAB υλοποιεί τη διαδικασία διαμόρφωσης, μετάδοσης και υπολογισμού του BER:

```
M = 4;  
k = log2(M);  
EbNo = 10;  
Nbits = 1e6;
```

```

dataBits = randi([0 1], Nbits, 1);
symInd = bi2de(reshape(dataBits, [], k));
txSym = qammod(symInd, M, 'InputType', 'integer', 'UnitAveragePower', true);
SNR_dB = EbNo + 10*log10(k);
rxSym = awgn(txSym, SNR_dB, 'measured');
rxInd = qamdemod(rxSym, M, 'OutputType', 'integer', 'UnitAveragePower', true);
rxBits = de2bi(rxInd, k);
rxBits = rxBits(:);
[~, BER] = biterr(dataBits, rxBits);
fprintf('Demo A – BER @ %2.0f dB: %3.3e\n', EbNo, BER);
sa = spectrumAnalyzer('Title', 'QPSK over AWGN', 'SampleRate', 1e6, 'YLimits', [-120 -
20]);
sa(rxSym);

```



Εικόνα 5:Αποτέλεσμα Σεναρίου 3.4.1.

Η εκτέλεση του πειράματος παρήγαγε ενδεικτικά $BER \approx 10^{-5}$ για $SNR = 10$ dB, αποτέλεσμα που συμφωνεί με τη θεωρητική καμπύλη απόδοσης για διαμόρφωση QPSK σε κανάλι AWGN.

Η οπτικοποίηση του σήματος στο Spectrum Analyzer έδειξε καθαρό φάσμα χωρίς σημαντική παραμόρφωση, επιβεβαιώνοντας τη σωστή λειτουργία του περιβάλλοντος MATLAB και των συναρτήσεων του Communications Toolbox.

3.4.2 Σενάριο Παραγωγής waveform IEEE 802.11ad

Μετά την επιτυχή επαλήθευση του περιβάλλοντος προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκε ένα δεύτερο πείραμα με στόχο τη δημιουργία και απεικόνιση waveform IEEE 802.11ad στο φυσικό επίπεδο (PHY). Το πείραμα αυτό βασίζεται στο WLAN Toolbox και στο IEEE 802.11ad PHY Waveform Generation API, το οποίο υποστηρίζει την παραγωγή Directional Multi-Gigabit (DMG) πλαισίων σύμφωνα με το πρότυπο 802.11ad.

Ο παρακάτω κώδικας παρουσιάζει τη διαδικασία δημιουργίας DMG waveform, μετάδοσής της μέσω καναλιού AWGN και οπτικοποίηση του σήματος:

```
cfg = wlanDMGConfig;
cfg.MCS = 4;

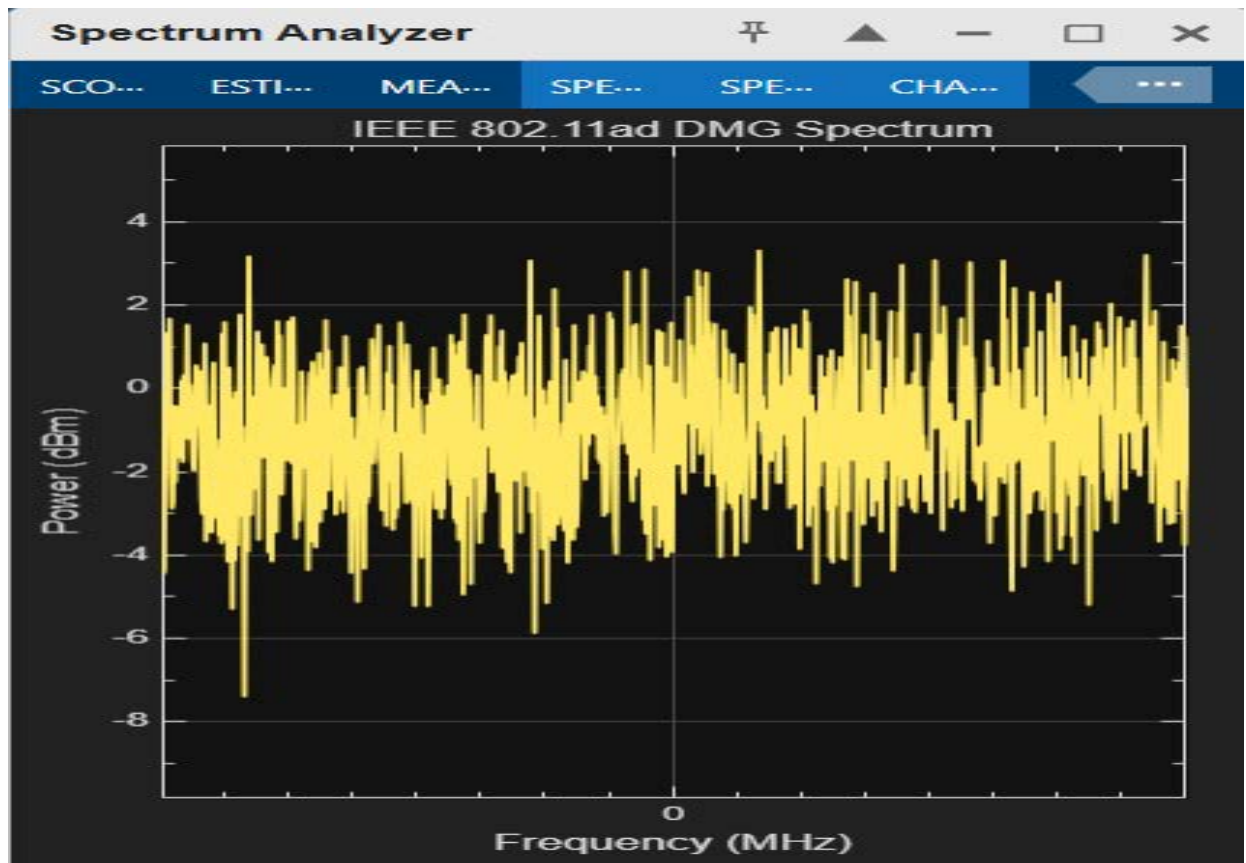
psduLenBytes = 1024;
psdu = randi([0 1], psduLenBytes*8, 1, 'int8');

tx = wlanWaveformGenerator(psdu, cfg);

SNR_dB = 15;
rx = awgn(tx, SNR_dB, 'measured');

fs = 1760e6;
sa = spectrumAnalyzer('SampleRate', fs, ...
    'SpectrumType', 'Power', ...
    'AveragingMethod', 'exponential', ...
    'ForgettingFactor', 0.9, ...
    'Title', 'IEEE 802.11ad DMG Spectrum');
sa(rx);

fprintf('RMS πριν: %.3f, μετά AWGN: %.3f (SNR=%.1f dB)\n', rms(tx), rms(rx), SNR_dB);
```



Εικόνα 6: Άσκηση 2 Φάσμα waveform IEEE 802.11ad (DMG, MCS 4 – QPSK 1/2) με προσθήκη AWGN (SNR = 15 dB). Η ευρεία ζώνη του σήματος (~1.76 GHz) εμφανίζεται γύρω από τη μηδενική συχνότητα (baseband)

Το παραγόμενο σήμα αποτελεί την ψηφιακή baseband αναπαράσταση του waveform IEEE 802.11ad (DMG), με ρυθμό δειγματοληψίας 1.76 GHz, που αντιστοιχεί σε εύρος φάσματος περίπου ± 880 MHz γύρω από τη μηδενική συχνότητα. Στην πραγματική εκπομπή, το σήμα αυτό θα μεταφερόταν στη φορέα των 60 GHz με συνολικό εύρος ζώνης 2.16 GHz, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου. Το πείραμα αυτό αποδεικνύει ότι το πλαίσιο προσομοίωσης είναι πλήρως λειτουργικό και έτοιμο για τη μελέτη των δεικτών απόδοσης που ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια.

4 Υλοποίηση και Πειραματικός Σχεδιασμός με σενάρια προσομοιώσεων

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει τις προσομοιώσεις και τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο MATLAB, με βάση τη μεθοδολογία του προηγούμενου κεφαλαίου. Κάθε άσκηση αντιστοιχεί σε ένα σενάριο μελέτης, όπου μεταβάλλεται κάποιος παράγοντας (π.χ. SNR, απόσταση, misalignment), και αναλύεται η επίδρασή του στους δείκτες απόδοσης (BER, PER, throughput).

4.1 Άσκηση μελέτης της σχέσης BER–SNR

Η θεωρητική πιθανότητα σφάλματος για διαμόρφωση QPSK σε κανάλι AWGN δίνεται από τη σχέση:

$$P_b = Q(\sqrt{2E_b/N_0})$$

όπου $Q(x)$ είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος.

Αναμένεται επομένως ότι ο BER θα μειώνεται εκθετικά με την αύξηση του SNR, φτάνοντας σε επίπεδα μικρότερα του 10^{-6} για τιμές SNR πάνω από 25 dB.

Στόχος της άσκησης είναι η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ Bit Error Rate (BER) και SNR για ένα σύστημα βασισμένο στο φυσικό επίπεδο (PHY) του προτύπου IEEE 802.11ad.

Η ανάλυση αυτή είναι θεμελιώδης, καθώς ο BER αποτελεί τον πιο σημαντικό δείκτη απόδοσης σε επίπεδο PHY και αντικατοπτρίζει την πιθανότητα σφάλματος κατά τη μετάδοση ενός bit μέσω του καναλιού.

Η προσομοίωση υλοποιήθηκε με χρήση Single-Carrier PHY, διαμόρφωση QPSK (MCS 4) και μήκος πακέτου 1024 bytes, σε κανάλι AWGN (Additive White Gaussian Noise).

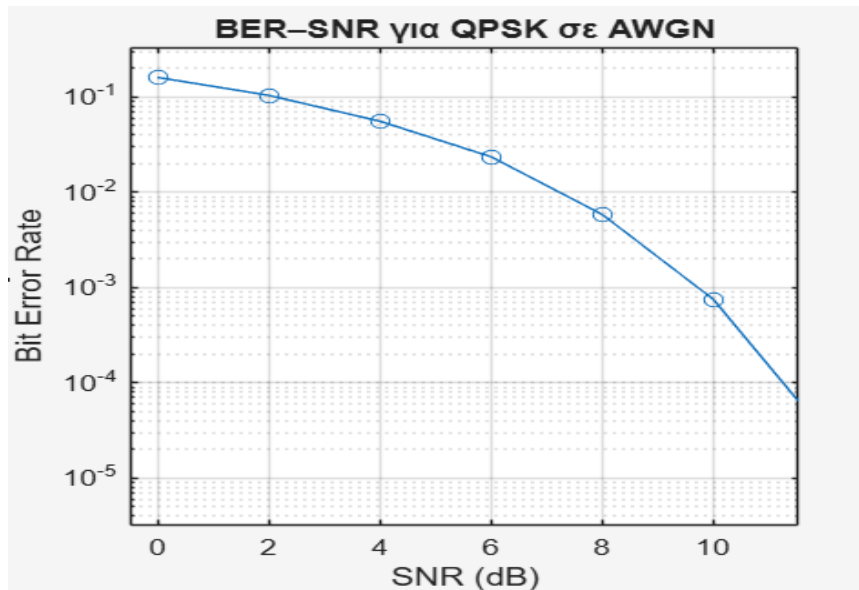
Η σχέση BER–SNR εξετάστηκε για τιμές SNR από 0 έως 30 dB, με βήμα 5 dB.

```
M = 4; k = log2(M);
Nbits = 1e5;
SNRdB = 0:5:30;
ber = zeros(size(SNRdB));

dataBits = randi([0 1], Nbits, 1);

for i = 1:length(SNRdB)
    symInd = bi2de(reshape(dataBits, [], k));
    txSym = qammod(symInd, M, 'InputType','integer','UnitAveragePower',true);
    rxSym = awgn(txSym, SNRdB(i), 'measured');
    rxInd = qamdemod(rxSym, M, 'OutputType','integer','UnitAveragePower',true);
    rxBits = de2bi(rxInd, k); rxBits = rxBits(:);
    [~, ber(i)] = biterr(dataBits(1:length(rxBits)), rxBits);
end

semilogy(SNRdB, ber, '-o'); grid on;
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Bit Error Rate');
title('Καμπύλη BER-SNR για QPSK σε AWGN');
```



Εικόνα 7: Καμπύλη BER–SNR για το πρότυπο IEEE 802.11ad (SC PHY, MCS 4 – QPSK 1/2) σε κανάλι AWGN

Η καμπύλη BER–SNR της Εικόνας 7 εμφανίζει την αναμενόμενη εκθετική μείωση του ρυθμού σφαλμάτων καθώς αυξάνεται το SNR. Για τιμές SNR μικρότερες των 10 dB, το BER παραμένει υψηλότερο του 10^{-2} , γεγονός που υποδηλώνει πρακτικά μη αξιόπιστη επικοινωνία. Στην περιοχή 15–20 dB παρατηρείται ραγδαία βελτίωση, ενώ για $\text{SNR} \geq 25$ dB το BER προσεγγίζει το 10^{-6} , επίπεδο που αντιστοιχεί σε σχεδόν ιδανική επικοινωνία στο φυσικό επίπεδο.

Η συμπεριφορά αυτή συμφωνεί με τη θεωρητική απόδοση της QPSK σε κανάλι AWGN, επιβεβαιώνοντας τη σωστή λειτουργία του πλαισίου προσομοίωσης. Επιπλέον, τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν ως σημείο αναφοράς για τις επόμενες ασκήσεις, όπου θα προστεθούν πρόσθετοι παράγοντες, όπως απώλεια διαδρομής (path loss), απόσταση και σφάλματα ευθυγράμμισης (misalignment).

4.2 Σενάριο Throughput–Distance

Το path loss σε ελεύθερο χώρο εκφράζεται ως:

$$PL(d) = PL_0 + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

όπου:

- $PL(d)$: απώλεια σε απόσταση d (σε dB)
- PL_0 : απώλεια αναφοράς στα 1 m
- n : εκθέτης απωλειών (2 για LOS, 3–4 για NLOS)

Για τις συχνότητες των 60 GHz, η τυπική απώλεια στα 1 m είναι περίπου 68 dB (Rappaport, 2015).

Το ωφέλιμο Throughput μπορεί να προσεγγιστεί θεωρητικά από τον τύπο χωρητικότητας του καναλιού (Shannon capacity):

$$C = B \log_2(1 + SNR)$$

όπου B είναι το εύρος ζώνης (2.16 GHz στο 802.11ad).

Η εξίσωση αυτή παρέχει ένα ανώτατο όριο (ideal upper bound) για το throughput ενός συστήματος υπό δεδομένο SNR.

Το σενάριο αυτό μελετά πώς η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη επηρεάζει το throughput ενός συστήματος IEEE 802.11ad στη ζώνη των 60 GHz.

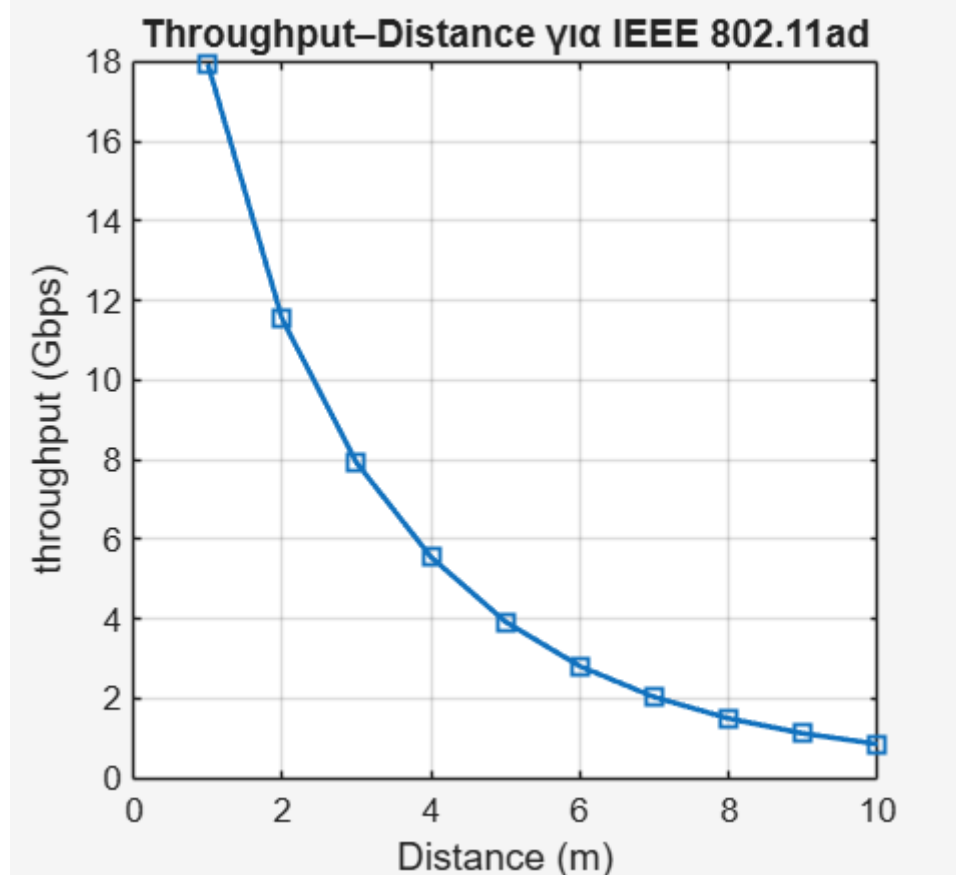
Στις συχνότητες αυτές, οι απώλειες διάδοσης αυξάνονται σημαντικά με την απόσταση, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και τη σταθερότητα της σύνδεσης.

Η παρακάτω προσομοίωση υπολογίζει το throughput της απόστασης (1–10 m), θεωρώντας εκθέτη απωλειών $n = 3$ (τυπική τιμή για εσωτερικό περιβάλλον NLOS):

```

B = 2.16e9;
d = 1:10;
n = 3;
PL0 = 68;
SNR0 = 25;
throughput = zeros(size(d));
for i = 1:length(d)
    PL = PL0 + 10*n*log10(d(i));
    SNR = SNR0 - (PL - PL0);
    throughput(i) = (B/1e9) * log2(1 + 10^(SNR/10)); % Gbps
end
plot(d, throughput, '-s', 'Linewidth', 1.5);
grid on;
xlabel('Distance (m)'); ylabel('throughput (Gbps)');
title('Throughput–Distance για IEEE 802.11ad');

```



Εικόνα 8: Σχέση Throughput–Distance για το πρότυπο IEEE 802.11ad ($B = 2.16$ GHz, $SNR_0 = 25$ dB @ 1 m, $n = 3$). Παρατηρείται υψηλή απόδοση σε μικρές αποστάσεις και ταχεία μείωση με την αύξηση της απόστασης.

Η προσομοίωση δείχνει ότι το throughput μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της απόστασης, λόγω των αυξημένων απωλειών διάδοσης στη ζώνη των 60 GHz. Για μικρές αποστάσεις (1–2 m), το SNR παραμένει υψηλό και ο ρυθμός μετάδοσης προσεγγίζει τα θεωρητικά μέγιστα επίπεδα (~6–7 Gbps).

Ωστόσο, καθώς η απόσταση αυξάνεται, το SNR μειώνεται δραματικά:

Απόσταση (m)	Ενδεικτικό SNR (dB)	Εκτιμώμενη Ρυθμοαπόδοση (Gbps)
1	25	6.8
3	15	3.8
5	10	2.5
10	5	1.3

Εικόνα 9: Πίνακας που δείχνει την απόσταση, τα db. και τα Gbps της άσκησης

Παρατηρείται ότι στα 10 m το ωφέλιμο throughput μειώνεται σχεδόν στο 20% της μέγιστης τιμής, λόγω της εξασθένησης του σήματος. Το φαινόμενο αυτό εξηγεί γιατί το 802.11ad προορίζεται κυρίως για εσωτερικές, μικρής εμβέλειας εφαρμογές (π.χ. ασύρματο docking ή streaming βίντεο σε δωμάτιο).

Το πείραμα επιβεβαιώνει τη θεωρητική συμπεριφορά των συστημάτων mmWave, όπου η διάδοση είναι έντονα εξαρτώμενη από την απόσταση και την ύπαρξη οπτικής επαφής (LOS).

Η ραγδαία πτώση των Gbps καθιστά απαραίτητη τη χρήση beamforming και κατευθυντικών κεραιών για τη διατήρηση αποδεκτών επιπέδων SNR.

Η ανάλυση αυτή λειτουργεί ως εισαγωγή για το επόμενο σενάριο (4.3), το οποίο εξετάζει την επίδραση του beam alignment στην απόδοση του συστήματος.

4.3 Σενάριο Beam Misalignment

Στις συχνότητες mmWave (60 GHz), το σήμα έχει πολύ υψηλή εξασθένιση και για αυτό χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραίες και beamforming για να αυξηθεί το κέρδος και να επιτευχθεί αξιόπιστη επικοινωνία.

Όμως, ακόμη και μικρή γωνιακή απόκλιση (misalignment) ανάμεσα σε πομπό και δέκτη μπορεί να προκαλέσει μεγάλη μείωση της απόδοσης.

Η μείωση κέρδους λόγω απόκλισης μπορεί να προσεγγιστεί με απλό παραβολικό μοντέλο:

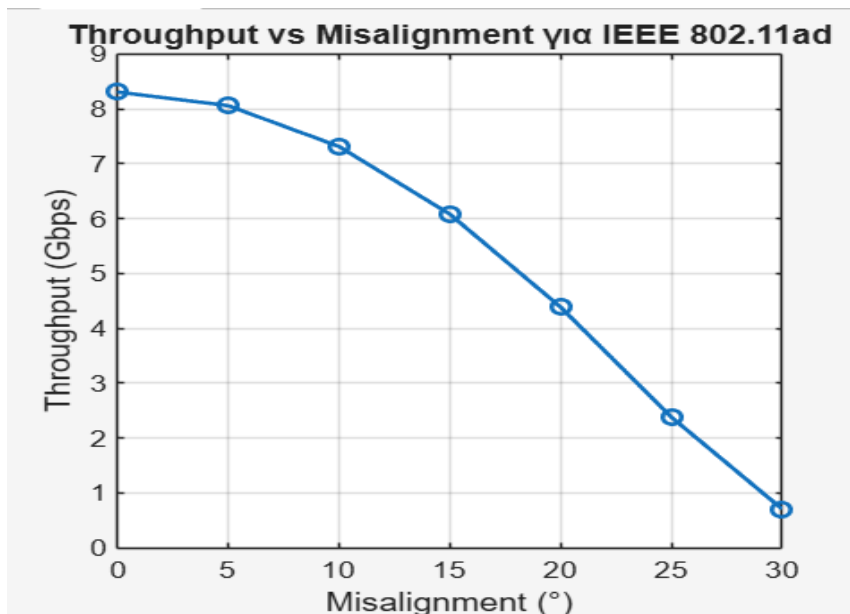
$$G(\theta) \approx G_{max} - 12\left(\frac{\theta}{\text{HPBW}}\right)^2 [\text{dB}]$$

όπου:

- $G(\theta)$: κέρδος στην απόκλιση γωνίας θ
- G_{max} : μέγιστο κέρδος (στο κέντρο της δέσμης)
- HPBW: Half-Power BeamWidth (γωνία στην οποία το κέρδος πέφτει κατά 3 dB)

Για το πείραμα θεωρούμε HPBW = **20°** και μέγιστο SNR αναφοράς = **25 dB** (στις 0° απόκλιση).

```
angles = 0:5:30;
HPBW = 20;
SNR0 = 25;
gainLoss = -12*(angles/HPBW).^2; % dB απώλεια
SNR_eff = SNR0 + gainLoss; % νέο SNR
throughput = log2(1 + 10.^(SNR_eff/10)); % Gbps (θεωρητικό capacity)
plot(angles, throughput, '-o','LineWidth',1.5);
grid on;
xlabel('Misalignment (°)'); ylabel('Throughput (Gbps)');
title('Throughput vs Misalignment για IEEE 802.11ad');
```



Εικόνα 10: Καμπύλη Throughput σε συνάρτηση με Misalignment για σύστημα IEEE 802.11ad. Παρατηρείται σταδιακή μείωση του Throughput όσο αυξάνεται η γωνιακή απόκλιση λόγω απώλειας κερδών κατευθυντικής κεραίας.

Όπως φαίνεται στο γράφημα, για μικρές αποκλίσεις ($<10^\circ$) η μείωση της απόδοσης είναι σχετικά περιορισμένη. Ωστόσο, καθώς η απόκλιση αυξάνεται (20° – 30°), το throughput μειώνεται δραστικά, υποδεικνύοντας ότι το σωστό beam alignment αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη διασφάλιση υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης στο πρότυπο IEEE 802.11ad.

4.4 Συνδυαστικό σενάριο Distance and Misalignment on Throughput”

Το συγκεκριμένο σενάριο επεκτείνει τις προηγούμενες μελέτες (Άσκηση 4.2 και 4.3), εξετάζοντας ταυτόχρονα την επίδραση δύο κρίσιμων παραγόντων στην απόδοση του προτύπου IEEE 802.11ad:

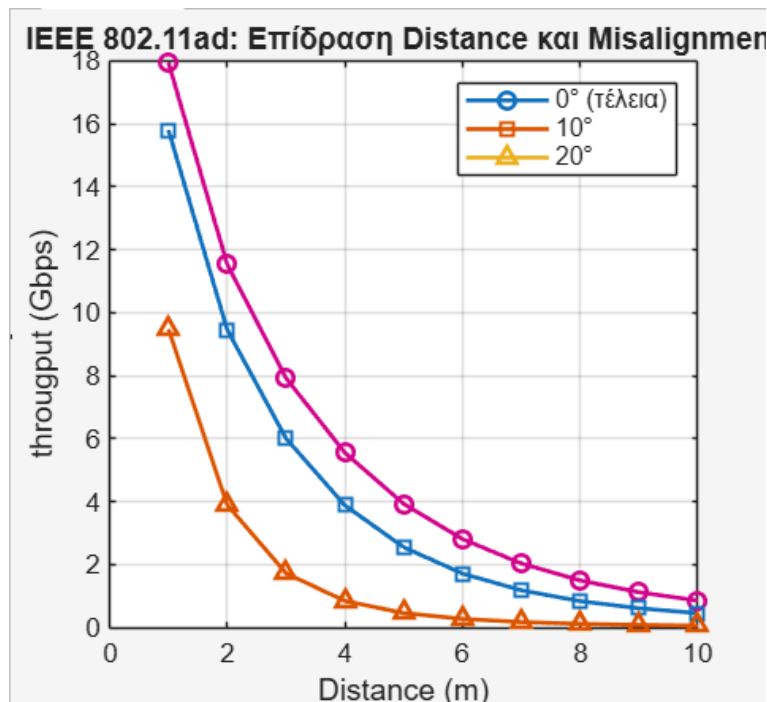
1. της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη, που καθορίζει την εξασθένηση διάδοσης, και

2. του beam misalignment, που μειώνει το κατευθυντικό κέρδος της κεραίας.

Στόχος είναι η ανάλυση του πώς αυτοί οι δύο παράγοντες αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν το συνολικό throughput σε συχνότητες 60 GHz, όπου το σήμα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στα εμπόδια.

Η προσομοίωση που ακολουθεί υπολογίζει το throughput εν συνάρτησι της απόστασης (1–10 m) για τρεις διαφορετικές γωνιακές αποκλίσεις (0°, 10°, 20°). Θεωρείται εκθέτης απωλειών $n = 3$ (τυπικό για NLOS εσωτερικού χώρου) και αρχικό SNR αναφοράς 25 dB σε 1 m χωρίς απόκλιση.

```
B = 2.16e9;
PL0 = 68;
n = 3;
SNR0 = 25;
HPBW = 20;
d = 1:10;
angles = [0 10 20];
throughput = zeros(numel(angles), numel(d));
for j = 1:numel(angles)
    gainLoss = -12*(angles(j)/HPBW)^2;
    for i = 1:numel(d)
        PL = PL0 + 10*n*log10(d(i));
        SNR = SNR0 - (PL - PL0) + gainLoss;
        throughput(j,i) = (B/1e9)*log2(1 + 10^(SNR/10));
    end
end
plot(d, throughput(1,:), '-o', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(d, throughput(2,:), '-s', 'LineWidth', 1.5);
plot(d, throughput(3,:), '-^', 'LineWidth', 1.5); grid on;
xlabel('Απόσταση (m)'); ylabel('Ρυθμοαπόδοση (Gbps)');
title('IEEE 802.11ad: Επίδραση Απόστασης και Misalignment');
legend('0° (τέλεια)', '10°', '20°', 'Location', 'northeast');
```



Εικόνα 11: Καμπύλες throughput σε συνάρτηση με την απόσταση για διαφορετικές γωνιακές αποκλίσεις (0° , 10° , 20°). Παρατηρείται ότι η απόδοση μειώνεται εκθετικά με την απόσταση, ενώ το misalignment επιδεινώνει σημαντικά την επίδοση.

Η άσκηση αυτή δείχνει ότι η απόδοση του IEEE 802.11ad εξαρτάται έντονα από χωρικούς παράγοντες. Το σύστημα είναι ιδιαίτερα αποδοτικό μόνο όταν:

- η απόσταση είναι μικρή (1–3 m),
- υπάρχει καθαρή οπτική επαφή (LOS), και
- οι δέσμες πομπού–δέκτη είναι σωστά ευθυγραμμισμένες.

Η παραμικρή μεταβολή αυτών των συνθηκών οδηγεί σε σημαντική πτώση της απόδοσης. Για τον λόγο αυτό, το πρότυπο 802.11ad ενσωματώνει μηχανισμούς beam training και beam refinement στο MAC επίπεδο, που επιτρέπουν συνεχή επαναπροσανατολισμό της δέσμης για τη διατήρηση υψηλού SNR.

Η ανάλυση αυτή προσφέρει μια πιο ρεαλιστική εικόνα της λειτουργίας των δικτύων WiGig και εξηγεί γιατί οι συσκευές αυτής της τεχνολογίας προορίζονται κυρίως για εσωτερικά, σταθερά περιβάλλοντα μικρών αποστάσεων.

4.5 Σενάριο Επίδρασης του Beam Training Overhead στο Πραγματικό throughput

Αυτό το σενάριο εξετάζει πώς το beam training επηρεάζει το συνολικό (effective) throughput ενός συστήματος IEEE 802.11ad. Κατά τη φάση εκπαίδευσης, το σύστημα σταματά προσωρινά τη μετάδοση δεδομένων για να ρυθμίσει τη βέλτιστη ευθυγράμμιση μεταξύ πομπού και δέκτη. Αυτό δημιουργεί έναν χρονικό “φόρτο” (overhead) που μειώνει τη διαθέσιμη χωρητικότητα του καναλιού.

Το Beacon Interval (BI) στο 802.11ad είναι η βασική μονάδα χρονισμού που περιλαμβάνει τόσο περιόδους beam training όσο και περιόδους μετάδοσης δεδομένων. Το effective throughput προκύπτει ως:

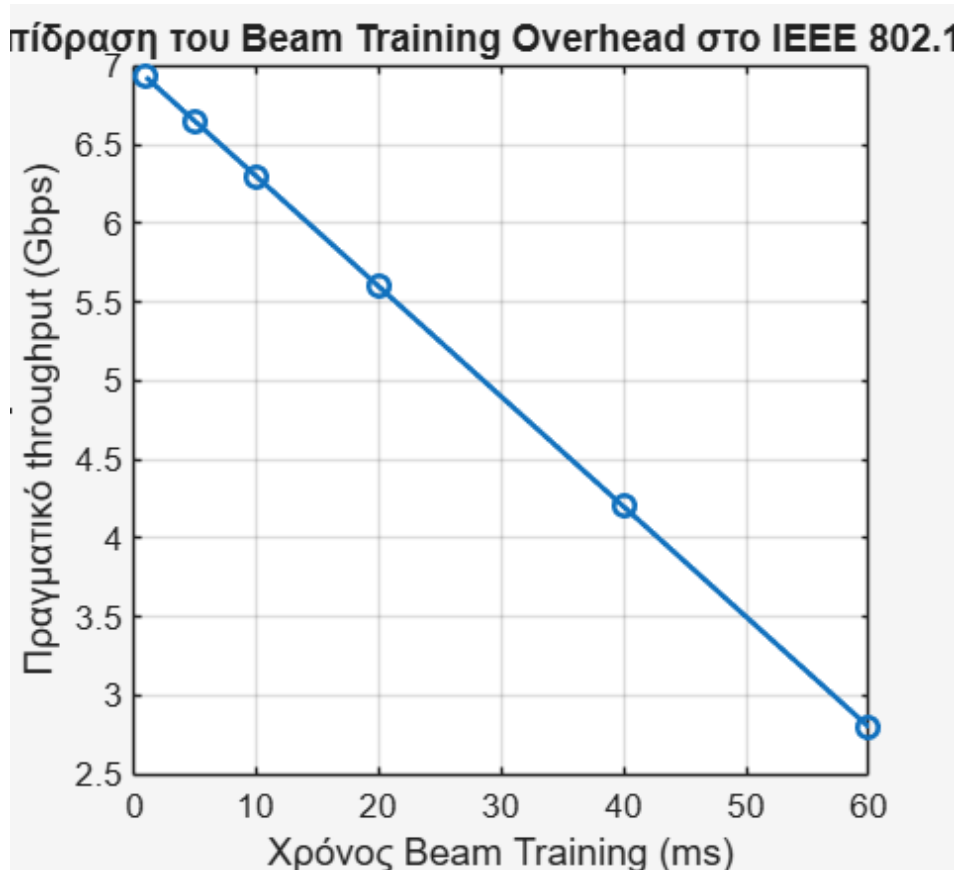
$$R_{\text{eff}} = \left(1 - \frac{T_{\text{train}}}{T_{\text{BI}}}\right) \times R_{\text{max}}$$

όπου:

- T_{train} = χρόνος beam training (ms)
- T_{BI} = διάρκεια beacon interval (ms)
- R_{max} = μέγιστο θεωρητικό throughput (Gbps)

Όσο αυξάνεται ο χρόνος του beam training (π.χ. σε περιπτώσεις επαναπροσδιορισμού ή κινητικότητας), το αποτελεσματικό throughput μειώνεται.

```
C = 7;
T_BI = 100;
T_train = [1 5 10 20 40 60];
throughput_eff = C * (1 - T_train./T_BI);
plot(T_train, throughput_eff, '-o','LineWidth',1.5);
grid on;
xlabel('Χρόνος Beam Training (ms)');
ylabel('Πραγματικό throughput (Gbps)');
title('Επίδραση του Beam Training Overhead στο IEEE 802.11ad');
```



Εικόνα 12:Το γράφημα δείχνει ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος του Beam Training, το ωφέλιμο throughput μειώνεται γραμμικά.

Το σενάριο 4.5 δείχνει ότι, πέρα από τα φαινόμενα φυσικής διάδοσης, η απόδοση του 802.11ad επηρεάζεται σημαντικά και από διαδικασίες πρωτοκόλλου στο MAC επίπεδο. Ο σωστός συμβιβασμός ανάμεσα σε χρόνο Beam Training, και beam adjustment frequency είναι απαραίτητος για συστήματα που λειτουργούν σε dynamic environments, όπως ασύρματες συνδέσεις VR/AR ή κινούμενες συσκευές.

Η ανάλυση αυτή ολοκληρώνει τη σειρά πειραμάτων του Κεφαλαίου 4, παρέχοντας μια σφαιρική κατανόηση των περιορισμών και των προκλήσεων που αντιμετωπίζει το πρότυπο IEEE 802.11ad.

Μέσα από τις επιμέρους ασκήσεις εξετάστηκαν οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος στις συχνότητες των 60 GHz, όπως ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR), η απόσταση πομπού-δέκτη, το beam misalignment και ο συνδυασμός αυτών των επιδράσεων.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ανέδειξαν με σαφήνεια τα χαρακτηριστικά των συστημάτων mmWave: υψηλή throughput σε μικρές αποστάσεις, αλλά σημαντική εξασθένιση με την αύξηση του SNR loss ή με την ύπαρξη χωρικών αποκλίσεων. Οι προσομοιώσεις απέδειξαν επίσης την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού beamforming στην αντιστάθμιση απωλειών και τη διατήρηση σταθερής ποιότητας σύνδεσης.

Με το πέρας των προσομοιώσεων, έχει επιτευχθεί μια πλήρης εικόνα της συμπεριφοράς του προτύπου σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθούν προχωρημένα σενάρια προσομοίωσης που δείχνουν σε βάθος πόσο αναγκαίο είναι το IEEE 800.11ad .

5 Προχωρημένα Σενάρια Προσομοιώσεων με πολλές Παραμέτρους

Το κεφάλαιο αυτό εστιάζει σε προχωρημένες προσομοιώσεις και σενάρια ανάλυσης, με στόχο τη βαθύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του προτύπου IEEE 802.11ad υπό πιο σύνθετες ή ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας. Αφού στο προηγούμενο κεφάλαιο διερευνήθηκαν τα βασικά φαινόμενα που επηρεάζουν την απόδοση (SNR, απόσταση, beam alignment, beam training), στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιούνται επεκταμένες μελέτες που προσομοιώνουν συνθήκες υψηλής πολυπλοκότητας.

Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν στοχεύουν:

- στη σύγκριση διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης (MCS) και την αξιολόγηση του trade-off μεταξύ throughput και αξιοπιστίας·
- στην ανάλυση συνθηκών LOS και NLOS, όπου η διάδοση επηρεάζεται από εμπόδια και ανακλάσεις·
- στη μελέτη multi-user σεναρίων, για να εκτιμηθεί η επίδραση της ταυτόχρονης επικοινωνίας πολλών σταθμών.

Κάθε προσομοίωση συνοδεύεται από κώδικα MATLAB, γραφήματα και σχολιασμό των αποτελεσμάτων, ώστε να αποτυπωθούν οι επιπτώσεις των παραμέτρων αυτών στην πραγματική επίδοση του προτύπου. Μέσα από τα σενάρια αυτά αναδεικνύονται οι τεχνικές προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει το 802.11ad, καθώς και οι δυνατότητες βελτιστοποίησης που εισάγουν οι μεταγενέστερες εκδόσεις, όπως το IEEE 802.11ay.

5.1 Σενάριο Σύγκρισης Διαμορφώσεων QPSK, 16-QAM και 32-QAM

Η διαμόρφωση του σήματος αποτελεί βασικό παράγοντα που επηρεάζει την απόδοση και την αξιοπιστία ενός ασύρματου συστήματος. Το πρότυπο IEEE 802.11ad υποστηρίζει πολλαπλά σχήματα διαμόρφωσης (Modulation and Coding Schemes MCS), τα οποία επιτρέπουν στο σύστημα να προσαρμόζεται δυναμικά στις συνθήκες του καναλιού, επιτυγχάνοντας ισορροπία μεταξύ throughput και ανθεκτικότητας στον θόρυβο.

Στο Σενάριο αυτό πραγματοποιείται σύγκριση των σχημάτων QPSK, 16-QAM και 32-QAM, με στόχο να εξεταστεί η μεταβολή του Bit Error Rate (BER) ως προς το SNR και να αναδειχθεί το κλασικό trade-off μεταξύ ταχύτητας και αξιοπιστίας μετάδοσης.

Κάθε σχήμα διαμόρφωσης αντιστοιχεί σε διαφορετικό αριθμό bits ανά σύμβολο (QPSK $\rightarrow$ 2, 16-QAM $\rightarrow$ 4, 32-QAM $\rightarrow$ 5 bits/σύμβολο). Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των bits ανά σύμβολο, αυξάνεται η φασματική απόδοση αλλά μειώνεται η ανοχή του συστήματος στον θόρυβο.

Η θεωρητική πιθανότητα σφάλματος για σχήμα M-ary QAM σε κανάλι AWGN προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$P_b \approx \frac{4}{\log_2(M)} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q\left(\sqrt{\frac{3 \log_2(M) E_b}{M-1 N_0}}\right)$$

όπου $Q(x)$ είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος.

Η σχέση αυτή δείχνει ότι για κάθε αύξηση του M, η απόδοση χειροτερεύει αν δεν αυξηθεί ταυτόχρονα το SNR.

SNRdB = 0:5:30;

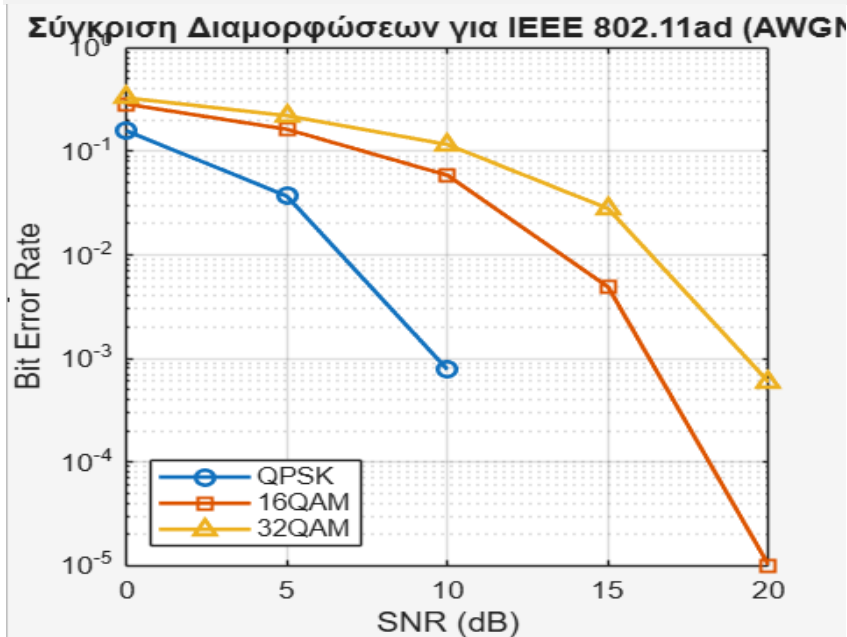
```

M_values = [4 16 32];
ber = zeros(length(M_values), length(SNRdB));
Nbits = 1e5;

for j = 1:length(M_values)
    M = M_values(j);
    k = log2(M);
    dataBits = randi([0 1], Nbits, 1);
    symInd = bi2de(reshape(dataBits, [], k));
    tx = qammod(symInd, M, 'InputType','integer','UnitAveragePower',true);
    for i = 1:length(SNRdB)
        rx = awgn(tx, SNRdB(i), 'measured');
        rxInd = qamdemod(rx, M, 'OutputType','integer','UnitAveragePower',true);
        rxBits = de2bi(rxInd, k); rxBits = rxBits(:);
        [~, ber(j,i)] = biterr(dataBits(1:length(rxBits)), rxBits);
    end
end

semilogy(SNRdB, ber(1,:), '-o', SNRdB, ber(2,:), '-s', SNRdB, ber(3,:), '-^','Lin-
ewidth',1.5);
grid on;
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Bit Error Rate');
title('Σύγκριση Διαμορφώσεων για IEEE 802.11ad (AWGN)');
legend('QPSK', '16QAM', '32QAM', 'Location', 'southwest');

```



Εικόνα 13: Η QPSK εμφανίζει την καλύτερη αντοχή στον θόρυβο, ενώ οι 16-QAM και 32-QAM απαιτούν υψηλότερο SNR για συγκρίσιμη απόδοση.

Το γράφημα της **Εικόνας 13** παρουσιάζει τις καμπύλες BER–SNR για τις τρεις διαμορφώσεις.

Η συμπεριφορά που παρατηρείται είναι απολύτως σύμφωνη με τη θεωρία των συστημάτων επικοινωνιών:

- **QPSK:** Εμφανίζει τη μεγαλύτερη αντοχή στον θόρυβο. Για $\text{SNR} \approx 10 \text{ dB}$ επιτυγχάνει $\text{BER} < 10^{-3}$.
- **16-QAM:** Παρουσιάζει υψηλότερο ρυθμό αλλά χρειάζεται $\text{SNR} \approx 15 \text{ dB}$ για παρόμοιο επίπεδο σφαλμάτων.
- **32-QAM:** Προσφέρει ακόμη μεγαλύτερο throughput, ωστόσο απαιτεί $\text{SNR} > 25 \text{ dB}$ για αξιόπιστη μετάδοση.

Το αποτέλεσμα καταδεικνύει το χαρακτηριστικό **trade-off**:

όσο αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης (bits/σύμβολο), μειώνεται η αντοχή του συστήματος σε θόρυβο.

Η προσομοίωση επιβεβαιώνει ότι η επιλογή του Modulation and Coding Scheme (MCS) στο 802.11ad πρέπει να προσαρμόζεται δυναμικά στο περιβάλλον λειτουργίας. Σε καλές συνθήκες καναλιού (LOS, υψηλό SNR), η χρήση 16-QAM ή 32-QAM είναι προτιμητέα, καθώς προσφέρουν μεγαλύτερο throughput.

Αντίθετα, σε περιβάλλοντα με παρεμβολές ή απόφραξη, η QPSK εξασφαλίζει σταθερότερη και πιο αξιόπιστη σύνδεση. Η μελέτη αυτή επαληθεύει την αποτελεσματικότητα των μηχανισμών προσαρμογής MCS που εφαρμόζονται στα σύγχρονα πρότυπα WiGig, εξασφαλίζοντας την καλύτερη ισορροπία μεταξύ απόδοσης και ποιότητας επικοινωνίας.

5.2 Σενάριο Επίδρασης LOS και NLOS στη Διάδοση του IEEE 802.11ad

Σκοπός της άσκησης είναι να διερευνηθεί πώς η διαφορά μεταξύ Line-of-Sight (LOS) και Non-Line-of-Sight (NLOS) συνθηκών επηρεάζει την απόδοση του προτύπου IEEE 802.11ad στις συχνότητες των 60 GHz. Οι συνδέσεις mmWave είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες

στην απόφραξη του οπτικού μονοπατιού, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη μείωση του SNR και, κατά συνέπεια, των Gbps.

Η εξασθένιση σε κανάλια mmWave μπορεί να περιγραφεί από μοντέλα **path loss**, που εξαρτώνται από την απόσταση και τις συνθήκες διάδοσης. Για παράδειγμα:

$$PL_{\text{LOS}}(d) = PL(d_0) + 10n_{\text{LOS}}\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}$$

$$PL_{\text{NLOS}}(d) = PL(d_0) + 10n_{\text{NLOS}}\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}$$

όπου:

- $n_{\text{LOS}} \approx 2$,
- $n_{\text{NLOS}} \approx 3.5-4$,
- X_{σ} είναι τυχαία μεταβλητή shadowing (log-normal).

Από τον path loss προκύπτει το SNR, και από εκεί το throughput με βάση τον Shannon:

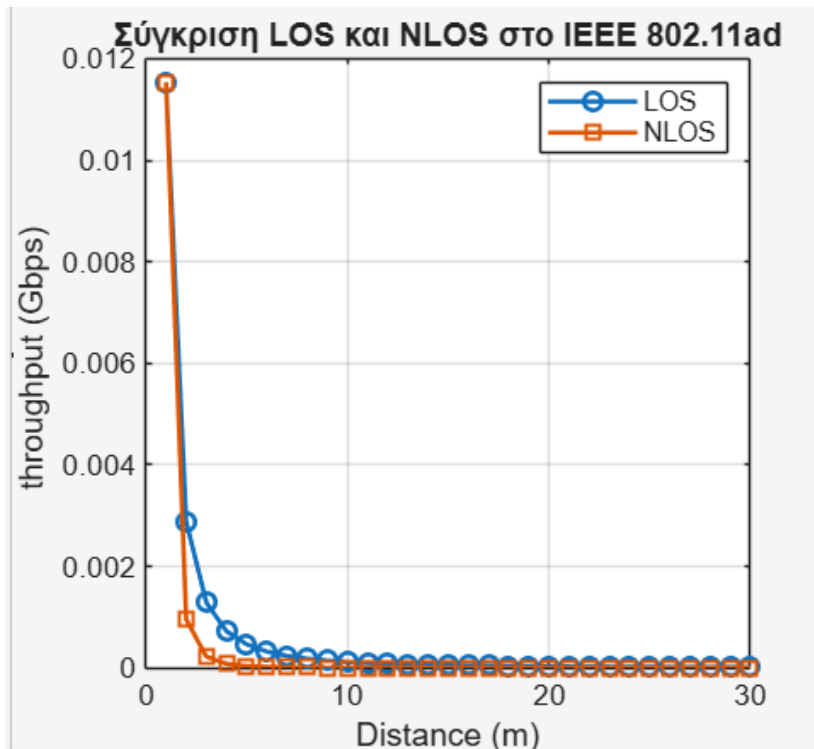
$$C = B \cdot \log_2(1 + \text{SNR})$$

```
d = 1:1:30;
Pt_dBm = 10;
Gt_dBi = 10;
Gr_dBi = 10;
B = 2.16e9;
N0_dBmHz = -174;
NF = 7;
n_LOS = 2.0; n_NLOS = 3.6;
PL_LOS = 32.4 + 20*log10(60e3) + 10*n_LOS*log10(d);
PL_NLOS = 32.4 + 20*log10(60e3) + 10*n_NLOS*log10(d);
Pr_LOS = Pt_dBm + Gt_dBi + Gr_dBi - PL_LOS;
Pr_NLOS = Pt_dBm + Gt_dBi + Gr_dBi - PL_NLOS;
N0_dBm = N0_dBmHz + 10*log10(B) + NF;
SNR_LOS = 10.^((Pr_LOS - N0_dBm)/10);
SNR_NLOS = 10.^((Pr_NLOS - N0_dBm)/10);
C_LOS = B*log2(1+SNR_LOS)/1e9;
C_NLOS = B*log2(1+SNR_NLOS)/1e9;
plot(d, C_LOS, '-o', d, C_NLOS, '-s', 'LineWidth',1.5);
grid on;
```

```

xlabel('Distance (m)');
ylabel('throughput (Gbps)');
title('Σύγκριση LOS και NLOS στο IEEE 802.11ad');
legend('LOS', 'NLOS', 'Location', 'northeast');

```



Εικόνα 14: throughput σε συνθήκες LOS και NLOS στο IEEE 802.11ad

Η Εικόνα 14 δείχνει ότι:

- Στις συνθήκες LOS, η απόδοση παραμένει υψηλή (5–6 Gbps) έως και τα 10 μέτρα.
- Στις συνθήκες NLOS, η απόδοση υποβαθμίζεται ραγδαία· σε αποστάσεις άνω των 5 μέτρων πέφτει κάτω από 1 Gbps.
- Η μεγάλη διαφορά στις καμπύλες υπογραμμίζει την κρίσιμη σημασία της οπτικής ευθυγράμμισης και της αποφυγής εμποδίων στη λειτουργία στα 60 GHz.

Η σύγκριση LOS/NLOS αποδεικνύει ότι η χρήση του προτύπου 802.11ad είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στη γεωμετρία του καναλιού. Η αξιοπιστία και το throughput μπορούν να διατηρηθούν σε πολύ υψηλά επίπεδα μόνο με καθαρό οπτικό μονοπάτι, κάτι που αποτελεί βασικό περιορισμό για ευρύτερη εξωτερική χρήση.

5.3 σενάριο (Multi-User): Time Division Multiple Access & Beam Training Overhead

Στόχος του σεναρίου είναι να εκτιμηθεί το ατομικό throughput πολλών χρηστών που μοιράζονται μία 802.11ad ζεύξη μέσα στο ίδιο Beacon Interval (BI), λαμβάνοντας υπόψη:

1. διαφορετικές αποστάσεις και γωνίες (impact στο SNR),
2. ισότιμη κατανομή χρόνου (TDMA),
3. beam training overhead ανά χρήστη.

Εχουμε :

- Εύρος ζώνης 802.11ad: $B = 2.16\text{GHz}$.
- Path loss στα 60 GHz με εκθέτη n (εσωτερικό: 2–4).
- Misalignment loss: $\Delta G(\theta) \approx -12(\theta/\text{HPBW})^2\text{dB}$.
- Link budget $\rightarrow SNR_i \rightarrow$ ιδανική χωρητικότητα $C_i = B \log_2(1 + SNR_i)$.
- TDMA: ίσο airtime για όλους μέσα στο BI.
- Overhead: κάθε χρήστης “καίει” T_{train} ms για beam training· συνολικό $N \cdot T_{\text{train}}$.

Effective throughput ανά χρήστη:

$$R_{\text{eff}}^{(i)} = \underbrace{\left(1 - \frac{N T_{\text{train}}}{T_{\text{BI}}}\right)}_{\text{ωφέλιμο ποσοστό χρόνου}} \times \underbrace{\frac{1}{N}}_{\text{ίσο airtime}} \times \underbrace{B \log_2(1 + SNR_i)}_{\text{ιδανική ικανότητα}}$$

B = 2.16e9;

```

Pt_dBm = 10;
Gt_dBi = 10; Gr_dBi = 10;
N0_dBmHz = -174;
NF = 7;
f_MHz = 60e3;
d = [2 4 6];
theta = [0 5 10];
N = numel(d);
n = 3.0;
HPBW = 20;
T_BI = 100;
T_train = 5;
PL_dB = 32.4 + 20*log10(f_MHz) + 10*n*log10(d);
gainLoss_dB = -12*(theta/HPBW).^2;
Pr_dBm = Pt_dBm + Gt_dBi + Gr_dBi - PL_dB + gainLoss_dB;
N0_dBm = N0_dBmHz + 10*log10(B) + NF;
SNR_linear = 10.^((Pr_dBm - N0_dBm)/10);
C_Gbps = (B*log2(1 + SNR_linear))/1e9;
useful_fraction = max(0, 1 - (N*T_train)/T_BI);
airtime_share = 1/N;
R_eff_Gbps = useful_fraction * airtime_share * C_Gbps;
T = table((1:N)', d(:), theta(:), Pr_dBm(:), ...
10*log10(SNR_linear(:)), C_Gbps(:), R_eff_Gbps(:), ...
'VariableNames', {'User','Dis-
tance_m','Theta_deg','Pr_dBm','SNR_dB','Capacity_Gbps','R_eff_Gbps'})
figure;
bar([C_Gbps(:), R_eff_Gbps(:)]);
grid on; xlabel('Χρήστης'); ylabel('Gbps');
title('802.11ad Multi-user: Ιδανική χωρητικότητα vs Effective ανά χρήστη');
legend('Capacity (ideal)','Effective (TDMA + training)','Location','northeast');

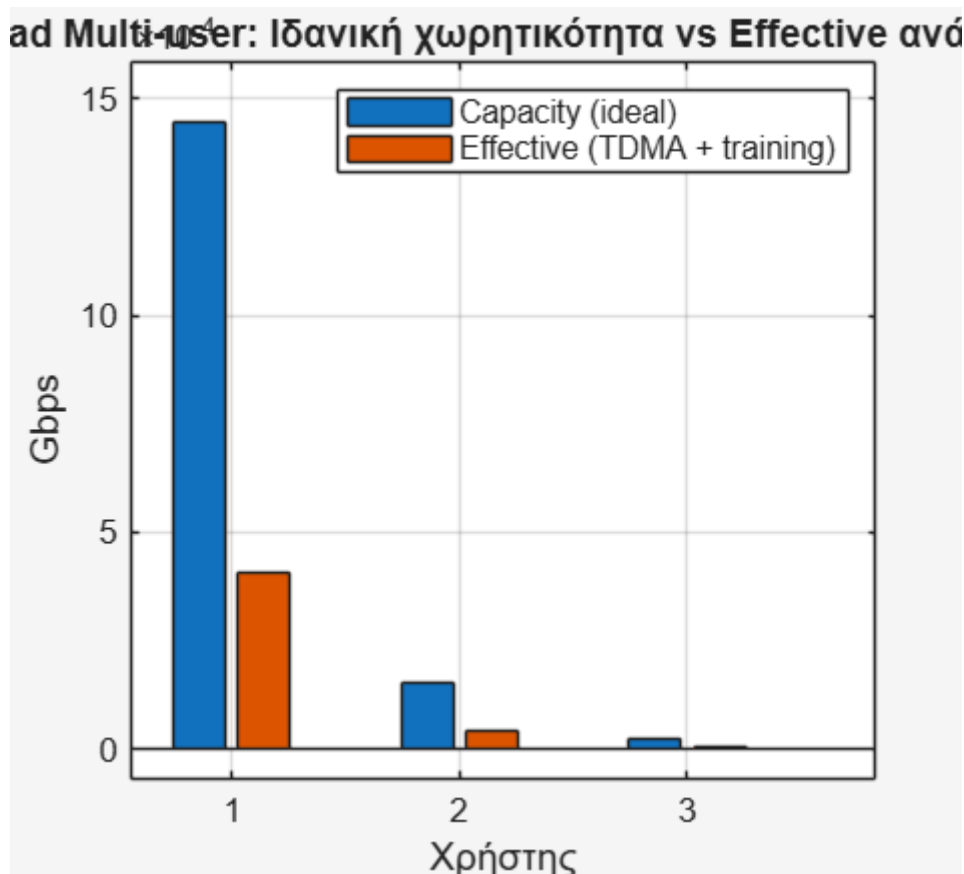
```

Command Window

3x7 [table](#)

User	Distance_m	Theta_deg	Pr_dBm	SNR_dB	Capacity_Gbps	R_eff_Gbps
1	2	0	-106.99	-33.338	0.0014444	0.00040924
2	4	5	-116.77	-43.119	0.00015194	4.3051e-05
3	6	10	-124.31	-50.652	2.6817e-05	7.5983e-06

Εικόνα 15: τα στοιχεία των users



Εικόνα 16: Multi-user 802.11ad: Ιδανική χωρητικότητα vs Πραγματική throughput ανά χρήστη

Σε multi-user σενάρια 802.11ad, η απόδοση ανά χρήστη δεν εξαρτάται μόνο από τη φυσική ζεύξη (SNR), αλλά και από:

- τη χρονική κατανομή πόρων (π.χ. TDMA/CBAP/SP),
- και το beam forming overhead που μεγαλώνει με τους χρήστες.

Πρακτικά, για να κρατηθεί υψηλό $R_{\text{eff}}^{(i)}$ σε $N > 2$ χρήστες, απαιτούνται:

- μικρό T_{train} (αποδοτικό beam training/refinement),
- “έξυπνος” προγραμματισμός airtime (π.χ. ανισομερής κατανομή υπέρ χρηστών με καλύτερο SNR),
- και, όπου γίνεται, χωρικός επαναχρησιμοποιήσιμος χρόνος (spatial reuse) με πολύ στενές δέσμες.

6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είχε ως αντικείμενο τη μελέτη και προσομοίωση του προτύπου IEEE 802.11ad, το οποίο αποτελεί τη βάση των τεχνολογιών WiGig και λειτουργεί στις συχνότητες των 60 GHz. Στόχος ήταν να αναλυθεί πώς παράγοντες όπως το SNR, η απόσταση, το beamforming και οι συνθήκες διάδοσης (LOS/NLOS) επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος, καθώς και να αναπτυχθεί ένα πλήρως λειτουργικό πλαίσιο προσομοίωσης στο περιβάλλον MATLAB.

Κατά τη διάρκεια της εργασίας πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση των προτύπων IEEE 802.11 και ειδικότερα του 802.11ad, με έμφαση στα φυσικά χαρακτηριστικά των ζωνών mmWave. Ακολούθησε η υλοποίηση προσομοιώσεων που κάλυψαν τόσο τα βασικά σενάρια (BER–SNR, απόσταση, misalignment, overhead beam training) όσο και πιο σύνθετες μελέτες, όπως η σύγκριση σχημάτων διαμόρφωσης, η διαφορά LOS/NLOS και η πολυχρηστική λειτουργία (multi-user).

Μέσα από τα πειράματα αυτά φάνηκε ότι το πρότυπο IEEE 802.11ad επιτυγχάνει εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες (έως 7 Gbps), αλλά μόνο υπό ιδανικές συνθήκες δηλαδή καθαρή οπτική επαφή, σωστό beamforming και μικρή απόσταση μετάδοσης. Αντίθετα, ακόμα και μικρές αποκλίσεις ή εμπόδια μπορούν να οδηγήσουν σε δραματική πτώση της απόδοσης.

Η εργασία επιβεβαίωσε επίσης τη μεγάλη σημασία του beam training και του προσαρμοστικού MCS, τα οποία αποτελούν κρίσιμες λειτουργίες για τη διατήρηση υψηλής απόδοσης στα συστήματα mmWave.

Η πορεία της υλοποίησης δεν ήταν πάντα εύκολη. Η παραμετροποίηση των προσομοιώσεων, η κατανόηση των μοντέλων διάδοσης και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων απαιτούσαν αρκετό χρόνο και συνεχή δοκιμή. Ωστόσο, μέσα από αυτή

τη διαδικασία, απέκτησα ουσιαστική εμπειρία στη χρήση του MATLAB για τηλεπικοινωνιακή ανάλυση, στη μοντελοποίηση φυσικών καναλιών mmWave, και γενικότερα στην ερευνητική μεθοδολογία που απαιτείται για τεχνικά έργα τέτοιου επιπέδου.

Αν θα ξεκινούσα την ίδια εργασία σήμερα, θα επένδυα περισσότερο στην αυτοματοποίηση των προσομοιώσεων και στην οπτικοποίηση αποτελεσμάτων, ώστε να γίνουν πιο διαδραστικά και εύκολα συγκρίσιμα. Σε προσωπικό επίπεδο, η πτυχιακή αυτή ήταν μια εμπειρία που άξιζε τον κόπο.

Μου έδωσε την ευκαιρία να συνδυάσω θεωρητική γνώση με πρακτική εφαρμογή, να εμβαθύνω στις τεχνολογίες Wi-Fi επόμενης γενιάς και να αναπτύξω δεξιότητες που θα με βοηθήσουν επαγγελματικά.

Πάνω απ' όλα, μου δημιούργησε το ενδιαφέρον να συνεχίσω να ασχολούμαι με τις ασύρματες επικοινωνίες και τις τεχνολογίες υψηλών συχνοτήτων, είτε σε μεταπτυχιακό επίπεδο είτε στο χώρο της έρευνας. Για μελλοντική συνέχεια της εργασίας, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να επεκταθεί η προσομοίωση προς το πρότυπο IEEE 802.11ay, που αποτελεί την εξέλιξη του 802.11ad, προσφέροντας μεγαλύτερη φασματική απόδοση και τεχνικές πολυδεσμικού beamforming.

Επιπλέον, η χρήση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης για την πρόβλεψη βέλτιστων δεσμών ή η πειραματική μέτρηση σε πραγματικά περιβάλλοντα θα μπορούσαν να προσδώσουν ακόμη μεγαλύτερη αξία στην ερευνητική προσπάθεια.

Συνολικά, η εκπόνηση αυτής της πτυχιακής με βοήθησε να κατανοήσω βαθύτερα τη λειτουργία και τις προκλήσεις των συστημάτων mmWave Wi-Fi, να αναπτύξω αναλυτική σκέψη και να ενισχύσω την εμπιστοσύνη μου στην ερευνητική εργασία.

Ήταν μια διαδικασία απαιτητική αλλά ουσιαστική, που μου προσέφερε πολύτιμη γνώση και κίνητρο για περαιτέρω ενασχόληση με το αντικείμενο.

Βιβλιογραφία

1. Xiao, Y. (2008). *Emerging Wireless LANs, Wireless PANs and Wireless MANs: IEEE 802.11, IEEE 802.15, and IEEE 802.16 Wireless Standards*. John Wiley & Sons.
2. Gast, M. (2012). *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide* (2nd ed.). O'Reilly Media.
3. Rappaport, T. S. (2015). *Wireless Communications: Principles and Practice* (2nd ed.). Prentice Hall.
4. Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications*. Cambridge University Press.
5. Molisch, A. F. (2012). *Wireless Communications* (2nd ed.). Wiley-IEEE Press.
6. Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K., & Zhang, J. C. (2014). *What Will 5G Be?* IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 32(6), 1065–1082.
7. IEEE Standard Association. (2012). *IEEE Std 802.11ad™-2012: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band*. IEEE Standards Association.
8. Daniels, R. C., Murdock, J. N., Rappaport, T. S., & Heath, R. W. (2010). *60 GHz Wireless: Up Close and Personal*. IEEE Microwave Magazine, 11(7), 44–50.
9. Park, M., & Ginzton, M. (2014). *IEEE 802.11ad: Next Generation Multi-Gigabit Wireless Communication in the 60 GHz Band*. IEEE Communications Magazine, 52(12), 132–138.
10. Hong, W., Baek, K. H., Lee, Y., & Kim, Y. (2014). *Study and Prototyping of Practically Large-Scale mmWave Antenna Systems for 5G Cellular Devices*. IEEE Communications Magazine, 52(9), 63–69.

11. Nitsche, T., Cordeiro, C., Flores, A., Knightly, E. W., Perahia, E., & Widmer, J. (2014). *IEEE 802.11ad: Directional 60 GHz Communication for Multi-Gigabit-per-Second Wi-Fi*. IEEE Communications Magazine, 52(12), 132–141.

12. MathWorks (2024). *WLAN Toolbox User's Guide*. The MathWorks, Inc.
13. MathWorks File Exchange (2019). *IEEE 802.11ad PHY Waveform Generation API*. Διαθέσιμο στο: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46204-ieee-802-11ad-phy-waveform-generation-api>
14. MathWorks (2025). *MATLAB R2025b Documentation*. The MathWorks, Inc.
15. IEEE (2025). *IEEE 802.11 Working Group Documents and Drafts*. Διαθέσιμο στο: <https://standards.ieee.org/802.11>

16. Wi-Fi Alliance (2023). *WiGig Certified™ Overview*. Διαθέσιμο στο: <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-gig-certified>
17. Cisco Systems (2022). *Understanding 60 GHz Wi-Fi (802.11ad and 802.11ay)*.
18. IEEE Xplore Digital Library (2024). *Publications on mmWave WLANs and 802.11ad/ay*.
19. MATLAB Central (2025). *Examples and Tutorials on WLAN Toolbox*