



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
Π.Μ.Σ. ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: Προσομοίωση Millimeter-Wave καναλιών με χωρική συνέπεια
για 5G δίκτυα

ΠΑΠΠΑ ΑΝΤΙΓΟΝΗ
Α.Μ.:17

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΓΓΕΛΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΡΤΑ 2022



UNIVERSITY OF IOANNINA
DEPARTMENT OF INFORMATICS & TELECOMMUNICATION
MASTER INFORMATICS AND NETWORKS

MASTER THESIS

**SUBJECT: Simulation of Millimeter-Wave channels with
spatial consistency for 5G networks**

PAPPA ANTIGONI
R.N.:17

SUPERVISOR PROFESSOR: AGGELIS KONSTANTINOS

ARTA 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
Π.Μ.Σ. ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: Προσομοίωση Millimeter-Wave καναλιών με χωρική συνέπεια
για 5G δίκτυα

ΠΑΠΠΑ ΑΝΤΙΓΟΝΗ
Α.Μ.:17

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΓΓΕΛΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Νοέμβριο 2022

.....		
.....		
.....		

© Παππά, Αντιγόνη, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

ΠΑΠΠΑ ΑΝΤΙΓΟΝΗ

Υπογραφή

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά και τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Αγγέλη για την ανάθεση, επίβλεψη και τη συνεισφορά του στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για όλη την υποστήριξη και τη βοήθεια τους σε όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών.

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει σημειωθεί τεράστια πρόοδος στην ασύρματη επικοινωνία. Η κίνηση δεδομένων αυξάνεται με γρήγορους ρυθμούς σε όλο τον κόσμο. Οι ανάγκες για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων οδήγησαν στην ανάπτυξη των δικτύων 5G χρησιμοποιώντας συχνότητα mmWave λόγω του τεράστιου εύρους ζώνης.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση mmWave ασύρματου καναλιού με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα. Οι μετρήσεις του mmWave massive MIMO καναλιού πραγματοποιήθηκε σε σενάριο εξωτερικού χώρου στα 28GHz.

Χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής NYUSIM που ικανοποιεί τέτοιες απαιτήσεις προσομοίωσης για ασύρματη έρευνα στο 5G και πέρα. Έτσι, Οι συστοιχίες κεραιών εκπομπής και λήψης με διαφορετική πόλωση είναι απαραίτητες για την παροχή περισσότερης ενέργειας σήματος και την αύξηση της κατάταξης του καναλιού.

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με διαφορετικές πολώσεις κεραίας πομπού και δέκτη, με διαφορετικές γωνίες αζιμούθιου, με διαφορετικά στοιχεία κεραίας και τέλος με διαφορετική ταχύτητα UT σε περιβάλλοντα LOS-NLOS.

Λέξεις κλειδιά: Δίκτυα 5G, mmWave, massive MIMO, χωρική συνέπεια, περιβάλλον LOS- NLOS, προσομοιωτής NYUSIM.

Abstract

Over the past few decades, tremendous progress has been made in wireless communication. Data traffic is growing at a rapid pace around the world. The needs for higher data transmission rates led to the development of 5G networks using mmWave frequency due to the huge bandwidth.

The purpose of this study is to simulate mmWave wireless channel with spatial consistency for 5G networks. The mmWave massive MIMO channel measurements were performed in an outdoor scenario at 28GHz.

The NYUSIM simulator was used which satisfies such simulation requirements for wireless research in 5G and beyond. Thus, arrays of transmit and receive antennas with different polarization are necessary to provide more signal energy and increase the channel rank.

Measurements were performed with different transmitter and receiver antenna polarizations, with different azimuth angles, with different antenna elements and finally with different UT speed in various LOS-NLOS environments.

Keywords: 5G networks, mmWave, massive MIMO, spatial consistency, LOS-NLOS environment, NYUSIM simulator.

Περιεχόμενα

Δήλωση μη λογοκλοπής.....	viii
Ευχαριστίες.....	ix
Περίληψη.....	x
Abstract	xi
Κατάλογος εικόνων	xiv
Κατάλογος πινάκων.....	xvi
Κατάλογος ακρωνυμίων	xvii
Εισαγωγή	18
Κεφάλαιο 1ο : Εξέλιξη της ασύρματης επικοινωνίας	21
1.1 Εισαγωγή.....	21
1.2 Τεχνολογία πρώτης γενιάς 1G (αναλογική)	22
1.3 Τεχνολογία δεύτερης γενιάς 2G (ψηφιακή)	22
1.3.1 Τεχνολογία 2.5 G.....	23
1.4 Τεχνολογία Τρίτης γενιάς 3G.....	23
1.5 Τεχνολογία τέταρτης γενιάς 4G	24
1.6 Τεχνολογία πέμπτης γενιάς 5G	24
1.6.1 Τι είναι η τεχνολογία 5G;.....	25
1.6.2 Πώς λειτουργεί η τεχνολογία 5G;	25
1.6.3 Πότε θα είναι διαθέσιμο το 5G και πώς θα επεκταθεί;.....	26
1.6.4 Ποιος είναι ο πραγματικός αντίκτυπος της τεχνολογίας 5G;	26
1.7 Τεχνολογία 6G.....	26
Κεφάλαιο 2ο :Βασικές Τεχνολογίες Ενεργοποίησης για δίκτυα 5G και πέρα από αυτά	31
2.1 Εισαγωγή.....	31
2.2 Mimo-ofdm.....	31
2.3 Κύματα χιλιοστών.....	32
2.4 Ζώνη υπο-χιλιοστών ή Terahertz	33
2.5 Μικρά κύτταρα ή Ετερογενή Δίκτυα	35
2.6 Beamforming.....	35
2.7 Massive MIMO	37
2.8 Internet of Things	39
Κεφάλαιο 3ο : Προσομοιωτής NYUSIM 3.1.....	43
3.1 Εισαγωγή.....	43
3.2 Βασικά στοιχεία γραφικής διεπαφής χρήστη και προσομοιωτή	43

3.2.1 Παράμετροι εισόδου	44
3.2.2 Αρχεία Εξόδου	50
Κεφάλαιο 4 ^ο : Προσομοιώσεις	57
4.1 1 ^η Περίπτωση	57
4.2 2 ^η Περίπτωση.....	77
4.3 3 ^η Περίπτωση.....	86
4.4 4 ^η Περίπτωση.....	97
Συμπεράσματα.....	107
Βιβλιογραφία.....	108

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: 5G	24
Εικόνα 2: Ζώνη κυμάτων	34
Εικόνα 3: Small shell.....	35
Εικόνα 4: Beamforming	36
Εικόνα 5: Massive MIMO ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη.....	38
Εικόνα 6: Γραφική διεπαφή χρήστη (GUI)	43
Εικόνα 7: Ένας χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωριάζει με τις θέσεις BS και UT. Εξασθένιση σκιάς 4dB σε σενάριο UMi LOS. Η απόσταση διαχωρισμού T-R είναι 100m..	50
Εικόνα 8: Ένας χάρτης χωρικά συσχετισμένης κατάστασης LOS/NLOS	51
Εικόνα 9: Παράδειγμα διαδρομής χρήστη	51
Εικόνα 10: Παράδειγμα διαδοχικών πανκατευθυντικά PDP.....	52
Εικόνα 11: Παράδειγμα διαδοχικών κατευθυντικών PDP.	52
Εικόνα 12: Περιβάλλον Los	57
Εικόνα 13: Περιβάλλον Nlos	58
Εικόνα 14: Διαδρομή χρήστη	60
Εικόνα 15: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με co-pol.....	73
Εικόνα 16: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP με co-pol.....	73
Εικόνα 17: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με x-pol.....	74
Εικόνα 18: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP με x-pol.....	74
Εικόνα 19: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με co-pol, σε περιβάλλον NLOS.	75
Εικόνα 20: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP με co-pol, σε περιβάλλον NLOS.	75
Εικόνα 21: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με x-pol, σε περιβάλλον NLOS	76
Εικόνα 22: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP με x-pol, σε περιβάλλον NLOS.....	76
Εικόνα 23: Αζιμούθιο.....	78
Εικόνα 24: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με αζιμούθιο 7°.	80
Εικόνα 25: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωριάζει με τις θέσεις BS και UT. Η απόσταση διαχωρισμού είναι 42,8m.	80
Εικόνα 26: Χάρτης χωρικά συσχετισμένων συνθηκών LOS/NLOS.....	81
Εικόνα 27: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με αζιμούθιο 7ο, σε περιβάλλον NLOS.	81
Εικόνα 28: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωριάζει με τις θέσεις BS και UT. Η απόσταση διαχωρισμού είναι 42,8m	82
Εικόνα 29: Χάρτης χωρικά συσχετισμένων συνθηκών LOS/NLOS.....	82
Εικόνα 30: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με αζιμούθιο 60°.	83
Εικόνα 31: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωριάζει με τις θέσεις BS και UT. Η απόσταση διαχωρισμού είναι 42,8m	83
Εικόνα 32: Χάρτης χωρικά συσχετισμένων συνθηκών LOS/NLOS.....	84
Εικόνα 33: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με αζιμούθιο 60°, σε περιβάλλον NLOS.	84
Εικόνα 34: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωριάζει με τις θέσεις BS και UT. Η απόσταση διαχωρισμού είναι 42,8m	85
Εικόνα 35: Χάρτης χωρικά συσχετισμένων συνθηκών LOS/NLOS.....	85
Εικόνα 36: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP.....	87
Εικόνα 37: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP.....	88
Εικόνα 38: Χάρτης χωρικά συσχετισμένων συνθηκών LOS/NLOS.....	88

Εικόνα 39: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωριάζει με τις θέσεις BS και UT. Η απόσταση διαχωρισμού είναι 18,6m	89
Εικόνα 40: Διαδρομή χρήστη	89
Εικόνα 41: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP	90
Εικόνα 42: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP	91
Εικόνα 43: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP	92
Εικόνα 44: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP	92
Εικόνα 45: Χάρτης χωρικά συσχετισμένων συνθηκών LOS/NLOS.....	93
Εικόνα 46: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωριάζει με τις θέσεις BS και UT..	94
Εικόνα 47: Διαδρομή χρήστη	94
Εικόνα 48: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP	95
Εικόνα 49: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP	96
Εικόνα 50: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP	100
Εικόνα 51: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP	101
Εικόνα 52: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωριάζει με τις θέσεις BS και UT.	101
Εικόνα 53: Διαδρομή χρήστη	102
Εικόνα 54: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με ταχύτητα 30m/s, σε περιβάλλον NLOS.....	104
Εικόνα 55: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP , με ταχύτητα 30m/s, σε περιβάλλον NLOS.	105
Εικόνα 56: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωριάζει με τις θέσεις BS και UT.	105
Εικόνα 57: Διαδρομή Χρήστη.....	106

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Δείχνει τη σύγκριση χαρακτηριστικών των δικτύων 4G, 5G και 6G.	27
Πίνακας 2: Δείγμα των τριών πρώτων στιγμιότυπων του DIRPDPInfo.txt.....	70
Πίνακας 3: OmniPDPInfo.txt	72
Πίνακας 4: Η ισχύς στο δέκτη των DIRPDPInfo.txt και OMNIPDPInfo.txt για ταχύτητες 30m/s και 1m/s.	100
Πίνακας 5: Η ισχύς στο δέκτη των DIRPDPInfo.txt και OMNIPDPInfo.txt για ταχύτητες 30m/s και 1m/s, χωρίς οπτική επαφή.	104

Κατάλογος ακρωνυμίων

mmWave	Millimeter Wave
MIMO	Multiple-input multiple-output
PL	Path lost
CI	Close in
UMi	Αστικές Μικροκυψέλες
PLE	Εκθέτης απώλειας διαδρομής
TC	Time Clusters (Συστάδες χρόνου)
MPC	Multipath component (Συνιστώσα πολλαπλών διαδρομών)
SF	Συντελεστής σκιάς
PDP	Power Delay Profile
LOS	Line Of Sight
NLOS	Non- Line Of Sight
RF	Radio Frequency
RX	Receiver
TX	Transmitter
HPBW	Half Power Beam width
CIR	Channel Impulse Response (Παλμική απόκριση καναλιού)
UT	Χρήστης
BS	Σταθμός βάσης
ULA	Uniform linear array
URA	Uniform rectangular array
LTE	Long Term Evolution
RMS	Root-mean-square

Εισαγωγή

Η αυξανόμενη ζήτηση για ταχύτερους ρυθμούς δεδομένων και για μεγαλύτερο εύρος ζώνης οδήγησαν στην επόμενη γενιά δικτύων. Οι συχνότητες κυμάτων χιλιοστών και υπό-Terahertz αναμένεται να παίξουν σημαντικό ρόλο στα ασύρματα συστήματα 5G και πέρα από αυτό, εξαιτίας του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Τα χαρακτηριστικά των δικτύων 5G είναι η υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, η εξαιρετικά χαμηλή απόκριση (2 millisecond), και η ταυτόχρονη λειτουργία πολλών συσκευών στην ίδια περιοχή. Επομένως προσφέρουν καλύτερες λειτουργίες σε αναδυόμενες πλατφόρμες όπως η υγειονομική περίθαλψη, η ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας, η εικονική πραγματικότητα, η αυτό-οδήγηση αυτοκινήτων το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) και άλλα.

Τα κύματα χιλιοστών εξαιτίας του μικρού μήκους κύματος είναι πιο ευαίσθητα σε περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως η ατμοσφαιρική εξασθένηση, την απώλεια μεγάλης διαδρομής, δέντρα, τοίχους και στην απόφραξη από τον άνθρωπο.

Για το λόγω αυτό δημιουργείτε σενάριο εξωτερικού χώρου με χωρική συνέπεια, δημιουργώντας διαφορετικούς παραμέτρους (πόλωσης, αζιμούθιου, στοιχείων κεραίας και κινούμενου οχήματος). Οι προσομοιώσεις εξωτερικού χώρου διάδοσης mmWave ευρείας ζώνης πραγματοποιούνται στα 28GHz για το πώς οι διάφοροι παράμετροι επηρεάζουν την ενέργεια του ληφθέντος σήματος.

Η εργασία οργανώνεται ως εξής: Στο πρώτο κεφάλαιο θα γίνει μια ιστορική αναδρομή της εξέλιξης της ασύρματης επικοινωνίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο να αναλυθούν οι τεχνολογίες που χρησιμοποιεί το αναδυόμενο δίκτυο 5G καθώς και έρευνες που υπάρχουν για την μελλοντική τους ανάπτυξη.

Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας θα αναλυθεί ο προσομοιωτής NYUSIM 3.1. για 5G δίκτυα.

Και τέλος θα πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις θα καταγραφούν τα αποτελέσματα και θα αναλυθούν τα συμπεράσματα αυτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

Κεφάλαιο 1ο : Εξέλιξη της ασύρματης επικοινωνίας

1.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει σημειωθεί τεράστια πρόοδος στην ασύρματη επικοινωνία. Η ασύρματη επικοινωνία ξεκίνησε με το 1G ακολουθούμενο από τα 2G, 3G, 4G και το τρέχον 5G.

Το κυψελοειδές ασύρματο Generation (G) αναφέρεται γενικά σε μια αλλαγή στη φύση του συστήματος, την ταχύτητα, την τεχνολογία και τη συχνότητα. Κάθε γενιά έχει κάποια πρότυπα, ικανότητες, τεχνικές και νέα χαρακτηριστικά που το διαφοροποιούν από την προηγούμενη. Το 1ο εμπορικό αυτοματοποιημένο κινητό δίκτυο ξεκίνησε από την NTT στην Ιαπωνία το 1979, ακολουθούμενη από η κυκλοφορία του συστήματος κινητής τηλεφωνίας Nordic (NMT) στη Δανία, Φινλανδία, Νορβηγία και Σουηδία, το 1981. Μετά από αυτό αρχίζει η ανάπτυξη των γενεών για ασύρματη κινητή επικοινωνία.

Το δίκτυο κινητής ασύρματης επικοινωνίας πρώτης γενιάς (1G) χρησιμοποιήθηκε αναλογικό μόνο για φωνητικές κλήσεις. Η δεύτερη γενιά (2G) είναι μια ψηφιακή τεχνολογία και υποστηρίζει μηνύματα κειμένου. Μετά από αυτό ήταν το 3G που παρείχε υποστήριξη πολυμέσων μαζί με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και αυξημένη χωρητικότητα. Η τέταρτη γενιά (4G) ενσωματώνει το 3G με σταθερό διαδίκτυο για την υποστήριξη ασύρματου διαδικτύου για φορητές συσκευές, κάτι που αποτελεί εξέλιξη για την υπέρβαση των περιορισμών του 3G και αυξάνει επίσης το QoS¹ αυξάνει το εύρος ζώνης και μειώνει το κόστος των πόρων. Το 5G φέρνει μπροστά ένα πραγματικό ασύρματο Wireless World Wide Web (WWWW) ενώ το 6G προτείνεται να ενσωματώσει το 5G με δορυφορικά δίκτυα για παγκόσμια κάλυψη.

¹**Quality of service (QoS) Ποιότητα υπηρεσίας (QoS)** είναι η περιγραφή ή η μέτρηση της συνολικής απόδοσης μιας υπηρεσίας, όπως ένα δίκτυο τηλεφωνίας ή υπολογιστών ή μια υπηρεσία υπολογιστικού νέφους, ιδιαίτερα η απόδοση που βλέπουν οι χρήστες του δικτύου. Για την ποσοτική μέτρηση της ποιότητας της υπηρεσίας, συχνά λαμβάνονται υπόψη πολλές σχετικές πτυχές της υπηρεσίας δικτύου, όπως η απώλεια πακέτων, ο ρυθμός μετάδοσης bit, η απόδοση, η καθυστέρηση μετάδοσης, η διαθεσιμότητα. Στον τομέα της δικτύωσης υπολογιστών και άλλων τηλεπικοινωνιακών δικτύων μεταγωγής πακέτων, η ποιότητα της υπηρεσίας αναφέρεται σε μηχανισμούς ελέγχου προτεραιοτήτων κυκλοφορίας και δέσμευσης πόρων παρά στην επιτευχθείσα ποιότητα υπηρεσίας. Ποιότητα υπηρεσίας είναι η ικανότητα παροχής διαφορετικών προτεραιοτήτων σε διαφορετικές εφαρμογές, χρήστες ή ροές δεδομένων ή η εγγύηση ενός συγκεκριμένου επιπέδου απόδοσης σε μια ροή δεδομένων. https://en.wikipedia.org/wiki/Quality_of_service

1.2 Τεχνολογία πρώτης γενιάς 1G (αναλογική)

Το σύστημα ασύρματης κινητής επικοινωνίας πρώτης γενιάς είναι μια αναλογική τεχνολογία που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980. Χρησιμοποιήθηκε για φωνητικές υπηρεσίες και βασίστηκε στην τεχνολογία που ονομάζεται προηγμένο σύστημα κινητής τηλεφωνίας (AMPS-Advanced Mobile Phone System). Το σύστημα AMPS διαμόρφωνε συχνότητα και χρησιμοποιούσε διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (FDMA- frequency division multiple access) με χωρητικότητα καναλιού 30KHz και ζώνη συχνοτήτων 824-894MHz. Υποστηρίζει ταχύτητα έως 2,4 kbps. Το 1988, το AMPS κατανεμήθηκε με επιπλέον εύρος ζώνης 10 MHz που ονομάζεται διευρυμένο φάσμα (Expanded Spectrum), το οποίο αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στο Σικάγο, με περιοχή εξυπηρέτησης 2100 τετραγωνικών μιλίων. Το AMPS κυκλοφόρησε για πρώτη φορά από τις ΗΠΑ το 1982.

1.3 Τεχνολογία δεύτερης γενιάς 2G (ψηφιακή)

Η δεύτερη γενιά (2G) είναι μια ψηφιακή τεχνολογία και υποστηρίζει μηνύματα κειμένου. Μετά από αυτό ήταν το 3G που παρείχε υποστήριξη πολυμέσων μαζί με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Το σύστημα ασύρματης κινητής επικοινωνίας δεύτερης γενιάς είναι μια ψηφιακή τεχνολογία που εισήχθη στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Χρησιμοποιεί ψηφιακά σήματα για μετάδοση φωνής και έχει ταχύτητα 64kbps. Το εύρος ζώνης του 2G είναι 30-200KHz. Το 2G παρέχει υπηρεσίες όπως υπηρεσίες σύντομων μηνυμάτων (SMS), μηνύματα εικόνας και υπηρεσίες μηνυμάτων πολυμέσων (MMS). Χρησιμοποιεί ψηφιακά σχήματα διαμόρφωσης όπως το Time Division Multiple Access (TDMA) και πολλαπλή διαίρεση κώδικα Code division Multiple Access (CDMA). TDMA επιτρέπει τη διαίρεση των σημάτων σε χρονοθυρίδες. Το CDMA παρέχει σε κάθε χρήστη έναν ειδικό κωδικό για να επικοινωνεί μέσω ενός πολυπλεξικού φυσικού καναλιού.

Το GSM (Global System for Mobile Communication-Παγκόσμιο Σύστημα για Κινητές Επικοινωνίες) είναι το μεγαλύτερο ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο κινητής τηλεφωνίας 2G. Το 2G εμπορικά κυκλοφόρησε με πρότυπο GSM στη Φινλανδία, το 1991.

Η τεχνολογία GSM ήταν η πρώτη που υποστήριξε τη διεθνή περιαγωγή. Αυτό έδωσε την δυνατότητα στους συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας να χρησιμοποιούν τις συνδέσεις κινητής τηλεφωνίας σε διάφορες χώρες του κόσμου με καλύτερη ποιότητα και χωρητικότητα.

1.3.1 Τεχνολογία 2.5 G

Η τεχνολογία GSM βελτιώνονταν συνεχώς για να παρέχει καλύτερες υπηρεσίες που οδήγησαν στην ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων που ονομάζονται συστήματα 2.5 γενιάς (2.5G). Η 2.5G βρίσκεται μεταξύ τεχνολογιών 2G και 3G. Επιπρόσθετα με τον τομέα μεταγωγής κυκλώματος του συστήματος 2G, το 2.5G υλοποιεί έναν τομέα μεταγωγής πακέτων και παρέχει ρυθμό δεδομένων 144 Kbps. Χρησιμοποιούνται τεχνολογίες 2G όπως Γενική Υπηρεσία Ραδιοφώνου Πακέτων (GPRS- General Packet Radio Service) και EDGE- (Enhanced Data rates in GSM Environment)-(Βελτιωμένοι ρυθμοί δεδομένων στο περιβάλλον GSM). Το GPRS παρέχει πρωτόκολλα μεταγωγής πακέτων, σύντομο χρόνο εγκατάστασης για συνδέσεις ISP και τη δυνατότητα χρέωσης του συνδρομητή ανάλογα με την ποσότητα των δεδομένων που αποστέλλονται και όχι με τον χρόνο σύνδεσης. Το GPRS υποστηρίζει ευέλικτους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και παρέχει συνεχή σύνδεση με το δίκτυο. Το GPRS είναι το σημαντικό βήμα προς το 3G.

1.4 Τεχνολογία Τρίτης γενιάς 3G

Το σύστημα ασύρματης κινητής επικοινωνίας τρίτης γενιάς εισήχθη το 2000. Στόχος των συστημάτων 3G ήταν να προσφέρουν αυξημένες ταχύτητες δεδομένων από 144 Kbps σε 384 Kbps σε περιοχές ευρείας κάλυψης και 2 Mbps σε περιοχές τοπικής κάλυψης. Το 3G προσφέρει προηγμένες υπηρεσίες στους χρήστες σε σύγκριση με το 1G και το 2G .Μαζί με την φωνητική επικοινωνία περιλαμβάνει υπηρεσίες δεδομένων, πρόσβαση σε τηλεόραση/βίντεο, περιήγηση στο Web, e-mail, τηλεδιάσκεψη, σελιδοποίηση, φαξ και χάρτες πλοήγησης. Έχει εύρος ζώνης 15-20MHz που χρησιμοποιείται για internet υψηλής ταχύτητας, βίντεο συνομιλία, κ.λπ. Ένα κινητό σύστημα 3G ορίστηκε από έναν οργανισμό που ονομάζεται 3rd Generation Partnership Project (3GPP) που πληροί τα πρότυπα IMT-2000. Ονομάστηκε ως UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) στην Ευρώπη, το οποίο βασίζεται στο TSI. Το IMT2000 είναι το όνομα ITU-T για το σύστημα τρίτης γενιάς, ενώ το CDMA2000 είναι το όνομα της αμερικανικής παραλλαγής 3G. Επίσης το IMT2000 έχει αποδεχτεί ένα νέο πρότυπο 3G από την Κίνα, δηλαδή το TD-SCDMA. Το WCDMA είναι η τεχνολογία διεπαφής αέρα για το UMTS. Το πρώτο εμπορικό δίκτυο 3G κυκλοφόρησε από την NTT στην Ιαπωνία, το 2001

1.5 Τεχνολογία τέταρτης γενιάς 4G

Το σύστημα κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς εισήχθη στα τέλη της δεκαετίας του 2000 και ήταν όλο σύστημα δικτύου βασισμένο σε IP. Ο κύριος στόχος της τεχνολογίας 4G είναι να παρέχει υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας, υψηλής ποιότητας, υψηλής χωρητικότητας, ασφάλειας και χαμηλού κόστους για υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, πολυμέσων και διαδικτύου μέσω IP. Ο λόγος για τη μετάβαση σε όλες τις IP είναι η ύπαρξη μιας κοινής πλατφόρμας για όλες οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα. Έχει τη δυνατότητα 100Mbps έως 1Gbps .

Για την παροχή ασύρματων υπηρεσιών οποτεδήποτε και οπουδήποτε, η φορητότητα τερματικού είναι βασικός παράγοντας στο 4G. Η κινητικότητα τερματικού προϋποθέτει αυτόματη περιαγωγή μεταξύ διαφορετικών ασύρματων δικτύων. Η τεχνολογία 4G ενσωματώνει διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες (π.χ. OFDM, MC-CDMA, LAS-CDMA και Network-LMDS) για να παρέχει ελευθερία κινήσεων και αδιάκοπη περιαγωγή από τη μία τεχνολογία στην άλλη. Τα LTE(Long Term Evolution) και WiMAX(Wireless Interoperability for Microwave Access) θεωρούνται τεχνολογίες 4G. Η πρώτη επιτυχημένη δοκιμή πεδίου για 4G πραγματοποιήθηκε στην Ιαπωνία, το 2005. [1]

1.6 Τεχνολογία πέμπτης γενιάς 5G

Το 5G είναι η πέμπτη γενιά κυψελοειδούς τεχνολογίας Εικόνα 1. Έχει σχεδιαστεί για να αυξάνει την ταχύτητα, να μειώνει την καθυστέρηση και να βελτιώνει την ευελιξία των ασύρματων υπηρεσιών.



Εικόνα 1: 5G

1.6.1 Τι είναι η τεχνολογία 5G;

Η τεχνολογία 5G έχει θεωρητική μέγιστη ταχύτητα 20 Gbps, ενώ η μέγιστη ταχύτητα 4G είναι μόνο 1 Gbps. Το 5G υπόσχεται επίσης χαμηλότερη καθυστέρηση, η οποία μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των επαγγελματικών εφαρμογών καθώς και άλλες ψηφιακές εμπειρίες (όπως διαδικτυακά παιχνίδια, τηλεδιάσκεψη και αυτο-οδηγούμενα αυτοκίνητα).

Ενώ οι προηγούμενες γενιές κυψελοειδούς τεχνολογίας (όπως το 4G LTE) επικεντρώνονταν στη διασφάλιση της συνδεσιμότητας, το 5G οδηγεί τη συνδεσιμότητα στο επόμενο επίπεδο, παρέχοντας συνδεδεμένες εμπειρίες από το cloud στους πελάτες. Τα δίκτυα 5G είναι εικονικοποιημένα και βασίζονται σε λογισμικό και εκμεταλλεύονται τεχνολογίες cloud.

Το δίκτυο 5G θα απλοποιήσει επίσης την κινητικότητα, με απρόσκοπτες δυνατότητες ανοιχτής περιαγωγής μεταξύ κινητής τηλεφωνίας και πρόσβασης Wi-Fi. Οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας μπορούν να παραμείνουν συνδεδεμένοι καθώς μετακινούνται μεταξύ εξωτερικών ασύρματων συνδέσεων και ασύρματων δικτύων μέσα σε κτίρια χωρίς την παρέμβαση του χρήστη ή την ανάγκη ελέγχου ταυτότητας από τους χρήστες.

Η τεχνολογία 5G θα βελτιώσει τη συνδεσιμότητα σε υποεξυπηρετούμενες αγροτικές περιοχές και σε πόλεις όπου η ζήτηση μπορεί να ξεπεράσει τη σημερινή χωρητικότητα με την τεχνολογία 4G. Τα νέα δίκτυα 5G θα έχουν επίσης πυκνή αρχιτεκτονική κατανομημένης πρόσβασης και θα μετακινούν την επεξεργασία δεδομένων πιο κοντά στην άκρη και τους χρήστες για να επιτρέψουν την ταχύτερη επεξεργασία δεδομένων.

1.6.2 Πώς λειτουργεί η τεχνολογία 5G;

Η τεχνολογία 5G θα εισαγάγει προόδους σε όλη την αρχιτεκτονική του δικτύου. Το 5G New Radio, το παγκόσμιο πρότυπο για μια πιο ικανή ασύρματη διεπαφή αέρα 5G, θα καλύπτει φάσματα που δεν χρησιμοποιούνται στο 4G. Οι νέες κεραίες θα ενσωματώνουν τεχνολογία γνωστή ως μαζική MIMO (πολλαπλή είσοδος, πολλαπλή έξοδος), η οποία επιτρέπει σε πολλούς πομπούς και δέκτες να μεταφέρουν περισσότερα δεδομένα ταυτόχρονα. Όμως η τεχνολογία 5G δεν περιορίζεται στο νέο ραδιοφάσμα. Έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίξει ένα συγκλίνον, ετερογενές δίκτυο που συνδυάζει αδειοδοτημένες και μη αδειοδοτημένες ασύρματες τεχνολογίες. Αυτό θα προσθέσει εύρος ζώνης διαθέσιμο για τους χρήστες.

Οι αρχιτεκτονικές 5G θα είναι πλατφόρμες που καθορίζονται από λογισμικό, στις οποίες η διαχείριση της λειτουργικότητας δικτύωσης γίνεται μέσω λογισμικού και όχι υλικού. Οι εξελίξεις στην εικονικοποίηση, στις τεχνολογίες που βασίζονται στο cloud και στον αυτοματισμό επιτρέπουν στην αρχιτεκτονική 5G να είναι ευέλικτη και να παρέχει πρόσβαση στους χρήστες ανά πάσα στιγμή και οπουδήποτε. Τα δίκτυα 5G μπορούν να δημιουργήσουν κατασκευές υποδικτύων που καθορίζονται από λογισμικό, γνωστά ως τμήματα δικτύου. Αυτά τα τμήματα επιτρέπουν στους διαχειριστές δικτύου να υπαγορεύουν τη λειτουργικότητα του δικτύου με βάση τους χρήστες και τις συσκευές.

Το 5G ενισχύει επίσης τις ψηφιακές εμπειρίες μέσω της αυτοματοποίησης με δυνατότητα μηχανικής μάθησης (ML). Η ζήτηση για χρόνους απόκρισης μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου (όπως αυτοί για αυτο-οδηγούμενα αυτοκίνητα) απαιτεί από τα δίκτυα 5G να χρησιμοποιούν αυτοματισμό με ML και, τελικά, βαθιά μάθηση

και τεχνητή νοημοσύνη (AI). Η αυτοματοποιημένη παροχή και η προληπτική διαχείριση της κίνησης και των υπηρεσιών θα μειώσει το κόστος της υποδομής και θα βελτιώσει τη συνδεδεμένη εμπειρία.

1.6.3 Πότε θα είναι διαθέσιμο το 5G και πώς θα επεκταθεί;

Η υπηρεσία 5G είναι ήδη διαθέσιμη σε ορισμένες περιοχές σε διάφορες χώρες. Αυτές οι υπηρεσίες 5G πρώιμης γενιάς ονομάζονται 5G non-standalone (5G NSA). Αυτή η τεχνολογία είναι ένα ραδιόφωνο 5G που βασίζεται στην υπάρχουσα υποδομή δικτύου 4G LTE. Το 5G NSA θα είναι ταχύτερο από το 4G LTE. Αλλά η τεχνολογία 5G υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης στην οποία έχει επικεντρωθεί η βιομηχανία είναι αυτόνομη 5G (5G SA). Έχει αρχίσει από το 2020.

1.6.4 Ποιος είναι ο πραγματικός αντίκτυπος της τεχνολογίας 5G;

Η τεχνολογία 5G όχι μόνο θα εγκαινιάσει μια νέα εποχή βελτιωμένης απόδοσης και ταχύτητας δικτύου, αλλά και νέες συνδεδεμένες εμπειρίες για τους χρήστες.

Στον τομέα της υγείας, η τεχνολογία 5G και η συνδεσιμότητα Wi-Fi 6 θα επιτρέψουν στους ασθενείς να παρακολουθούνται μέσω συνδεδεμένων συσκευών που παρέχουν συνεχώς δεδομένα σχετικά με βασικούς δείκτες υγείας, όπως ο καρδιακός ρυθμός και η αρτηριακή πίεση. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, το 5G σε συνδυασμό με αλγόριθμους που βασίζονται σε ML θα παρέχουν πληροφορίες για την κυκλοφορία, τα ατυχήματα και άλλα. Τα οχήματα θα μπορούν να μοιράζονται πληροφορίες με άλλα οχήματα και οντότητες στους δρόμους, όπως τα φανάρια. Αυτές είναι μόνο δύο βιομηχανικές εφαρμογές της τεχνολογίας 5G που μπορούν να επιτρέψουν καλύτερες, ασφαλέστερες εμπειρίες για τους χρήστες. [2]

1.7 Τεχνολογία 6G

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 6G είναι πλήρη ασύρματα δίκτυα χωρίς περιορισμούς. Αυτή τη στιγμή βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης και θα παρέχει απίστευτη ταχύτητα μετάδοσης στην περιοχή Terabit. Αυτή η τεχνολογία θα απαιτούσε μια έξυπνη κεραία, μεγάλη μνήμη σε κινητά τηλέφωνα και τεράστια οπτικά δίκτυα. Τα δίκτυα 6G θα είναι χωρίς κυψέλες και θα επιτρέψει την τεχνητή νοημοσύνη σε ασύρματα δίκτυα. Δεν είναι σαφές ποια ζώνη συχνοτήτων θα χρησιμοποιούν τα δίκτυα 6G, αλλά είναι προφανές ότι θα χρειαστεί πολύ υψηλότερη ζώνη συχνοτήτων για να αυξηθεί ο ρυθμός δεδομένων που απαιτείται για τα δίκτυα 6G. Ενώ το 5G υποτίθεται ότι χρησιμοποιεί συχνότητα μεγαλύτερη από 30 GHz και έως 300 GHz (κύμα χιλιοστών), το 6G σχετίζεται με πολύ υψηλότερη συχνότητα σε ζώνες THz (300 GHz έως 3 THz). Η χρήση του φάσματος THz για 6G εκτιμάται ότι θα γίνει εμπορική τα επόμενα 5-7 χρόνια. Μερικές από τις εφαρμογές για δίκτυα 6G είναι συνδεδεμένη ρομποτική και αυτόνομα συστήματα, ασύρματες διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή, τεχνολογία blockchain, εκτεταμένη πραγματικότητα πολλαπλών αισθητήρων, διαστημικά ταξίδια, αξιοθέατα σε βαθιά θάλασσα, απτικό

διαδίκτυο και βιομηχανικό διαδίκτυο. Τα δίκτυα 6G αναμένεται να εισαχθούν το έτος 2030. Μερικά από τα πλεονεκτήματα των δικτύων 6G είναι:

- Ρυθμός δεδομένων: Το δίκτυο 6G αναμένεται να παρέχει ρυθμό δεδομένων έως και 10 Tbps, που είναι σχεδόν εκατό φορές καλύτερος από τα δίκτυα 5G.
- Λάθος χρόνος : Το δίκτυο 6G θα παρέχει λανθάνοντα χρόνο έως και 0,1 ms σε σύγκριση με τον λανθάνοντα χρόνο 1 ms που παρέχεται από τα δίκτυα 5G.
- Αποδοτική σηματοδότηση: Τα δίκτυα 6G παρέχουν αποτελεσματική σηματοδότηση για μαζική συνδεσιμότητα IoT και επικοινωνία M2M.
- Εμπειρία χρήστη: Το 6G ενισχύει την εκτεταμένη πραγματικότητα, την επαυξημένη πραγματικότητα, την εικονική πραγματικότητα και την τεχνητή νοημοσύνη.
- Φασματική απόδοση: Το 6G θα παρείχε δέκα φορές μεγαλύτερη φασματική απόδοση και απόδοση δικτύου σε σύγκριση με τα δίκτυα 5G.
- Ενεργειακή απόδοση: Τα δίκτυα 6G παρέχουν 100 φορές πιο αποδοτική χρήση ενέργειας δικτύου σε σύγκριση με τα δίκτυα 5G.
- Πολλές συνδέσεις: Το 6G θα παρέχει τεράστια δεδομένα μετάδοσης, τα οποία μπορούν να υποστηρίξουν περισσότερες από 1 εκατομμύριο συνδέσεις, που είναι σχεδόν εκατό φορές περισσότερα από τα δίκτυα 5G.[3]

Γενιές	4G	5G	6G
Έτος εισαγωγής	2010	2019	2030
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	1Gbps	20 Gbps	10Tbps
καθυστέρηση	10 ms	1ms	0.1 ms
Πυκνότητα σύνδεσης	0.1 Συσκ/km ²	εκατ. 1 εκατ. Συσκ/km ²	10 Συσκ/km ² εκατ.
Διαθέσιμο φάσμα	6GHz	30GHz έως 300GHz	3THz

Πίνακας 1: Δείχνει τη σύγκριση χαρακτηριστικών των δικτύων 4G, 5G και 6G.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΑ 5G ΚΑΙ ΠΕΡΑ ΑΠΟ ΑΥΤΑ

Κεφάλαιο 2ο :Βασικές Τεχνολογίες Ενεργοποίησης για δίκτυα 5G και πέρα από αυτά

2.1 Εισαγωγή

Για να γίνουν πραγματικότητα τα δίκτυα 5G και όχι μόνο, πολλές προηγμένες ιδέες έχουν προταθεί και αναλυθεί τα τελευταία χρόνια. Οι κύριες τεχνολογίες ενεργοποίησης δικτύων που έχουν ληφθεί υπόψη για τα συστήματα 5G και 6G περιλαμβάνουν κύματα χιλιοστών, μικρές κυψέλες, διαμόρφωση δέσμης, αρχιτεκτονική με επίκεντρο τη συσκευή, τεχνολογία πλήρους αμφίδρομης λειτουργίας, μαζικό MIMO, κύμα Terahertz και φάσμα ορατού φωτός

2.2 Mimo-ofdm

Καθώς τα κινητά ραδιοφωνικά συστήματα εξελίσσονται και ενσωματώνονται περισσότερο στις καθημερινές δραστηριότητες, υπάρχει μια αυξανόμενη απαίτηση για υπηρεσίες που απαιτούν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης bit και μεγαλύτερη χωρητικότητα συστήματος για τέτοιες υπηρεσίες.[6]

Οι σύγχρονες εφαρμογές συστημάτων πέμπτης γενιάς (5G) και έκτης γενιάς (6G) απαιτούν γρήγορη, αποτελεσματική και ισχυρή μετάδοση πληροφοριών πολυμέσων μέσω ασύρματου μέσου επικοινωνίας. Η μαζική πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (mMIMO) και ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM) αποδεικνύεται μια εντυπωσιακή μεθοδολογία για την κάλυψη των αναγκών των χρηστών 5G και πέρα. [4]

Η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) είναι μια μία από τις τεχνολογίες που αποδεικνύονται κατάλληλα για πρόσβαση που χρησιμοποιείται σε σύγχρονα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένου του 5G. Το OFDM συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της Διαμόρφωσης Τετραγωνικού Πλάτους (QAM) και της Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας (FDM) για την παραγωγή ενός συστήματος επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας δεδομένων. [5]

Το QAM αναφέρεται σε μια ποικιλία συγκεκριμένων τύπων διαμόρφωσης, όπως BPSK (Διαδική Μετατόπιση Φάσης), QPSK (Τετραγωνικής Μετατόπισης Φάσης), 16QAM κ.ά..[5]

Στο FDM (Frequency Division Multiplexing) πολλαπλά κανάλια επικοινωνίας μπορούν να συνυπάρχουν ορίζοντας ένα τμήμα του φάσματος συχνοτήτων για κάθε κανάλι. Κάθε κανάλι FDM χωρίζεται από τα άλλα από μια ζώνη προστασίας συχνότητας για τη μείωση των παρεμβολών μεταξύ γειτονικών καναλιών.

Το MIMO (πολλαπλή είσοδος, πολλαπλή έξοδος) είναι μια μέθοδος για ασύρματες επικοινωνίες στην οποία χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραίες μετάδοσης (πομπός) και λήψης (δέκτη). Οι κεραίες σε κάθε άκρο του κυκλώματος επικοινωνιών συνδυάζονται για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων, τη βελτιστοποίηση της ταχύτητας δεδομένων και τη βελτίωση της χωρητικότητας των ραδιοεκπομπών, επιτρέποντας στα δεδομένα να ταξιδεύουν σε πολλές διαδρομές σήματος ταυτόχρονα.[8]

Τα συστήματα MIMO αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των σημερινών ασύρματων συστημάτων και τα τελευταία χρόνια έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης και ενεργειακής απόδοσης.

Η τεχνολογία πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) συνδυάζεται με την ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) για χρήση σε συστήματα ευρυζωνικής ασύρματης επικοινωνίας επόμενης γενιάς.

Το MIMO-OFDM επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη φασματική απόδοση, δηλαδή παρέχει την υψηλότερη χωρητικότητα και απόδοση δεδομένων.

Πλεονεκτήματα του MIMO-OFDM [9]

Μικρότερο ποσό παρεμβολής

Η χωρητικότητα δεδομένων αυξάνεται

Αποδοτικότητα ισχύος

Κέρδος εύρους ζώνης

Μειονεκτήματα του MIMO-OFDM[10]

Πολύπλοκος πομπός και δέκτης

2.3 Κύματα χιλιοστών

Η μαζική αύξηση της κίνησης δεδομένων έχει συμφορήσει το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων. Το αποτέλεσμα είναι ότι υπάρχει περιορισμένο εύρος ζώνης για έναν χρήστη, προκαλώντας μια πιο αργή και αναξιόπιστη σύνδεση. Ένας τρόπος για να λυθεί αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση συχνότητας άνω των 6 GHz για ασύρματη επικοινωνία. Η συχνότητα πάνω από τα 6 GHz δεν έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ για ασύρματη επικοινωνία και έχει γίνει πολλή έρευνα με τη μετάδοση κυμάτων χιλιοστών. Τα κύματα χιλιοστού έχουν συχνότητα μεταξύ 30 GHz έως 300 GHz, αλλά το 5G θα χρησιμοποιεί τη ζώνη 24 GHz έως 100 GHz.

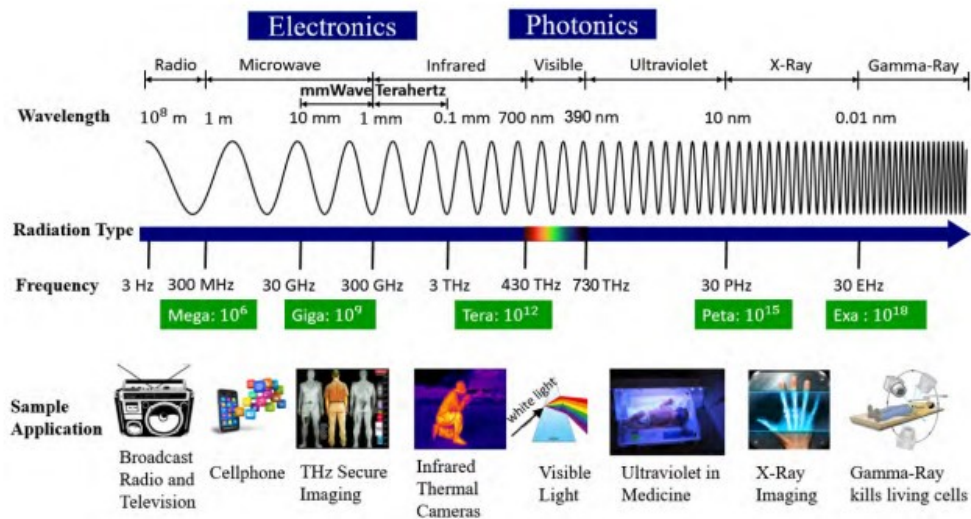
Τα κύματα χιλιοστών μπορούν να παρέχουν εύρος ζώνης δέκα φορές περισσότερο από αυτό ολόκληρης της κυψελοειδούς ζώνης 4G. Αυτά τα κύματα υψηλής συχνότητας χρησιμοποιούνται σε ορισμένες δορυφορικές εφαρμογές, αλλά δεν είχαν χρησιμοποιηθεί ποτέ για κινητές ευρυζωνικές συνδέσεις. Το 5G mmWave είναι μια καινοτόμος κυψελοειδής τεχνολογία που παρέχει πρόσβαση στο μεγάλο εύρος ζώνης και χωρητικότητα που είναι διαθέσιμη στη ζώνη συχνοτήτων άνω των 24 GHz. Τα κύματα χιλιοστών 5G χρησιμοποιούνται τώρα σε ασύρματα οικοσυστήματα και συνεχίζουν να κερδίζουν δυναμική παγκοσμίως. Για παράδειγμα, στις Ηνωμένες Πολιτείες, όλες οι μεγάλες εταιρείες κινητής τηλεφωνίας προσφέρουν

την πλήρη γκάμα των πιο πρόσφατων και με τις μεγαλύτερες πωλήσεις ναυαρχίδων τηλεφώνων χιλιοστών κυμάτων 5G και υπηρεσιών χιλιοστών κυμάτων 5G. Στην Ευρώπη, σχεδόν οι μισές χώρες έχουν εκχωρήσει ή σχεδιάζουν να εκχωρήσουν φάσματα κυμάτων χιλιοστών στο 5G. Επειδή τα χιλιοστά έχουν μικρότερο μήκος κύματος, δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογές μεγάλης εμβέλειας. Ένα άλλο πρόβλημα με τα κύματα χιλιοστού είναι ότι δεν μπορούν να διαπεράσουν τα κτίρια και τα εμπόδια και τείνουν να απορροφώνται σε μικρό ποσοστό από τη βροχή.

2.4 Ζώνη υπο-χιλιοστών ή Terahertz

Με την παγκοσμιοποίηση, η τρέχουσα αγορά ασύρματης σύνδεσης επεκτείνεται ταχέως. Με τη συζήτηση για δίκτυα 6G, η ζήτηση για υψηλότερο φάσμα είναι επικείμενη στο εγγύς μέλλον. Η συχνότητα μεγαλύτερη από τη ζώνη κυμάτων χιλιοστού (30 GHz–300 GHz) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για ασύρματη επικοινωνία. Η ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 300 GHz και 3 THz είναι γνωστή ως ζώνη Terahertz. Αν και αυτή η ιδέα είναι σχετικά νέα, η έρευνα σε αυτόν τον τομέα μπορεί να είναι χρήσιμη για τη βιομηχανία ασύρματων επικοινωνιών. Εκτός από απλά ένα υψηλότερο φάσμα, υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα της ζώνης THz, όπως ανάπτυξη φιλική προς τις παρεμβολές, επεκτασιμότητα, βελτιωμένη ασφάλεια, διαθεσιμότητα φάσματος, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ενίσχυση αποστάσεων για το ασύρματο δίκτυο, μικρό μέγεθος κεραιών και εστιασμένες δέσμες.

Η τεχνολογία THz θα ήταν επωφελής για εφαρμογές όπως η απεικόνιση, η φασματοσκοπία, η ολογραφική τηλεπαρουσία, η βιομηχανία 4.0 και οι επικοινωνίες μεγάλης κλίμακας. Υπάρχουν πολλές προκλήσεις και νέοι τομείς έρευνας στις αναπτύξεις ζώνης THz, όπως ο σύνθετος σχεδιασμός κεραίας για υποστήριξη υψηλότερου κέρδους κεραίας, προδιαγραφές και ανάπτυξη σημείου πρόσβασης, σχεδιασμός σύνθετου κυκλώματος και υψηλή απώλεια διάδοσης. Οι ζώνες mmWave και Terahertz φαίνονται στην εικόνα 2[11]. Είναι σημαντικό ότι δεν υπάρχουν εφαρμογές για ασύρματη επικοινωνία μέχρι mmWaves ή Terahertz, αλλά το γεγονός είναι ότι το mmWave είναι τώρα το 5G οπότε αυτό το κινητό θα πρέπει να μετακινηθεί στα κύματα χιλιοστού. Όταν η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των ΗΠΑ (FCC) το 2019 άνοιξε τις συχνότητες άνω των 95 gigahertz (GHz) έως 3 THz για δοκιμές συστημάτων 6G.



Εικόνα 2: Ζώνη κυμάτων

Η ζώνη των 28 GHz [12]

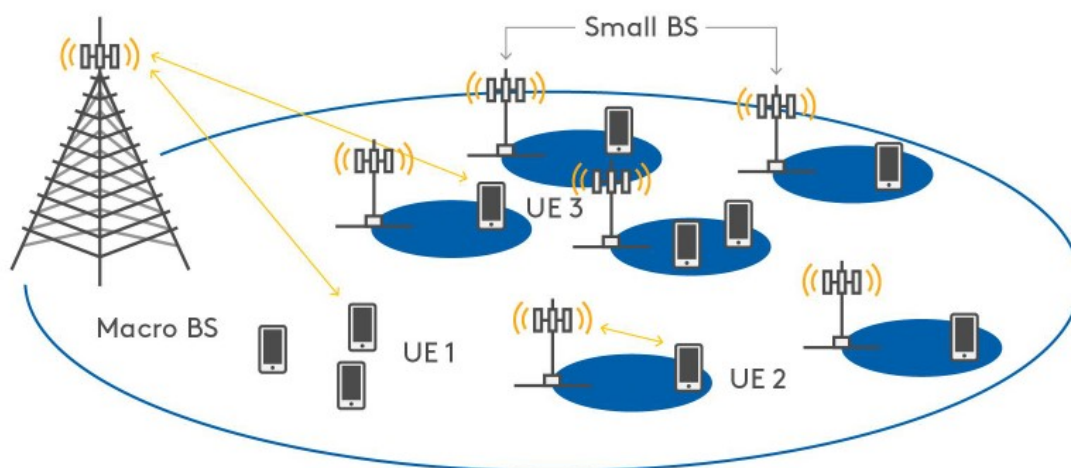
Η ζώνη των 28 GHz είναι η πιο δοκιμασμένη ζώνη 5G στον κόσμο. Η ανάπτυξη της ζώνης των mmWave 28 GHz βρίσκεται σε εξέλιξη και διευθύνεται από το 3GPP TR 38.815. Όπως όλες οι ζώνες mmWave, το n257 είναι ένα επίπεδο χωρητικότητας σχεδιασμένο για μετάδοση μικρής εμβέλειας με υψηλούς ρυθμούς δεδομένων.

Το ενδιαφέρον για τη ζώνη των 28 GHz οφείλεται σε μεγάλο βαθμό σε έναν συνδυασμό τριών παραγόντων.

- Διαθεσιμότητα φάσματος: μεγάλα τμήματα του φάσματος υπό χρησιμοποιούνται, επιτρέποντας αρκετές εκατοντάδες megahertz να αφιερωθούν σε υπηρεσίες 5G
- Πολυπλοκότητα συσκευής: από τις διαθέσιμες ζώνες mmWave, οι ζώνες 26 και 28 GHz είναι οι χαμηλότερες διαθέσιμες συχνότητες, παρέχοντας καλύτερη διάδοση και μειωμένη πολυπλοκότητα της συσκευής
- Γεωγραφική παγκόσμια εναρμόνιση: από τις διαθέσιμες ζώνες mmWave, η περιοχή συχνοτήτων των 28 GHz είναι διαθέσιμη στον μεγαλύτερο αριθμό χωρών σε όλο τον κόσμο.

2.5 Μικρά κύτταρα ή Ετερογενή Δίκτυα

Οι μικρές κυψέλες είναι μικροσκοπικοί σταθμοί βάσης χαμηλής ισχύος που μπορούν να τοποθετηθούν σε απόσταση 100 m για να καλύψουν μικρές γεωγραφικές περιοχές. Αυτοί οι σταθμοί βάσης χαμηλής ισχύος εμποδίζουν την πτώση του σήματος σε πολυσύχναστες περιοχές. Τα μικρά κελιά είναι πολύ ελαφριά και μικρά. Έτσι, μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε. Εάν χρησιμοποιούμε κύματα χιλιοστών αντί για το παραδοσιακό φάσμα κάτω των 6 GHz, η μικρή κυψέλη μπορεί να γίνει ακόμη μικρότερη και να τοποθετηθεί σε μικροσκοπικά σημεία. Οι μικρές κυψέλες θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην παροχή υψηλής ταχύτητας ευρυζωνικής σύνδεσης για κινητά και εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης για το 5G. Τα Small Cells μπορούν περαιτέρω να χωριστούν σε microcells, femtocells και picocells με βάση την περιοχή κάλυψης και τον αριθμό των χρηστών που μπορεί να υποστηρίξει.

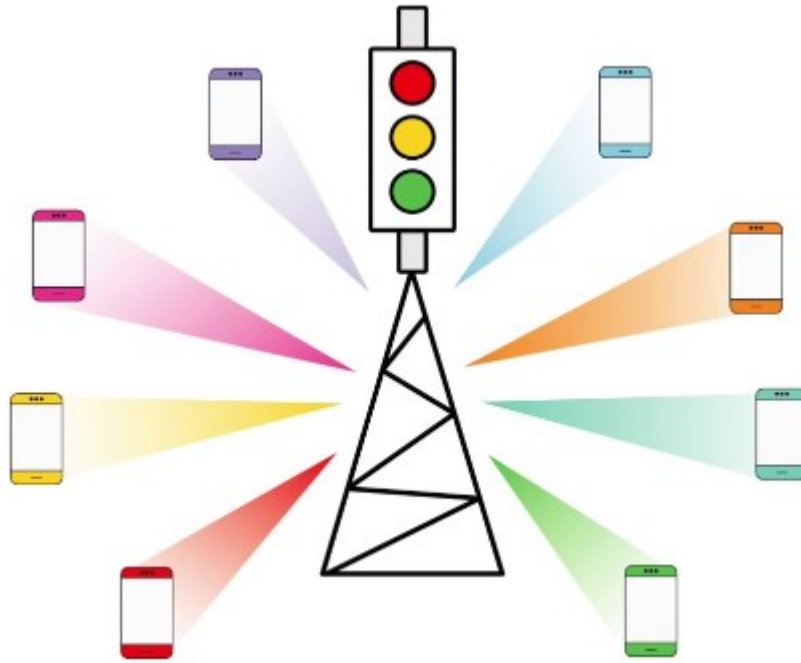


Εικόνα 3: Small shell

Πηγή: www.essentracomponents.com/en-gb/news/guides/guide-to-5g-small-cells-and-macrocels

2.6 Beamforming

Beamforming είναι η ικανότητα του σταθμού βάσης να προσαρμόζει το σχέδιο ακτινοβολίας της κεραίας. Η διαμόρφωση δέσμης βοηθά τον σταθμό βάσης να βρει μια κατάλληλη διαδρομή για την παράδοση δεδομένων στον χρήστη και επίσης μειώνει τις παρεμβολές με τους κοντινούς χρήστες κατά μήκος της διαδρομής, όπως φαίνεται στην εικόνα 4[13].



Εικόνα 4: Beamforming

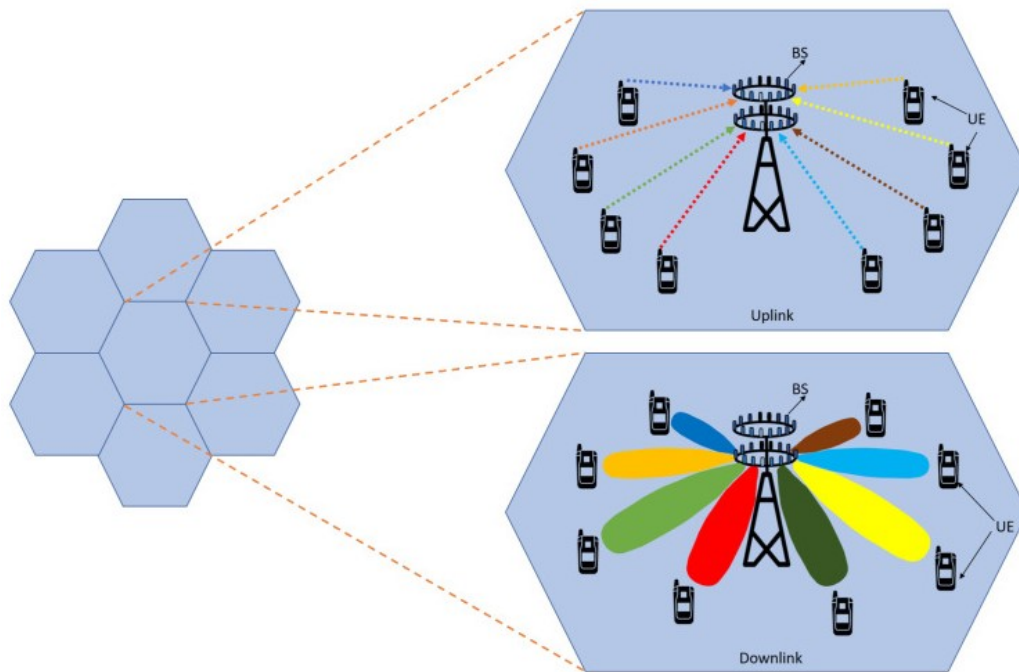
Με άλλα λόγια τα δίκτυα 5g μπορούν να μεταδίδουν δεδομένα μέσω στοχευμένων δεσμών και προηγμένης επεξεργασίας σήματος που μπορεί να επιταχύνει τους ρυθμούς δεδομένων και να ενισχύσει το εύρος ζώνης. Το Beamforming έχει πολλά πλεονεκτήματα για δίκτυα 5G και όχι μόνο. Ανάλογα με την κατάσταση, η τεχνολογία διαμόρφωσης δέσμης μπορεί να εφαρμοστεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους σε μελλοντικά δίκτυα [12]. Για τεράστια συστήματα MIMO, η διαμόρφωση δέσμης βοηθά στην αύξηση της απόδοσης του φάσματος και για τα κύματα χιλιοστών, βοηθά στην ενίσχυση του ρυθμού δεδομένων. Σε massive MIMO συστήματα, ο σταθμός βάσης μπορεί να στείλει δεδομένα στον χρήστη από διάφορες διαδρομές και η διαμόρφωση δέσμης χορογραφεί την κίνηση του πακέτου και τον χρόνο άφιξης για να επιτρέψει σε περισσότερους χρήστες να στείλουν δεδομένα ταυτόχρονα. Δεδομένου ότι τα κύματα χιλιοστού δεν μπορούν να διεισδύσουν μέσα από εμπόδια και δεν διαδίδονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις λόγω μικρότερου μήκους κύματος, η διαμόρφωση δέσμης βοηθά στην αποστολή συγκεντρωμένων ακτινών προς τους χρήστες. Έτσι, η διαμόρφωση δέσμης βοηθά έναν χρήστη να λάβει ένα ισχυρό σήμα χωρίς παρεμβολές από άλλους χρήστες.[13]

2.7 Massive MIMO

Τα συστήματα MIMO αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των σημερινών ασύρματων συστημάτων και τα τελευταία χρόνια έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης και ενεργειακής απόδοσης. Πριν από την εισαγωγή του MIMO, χρησιμοποιούνταν ως επί το πλείστον συστήματα μίας εισόδου-μονής εξόδου, τα οποία είχαν πολύ χαμηλή απόδοση και δεν μπορούσαν να υποστηρίξουν μεγάλο αριθμό χρηστών με υψηλή αξιοπιστία. Για να ικανοποιηθεί αυτή η τεράστια ζήτηση χρηστών, αναπτύχθηκαν διάφορες νέες τεχνολογίες MIMO, όπως MIMO ενός χρήστη (SU-MIMO), MIMO πολλών χρηστών (MU-MIMO) και MIMO δικτύου. Ωστόσο, αυτές οι νέες τεχνολογίες δεν είναι αρκετές για να καλύψουν τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις. Οι χρήστες ασύρματου δικτύου έχουν αυξηθεί εκθετικά τα τελευταία χρόνια και αυτοί οι χρήστες παράγουν τρισεκατομμύρια δεδομένα που πρέπει να χειρίζονται αποτελεσματικά με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Επιπλέον, υπάρχουν δισεκατομμύρια συσκευές IoT, με διάφορες εφαρμογές για έξυπνη υγειονομική περίθαλψη, έξυπνα σπίτια και έξυπνη ενέργεια, που συμβάλλουν στην κυκλοφορία δεδομένων. Οι τεχνολογίες MIMO που σχετίζονται με το δίκτυο 4G/LTE δεν είναι σε θέση να χειριστούν αυτήν την τεράστια εισροή στην κίνηση δεδομένων με μεγαλύτερη ταχύτητα και αξιοπιστία. Έτσι, το δίκτυο 5G εξετάζει τη μαζική τεχνολογία MIMO ως πιθανή τεχνολογία για να ξεπεράσει το πρόβλημα που δημιουργείται από τη μαζική κίνηση δεδομένων και τους χρήστες.

Το Massive MIMO είναι η πρόοδος των σύγχρονων συστημάτων MIMO που χρησιμοποιούνται στα 5G δίκτυα, τα οποία συγκεντρώνουν εκατοντάδες, ακόμη και χιλιάδες κεραιές στο σταθμό βάσης και εξυπηρετούν δεκάδες χρήστες ταυτόχρονα. Οι επιπλέον κεραιές που χρησιμοποιεί το τεράστιο MIMO θα βοηθήσουν στην εστίαση της ενέργειας σε μια μικρότερη περιοχή του χώρου για να παρέχουν καλύτερη φασματική απόδοση. Η τεράστια κατερχόμενη ζεύξη MIMO και το σύστημα ανοδικής ζεύξης φαίνονται στην Εικόνα 5 [7].



Εικόνα 5: Massive MIMO ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη

Καθώς ο αριθμός των κεραιών αυξάνεται σε ένα Massive MIMO σύστημα, οι ακτινοβολούμενες δέσμες γίνονται στενότερες και εστιάζονται χωρικά προς τον χρήστη. Αυτές οι χωρικά εστιασμένες δέσμες κεραιάς αυξάνουν την απόδοση για τον επιθυμητό χρήστη και μειώνουν την παρεμβολή στον γειτονικό χρήστη.

Οφέλη του massive MIMO για δίκτυα 5G και πέρα [7]

Μερικά από τα οφέλη της τεχνολογίας Massive MIMO είναι:

- Φασματική απόδοση: Το massive MIMO παρέχει υψηλότερη φασματική απόδοση επιτρέποντας στη διάταξη κεραιών του να εστιάζει τις στενές δέσμες προς τον χρήστη. Μπορεί να επιτευχθεί φασματική απόδοση πάνω από δέκα φορές καλύτερη από το τρέχον σύστημα MIMO που χρησιμοποιείται για 4G/LTE.
- Ενεργειακή απόδοση: Καθώς η διάταξη κεραιάς εστιάζει σε ένα μικρό συγκεκριμένο τμήμα, απαιτεί λιγότερη ακτινοβολούμενη ισχύ και μειώνει την απαίτηση ενέργειας σε τεράστια συστήματα MIMO.
- Υψηλός ρυθμός δεδομένων: Το κέρδος συστοιχίας και η χωρική πολυπλεξία που παρέχονται από το massive MIMO αυξάνουν τον ρυθμό δεδομένων και τη χωρητικότητα των ασύρματων συστημάτων.
- Παρακολούθηση χρήστη: Επειδή το massive MIMO χρησιμοποιεί στενές δέσμες σήματος προς τον χρήστη. Η παρακολούθηση των χρηστών γίνεται πιο αξιόπιστη και ακριβής.
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας: Το τεράστιο MIMO είναι κατασκευασμένο με γραμμικούς ενισχυτές εξαιρετικά χαμηλότερης ισχύος, γεγονός που εξαλείφει τη χρήση ογκώδους ηλεκτρονικού εξοπλισμού στο σύστημα. Αυτή η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί σημαντικά.
- Λιγότερο ξεθώριασμα: Ένας μεγάλος αριθμός κεραιάς στον δέκτη κάνει το massive MIMO ανθεκτικό στο ξεθώριασμα.

- Χαμηλή καθυστέρηση: Το massive MIMO μειώνει την καθυστέρηση στη διεπαφή αέρα.
- Ανθεκτικότητα: Τα massive MIMO συστήματα είναι ανθεκτικά έναντι ακούσιων παρεμβολών και εσωτερικών εμπλοκών. Επίσης, αυτά τα συστήματα είναι ανθεκτικά σε μία ή μερικές βλάβες κεραίας λόγω μεγάλων κεραίων.
- Αξιοπιστία: Ένας μεγάλος αριθμός κεραιών στο τεράστιο MIMO παρέχει μεγαλύτερη κέρδος διαφοροποίησης, γεγονός που αυξάνει την αξιοπιστία της σύνδεσης.
- Ενισχυμένη ασφάλεια: Το τεράστιο MIMO παρέχει περισσότερη φυσική ασφάλεια λόγω των ορθογώνιων καναλιών κινητών σταθμών και των στενών ακτινών.
- Χαμηλή σύνθετη γραμμική επεξεργασία: Ο μεγαλύτερος αριθμός κεραιών σταθμού βάσης καθιστά τους απλούς ανιχνευτές σήματος και τους προ-κωδικοποιητές βέλτιστους για το σύστημα.

2.8 Internet of Things

Ο όρος Internet of Things [14] χρησιμοποιήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 από τον Kevin Ashton για να περιγράψει τον τρόπο πώς να συνδέσει τα αντικείμενα με το διαδίκτυο μέσω μιας τεχνολογίας ράδιο-συχνοτήτων RFID (Radio Frequency Identification).

Το **Internet of things** είναι το δίκτυο επικοινωνίας πολλών συσκευών, οικιακών συσκευών, οχημάτων καθώς και κάθε αντικειμένου που ενσωματώνει ηλεκτρονικά μέσα, λογισμικό, αισθητήρες και συνδεσιμότητα σε δίκτυο ώστε να επιτρέπεται η σύνδεση και η ανταλλαγή δεδομένων. Με άλλα λόγια, το IoT είναι η σύνδεση όλων των ηλεκτρονικών συσκευών μεταξύ τους ή και με το διαδίκτυο.

Το IoT αφορά μία ευρεία ποικιλία συσκευών εντελώς διαφορετικά μεταξύ τους, όπως για παράδειγμα αυτοκίνητα με ενσωματωμένους αισθητήρες, κάμερες, κλιματιστικά, φώτα, συστήματα ασφαλείας, smartwatches ακόμα και οχήματα των οποίων αισθητήρες εντοπίζουν αντικείμενα στην πορεία τους. Βασικό χαρακτηριστικό όλων είναι η σύνδεση μεταξύ τους με απώτερο σκοπό την δυνατότητα του χρήστη να τα ελέγχει από έναν υπολογιστή ή κινητό.

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) αυξάνεται καθώς ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών πρόκειται να αυξηθεί από 700 εκατομμύρια σε 3,2 δισεκατομμύρια έως το 2023. Αν και υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτή την άνοδο, ένας από τους πιο σημαντικούς θα είναι η ανάπτυξη των δικτύων 5G. [15]

Η κυκλοφορία της πέμπτης γενιάς κυψελοειδών κινητών επικοινωνιών ή 5G είναι σημαντική για την αγορά του IoT. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα δίκτυα 5G θα συμβάλουν πολύ στη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας αυτών των συνδεδεμένων συσκευών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ NYUSIM 3.1

Κεφάλαιο 3^ο : Προσομοιωτής NYUSIM 3.1

3.1 Εισαγωγή

Το NYUSIM επικεντρώνεται στην δημιουργία μοντέλων καναλιών για συγκεκριμένες συχνότητες mmWaves, όπως 28GHz και 73 GHz. Γίνονται μετρήσεις διάδοσης για να δημιουργήσουν μοντέλα για να μην χρειάζεται οι άνθρωποι να βγουν έξω και να κάνουν αυτές τις μετρήσεις και να μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα μοντέλα της NYUSIM για σκοπούς προσομοίωσης και ανάλυσης.

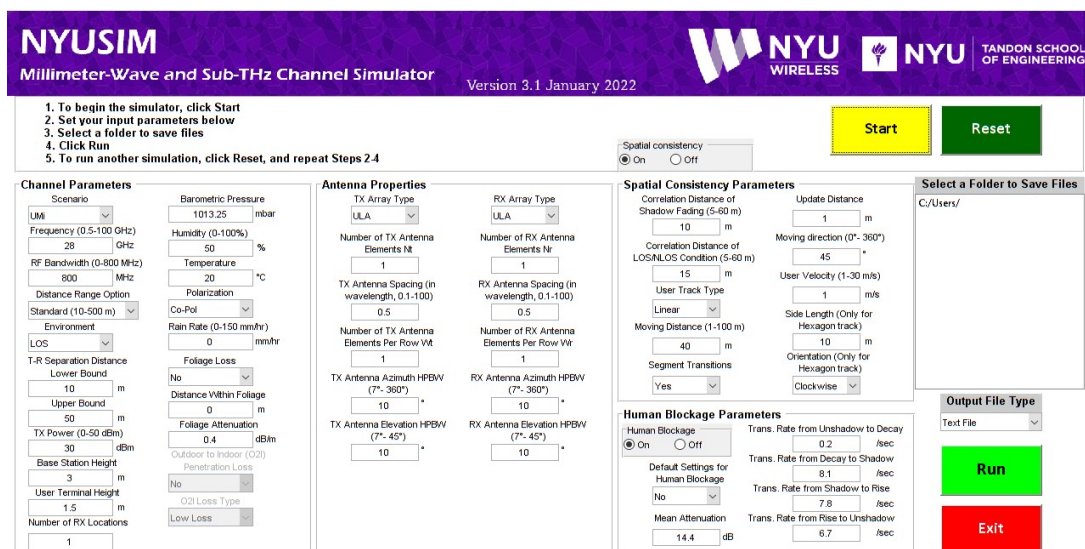
Τα μοντέλα καναλιών είναι πολύ σημαντικά για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη συστημάτων 5G . Οπότε είναι σημαντικό να υπάρχουν κατάλληλα μοντέλα καναλιών που να μπορούν να αναπαράγουν τις ρεαλιστικές παλμικές αποκρίσεις καναλιού, τόσο στο χωρικό όσο και στο χρονικό πεδίο.

Για τις συχνότητες mmWaves φαίνεται να μην υπάρχουν επαρκής μετρήσεις για την υποστήριξη μοντέλων καναλιών. Έτσι δημιουργήθηκε το μοντέλο καναλιών NYUSIM που βασίζεται στον εκτεταμένο όγκο δεδομένων. Έχουν γίνει μετρήσεις από το 2012 έως το 2021, έχοντας αποκτήσει συνολικά πάνω από 1 TB δεδομένων, σε συχνότητες από 28 έως 140 GHz σε διάφορους εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους. Έχουν καταγραφεί πάνω από 80.000 λήψεις.

Στην προσπάθεια να επιταχυνθεί η ανάπτυξη 5G, το NYUSIM παρέχεται ως δωρεάν λογισμικό ανοιχτού κώδικα για την κυτταρική διάδοση στη ζώνη χιλιοστών κυμάτων (mmWave).

3.2 Βασικά στοιχεία γραφικής διεπαφής χρήστη και προσομοιωτή

Όταν η χωρική συνέπεια είναι ενεργή, το NYUSIM εκτελεί τη διαδικασία χωρικής συνέπειας και δημιουργεί διαδοχικά και συσχετισμένα CIR κατά μήκος της τροχιάς UT.



Εικόνα 6: Γραφική διεπαφή χρήστη (GUI)

3.2.1 Παράμετροι εισόδου

Οι παράμετροι εισόδου στον προσομοιωτή είναι ομαδοποιημένες σε τέσσερις κύριες κατηγορίες: Παράμετροι καναλιού, Ιδιότητες κεραίας, Χωρική Παράμετροι συνέπειας και Παράμετροι Ανθρώπινου Μπλοκαρίσματος, όπως φαίνεται στο GUI στην Εικόνα 6.

Ο πίνακας παράμετροι καναλιού περιέχει 19 βασικές παραμέτρους εισόδου σχετικά με το κανάλι διάδοσης, όπως παρατίθεται και εξηγείται παρακάτω:

1. **Σενάριο:** είναι μια επιλέξιμη παράμετρος που υποδηλώνει το σενάριο. Έχει τέσσερις επιλογές σεναρίου, αστικό μικροκύτταρο ("UMi"), αστικό μακροκύτταρο ("UMa"), αγροτικές μακροκυψέλες ("RMa") και hotspot εσωτερικού χώρου ("InH"). Η προεπιλεγμένη επιλογή σεναρίου είναι "UMi". Επιλέγοντας την επιλογή "InH" θα αλλάξει το επιτρεπόμενο εύρος συχνοτήτων φορέα από 0,5-100 GHz (για σενάρια εξωτερικού χώρου) σε 0,5-150 GHz, θα αλλάξει το εύρος απόστασης από «Τυπικό (10-500 m)» σε «Εσωτερικό (5-50 m)», και το ανώτερο όριο ύψους σταθμού βάσης από 150 m (για σενάρια εξωτερικού χώρου) σε 3 m. Επιλέγοντας "InH" θα απενεργοποιήσει επίσης τις ακόλουθες επιλογές: "Rain Rate", "Foliage Loss", "Distance In Foliage", "Foliage Attenuation", "Out door to Indoor (O2I) Penetration Loss", "O2I Loss Type", και χωροταξικά λειτουργία συνέπειας.
2. **Συχνότητα (GHz):** είναι μια επεξεργάσιμη παράμετρος που υποδηλώνει τη συχνότητα του φορέα σε GHz. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 28 (GHz) και μπορεί να ποικίλει από 0,5 έως 100 (GHz) με το πολύ ένα δεκαδικό ψηφίο για UMi, UMa και RMa σενάρια. Όταν είναι επιλεγμένο το "InH", η επιτρεπόμενη συχνότητα φορέα θα κυμαίνεται από 0,5 έως 150 (GHz).
3. **Εύρος ζώνης RF (MHz):** είναι μια επεξεργάσιμη παράμετρος που υποδηλώνει το πλάτος της ζώνης RF του μεταδιδόμενου σήματος σε MHz. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 800 MHz, και μπορεί να ποικίλλει από 0 έως 800 MHz. Καθώς ο προσομοιωτής αναπτύχθηκε από πραγματικές μετρήσεις που ελήφθησαν με εύρος ζώνης RF των 800 MHz, μπορεί να μειωθεί μόνο από τα 800 MHz.
4. **Επιλογή εύρους απόστασης:** είναι μια επιλέξιμη παράμετρος που υποδηλώνει το εύρος απόστασης. Ισχύουν τρεις επιλογές, "Standard (10-500 m)", "Extended (10-10.000 m)", και "Indoor (5-50 m)". Η προεπιλεγμένη ρύθμιση είναι "Standard (10-500 m)".
Για αποστάσεις μικρότερες από 500 m, το δυναμικό εύρος (δηλαδή, η μεγαλύτερη δυνατή απώλεια διαδρομής) ορίζεται στα 190 dB στο NYUSIM με βάση αποτελέσματα μέτρησης πεδίου [16], [17], ενώ για το εύρος απόστασης πέρα από τα 500 m, το δυναμικό εύρος έχει ρυθμιστεί στα 220 dB. Όταν επιλέγεται το "InH", η "Επιλογή εύρους απόστασης" έχει οριστεί ως "Indoor (5-50 m)".
5. **Περιβάλλον:** είναι μια επιλέξιμη παράμετρος που υποδηλώνει το περιβάλλον, είτε οπτική επαφή (LOS) είτε μη οπτική επαφή (NLOS). Η προεπιλεγμένη ρύθμιση είναι LOS.
6. **Κάτω όριο απόστασης διαχωρισμού TR (m):** είναι μια επεξεργάσιμη

παράμετρος που υποδηλώνει τη μικρότερη απόσταση μεταξύ του πομπού (TX) και του δέκτη (RX) σε μέτρα με το πολύ ένα δεκαδικό ψηφίο. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 10 m και μπορεί να μεταβληθεί από 10 m έως 500 m για την τυπική εμβέλεια (επαληθευμένη με εκτεταμένες μετρήσεις από το NYU), 10 m έως 10 Km για την εκτεταμένη εμβέλεια και 5 m έως 50 m για τον εσωτερικό χώρο εύρος αλλά όχι περισσότερο από το άνω όριο της απόστασης διαχωρισμού TR.

7. **Ανώτερο όριο απόστασης διαχωρισμού TR (m):** είναι μια επεξεργάσιμη παράμετρος που υποδηλώνει τη μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ του TX και του RX σε μέτρα με το πολύ ένα δεκαδικό ψηφίο. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 500 m και μπορεί να μεταβληθεί από 10 m έως 500 m για την τυπική εμβέλεια (επαληθευμένη με εκτεταμένες μετρήσεις από το NYU) και από 10 m έως 10 Km για την εκτεταμένη εμβέλεια και από 5 m έως 50 m για το εύρος εσωτερικού χώρου, αλλά όχι μικρότερο από το κάτω όριο της απόστασης διαχωρισμού TR.

8. **TX Power (dBm):** είναι μια επεξεργάσιμη παράμετρος που υποδηλώνει την ισχύ εκπομπής σε dBm. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 30 (dBm) και μπορεί να οριστεί σε οποιαδήποτε τιμή που κυμαίνεται από 0 έως 50 (dBm).

9. **Ύψος σταθμού βάσης (m):** είναι μια επεξεργάσιμη παράμετρος που υποδηλώνει το ύψος του σταθμού βάσης σε μέτρα. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 35 (m) και μπορεί να οριστεί σε οποιαδήποτε τιμή που κυμαίνεται από 10 έως 150 (m). Το ύψος σταθμού βάσης ισχύει μόνο για μοντελοποίηση RMa και αγνοείται για σενάρια UMi και UMa. Το μέγιστο ύψος των σταθμών είναι 3 m για το σενάριο InH.

10. **Ύψος τερματικού χρήστη (m):** είναι μια επεξεργάσιμη παράμετρος που υποδηλώνει το ύψος UT σε μέτρα. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 1,5 (m) και μπορεί να οριστεί σε οποιαδήποτε τιμή που κυμαίνεται από 1 έως 10 (m) πάνω από το έδαφος.

11. **Βαρομετρική πίεση:** είναι μια επεξεργάσιμη παράμετρος που υποδηλώνει τη βαρομετρική πίεση p_{ic} σε mbar που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απώλειας διαδρομής διάδοσης σε ξηρό αέρα. Η προεπιλεγμένη και τυπική τιμή είναι 1013,25 mbar (millibar) (δηλαδή, ονομαστική για τη στάθμη της θάλασσας) και μπορεί να κυμαίνεται από 10^{-5} έως 1013,25 (mbar)[18].

12. **Υγρασία:** είναι μια επεξεργάσιμη παράμετρος που υποδηλώνει τη σχετική υγρασία σε ποσοστό που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απώλειας διαδρομής διάδοσης που προκαλείται από τον ατμό. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 50 (%) και μπορεί να οριστεί σε οποιονδήποτε αριθμό μεταξύ 0 και 100 (%).

13. **Θερμοκρασία:** είναι μια επεξεργάσιμη παράμετρος που υποδηλώνει τη θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απώλειας διαδρομής διάδοσης που προκαλείται από την ομίχλη/ομίχλη. Η προεπιλεγμένη και τυπική τιμή είναι 20 (°C) και μπορεί να κυμαίνεται από -100 έως 50 (°C).

14. **Ρυθμός βροχής:** είναι μια επεξεργάσιμη παράμετρος που υποδηλώνει τον ρυθμό βροχής σε mm/hr χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της πρόσθετης απώλειας διαδρομής διάδοσης που προκαλείται από τη βροχή. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 0 (mm/hr) και το τυπικό εύρος είναι από 0 έως 150 (mm/hr). Αυτή η επιλογή είναι απενεργοποιημένη για το σενάριο InH.

15. **Polarization:** είναι μια επιλέξιμη παράμετρος που υποδηλώνει τη σχέση πόλωσης μεταξύ των κεραιών TX και RX ή των συστοιχιών κεραιών. Η προεπιλεγμένη ρύθμιση είναι Co-Pol (συμπόλωση) και μπορεί να αλλάξει σε X-Pol (διασταυρούμενη πόλωση), Co/X-Pol (συν- και διασταυρούμενη πόλωση)

και all-Pol (VV, πόλωση HH, VH και HV). Η διάκριση διασταυρούμενης πόλωσης (XPD) μπορεί να κυμαίνεται από 5 dB έως 27 dB, ανάλογα με τη συχνότητα και το περιβάλλον [19]. Για Co-Pol, δεν θα προστεθεί επιπλέον απώλεια στην απώλεια διαδρομής, ενώ για X-Pol η απώλεια θα προστεθεί στην απώλεια διαδρομής, αυτό οφείλεται στην αναντιστοιχία πόλωσης [20]. Επιπλέον, θα προστεθεί μια μηδενική μέση Gaussian τυχαία μεταβλητή παράγουν την ισχύ HH (HV) από την ισχύ VV (VH).

16. **Απώλεια φυλλώματος:** είναι μια επιλέξιμη παράμετρος που υποδεικνύει εάν η απώλεια φυλλώματος θα ληφθεί υπόψη ή όχι στην προσομοίωση. Η προεπιλεγμένη ρύθμιση είναι «Όχι» (που σημαίνει ότι η απώλεια φυλλώματος δεν θα ληφθεί υπόψη), και μπορεί να αλλάξει σε «Ναι» (που σημαίνει ότι θα ληφθεί υπόψη η απώλεια φυλλώματος). Αυτή η επιλογή είναι απενεργοποιημένη για το σενάριο InH.

17. **Distance Within Foliage:** είναι μια επεξεργάσιμη παράμετρος που αντιπροσωπεύει την απόσταση σε μέτρα που διανύει το μεταδιδόμενο σήμα μέσα στο φύλλωμα. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 0 και μπορεί να οριστεί σε οποιονδήποτε μη αρνητικό αριθμό μεγαλύτερο από το κάτω όριο της απόστασης διαχωρισμού TR. Αυτή η επιλογή είναι απενεργοποιημένη για το σενάριο InH.

18. **Foliage Attenuation:** είναι μια επεξεργάσιμη παράμετρος που δηλώνει την απώλεια που προκαλείται από το φύλλωμα σε dB/m. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 0,4 (dB/m) και μπορεί να οριστεί σε οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 0 και 10 (dB/m). Αυτή η επιλογή είναι απενεργοποιημένη για το σενάριο InH.

19. **Αριθμός θέσεων RX:** είναι μια επεξεργάσιμη παράμετρος που υποδηλώνει τον αριθμό των τοποθεσιών RX. Μπορεί να είναι οποιοσδήποτε θετικός ακέραιος αριθμός. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 1 και μπορεί να οριστεί σε οποιονδήποτε ακέραιο από 1 έως 10.000.

20. **Απώλεια διείσδυσης από εξωτερικό σε εσωτερικό (O2I):** είναι μια επιλέξιμη παράμετρος που επισημαίνει ότι ένα UT βρίσκεται σε σενάριο εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου. Δύο επιλογές, Παρέχονται «Ναι» και «Όχι». Η προεπιλεγμένη τιμή είναι "Όχι". Αν είναι «Ναι» επιλεγμένο, πρόσθετη απώλεια διείσδυσης κτιρίου θα προστεθεί στην συνολική λαμβανόμενη ισχύ πριν δημιουργηθούν παράμετροι μικρής κλίμακας[21]. Εάν επιλεγεί "Όχι", δεν λαμβάνεται υπόψη η απώλεια διείσδυσης. Αυτή η επιλογή είναι απενεργοποιημένη για το σενάριο InH.

21. **Τύπος απώλειας O2I:** είναι μια επιλέξιμη παράμετρος που υποδηλώνει τον τύπο απώλειας O2I. Παρέχονται δύο επιλογές, «Χαμηλή απώλεια» και «Υψηλή απώλεια». Το μοντέλο «Χαμηλής Απώλειας» αντιστοιχεί σε δομικά υλικά χαμηλής απώλειας όπως το τυπικό γυαλί και το ξύλο. Η "Υψηλή Απώλεια" αντιστοιχεί σε δομικά υλικά υψηλής απώλειας όπως το υπέρυθρο ανακλαστικό γυαλί (IRR) και το σκυρόδεμα [21]. Αυτή η επιλογή είναι απενεργοποιημένη για το σενάριο InH.

Οι Ιδιότητες κεραίας του πίνακα περιέχει 12 παραμέτρους εισόδου που σχετίζονται με τις συστοιχίες κεραίων TX και RX, όπως παρατίθενται και εξηγούνται παρακάτω:

1. **Τύπος συστοιχίας TX:** μια παράμετρος που υποδηλώνει τον τύπο συστοιχίας κεραίας TX. Η προεπιλεγμένη ρύθμιση είναι ULA (ομοιόμορφος γραμμικός πίνακας) και μπορεί να αλλάξει σε URA (ομοιόμορφος

ορθογώνιος πίνακας).

2. **Τύπος συστοιχίας RX:** μια παράμετρος που υποδηλώνει τον τύπο συστοιχίας κεραίας RX. Η προεπιλεγμένη ρύθμιση είναι ULA και μπορεί να αλλάξει σε URA.

3. **Αριθμός στοιχείων κεραίας TX Nt :** μια παράμετρος που δηλώνει τον συνολικό αριθμό των στοιχείων κεραίας TX στη συστοιχία. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 1 και μπορεί να οριστεί σε οποιονδήποτε ακέραιο από 1 έως 128.

4. **Αριθμός στοιχείων κεραίας RX Nr:** μια παράμετρος που δηλώνει τον συνολικό αριθμό των στοιχείων κεραίας RX στη συστοιχία. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 1 και μπορεί να οριστεί σε οποιονδήποτε ακέραιο από 1 έως 64.

5. **Διάστημα κεραίας TX (σε μήκος κύματος):** μια παράμετρος που υποδηλώνει την απόσταση μεταξύ γειτονικών κεραιών TX στη συστοιχία ως προς το μήκος κύματος φορέα. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 0,5 και μπορεί να οριστεί σε οποιονδήποτε θετικό αριθμό με έως και ένα δεκαδικό ψηφίο από το 0,1 έως το 100.

6. **Διάστημα κεραίας RX (σε μήκος κύματος):** μια παράμετρος που υποδηλώνει την απόσταση μεταξύ γειτονικών κεραιών RX στη συστοιχία ως προς το μήκος κύματος φορέα. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 0,5 και μπορεί να οριστεί σε οποιονδήποτε θετικό αριθμό με έως και ένα δεκαδικό ψηφίο από το 0,1 έως το 100.

7. **Αριθμός στοιχείων κεραίας TX ανά γραμμή Wt :** μια επεξεργάσιμη παράμετρος που υποδηλώνει τον αριθμό των κεραιών TX σε μία διάσταση όταν ο τύπος συστοιχίας TX είναι ULA ή URA, ο οποίος πρέπει να διαιρεί τον αριθμό των στοιχείων κεραίας TX. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 1.

8. **Αριθμός στοιχείων κεραίας RX ανά σειρά Wr:** μια παράμετρος που υποδηλώνει τον αριθμό των κεραιών RX σε μία διάσταση όταν ο τύπος συστοιχίας RX είναι ULA ή URA, ο οποίος πρέπει να διαιρεί τον αριθμό των στοιχείων κεραίας RX. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 1.

9. **TX Antenna Azimuth HPBW (μοίρες):** μια παράμετρος που υποδηλώνει το αζιμούθιο πλάτος δέσμης μισής ισχύος (HPBW) της κεραίας TX (συστοιχία) σε μοίρες. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 10° και μπορεί να οριστεί σε οποιαδήποτε τιμή από 7° έως 360° (καθώς το μικρότερο αζιμούθιο HPBW της κεραίας που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις για τον προσομοιωτή ήταν 7°).

10. **TX Antenna Elevation HPBW (μοίρες):** μια παράμετρος που σημειώνει την ανύψωση HPBW της κεραίας TX (συστοιχία) σε μοίρες. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 10° και μπορεί να οριστεί σε οποιαδήποτε τιμή από 7° έως 45° (καθώς η μικρότερη ανύψωση που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις για τον προσομοιωτή ήταν 7°).

11. **Κεραία RX Azimuth HPBW (μοίρες):** μια παράμετρος που υποδηλώνει το αζιμούθιο HPBW της κεραίας RX (συστοιχία) σε μοίρες. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 10°, και μπορεί να ρυθμιστεί σε οποιαδήποτε τιμή από 7° έως 360°.

12. **RX Antenna Elevation HPBW (μοίρες):** μια παράμετρος που σημειώνει την ανύψωση HPBW της κεραίας RX (συστοιχία) σε μοίρες. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 10° και μπορεί να οριστεί σε οποιαδήποτε τιμή από 7° έως 45°.

Ο πίνακας Χωρική συνέπεια περιέχει 10 παραμέτρους εισόδου που σχετίζονται με την εφαρμογή χωρικής συνέπειας, όπως παρατίθενται και εξηγούνται

παρακάτω: (Η λειτουργία χωρικής συνέπειας θα απενεργοποιηθεί για την προσομοίωση καναλιού εσωτερικού χώρου)

1. **Απόσταση συσχέτισης του ξεθωριάσματος σκιάς (5-60 m):** ένας επεξεργάσιμος παράμετρος που υποδηλώνει την απόσταση συσχέτισης του ξεθωριάσματος σκιάς. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 10 m. Η απόσταση συσχέτισης της εξασθένησης της σκιάς, γνωστή και ως "τοπική περιοχή" καθορίζει το μήκος ενός τμήματος καναλιού. Η απόσταση συσχέτισης είναι η απόσταση πέρα από την οποία η τιμή αυτόματης συσχέτισης μιας παραμέτρου μεγάλης κλίμακας (LSP-large scale parameter) πέφτει κάτω από 0,5 [22]. Εντός της απόστασης συσχέτισης, τα LSP θεωρούνται χωρικά συσχετισμένα κατά τη διάρκεια της κίνησης UT. Εάν ένα UT κινηθεί πέρα από την απόσταση συσχέτισης, τα LSPs θεωρούνται ανεξάρτητα και δημιουργούνται ξανά τυχαία με βάση τις προκαθορισμένες πιθανοτικές κατανομές [23]. Συγκεκριμένα, ένα νέο κανάλι θα αρχικοποιηθεί και νέα CIR θα αναδημιουργηθούν ανεξάρτητα όταν ένα UT μετακινηθεί πέρα από την απόσταση συσχέτισης της εξασθένησης της σκιάς.
2. **Απόσταση συσχέτισης Συνθήκης LOS/NLOS (5-60 m):** μια παράμετρος που υποδηλώνει την απόσταση συσχέτισης της συνθήκης LOS/NLOS. Η απόσταση συσχέτισης της συνθήκης LOS/NLOS χρησιμοποιείται για τη δημιουργία χωρικά συσχετισμένων τιμών LOS/NLOS, που σημαίνει ότι ένα UT που κινείται σε μια τοπική περιοχή θα πρέπει πάντα να έχει την ίδια κατάσταση ορατότητας (LOS ή NLOS). Συγκεκριμένα, η συνθήκη ορατότητας δεν αλλάζει μέσα σε ένα τμήμα καναλιού, αλλά μπορεί να αλλάξει διαβάζοντας τον χωρικά συσχετισμένο χάρτη με βάση τη θέση UT όταν ξεκινάει το επόμενο τμήμα.
3. **Τύπος κομματιού UT:** μια παράμετρος που υποδηλώνει τον τύπο κομματιού UT. Δύο επιλογές, «Γραμμικό» και «Εξάγωνο» παρέχονται στον χρήστη. Η προεπιλεγμένη επιλογή είναι "Γραμμική".
4. **Απόσταση διαδρομής (1-100 m):** μια παράμετρος που υποδηλώνει το μήκος τροχιάς του UT. Η απόσταση του ίχνους εισόδου για το κομμάτι "Εξάγωνο" δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την περίμετρο του εξαγώνου. Η ρεαλιστική παραγωγή CIR δεν μπορεί να είναι εγγυημένη εκτός ορίου. Η απόσταση του κομματιού χωρίζεται σε πολλαπλά τμήματα καναλιού με βάση την απόσταση συσχέτισης της εξασθένησης της σκιάς.
5. **Απόσταση ενημέρωσης (<1 m):** μια παράμετρος που υποδηλώνει το διάστημα απόστασης μεταξύ δύο στιγμιότυπων καναλιών. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 1 m. Η μείωση της απόστασης ενημέρωσης προκαλεί τη δημιουργία περισσότερων CIR από το NYUSIM με το διαχωρισμό μεταξύ κάθε CIR που δημιουργείται από το NYUSIM ίσο με την απόσταση ενημέρωσης. Η απόσταση ενημέρωσης δεν πρέπει να οριστεί πολύ μικρή επειδή είναι υπολογιστικά ακριβή. Προτείνονται αποστάσεις ενημέρωσης 0,1, 0,5 και 1 m.
6. **Κατεύθυνση κίνησης (0°-360°):** μια παράμετρος που υποδηλώνει την αρχική κατεύθυνση κίνησης UT. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 45°. Τόσο η διαδρομή "Γραμμική" όσο και η "Εξάγωνη" απαιτούν μια αρχική κατεύθυνση κίνησης. Για μια γραμμική τροχιά, η κατεύθυνση κίνησης δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για μια εξάγωνη τροχιά, η κατεύθυνση κίνησης αλλάζει με βάση την απόσταση τροχιάς και το μήκος της πλευράς του εξαγώνου.
7. **Ταχύτητα UT (1 - 30 m/s):** μια παράμετρος που υποδηλώνει την ταχύτητα του UT. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 1 m/s, κοντά στην τυπική ταχύτητα βάρδισης του ανθρώπου. Η ταχύτητα UT μαζί με την απόσταση

ενημέρωσης καθορίζει τον χρόνο ενημέρωσης που είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών CIR.

8. **Μήκος πλευράς:** μια παράμετρος που υποδηλώνει το μήκος της πλευράς του εξαγώνου. Αυτή η παράμετρος λειτουργεί μόνο για το κομμάτι "Hexagon". Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 10 m.

9. **Προσανατολισμός:** μια επιλέξιμη παράμετρος που υποδηλώνει τον προσανατολισμό της εξάγωνης τροχιάς. Αυτή η παράμετρος λειτουργεί μόνο για το κομμάτι "Hexagon". Παρέχονται δύο επιλογές, «Δεξιά του ρολογιού» και «Μετρητής».

10. **Μεταβάσεις τμημάτων:** μια επιλέξιμη παράμετρος που υποδηλώνει εάν οι ομαλές μεταβάσεις μεταξύ δύο τμημάτων. Παρέχονται δύο επιλογές, «Ναι» και «Όχι». Με επιλεγμένο το "Ναι" γίνεται μια μετα-επεξεργασία για τη "σύνδεση" δημιουργημένων τμημάτων καναλιού μέσω γέννησης και θανάτου συμπλέγματος. Το "Όχι" δημιουργεί ανεξάρτητα τμήματα καναλιού, με τα στιγμιότυπα καναλιού να συσχετίζονται χωρικά σε κάθε τμήμα καναλιού.

Ο πίνακας Human Blockage περιέχει 6 παραμέτρους εισόδου που σχετίζονται με την απώλεια σκίασης από ανθρώπινη απόφραξη λόγω ενός ατόμου κοντά στο κινητό τηλέφωνο (UT), όπως παρατίθενται και εξηγούνται παρακάτω. Η ανθρώπινη απόφραξη μπορεί να ενεργοποιηθεί ή να απενεργοποιηθεί. Το μήκος ενός ίχνους Markov είναι 20 δευτερόλεπτα και η χρονική ανάλυση είναι 1 ms.

1. **Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για το ανθρώπινο μπλοκάρισμα:** Παρέχονται δύο επιλογές, «Ναι» και «Όχι». Εάν ο χρήστης επιλέξει «Ναι», οι ρυθμοί μετάβασης και η μέση εξασθένηση υλοποιούνται με βάση μια γραμμική προσαρμογή στα δεδομένα καθώς αλλάζει το αζιμούθιο της κεραίας RX HPBW[24]. Εάν ο χρήστης επιλέξει "Όχι", οι ρυθμοί μετάβασης και η μέση εξασθένηση είναι ελεύθερα για επεξεργασία για προτιμήσεις που καθορίζονται από τον χρήστη, σε περίπτωση που προτιμηθούν ή ανακαλυφθούν στο μέλλον άλλες παράμετροι του μοντέλου Markov.

2. **Μέση εξασθένηση:** μια παράμετρος που υποδηλώνει τη μέση εξασθένηση συμβάντων απόφραξης (SE_{mean}). Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 14,4 dB.

3. **Μετάβαση από μη σκιασμένη κατάσταση σε κατάσταση αποσύνθεσης (1/s):** μια παράμετρος που υποδηλώνει το ρυθμό μετάβασης από μη σκιασμένη κατάσταση σε κατάσταση αποσύνθεσης. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 0,20 όταν το αζιμούθιο της κεραίας RX HPBW είναι 10°.

4. **Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση αποσύνθεσης σε σκιασμένη κατάσταση (1/s):** μια παράμετρος που δηλώνει το ρυθμό μετάβασης από την κατάσταση αποσύνθεσης σε σκιασμένη κατάσταση. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 8,08 όταν το αζιμούθιο της κεραίας RX HPBW είναι 10°.

5. **Ρυθμός μετάβασης από σκιασμένη κατάσταση σε κατάσταση ανόδου (1/s):** μια παράμετρος που δηλώνει το ρυθμό μετάβασης από τη σκιασμένη κατάσταση στην κατάσταση ανόδου. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 7,85 όταν το αζιμούθιο της κεραίας RX HPBW είναι 10°.

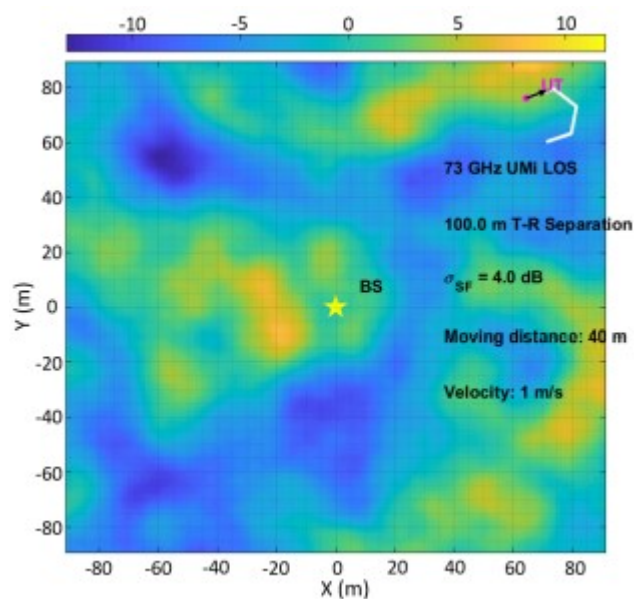
6. **Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση ανόδου σε κατάσταση μη σκιασμένη (1/s):** μια παράμετρος που δηλώνει το ρυθμό μετάβασης από την κατάσταση ανόδου σε κατάσταση χωρίς σκιά. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 6,70 όταν το αζιμούθιο της κεραίας RX HPBW είναι 10° .

3.2.2 Αρχεία Εξόδου

Η λειτουργία χωρικής συνέπειας υποθέτει ότι ένα UT διανύει μια συγκεκριμένη διαδρομή και δημιουργεί συσχετισμένες και διαδοχικές παλμικές αποκρίσεις καναλιού για διαδοχικά σημεία δειγματοληψίας στη διαδρομή. Μια σειρά χωρικά συσχετισμένων και χρονικών αποκρίσεων καναλιού δημιουργούνται εύκολα στο NYUSIM υπό τη λειτουργία χωρικής συνέπειας. Μια εκτέλεση προσομοίωσης μπορεί να παράγει εκατοντάδες ή χιλιάδες αποκρίσεις παλμών καναλιών σε κοντινή απόσταση με βάση την τροχιά και την ταχύτητα UT.

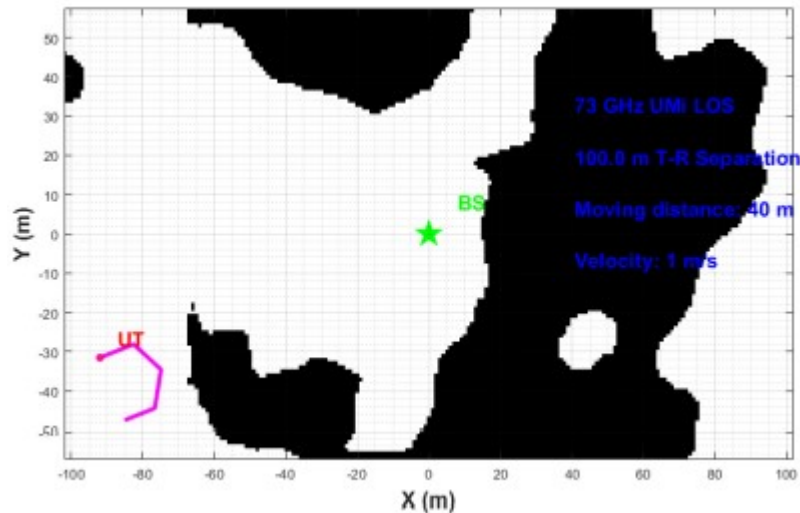
Για κάθε εκτέλεση προσομοίωσης, θα δημιουργηθούν και θα αποθηκευτούν πέντε ψηφία που βασίζονται στα συγκεκριμένα αποτελέσματα της προσομοίωσης που εκτελείται. Αυτές οι πέντε φιγούρες θα εμφανιστούν στην οθόνη για οπτικούς σκοπούς. Τα περιεχόμενα αυτών των σχημάτων έχουν ως εξής.

- Εξάγεται ένας χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς με τις θέσεις UT και BS και το ίχνος UT όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Κάποιες βασικές πληροφορίες, όπως συχνότητα, περιβάλλον, απόσταση διαχωρισμού TR, τυπική απόκλιση εξασθένησης σκίασης, απόσταση τροχιάς, ταχύτητα, εμφανίζονται στο σχήμα.



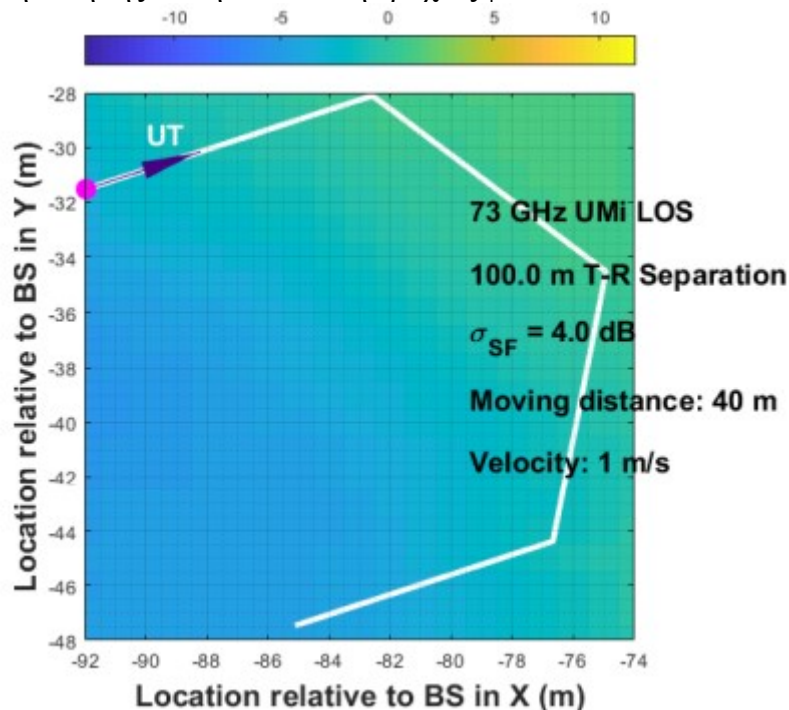
Εικόνα 7: Ένας χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωιάζει με τις θέσεις BS και UT. Εξασθένιση σκιάς 4dB σε σενάριο UMi LOS. Η απόσταση διαχωρισμού T-R είναι 100m.

- Ένας χάρτης για χωρικά συσχετισμένη συνθήκη LOS/NLOS χρησιμοποιώντας πιθανότητα LOS συγκεκριμένης σεναρίου εξάγεται όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 8, ο οποίος υποδεικνύει ότι όλες οι τοποθεσίες σε μια τοπική περιοχή αντιμετωπίζουν την ίδια συνθήκη διάδοσης (LOS ή NLOS). Ορισμένες βασικές πληροφορίες όπως η συχνότητα, το περιβάλλον, η απόσταση διαχωρισμού TR, η τυπική απόκλιση του ξεθωριάσματος της σκιάς, η απόσταση διαδρομής, η ταχύτητα εμφανίζονται στο σχήμα.



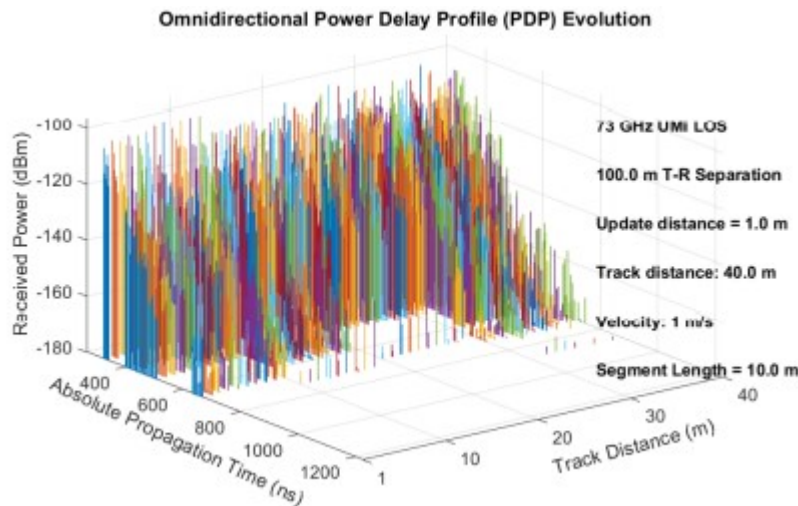
Εικόνα 8: Ένας χάρτης χωρικά συσχετισμένης κατάστασης LOS/NLOS

- Ίχνος χρήστη: Το τμήμα του χάρτη για το ξεθωρίασμα σκιών με χωρική συσχέτιση κατά μήκος του οποίου κινείται το UT όπως φαίνεται στην Εικόνα 9. Η κατεύθυνση κίνησης και η απόσταση τροχιάς φαίνονται σε αυτό το σχήμα.



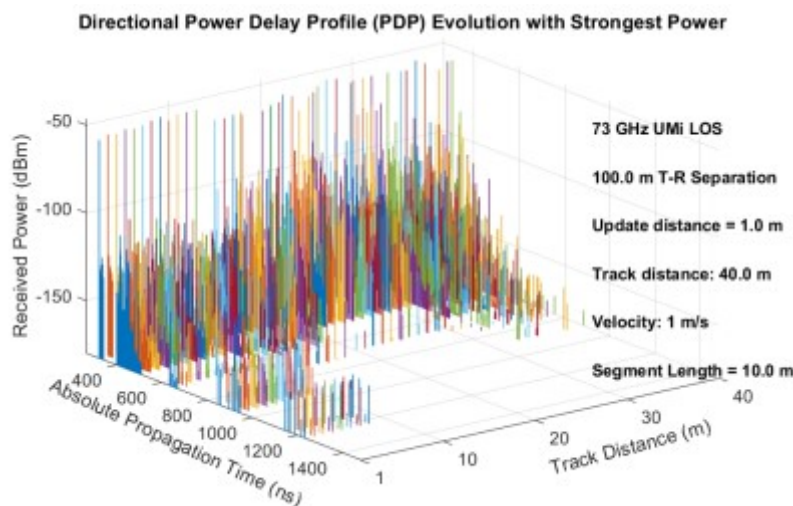
Εικόνα 9: Παράδειγμα διαδρομής χρήστη

- Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP(Power Delay Profile) κατά μήκος της τροχιάς του χρήστη εμφανίζονται στην Εικόνα 10 για να δείξουν τη διακύμανση ισχύος και τη καθυστέρηση μετατόπισης των MPC (Multipath Component), όπου τα μοτίβα απολαβής κατευθυντικής κεραίας εφαρμόζονται στο TX και/ή στο RX. Ορισμένες βασικές πληροφορίες όπως η συχνότητα, το περιβάλλον, η απόσταση διαχωρισμού TR, η απόσταση τροχιάς, η ταχύτητα εμφανίζονται στο διάγραμμα PDP.



Εικόνα 10: Παράδειγμα διαδοχικών πανκατευθυντικών PDP

- Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με την ισχυρότερη λαμβανόμενη ισχύ κατά μήκος της τροχιάς χρήστη εμφανίζονται στην Εικόνα 11 για να δείξουν τη διακύμανση ισχύος και την καθυστέρηση μετατόπισης των MPC. Ορισμένες θεμελιώδεις πληροφορίες όπως η συχνότητα, το περιβάλλον, η απόσταση διαχωρισμού TR, η απόσταση τροχιάς, η ταχύτητα εμφανίζονται στο διάγραμμα PDP.



Εικόνα 11: Παράδειγμα διαδοχικών κατευθυντικών PDP.

Αρχεία δεδομένων εξόδου

Για κάθε εκτέλεση προσομοίωσης, δημιουργούνται πέντε σκετ αρχείων .txt ή πέντε αντίστοιχα αρχεία .mat, συγκεκριμένα:

- "OmniPDP_Snapx.txt(/.mat)",
- "DirectionalPDP_Snapx.txt(/.mat)",
- "OmniPDPInfo.txt(/.mat)",
- "DirPDPInfo.txt(/.mat)" και
- "BasicParameters.txt(/.mat)".

Το x αντιπροσωπεύει το ευρετήριο ενός στιγμιότυπου καναλιού.

Κάθε αρχείο κειμένου "OmniPDP_Snapx" περιέχει επτά παραμέτρους (σειρές) του όλα τα επιλύσιμα στοιχεία πολλαπλών διαδρομών (MPC-multipath components) (στήλες), τα οποία παρατίθενται και επεξηγούνται παρακάτω.

- 1.pathDelay (ns): Η πρώτη στήλη αντιπροσωπεύει καθυστερήσεις MPC σε ns.
- 2.pathPower (dBm): Η δεύτερη στήλη αντιπροσωπεύει τις δυνάμεις των MPC με πανκατευθυντικές κεραίες στο TX και RX σε dBm.
- 3.pathPhase (rad): Η τρίτη στήλη αντιπροσωπεύει φάσεις MPC σε rad.
- 4.AOD (degree): Η τέταρτη στήλη αντιπροσωπεύει τα AOD των MPC σε μοίρες.
- 5.ZOD (degree): Η πέμπτη στήλη αντιπροσωπεύει τα ZOD των MPC σε μοίρες.
- 6.AOA (degree): Η έκτη στήλη αντιπροσωπεύει τα AOA των MPC σε μοίρες.
- 7.ZOA (degree): Η έβδομη στήλη αντιπροσωπεύει τα ZOA των MPC σε μοίρες.

Κάθε αρχείο κειμένου "DirectionalPDP_Snapx" περιέχει επτά παραμέτρους (γραμμές) όλων των επιλύσιμων MPC (στήλες) του στιγμιότυπου του x^{ov} καναλιού, οι οποίες παρατίθενται και επεξηγούνται παρακάτω.

- 1.pathDelay (ns): Η πρώτη στήλη αντιπροσωπεύει καθυστερήσεις MPC σε ns.
- 2.pathPower (dBm): Η δεύτερη στήλη αντιπροσωπεύει τις ισχύς των MPC με μοτίβα κατευθυντικής κεραίας που καθορίζονται από τον χρήστη στο TX και RX σε dBm.
- 3.pathPhase (rad): Η τρίτη στήλη αντιπροσωπεύει φάσεις MPC σε rad.
- 4.AOD (degree): Η τέταρτη στήλη αντιπροσωπεύει τα AOD των MPC σε μοίρες.
- 5.ZOD (degree): Η πέμπτη στήλη αντιπροσωπεύει τα ZOD των MPC σε μοίρες.
- 6.AOA (degree): Η έκτη στήλη αντιπροσωπεύει τα AOA των MPC σε μοίρες.
- 7.ZOA (degree): Η έβδομη στήλη αντιπροσωπεύει τα ZOA των MPC σε μοίρες.

Το αρχείο κειμένου "OmniPDPInfo" περιέχει πέντε στήλες όπου κάθε στήλη αντιπροσωπεύει μια βασική παράμετρο για καθένα από τα πανκατευθυντικά PDP από όλα τα προσομοιωμένα στιγμιότυπα καναλιών. Κάθε σειρά αντιστοιχεί σε ένα στιγμιότυπο καναλιού. Οι παράμετροι παρατίθενται και επεξηγούνται παρακάτω.

1. TR Απόσταση διαχωρισμού (m).

2. Ληφθείσα ισχύς (dBm): πανκατευθυντική λαμβανόμενη ισχύς σε dBm
3. Απώλεια διαδρομής (dB): απώλεια μονοπατιού σε dBm
4. RMS Delay Spread (ns): πανκατευθυντική εξάπλωση καθυστέρησης RMS σε nanosecond (ns)
5. Συντελεστής K Ricean (dB): λόγος της ισχυρότερης ισχύος της συνιστώσας πολλαπλών διαδρομών (το πρώτο στοιχείο πολλαπλών διαδρομών που φτάνει στο LOS) προς το άθροισμα των δυνάμεων των άλλων στοιχείων πολλαπλών διαδρομών, που μετατρέπεται από γραμμική σε κλίμακα dB.

Το αρχείο κειμένου "OmniPDPInfo" περιέχει πέντε στήλες όπου κάθε στήλη αντιπροσωπεύει μια βασική παράμετρο για καθένα από τα κατευθυντικά PDP από όλα τα προσομοιωμένα στιγμιότυπα καναλιού, όπου το ίδιο είδος παραμέτρων από κάθε στιγμιότυπο καναλιού εντάσσονται σε καταρράκτη στην ίδια στήλη. Ο αριθμός των σειρών κάθε στιγμιότυπου καναλιού αντιστοιχεί στον αριθμό των MPC αυτού του στιγμιότυπου καναλιού. Οι παράμετροι παρατίθενται και επεξηγούνται παρακάτω.

1. Ευρετήριο στιγμιότυπου
2. Απόσταση διαχωρισμού TR (m)
3. Ληφθείσα ισχύς (dBm): κατευθυντική λαμβανόμενη ισχύς σε dBm
4. Απώλεια διαδρομής (dB): απώλεια μονοπατιού σε dB
5. RMS Delay Spread (ns): πανκατευθυντική εξάπλωση καθυστέρησης RMS σε nanosecond (ns)

Το αρχείο κειμένου "BasicParameters" περιέχει όλες τις παραμέτρους εισόδου του χρήστη, όπως παραμέτρους καναλιού, ιδιότητες κεραίας, παραμέτρους χωρικής συνέπειας και παραμέτρους ανθρώπινης απόφραξης.

Το λογισμικό του προσομοιωτή NYUSIM 3.1 [25] χορηγείται δωρεάν και δημιουργήθηκε με το Matlab 2021b.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Κεφάλαιο 4^ο : Προσομοιώσεις

4.1 1^η Περίπτωση

Στις προσομοιώσεις που κάναμε θέλουμε να δούμε πως επηρεάζει το σήμα μας οι διαφορετικοί συνδυασμοί πόλωσης σε διαφορετικά περιβάλλοντα Los/Nlos.

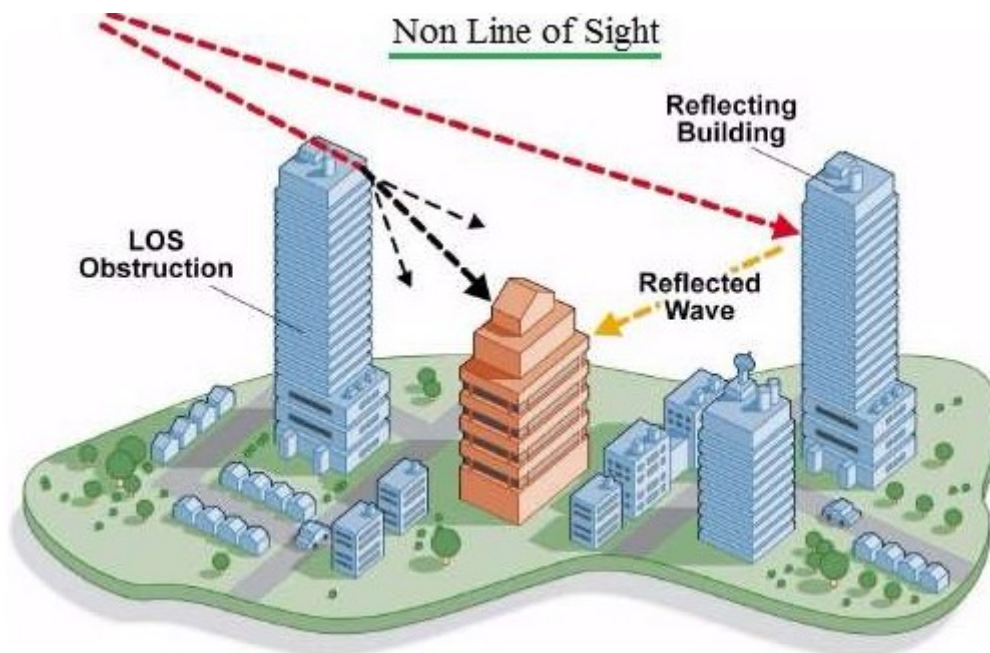
LOS (Line of Sight) σημαίνει με οπτική επαφή. Η εικόνα 12 απεικονίζει οπτική επικοινωνία μεταξύ δύο πομποδεκτών. Αυτή η ανάπτυξη LOS είναι δυνατή όταν δεν υπάρχει εμπόδιο μεταξύ του σταθμού βάσης (BS) και των σταθμών κινητών χρηστών (SU). Με άλλα λόγια, η επικοινωνία LOS είναι δυνατή όταν δεν υπάρχει εμπόδιο μεταξύ πομπού και δέκτη. Λόγω της μικρότερης εξασθένησης στην επικοινωνία LOS, προσφέρει καλή ισχύ σήματος και υψηλότερη ποσότητα απόδοσης σε σύγκριση με την αντίστοιχη NLOS.



Εικόνα 12: Περιβάλλον Los

NLOS (Non Line of Sight) σημαίνει χωρίς οπτική επαφή. Η εικόνα 13 απεικονίζει το σενάριο ανάπτυξης NLOS. Όπως φαίνεται, η ασύρματη σύνδεση θεωρείται NLOS όταν φυσικές ή/και ανθρωπογενείς δομές εμποδίζουν τη διαδρομή μεταξύ του σταθμού βάσης και των σταθμών συνδρομητών. Με άλλα λόγια, η επικοινωνία NLOS είναι δυνατή ακόμη και όταν υπάρχει εμπόδιο μεταξύ πομπού και δέκτη. Το σήμα φτάνει στον δέκτη αφού περάσει από πολλά εμπόδια ενδιάμεσα. Στη διαδρομή, το σήμα περνά από εξασθένηση καθώς και ανάκλαση, περίθλαση καθώς και διεισδύσεις.

Στην περίπτωση NLOS, η ασύρματη σύνδεση μπορεί να δημιουργηθεί μόνο εάν υπάρχει αντανάκλαστική διαδρομή μεταξύ του σταθμού βάσης και του σταθμού συνδρομητή.



Εικόνα 13: Περιβάλλον Nlos

Πηγή: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LOS-vs-NLOS-wireless-channel.html>

Θεωρώντας σε μία πόλη ότι ένας χρήστης (πεζός) κινείται σε εξάγωνη τροχιά (εικόνα 14) έχοντας οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης πραγματοποιήσαμε την 1η προσομοίωση, επιλέξαμε σενάριο εξωτερικού χώρου με χωρική συνέπεια θέτοντας της ακόλουθες παραμέτρους εισόδου στο NYUSIM GUI:

- Σενάριο: UMi
- Συχνότητα: 28GHz
- Εύρος Ζώνης RF: 800MHz
- Εύρος απόστασης: Standard (10-500m)
- Περιβάλλον: LOS
- Κάτω όριο απόστασης διαχωρισμού T-R(m):10m
- Άνω όριο απόστασης διαχωρισμού T-R(m):50m
- Ισχύς TX: 30dBm
- Ύψος σταθμού βάσης:3m(αγνοείται για σενάριο UMi)
- Ύψος τερματικού χρήστη: 1,5 m
- Βαρομετρική πίεση: 1013,25mbar
- Υγρασία:50 %
- Θερμοκρασία:20 °C
- Πόλωση: Co-Pol

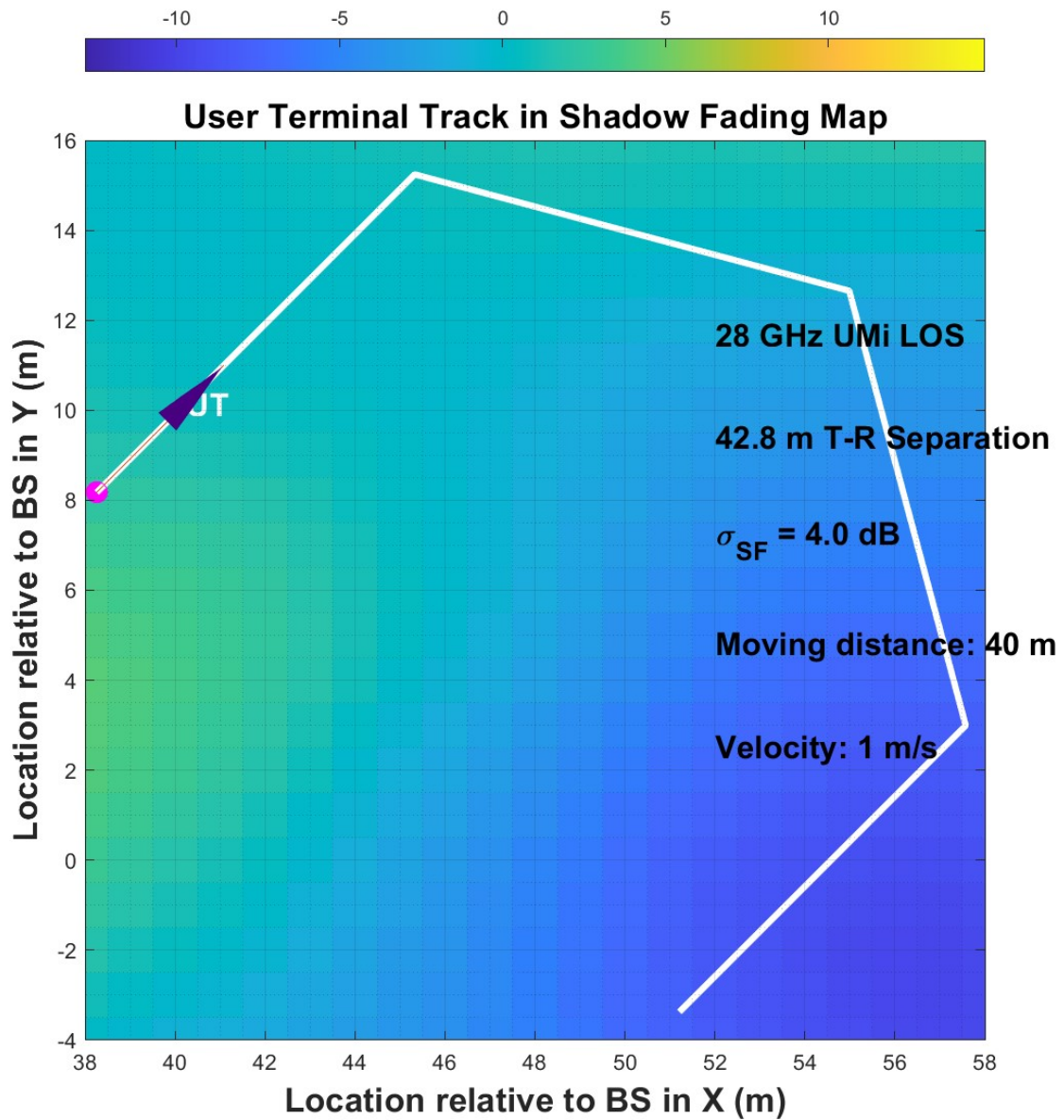
- Ρυθμός βροχής: 0
- Απώλεια φυλλώματος: όχι
- Απόσταση στο φύλλωμα: 0
- Απόσβεση φυλλώματος: 0,4 dBm
- Απώλεια διείσδυσης από εξωτερικό σε εσωτερικό(O2I)
- Τύπος συστοιχίας TX: ULA
- Τύπος συστοιχίας RX: ULA
- Αριθμός στοιχείων κεραίας TX Nt:1
- Αριθμός στοιχείων κεραίας RX Nr:1
- Διάστημα κεραίας TX: 0,5
- Διάστημα κεραίας RX: 0,5
- Αριθμός στοιχείων κεραίας TX ανά γραμμή Wt: 1
- Αριθμός στοιχείων κεραίας RX ανά γραμμή Wr: 1
- Αξιμούθιο TX κεραίας HPBW:10°
- Αξιμούθιο RX κεραίας HPBW:10°
- Ανύψωση TX κεραίας HPBW:10°
- Ανύψωση RX κεραίας HPBW:10°

Θέτοντας την Χωρική συνέπεια : On

- Απόσταση συσχέτισης ξεθωριάσματος σκιάς: 10m
- Απόσταση συσχέτισης LOS/NLOS συνθήκης: 15m
- Τύπος κομματιού χρήστη: εξάγωνο
- Απόσταση διαδρομής: 40m
- Ενημέρωση απόστασης: 1m
- Κατεύθυνση κίνησης: 45°
- Ταχύτητα χρήστη: 1 m/s
- Μήκος πλευράς: 10 m
- Προσανατολισμός: φορά ρολογιού
- Μεταβάσεις τμημάτων: Ναι

Ανθρώπινο Μπλοκάρισμα : On

- Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για το ανθρώπινο μπλοκάρισμα: όχι
- Μέση εξασθένηση: 14,4 dB
- Ρυθμός μετάβαση από μη σκιασμένη κατάσταση σε κατάσταση αποσύνθεσης: 0,2 /sec
- Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση αποσύνθεσης σε σκιασμένη κατάσταση: 8,1 /sec
- Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση σκιασμένη σε κατάσταση ανόδου: 7,8 /sec
- Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση ανόδου σε μη σκιασμένη κατάσταση: 6,7 /sec



Εικόνα 14: Διαδρομή χρήστη

Τα αποτελέσματα δίνονται με βάση την απόσταση μεταξύ δύο στιγμιότυπων καναλιών που είναι η απόσταση ενημέρωσης, που σημαίνει ότι οι συντελεστές καναλιού ενημερώνονται για κάθε 1m που διανύει κατά μήκος μιας διανυθείσας διαδρομής. Στον πίνακα 2 δίνεται ένα δείγμα των πρώτων 3 στιγμιότυπων του DIRPDPIInfo.txt.

Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

Snapshot	T-R Separation Distance (m)	Received Power (dBm)	Path Loss (dB)	RMS Delay Spread (ns)
1	39.1	-20.7	99.9	8.8
1	39.1	-32.7	111.9	3.0
1	39.1	-29.7	108.9	11.9
1	39.1	-27.9	107.1	12.1
1	39.1	-24.6	103.8	3.9
1	39.1	-25.3	104.5	4.7
1	39.1	-21.8	101.0	10.9
1	39.1	-39.7	118.9	6.0
1	39.1	-27.3	106.5	6.9
1	39.1	-25.6	104.8	14.8
1	39.1	-25.3	104.5	13.9
1	39.1	-45.3	124.5	19.6
1	39.1	-38.1	117.3	17.6
1	39.1	-39.6	118.9	13.7
1	39.1	-38.5	117.7	1.1
1	39.1	-42.7	121.9	20.0
1	39.1	-22.6	101.8	10.7
1	39.1	-40.7	119.9	31.8
1	39.1	-34.1	113.3	14.8
1	39.1	-44.7	123.9	37.9
1	39.1	-42.9	122.1	18.2
1	39.1	-52.8	132.1	25.0
1	39.1	-45.6	124.8	27.7
1	39.1	-44.8	124.0	21.5
1	39.1	-36.5	115.8	11.5

Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

1	39.1	-24.3	103.5	10.8
1	39.1	-41.1	120.3	27.9
1	39.1	-50.1	129.3	37.0
1	39.1	-33.0	112.2	29.0
1	39.1	-28.7	107.9	5.1
1	39.1	-28.0	107.2	12.0
1	39.1	-53.7	132.9	49.9
1	39.1	-26.1	105.3	13.0
1	39.1	-38.2	117.4	13.9
1	39.1	-39.8	119.1	12.5
1	39.1	-29.2	108.4	12.9
1	39.1	-34.8	114.0	30.8
1	39.1	-32.9	112.1	11.3
1	39.1	-40.4	119.6	5.3
1	39.1	-33.2	112.4	8.9
1	39.1	-32.3	111.5	4.8
1	39.1	-46.7	125.9	45.2
1	39.1	-33.7	112.9	17.6
1	39.1	-43.9	123.1	17.8
1	39.1	-34.0	113.2	9.7
1	39.1	-35.9	115.1	6.5
1	39.1	-37.0	116.2	10.2
1	39.1	-54.9	134.1	21.7
1	39.1	-28.3	107.5	8.1
1	39.1	-49.0	128.3	31.7
1	39.1	-31.4	110.6	9.1

Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

1	39.1	-36.4	115.6	5.3
1	39.1	-37.8	117.1	13.8
1	39.1	-22.1	101.3	10.1
1	39.1	-34.3	113.5	8.2
1	39.1	-45.8	125.0	16.8
1	39.1	-48.9	128.1	17.3
1	39.1	-26.7	105.9	14.7
1	39.1	-66.6	145.8	37.0
1	39.1	-42.9	122.1	41.1
1	39.1	-51.1	130.3	24.2
1	39.1	-33.4	112.6	14.5
1	39.1	-62.2	141.4	18.6
1	39.1	-59.7	138.9	43.8
1	39.1	-33.6	112.8	15.2
1	39.1	-28.7	108.0	15.4
1	39.1	-26.6	105.8	11.8
1	39.1	-45.9	125.1	33.9
1	39.1	-26.3	105.5	11.4
1	39.1	-35.9	115.1	14.1
1	39.1	-49.6	128.8	13.0
1	39.1	-29.9	109.1	11.4
1	39.1	-36.6	115.8	5.9
1	39.1	-30.9	110.1	18.9
1	39.1	-27.3	106.5	12.1
1	39.1	-44.0	123.2	23.5
1	39.1	-35.2	114.4	18.2

Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

1	39.1	-28.9	108.1	4.1
1	39.1	-30.8	110.0	12.2
1	39.1	-30.0	109.2	11.1
1	39.1	-36.1	115.4	9.2
1	39.1	-35.1	114.3	22.3
1	39.1	-34.7	114.0	17.5
1	39.1	-36.1	115.3	12.6
1	39.1	-41.4	120.6	19.6
2	40.0	-16.1	95.3	8.7
2	40.0	-19.5	98.7	1.4
2	40.0	-20.0	99.2	10.1
2	40.0	-17.2	96.4	8.9
2	40.0	-21.0	100.2	7.3
2	40.0	-18.8	98.0	4.4
2	40.0	-19.3	98.5	13.8
2	40.0	-24.8	104.0	4.2
2	40.0	-19.0	98.2	4.0
2	40.0	-23.9	103.1	18.2
2	40.0	-22.0	101.2	16.7
2	40.0	-24.4	103.6	8.5
2	40.0	-34.6	113.8	29.0
2	40.0	-28.0	107.2	6.5
2	40.0	-36.6	115.8	5.7
2	40.0	-32.6	111.8	20.4
2	40.0	-16.7	95.9	10.4
2	40.0	-29.0	108.2	25.3

Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

2	40.0	-27.6	106.8	24.7
2	40.0	-38.5	117.7	36.0
2	40.0	-33.5	112.8	19.3
2	40.0	-38.2	117.4	40.2
2	40.0	-33.5	112.7	22.5
2	40.0	-35.9	115.1	20.6
2	40.0	-27.8	107.0	12.1
2	40.0	-21.1	100.3	15.3
2	40.0	-36.8	116.0	53.0
2	40.0	-41.9	121.1	45.3
2	40.0	-29.1	108.3	25.1
2	40.0	-20.2	99.4	5.7
2	40.0	-23.4	102.7	19.8
2	40.0	-42.1	121.4	66.9
2	40.0	-23.7	102.9	19.7
2	40.0	-27.5	106.7	20.6
2	40.0	-28.9	108.1	19.1
2	40.0	-22.3	101.5	16.9
2	40.0	-31.1	110.3	28.4
2	40.0	-30.8	110.0	17.3
2	40.0	-33.8	113.0	15.2
2	40.0	-23.7	102.9	18.7
2	40.0	-24.5	103.7	8.2
2	40.0	-37.8	117.0	36.9
2	40.0	-29.1	108.3	21.4
2	40.0	-29.8	109.0	13.6

Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

2	40.0	-25.4	104.6	23.2
2	40.0	-28.0	107.2	12.7
2	40.0	-21.3	100.5	8.8
2	40.0	-40.0	119.2	14.1
2	40.0	-25.2	104.4	18.5
2	40.0	-34.1	113.4	17.4
2	40.0	-29.8	109.0	21.8
2	40.0	-25.7	105.0	11.8
2	40.0	-35.0	114.2	26.2
2	40.0	-17.6	96.8	8.9
2	40.0	-34.2	113.4	26.9
2	40.0	-48.1	127.3	30.7
2	40.0	-46.8	126.0	19.0
2	40.0	-23.4	102.6	20.9
2	40.0	-55.9	135.1	68.5
2	40.0	-34.9	114.1	34.4
2	40.0	-37.8	117.0	13.2
2	40.0	-29.8	109.0	25.2
2	40.0	-39.0	118.2	14.3
2	40.0	-48.5	127.7	40.6
2	40.0	-28.8	108.0	21.3
2	40.0	-23.4	102.6	18.5
2	40.0	-22.4	101.6	9.0
2	40.0	-32.9	112.1	21.3
2	40.0	-24.2	103.4	20.6
2	40.0	-23.2	102.4	13.0

Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

2	40.0	-44.0	123.2	16.8
2	40.0	-29.8	109.0	19.3
2	40.0	-23.4	102.6	11.4
2	40.0	-28.1	107.3	18.2
2	40.0	-22.0	101.2	15.6
2	40.0	-34.4	113.6	20.8
2	40.0	-32.4	111.7	18.8
2	40.0	-21.4	100.6	5.2
2	40.0	-26.4	105.6	16.8
2	40.0	-22.2	101.4	17.0
2	40.0	-25.8	105.0	15.9
2	40.0	-28.6	107.8	25.9
2	40.0	-30.8	110.0	16.2
2	40.0	-27.3	106.5	15.1
2	40.0	-36.5	115.7	27.1
3	40.8	-13.0	92.2	2.8
3	40.8	-33.6	112.8	4.3
3	40.8	-19.3	98.5	8.3
3	40.8	-16.9	96.1	8.7
3	40.8	-21.3	100.5	5.7
3	40.8	-26.5	105.8	8.7
3	40.8	-18.6	97.9	11.6
3	40.8	-31.5	110.7	5.4
3	40.8	-23.1	102.4	8.3
3	40.8	-20.1	99.3	10.3
3	40.8	-23.3	102.5	16.7

Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

3	40.8	-27.1	106.3	18.8
3	40.8	-30.1	109.3	19.7
3	40.8	-33.4	112.6	11.6
3	40.8	-32.4	111.6	3.7
3	40.8	-35.6	114.8	32.1
3	40.8	-17.1	96.3	10.7
3	40.8	-26.9	106.2	12.5
3	40.8	-29.1	108.3	21.9
3	40.8	-35.8	115.0	30.7
3	40.8	-34.8	114.0	25.6
3	40.8	-37.4	116.6	35.1
3	40.8	-38.3	117.5	26.1
3	40.8	-38.4	117.6	24.4
3	40.8	-30.5	109.7	13.2
3	40.8	-19.9	99.1	9.9
3	40.8	-31.7	110.9	15.6
3	40.8	-42.5	121.7	56.0
3	40.8	-26.7	105.9	14.0
3	40.8	-27.5	106.7	17.6
3	40.8	-22.2	101.4	11.9
3	40.8	-43.7	122.9	80.3
3	40.8	-24.2	103.4	15.2
3	40.8	-26.5	105.8	18.3
3	40.8	-28.7	107.9	17.5
3	40.8	-23.1	102.4	14.1
3	40.8	-29.8	109.1	17.5

Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

3	40.8	-33.0	112.2	30.5
3	40.8	-41.9	121.1	32.4
3	40.8	-21.2	100.5	12.5
3	40.8	-29.8	109.1	21.2
3	40.8	-36.3	115.5	24.4
3	40.8	-26.9	106.1	13.3
3	40.8	-32.3	111.6	17.0
3	40.8	-22.1	101.3	13.3
3	40.8	-29.0	108.2	19.9
3	40.8	-20.9	100.1	9.1
3	40.8	-45.9	125.1	28.7
3	40.8	-25.8	105.0	15.2
3	40.8	-35.0	114.2	19.5
3	40.8	-29.7	108.9	24.2
3	40.8	-25.1	104.4	15.9
3	40.8	-37.8	117.0	32.4
3	40.8	-14.1	93.3	3.0
3	40.8	-36.1	115.3	30.0
3	40.8	-43.7	122.9	12.3
3	40.8	-46.2	125.5	11.0
3	40.8	-20.8	100.0	11.9
3	40.8	-56.1	135.3	78.3
3	40.8	-33.1	112.3	19.3
3	40.8	-43.4	122.6	36.7
3	40.8	-28.7	107.9	16.4
3	40.8	-37.9	117.1	13.8

Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

3	40.8	-48.3	127.5	39.5
3	40.8	-26.0	105.2	13.7
3	40.8	-21.6	100.8	11.7
3	40.8	-20.1	99.3	2.0
3	40.8	-31.1	110.3	12.9
3	40.8	-22.3	101.6	11.1
3	40.8	-22.3	101.5	11.3
3	40.8	-42.6	121.8	9.9
3	40.8	-29.8	109.0	21.9
3	40.8	-20.3	99.5	10.6
3	40.8	-25.0	104.2	9.2
3	40.8	-19.6	98.8	9.4
3	40.8	-42.7	122.0	34.0
3	40.8	-30.1	109.4	7.1
3	40.8	-34.2	113.4	15.7
3	40.8	-26.6	105.8	4.8
3	40.8	-23.7	102.9	14.7
3	40.8	-27.5	106.7	14.3
3	40.8	-25.0	104.2	9.9
3	40.8	-27.5	106.8	5.2
3	40.8	-29.1	108.3	13.5
3	40.8	-33.9	113.1	15.1

Πίνακας 2: Δείγμα των τριών πρώτων στιγμιότυπων του DIRPDPInfo.txt

T-R Separation Distance (m)	Received Power (dBm)	Path Loss (dB)	RMS Delay Spread (ns)	K-Factor (dB)
-----------------------------	----------------------	----------------	-----------------------	---------------

Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

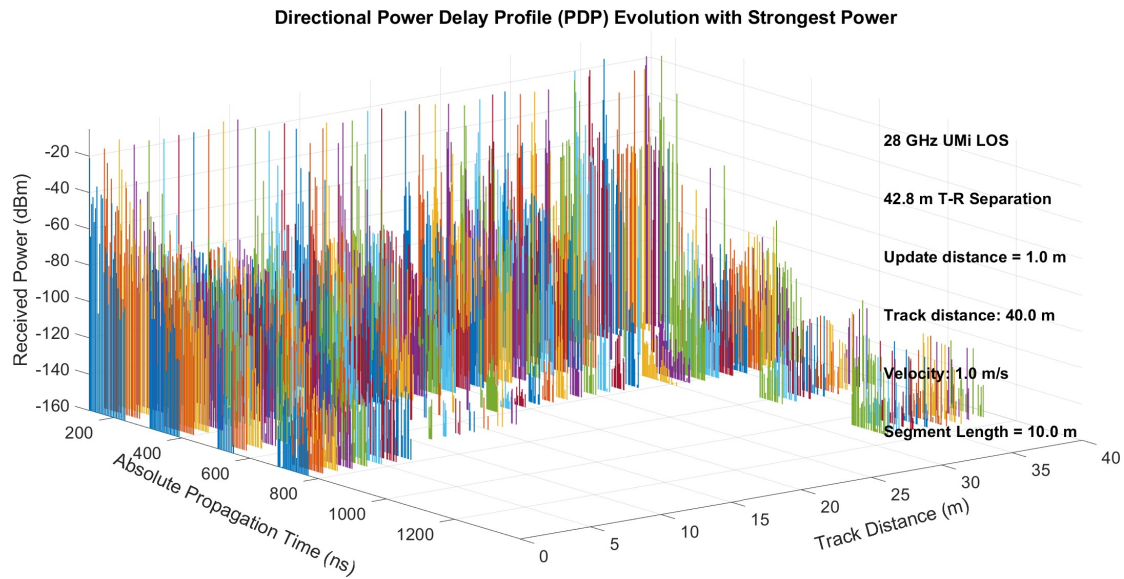
39.1	-59.8	89.8	15.0	1.0
40.0	-59.8	89.8	19.1	5.2
40.8	-59.8	89.8	14.9	0.9
41.7	-59.9	89.9	17.8	5.4
42.6	-59.7	89.7	17.2	4.1
43.4	-59.3	89.3	17.7	5.2
44.3	-59.5	89.5	16.3	3.8
45.2	-59.3	89.3	21.3	3.7
46.1	-59.1	89.1	17.0	3.4
47.0	-59.1	89.1	18.8	1.9
47.8	-59.2	89.2	17.8	2.0
48.7	-58.9	88.9	10.0	3.9
49.5	-58.5	88.5	14.6	2.4
50.4	-57.9	87.9	8.3	4.3
51.2	-57.7	87.7	17.5	5.0
52.1	-57.6	87.6	20.9	3.4
52.9	-57.8	87.8	13.4	3.6
53.8	-58.0	88.0	18.0	4.9
54.7	-58.5	88.5	19.9	6.2
55.6	-59.0	89.0	16.5	0.2
56.4	-59.5	89.5	27.2	0.7
56.5	-59.5	89.5	27.1	2.9
56.5	-59.9	89.9	24.4	1.7
56.6	-59.9	89.9	17.2	0.8
56.7	-59.9	89.9	20.7	2.7
56.8	-60.1	90.1	20.6	5.4

Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

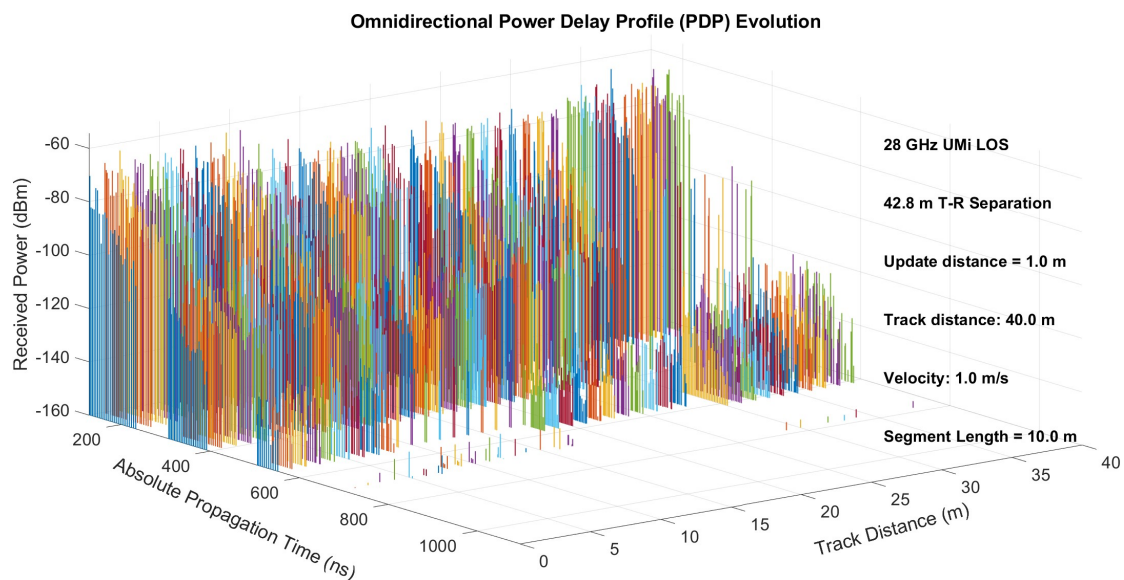
57.0	-60.5	90.5	18.6	2.2
57.1	-60.9	90.9	18.7	0.5
57.3	-61.3	91.3	21.8	0.4
57.5	-61.9	91.9	19.2	4.5
57.7	-62.6	92.6	18.8	4.5
56.9	-62.6	92.6	11.8	4.0
56.2	-62.3	92.3	18.0	5.8
55.5	-62.2	92.2	19.2	3.6
54.8	-62.2	92.2	15.1	4.6
54.1	-62.2	92.2	7.8	5.4
53.4	-62.2	92.2	17.0	5.0
52.7	-62.5	92.5	17.0	6.6
52.0	-63.2	93.2	13.1	1.3
51.3	-63.1	93.1	12.2	2.9

Πίνακας 3: OmniPDPInfo.txt

Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτουν η εικόνα 15 και η εικόνα 16 για διαδοχικά κατευθυντικά και πανκατευθυντικά PDP αντίστοιχα.



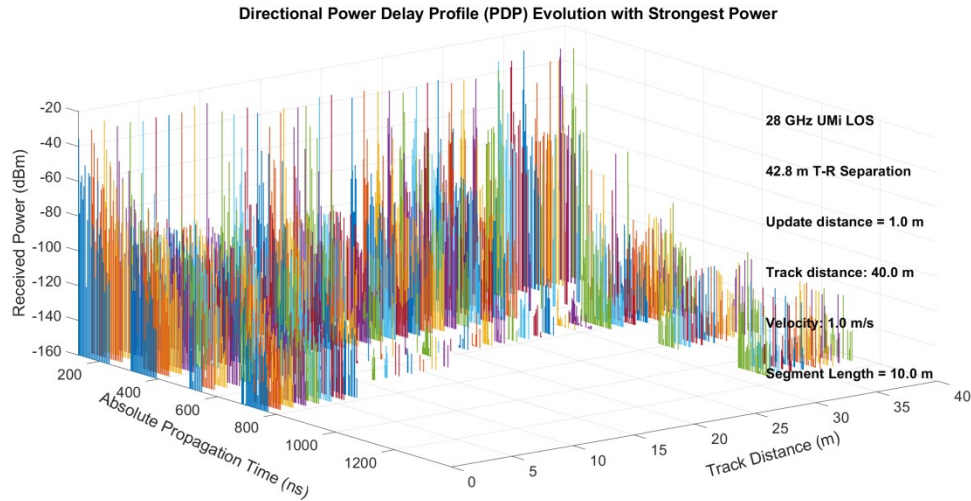
Εικόνα 15: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με co-pol.



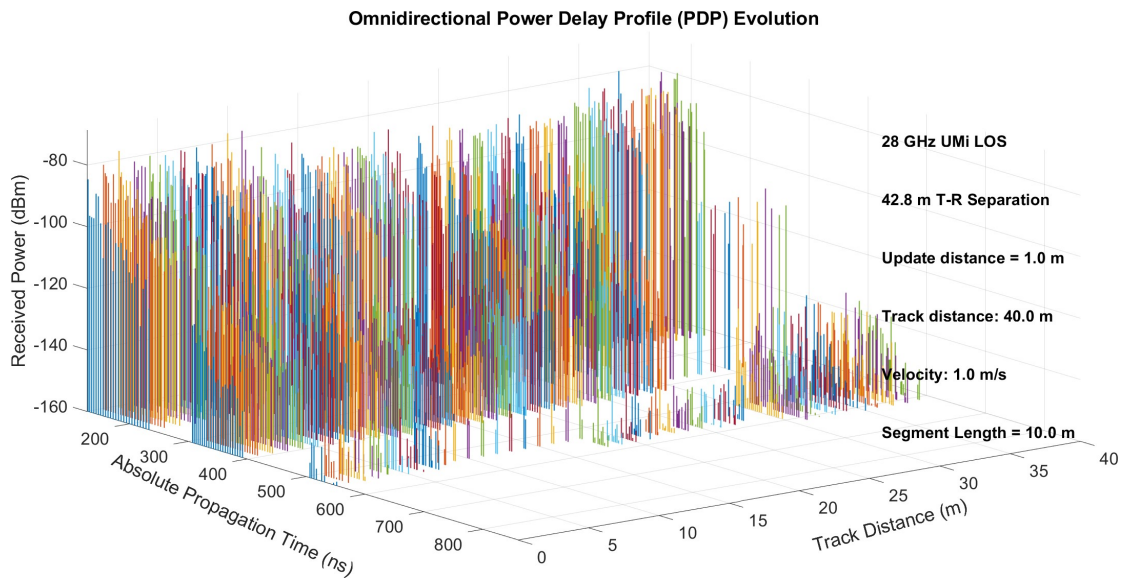
Εικόνα 16: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP με co-pol.

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ότι η ισχύς στον δέκτη είναι πολύ μεγαλύτερη σε κατευθυντική κεραία.

Αλλάζοντας την πόλωση από co-pol (συμπόλωση) σε x-pol(διασταυρούμενη πόλωση) στο ίδιο περιβάλλον (LOS) και με όλους τους παραπάνω παραμέτρους ίδιους προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα(εικόνα 17 και 18) για κατευθυντικά και πανκατευθυντικά PDP.



Εικόνα 17: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με x-pol.

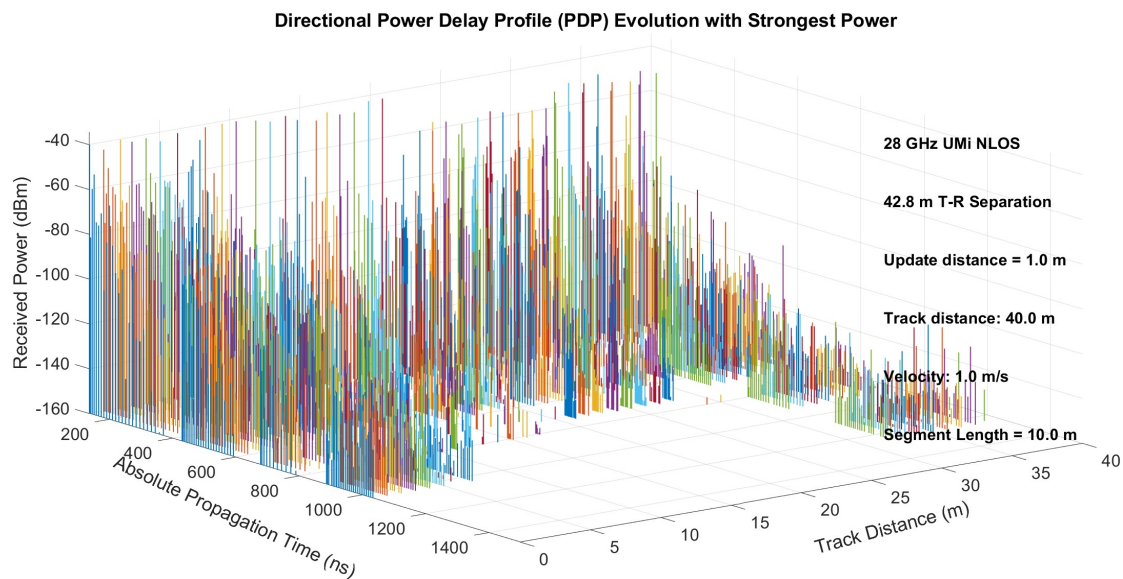


Εικόνα 18: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP με x-pol.

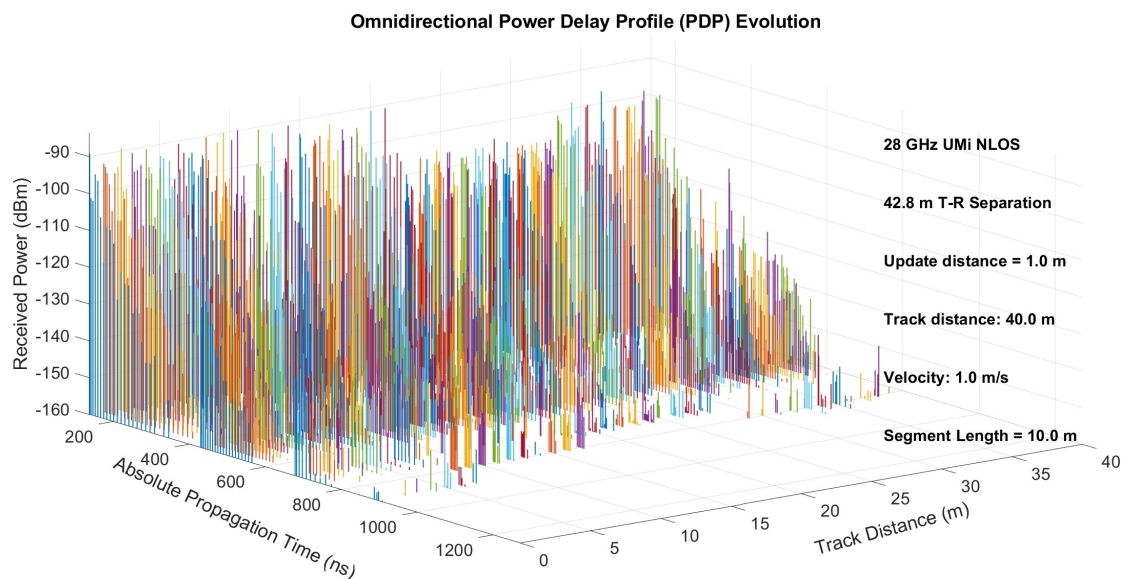
Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις, δηλαδή χρησιμοποιώντας διαφορετική πόλωση, την μία φορά συμπίλωση και την δεύτερη φορά διασταυρούμενη πόλωση, βρισκόμενοι στο ίδιο περιβάλλον με οπτική επαφή (LOS) και διατηρώντας την ίδια απόσταση πομπού με δέκτη, παρατηρούμε μία μικρή εξασθένηση ισχύς του σήματος στο δέκτη.

Λαμβάνοντας υπόψη τον δυνητικά τεράστιο αριθμό αρχείων υπό λειτουργία χωρικής συνέπειας, οι επιλογές πολλαπλής πόλωσης “Co/X-Pol” και “All Pol”, δημιουργούν μόνο συμπολωμένα κανάλια στις προσομοιώσεις χωρικής συνέπειας.

Θεωρώντας σε μία πόλη ότι ένας χρήστης (πεζός) κινείται 40m σε εξάγωνη τροχιά, με μήκος 10m. Χωρίς να έχει οπτική επαφή (δηλαδή διαδρομή του χρήστη να περιλαμβάνει κτίρια, δέντρα, λόφους, βουνά κ.α.) με τον σταθμό βάσης πραγματοποιήσαμε την προσομοίωση με συμπόλωση για κατευθυντικά (Εικόνα 19) και πανκατευθυντικά (εικόνα 20) PDP.



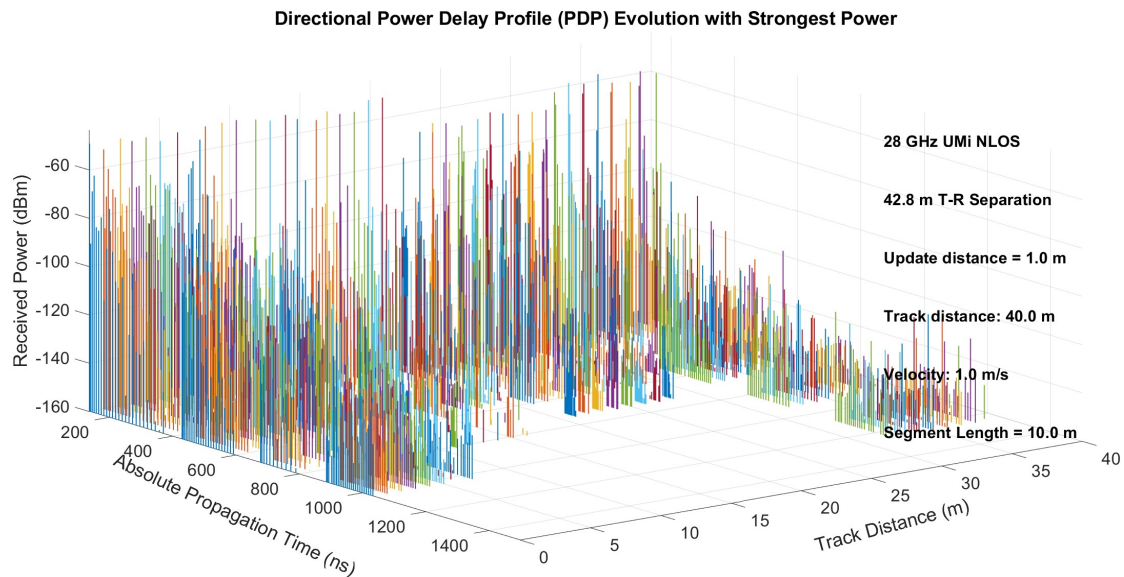
Εικόνα 19: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με co-pol, σε περιβάλλον NLOS.



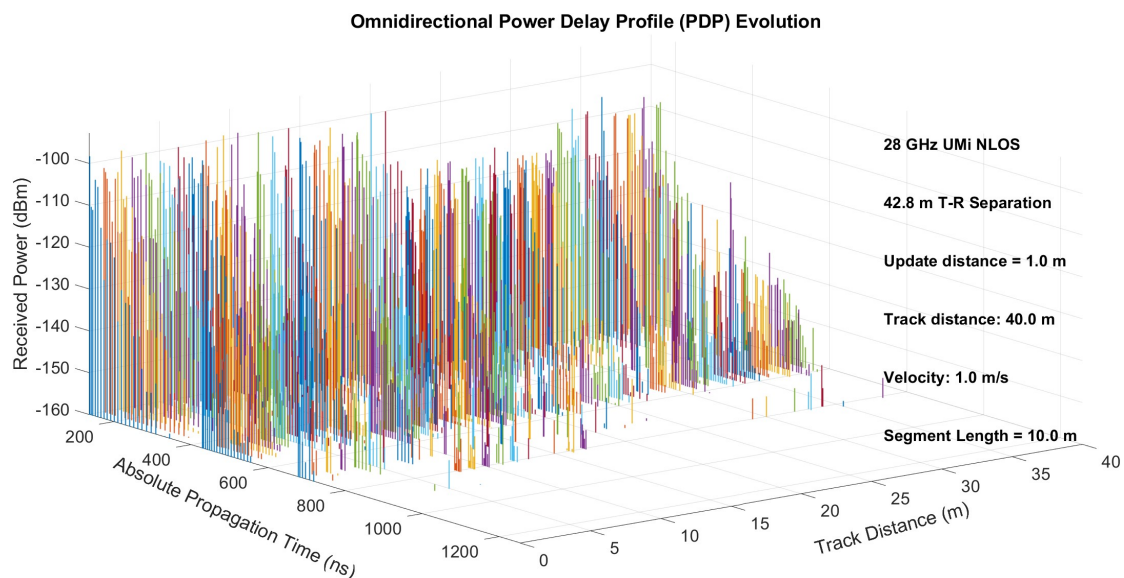
Εικόνα 20: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP με co-pol, σε περιβάλλον NLOS.

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ότι η ισχύς στον δέκτη είναι μεγαλύτερη σε κατευθυντική κεραία.

Αλλάζοντας την πόλωση από co-pol (συμπόλωση) σε x-pol(διασταυρούμενη πόλωση) στο ίδιο περιβάλλον (NLOS) και με όλους τους παραπάνω παραμέτρους ίδιους προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα για κατευθυντικά και πανκατευθυντικά PDP αντίστοιχα.



Εικόνα 21: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με x-pol, σε περιβάλλον NLOS .



Εικόνα 22: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP με x-pol, σε περιβάλλον NLOS.

Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις, δηλαδή χρησιμοποιώντας διαφορετική πόλωση, την μία φορά συμπόλωση και την δεύτερη φορά διασταυρούμενη πόλωση, βρίσκόμενοι στο ίδιο περιβάλλον χωρίς οπτική επαφή (NLOS) και διατηρώντας την ίδια απόσταση πομπού με δέκτη, παρατηρούμε μία μικρή εξασθένηση ισχύς του σήματος στο δέκτη.

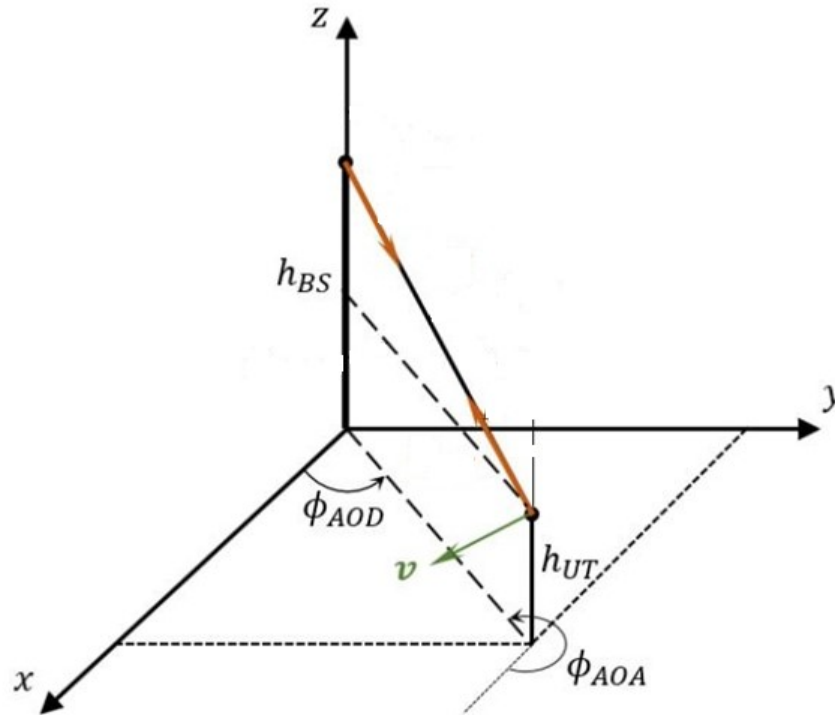
4.2 2^η Περίπτωση

Έστω σε μία πόλη ότι ένας χρήστης (πεζός) κινείται σε εξάγωνη τροχιά έχοντας οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης για να δούμε πως επηρεάζει το αζιμούθιο το σήμα μας επιλέγουμε τα δύο σετ κεραιών TX και RX με HPBW 7° και 60°. Σε σενάριο UMi στα 28GHz. Η απόσταση διαχωρισμού TR κυμαίνεται από 10-50m.

Half Power Beamwidth: Το πλάτος δέσμης του κύριου λοβού είναι ο γωνιακός τομέας, μέσα στον κύριο λοβό του σχεδίου ακτινοβολίας της κεραίας, μέσα στον οποίο βρίσκεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του σήματος. Η τιμή μετράται στο σημείο όπου το σήμα μειώνεται κατά το ήμισυ της ισχύος, που αντιστοιχεί σε μείωση κατά 3 dB.

Αζιμούθιο: είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κατεύθυνσης της κεραίας και της κατεύθυνσης προς τα βόρεια στο οριζόντιο επίπεδο (Εικόνα 23).

Ανύψωση: είναι η κλίση της κεραίας σε σχέση με ορίζοντα στο κατακόρυφο επίπεδο.



Εικόνα 23: Αζιμούθιο

Ενημέρωση γωνιών: Κάθε MPC έχει τέσσερις γωνίες, τη γωνία αναχώρησης αζιμούθιο (AOD), τη γωνία αναχώρησης του ζενίθ (ZOD), τη γωνία άφιξης του αζιμούθιου (AOA) και τη γωνία άφιξης του ζενίθ (ZOA). Ένα στοιχείο LOS μπορεί απλά να ενημερωθεί χρησιμοποιώντας γεωμετρία με βάση τις θέσεις BS και UT και την ταχύτητα και την κατεύθυνση κίνησης UT.

- Σενάριο: UMi
- Συχνότητα: 28GHz
- Εύρος Ζώνης RF: 800MHz
- Εύρος απόστασης: Standard (10-500m)
- Περιβάλλον: LOS
- Κάτω όριο απόστασης διαχωρισμού T-R(m):10m
- Άνω όριο απόστασης διαχωρισμού T-R(m):50m
- Ισχύς TX: 30dBm
- Ύψος σταθμού βάσης:3m(αγνοείται για σενάριο UMi)
- Ύψος τερματικού χρήστη: 1,5 m
- Βαρομετρική πίεση: 1013,25mbar
- Υγρασία:50 %
- Θερμοκρασία:20 °C
- Πόλωση: Co-Pol
- Ρυθμός βροχής: 0
- Απώλεια φυλλώματος: όχι
- Απόσταση στο φύλλωμα: 0

- Απόσβεση φυλλώματος: 0,4 dBm
- Απώλεια διείσδυσης από εξωτερικό σε εσωτερικό(O2I)
- Τύπος συστοιχίας TX: ULA
- Τύπος συστοιχίας RX: ULA
- Αριθμός στοιχείων κεραίας TX N_t : 1
- Αριθμός στοιχείων κεραίας RX N_r : 1
- Διάστημα κεραίας TX: 0,5
- Διάστημα κεραίας RX: 0,5
- Αριθμός στοιχείων κεραίας TX ανά γραμμή W_t : 1
- Αριθμός στοιχείων κεραίας RX ανά γραμμή W_r : 1
- Αξιμούθιο TX κεραίας HPBW: 7°
- Αξιμούθιο RX κεραίας HPBW: 7°
- Ανύψωση TX κεραίας HPBW: 10°
- Ανύψωση RX κεραίας HPBW: 10°

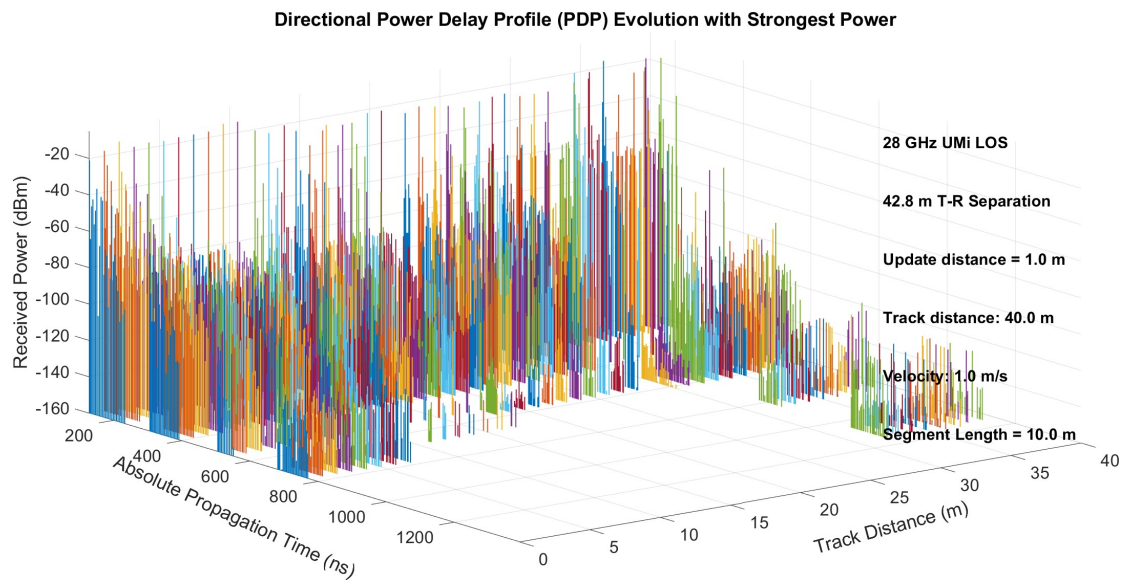
Θέτοντας την Χωρική συνέπεια : On

- Απόσταση συσχέτισης ξεθωριάσματος σκιάς: 10m
- Απόσταση συσχέτισης LOS/NLOS συνθήκης: 15m
- Τύπος κομματιού χρήστη: εξάγωνο
- Απόσταση διαδρομής: 40m
- Ενημέρωση απόστασης: 1m
- Κατεύθυνση κίνησης: 45°
- Ταχύτητα χρήστη: 1 m/s
- Μήκος πλευράς: 10 m
- Προσανατολισμός: φορά ρολογιού
- Μεταβάσεις τμημάτων: Ναι

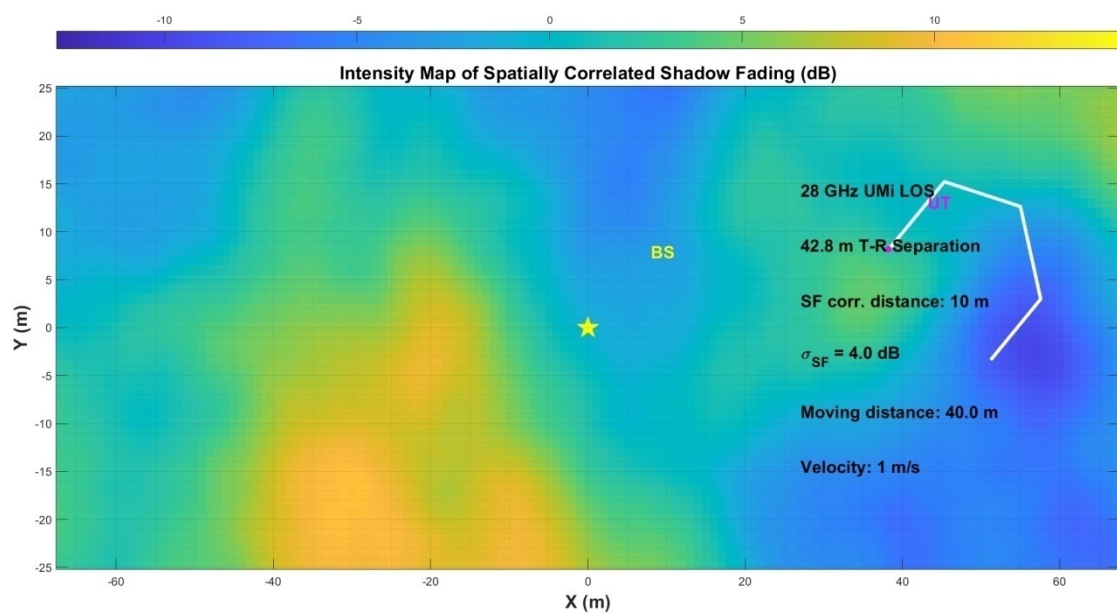
Ανθρώπινο Μπλοκάρισμα : On

- Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για το ανθρώπινο μπλοκάρισμα: όχι
- Μέση εξασθένηση: 14,4 dB
- Ρυθμός μετάβαση από μη σκιασμένη κατάσταση σε κατάσταση αποσύνθεσης: 0,2 /sec
- Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση αποσύνθεσης σε σκιασμένη κατάσταση: 8,1 /sec
- Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση σκιασμένη σε κατάσταση ανόδου: 7,8 /sec
- Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση ανόδου σε μη σκιασμένη κατάσταση: 6,7 /sec

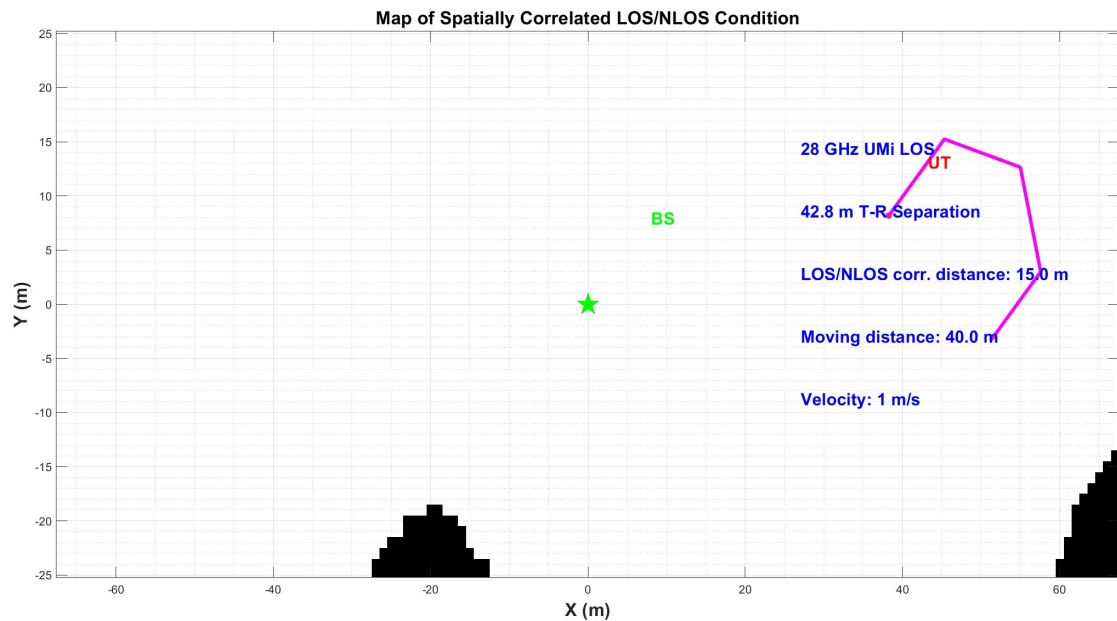
Θέτοντας τους παραπάνω παραμέτρους στο περιβάλλον GUI του NYUSIM έχουμε τα εξής αποτελέσματα:



Εικόνα 24: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με αζιμούθιο 7° .

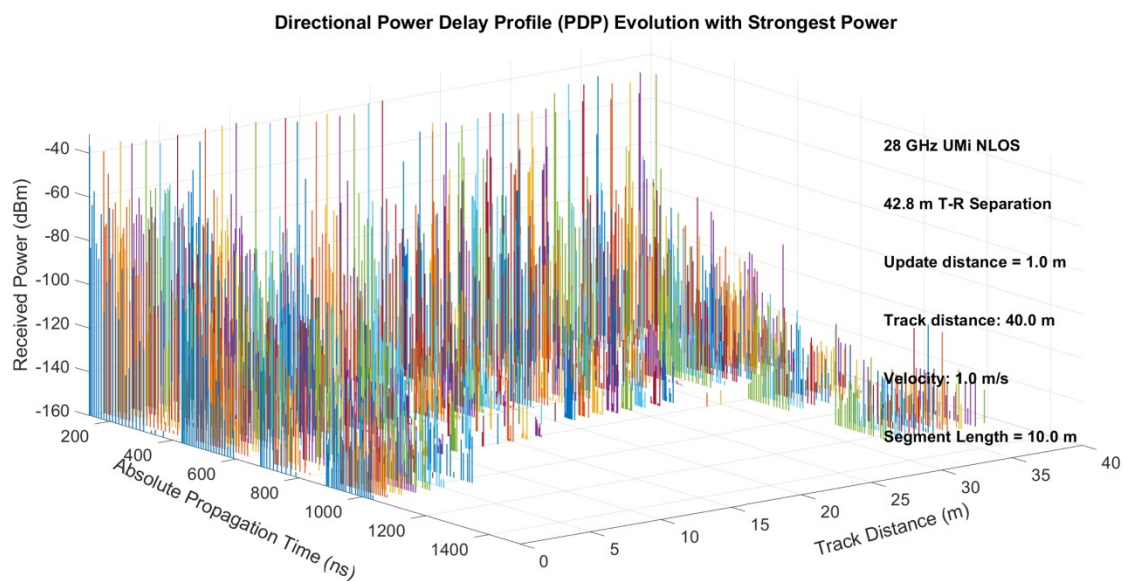


Εικόνα 25: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωιάζει με τις θέσεις BS και UT. Η απόσταση διαχωρισμού είναι 42,8m.

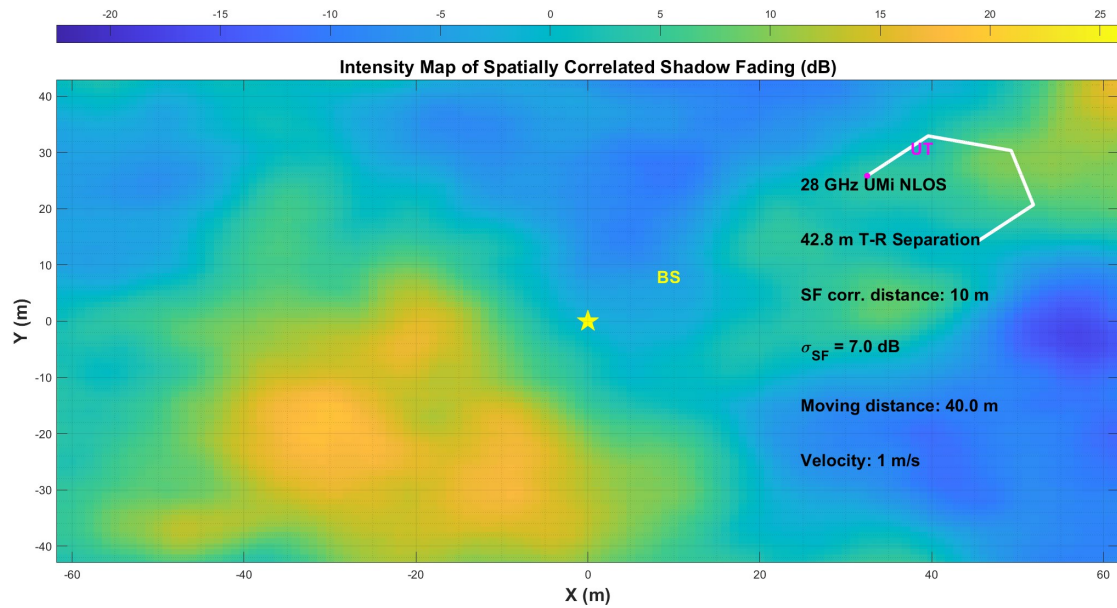


Εικόνα 26: Χάρτης χωρικά συσχετισμένων συνθηκών LOS/NLOS

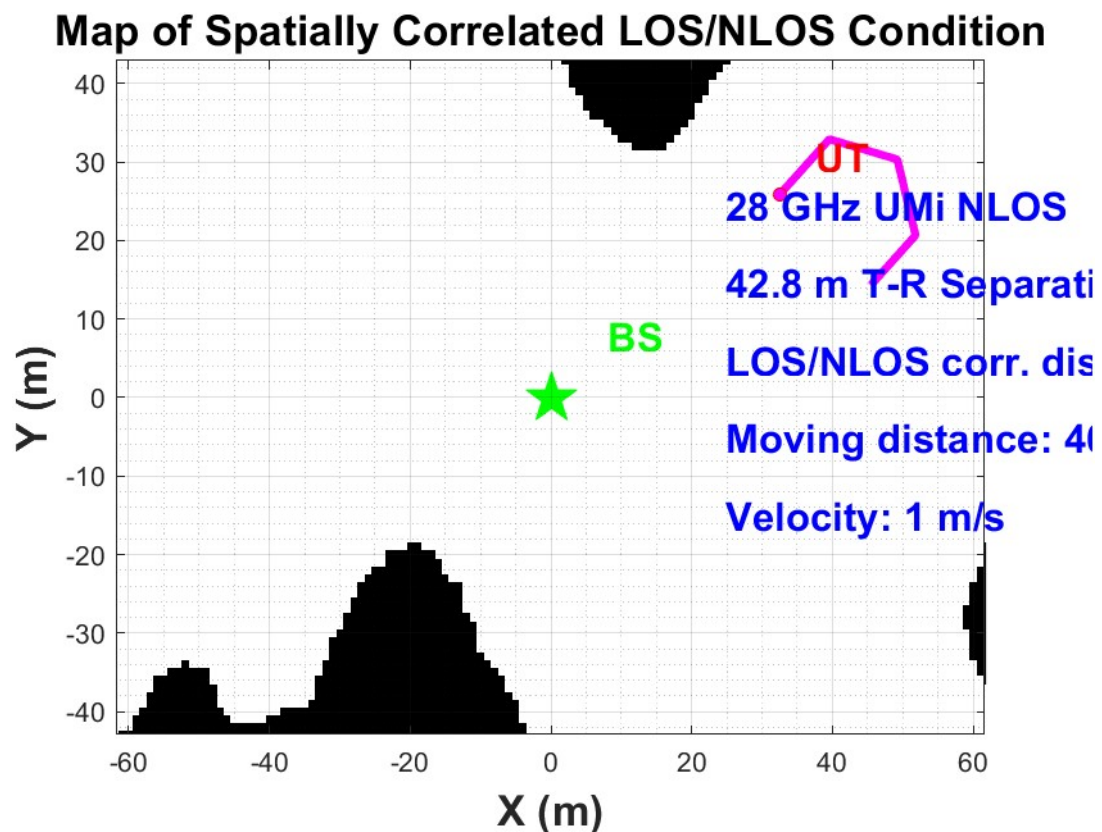
Το λευκό αντιπροσωπεύει το LOS ενώ το μαύρο αντιπροσωπεύει το NLOS. Η απόσταση συσχέτισης είναι 15m. Η ευαισθησία του χάρτη είναι 1m. Η μετάβαση των συνθηκών LOS και NLOS μπορεί να συμβεί κατά μήκος της τροχιάς UT σύμφωνα με τη θέση UT στο χάρτη.



Εικόνα 27: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με αζιμούθιο 70, σε περιβάλλον NLOS.



Εικόνα 28: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωιάζει με τις θέσεις BS και UT. Η απόσταση διαχωρισμού είναι 42,8m

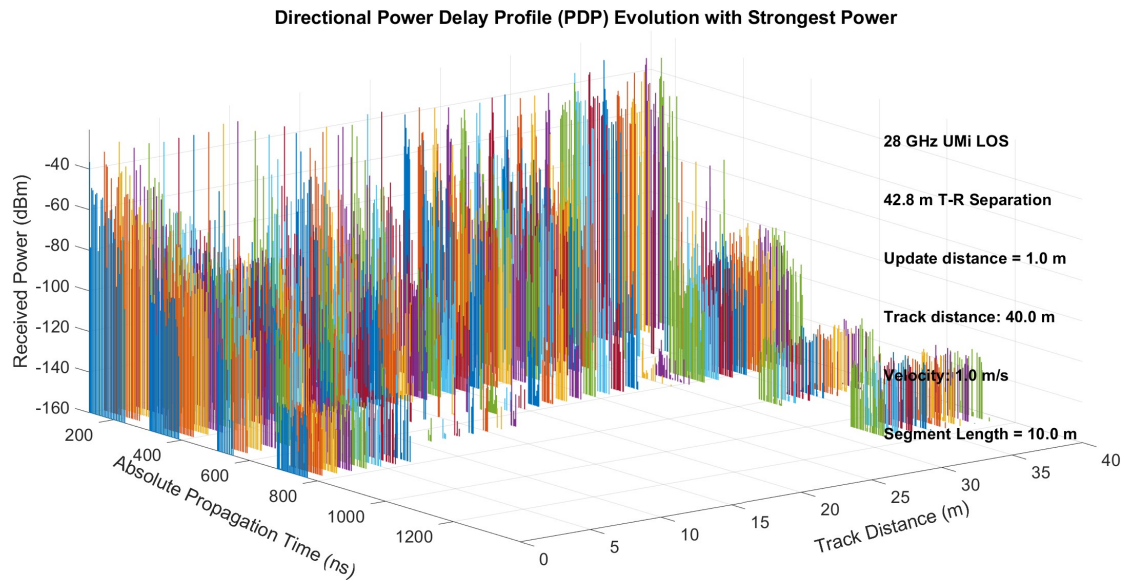


Εικόνα 29: Χάρτης χωρικά συσχετισμένων συνθηκών LOS/NLOS

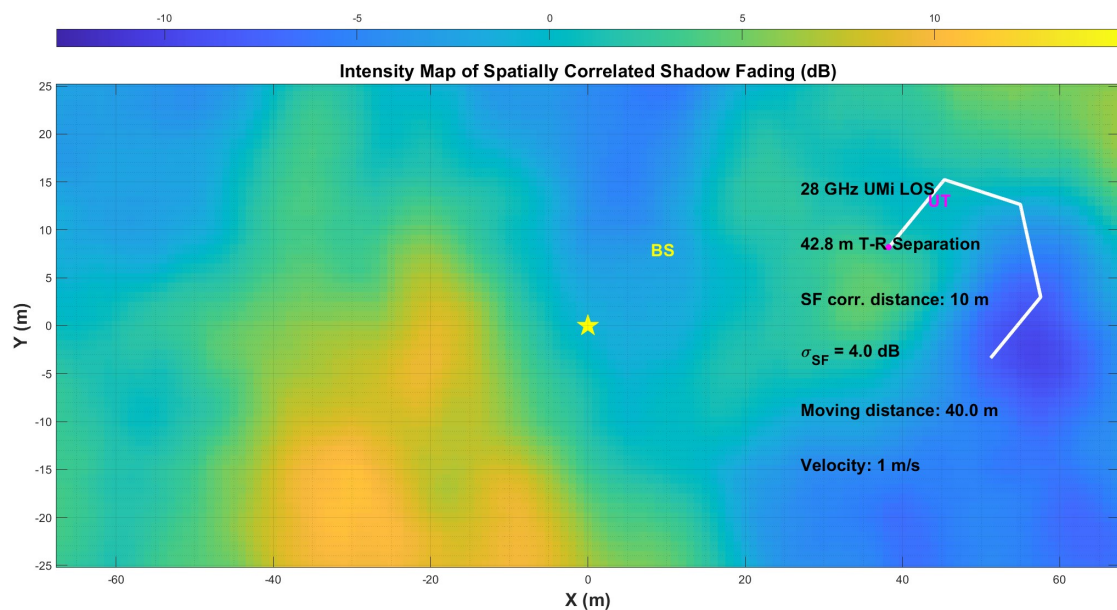
Αλλάζοντας τη γωνία αναχώρησης αζιμούθιο (AOD) και τη γωνία άφιξης του αζιμούθιου (AOA) με όλους τους παραπάνω παραμέτρους ίδιους προκύπτουν τα

παρακάτω σχήματα για κατευθυντικά PDP τη γωνία αναχώρησης αζιμούθιο (AOD), τη γωνία αναχώρησης του ζενίθ (ZOD), τη γωνία άφιξης του αζιμούθιο (AOA) σε διαφορετικά περιβάλλοντα LOS και NLOS.

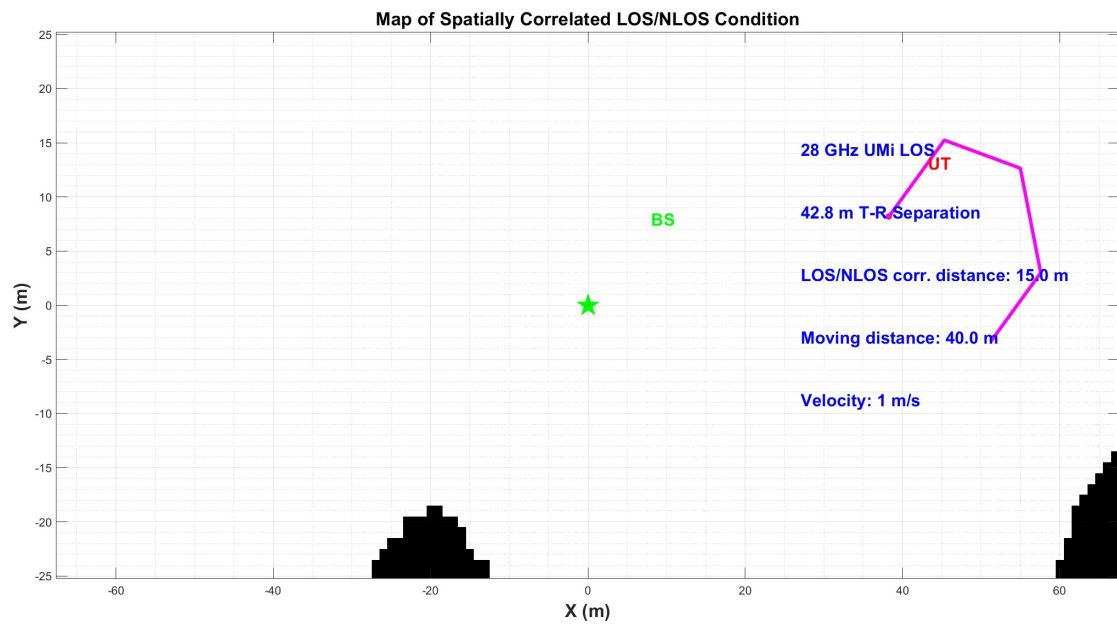
- Αζιμούθιο TX κεραίας HPBW: 60°
- Αζιμούθιο RX κεραίας HPBW: 60°



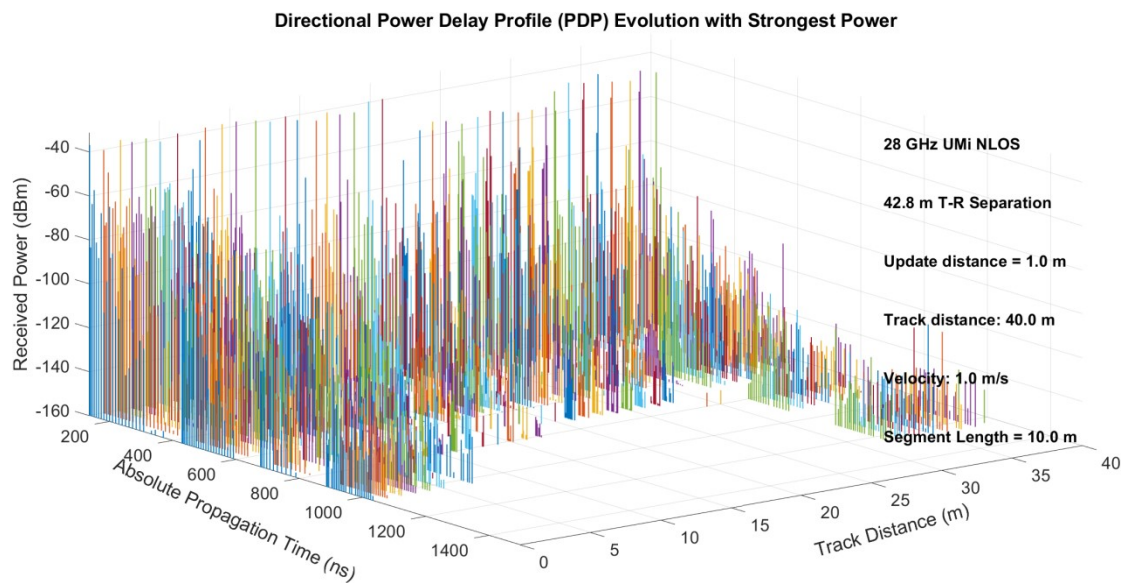
Εικόνα 30: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με αζιμούθιο 60° .



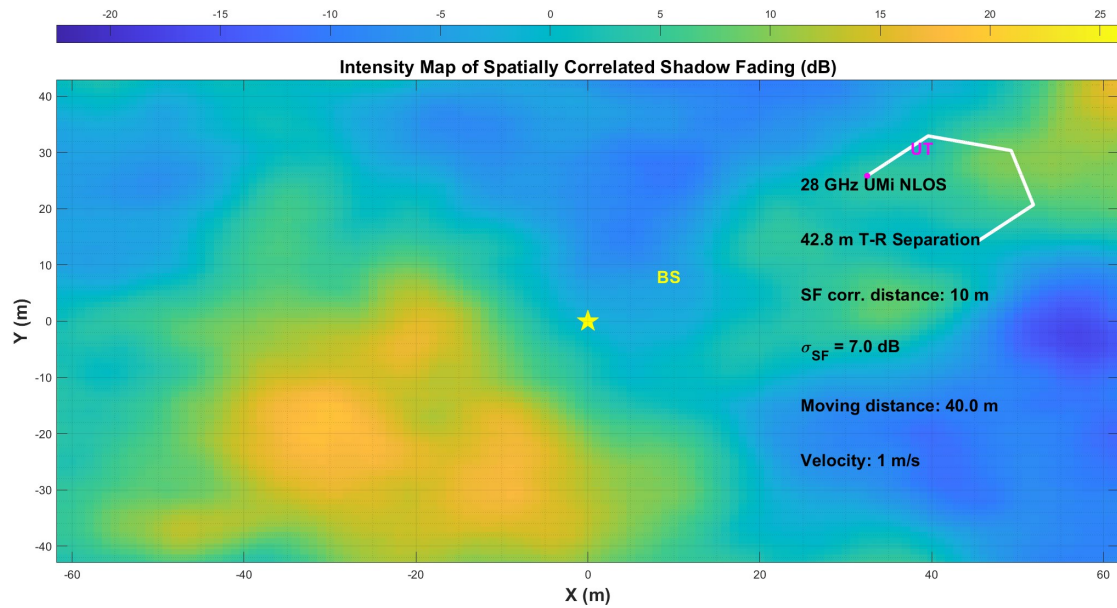
Εικόνα 31: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωριάζει με τις θέσεις BS και UT. Η απόσταση διαχωρισμού είναι 42,8m



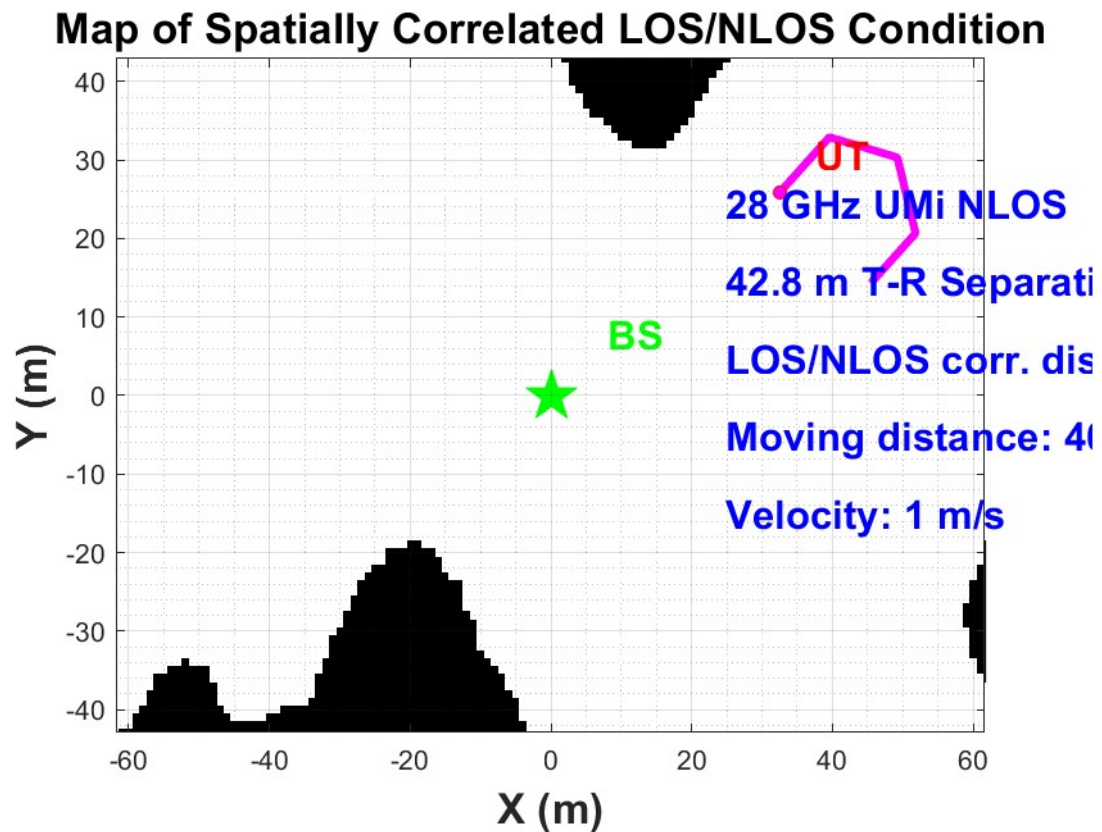
Εικόνα 32: Χάρτης χωρικά συσχετισμένων συνθηκών LOS/NLOS



Εικόνα 33: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με αζιμούθιο 60° , σε περιβάλλον NLOS.



Εικόνα 34: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωιάζει με τις θέσεις BS και UT. Η απόσταση διαχωρισμού είναι 42,8m



Εικόνα 35: Χάρτης χωρικά συσχετισμένων συνθηκών LOS/NLOS

Όταν το αζιμούθιο είναι ίδιο στον πομπό και στον δέκτη παρατηρούμε ότι η ισχύς στον δέκτη δεν επηρεάζεται. Αυτό που επηρεάζει την ισχύς στον πομπό και στον δέκτη είναι το περιβάλλον LOS/NLOS.

4.3 3^η Περίπτωση

Έστω σε μία πόλη ότι ένας χρήστης (πεζός) κινείται σε εξάγωνη τροχιά έχοντας οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης για να δούμε πως επηρεάζει το πλήθος των στοιχείων της κεραίας το σήμα μας θέτουμε τους παρακάτω παραμέτρους:

- Σενάριο: UMi
- Συχνότητα: 28GHz
- Εύρος Ζώνης RF: 800MHz
- Εύρος απόστασης: Standard (10-500m)
- Περιβάλλον: LOS
- Κάτω όριο απόστασης διαχωρισμού T-R(m):10m
- Άνω όριο απόστασης διαχωρισμού T-R(m):50m
- Ισχύς TX: 30dBm
- Ύψος σταθμού βάσης:3m(αγνοείται για σενάριο UMi)
- Ύψος τερματικού χρήστη: 1,5 m
- Βαρομετρική πίεση: 1013,25mbar
- Υγρασία:50 %
- Θερμοκρασία:20 °C
- Πόλωση: Co-Pol
- Ρυθμός βροχής: 0
- Απώλεια φυλλώματος: όχι
- Απόσταση στο φύλλωμα: 0
- Απόσβεση φυλλώματος: 0,4 dBm
- Απώλεια διείσδυσης από εξωτερικό σε εσωτερικό(O2I)
- Τύπος συστοιχίας TX: ULA
- Τύπος συστοιχίας RX: ULA
- Αριθμός στοιχείων κεραίας TX Nt:2
- Αριθμός στοιχείων κεραίας RX Nr:2
- Διάστημα κεραίας TX: 0,5
- Διάστημα κεραίας RX: 0,5
- Αριθμός στοιχείων κεραίας TX ανά γραμμή Wt: 2
- Αριθμός στοιχείων κεραίας RX ανά γραμμή Wr: 2
- Αζιμούθιο TX κεραίας HPBW:10°
- Αζιμούθιο RX κεραίας HPBW:10°
- Ανύψωση TX κεραίας HPBW:10°
- Ανύψωση RX κεραίας HPBW:10°

Θέτοντας την Χωρική συνέπεια : On

- Απόσταση συσχέτισης ξεθωριάσματος σκιάς: 10m
- Απόσταση συσχέτισης LOS/NLOS συνθήκης: 15m
- Τύπος κομματιού χρήστη: εξάγωνο
- Απόσταση διαδρομής: 40m
- Ενημέρωση απόστασης: 1m

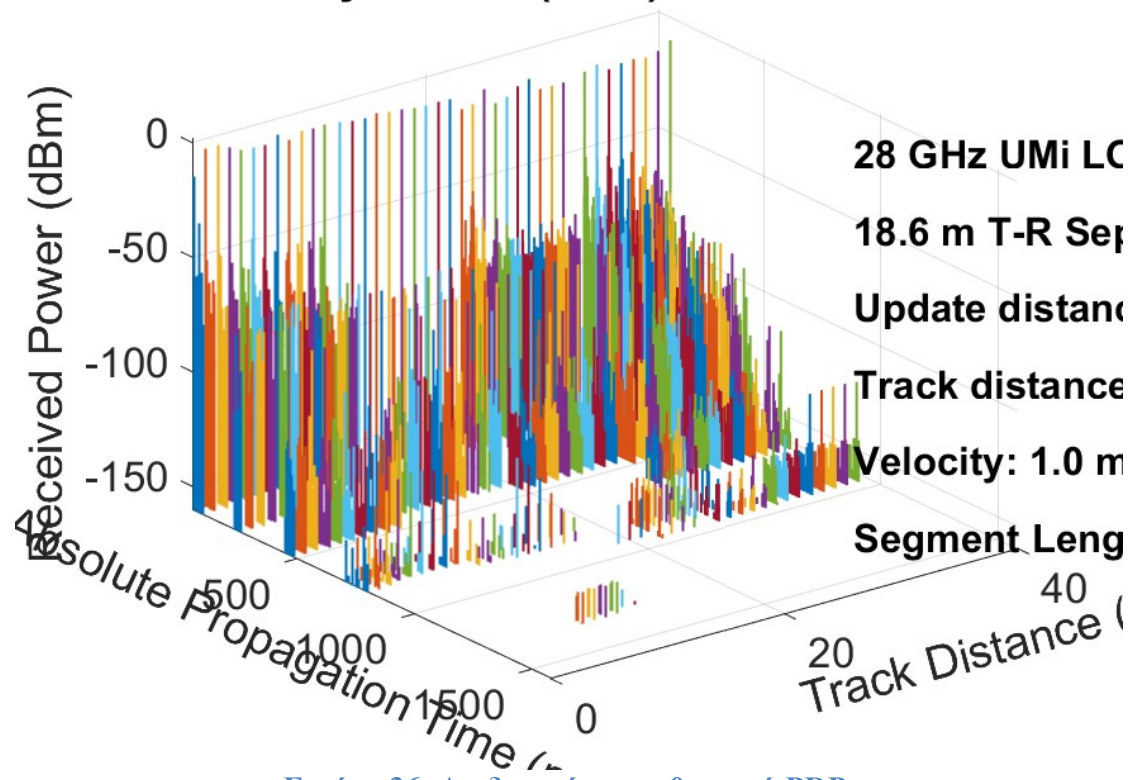
- Κατεύθυνση κίνησης: 45°
- Ταχύτητα χρήστη: 1 m/s
- Μήκος πλευράς: 10 m
- Προσανατολισμός: φορά ρολογιού
- Μεταβάσεις τμημάτων: Ναι

Ανθρώπινο Μπλοκάρισμα : On

- Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για το ανθρώπινο μπλοκάρισμα: όχι
- Μέση εξασθένηση: 14,4 dB
- Ρυθμός μετάβαση από μη σκιασμένη κατάσταση σε κατάσταση αποσύνθεσης: 0,2 /sec
- Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση αποσύνθεσης σε σκιασμένη κατάσταση: 8,1 /sec
- Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση σκιασμένη σε κατάσταση ανόδου: 7,8 /sec
- Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση ανόδου σε μη σκιασμένη κατάσταση: 6,7 /sec

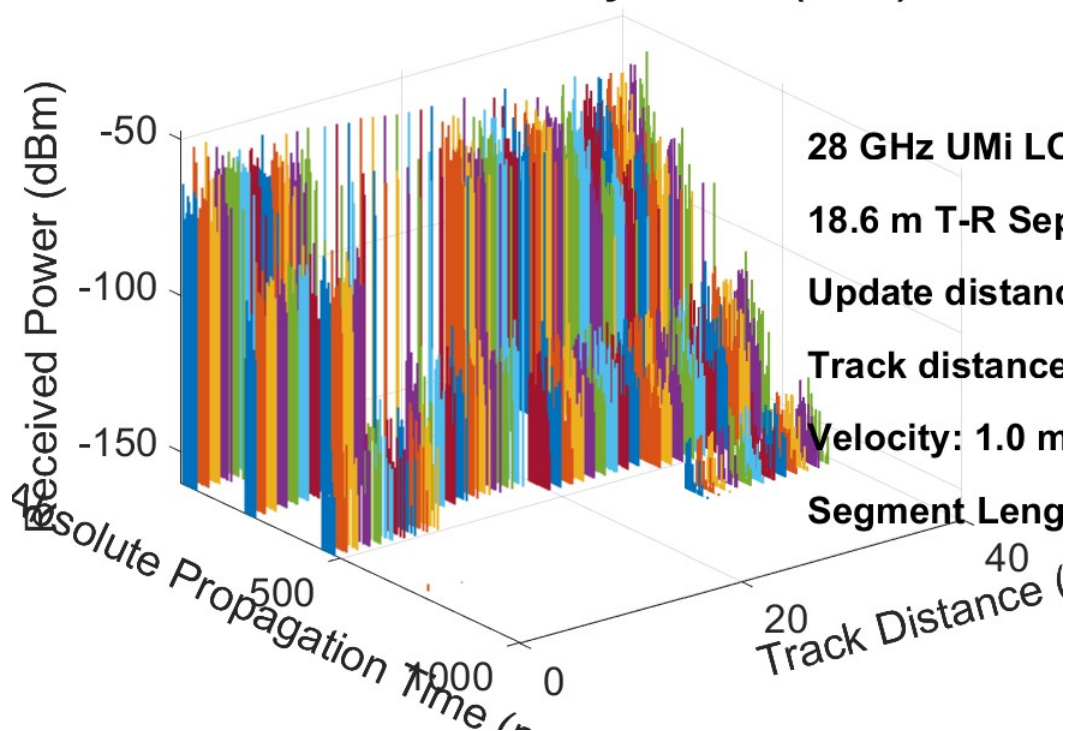
Με βάση τα αποτελέσματα προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα για απόσταση διαχωρισμού T-R 18.6m. Σε περιβάλλον LOS.

nal Power Delay Profile (PDP) Evolution with Stron



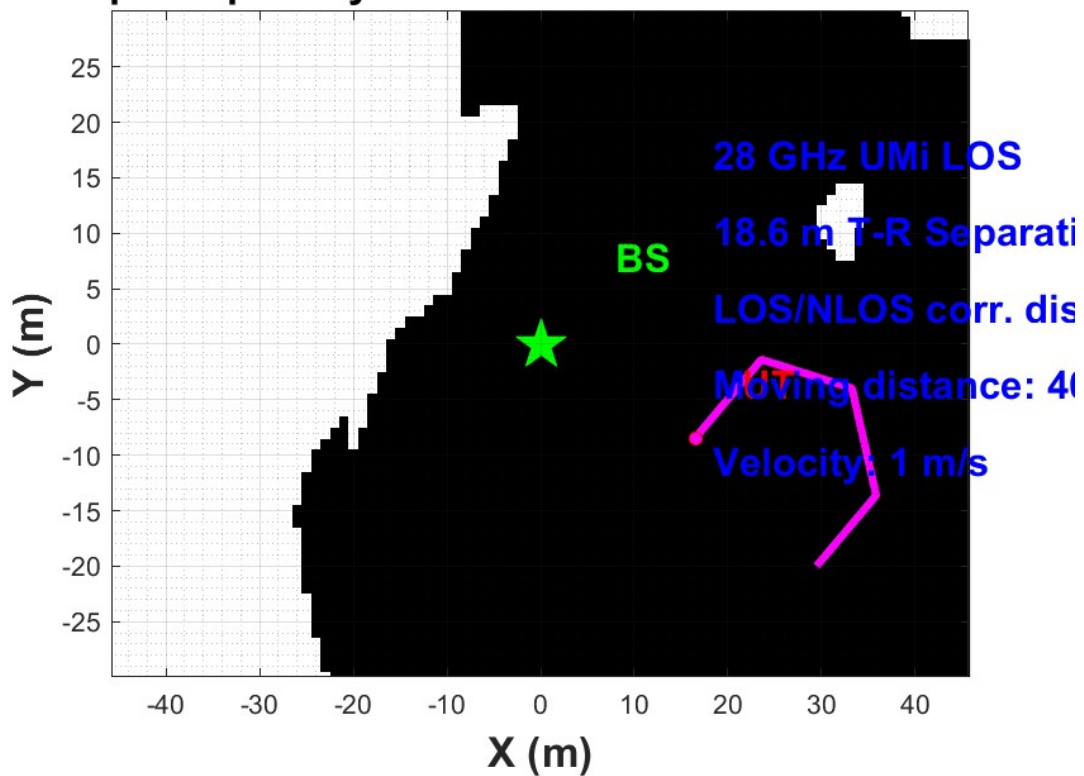
Εικόνα 36: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP

Omnidirectional Power Delay Profile (PDP) Evolution

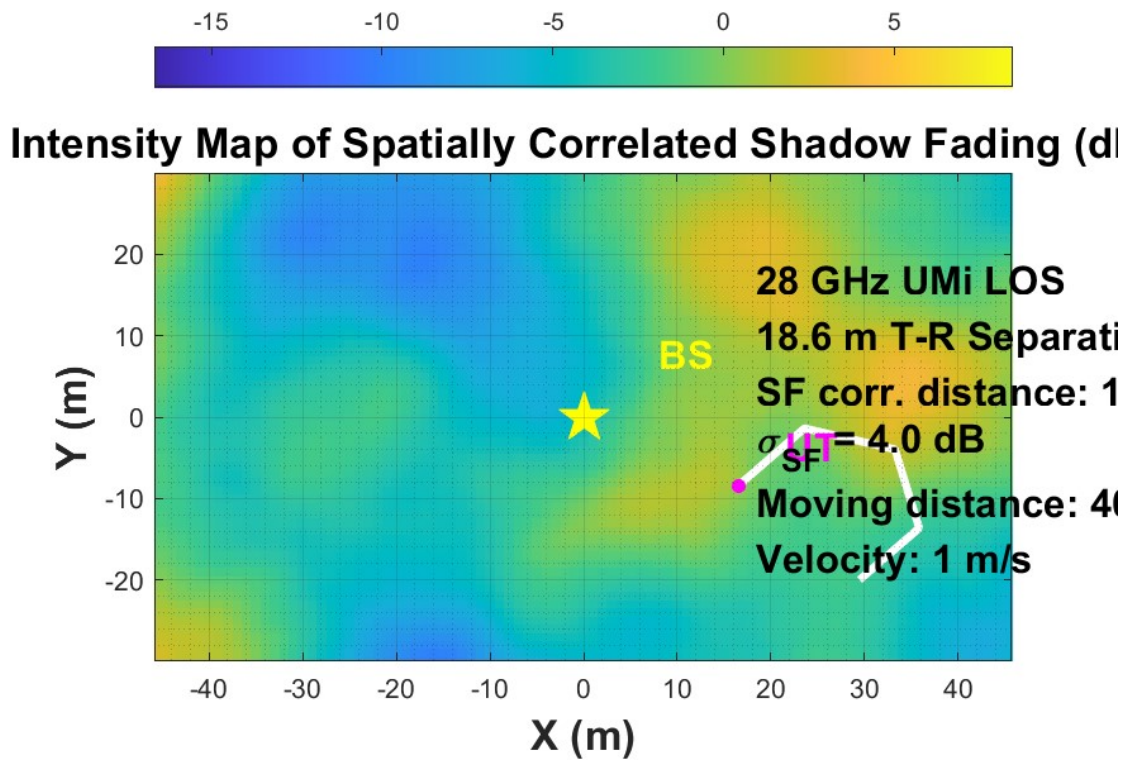


Εικόνα 37: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP

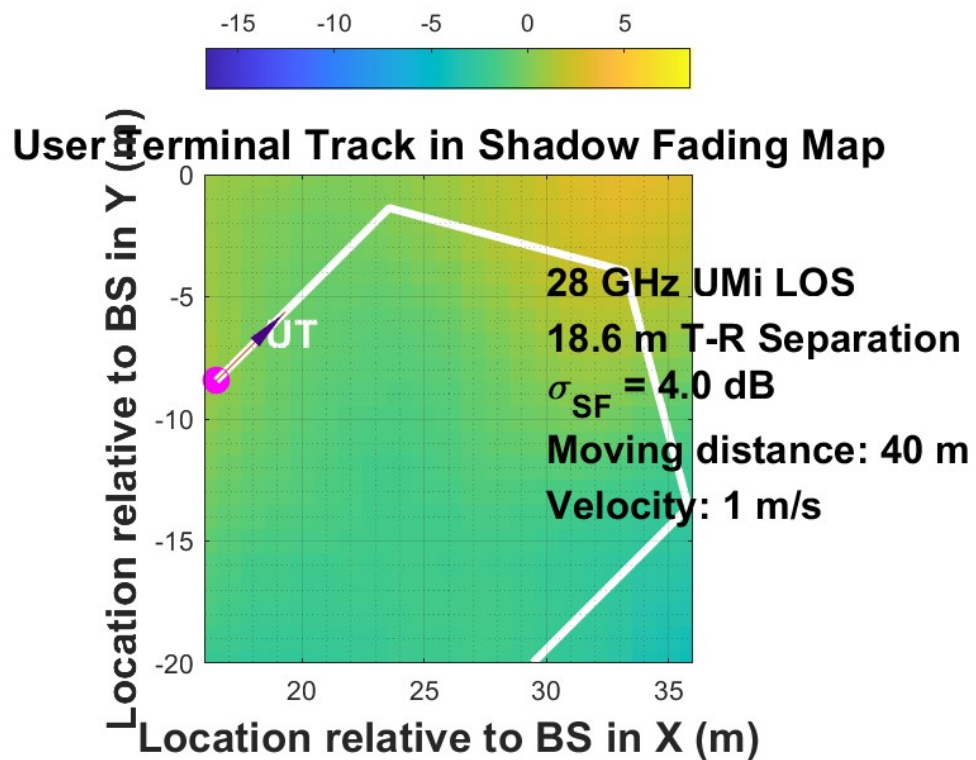
Map of Spatially Correlated LOS/NLOS Condition



Εικόνα 38: Χάρτης χωρικά συσχετισμένων συνθηκών LOS/NLOS



Εικόνα 39: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωιάζει με τις θέσεις BS και UT. Η απόσταση διαχωρισμού είναι 18,6m



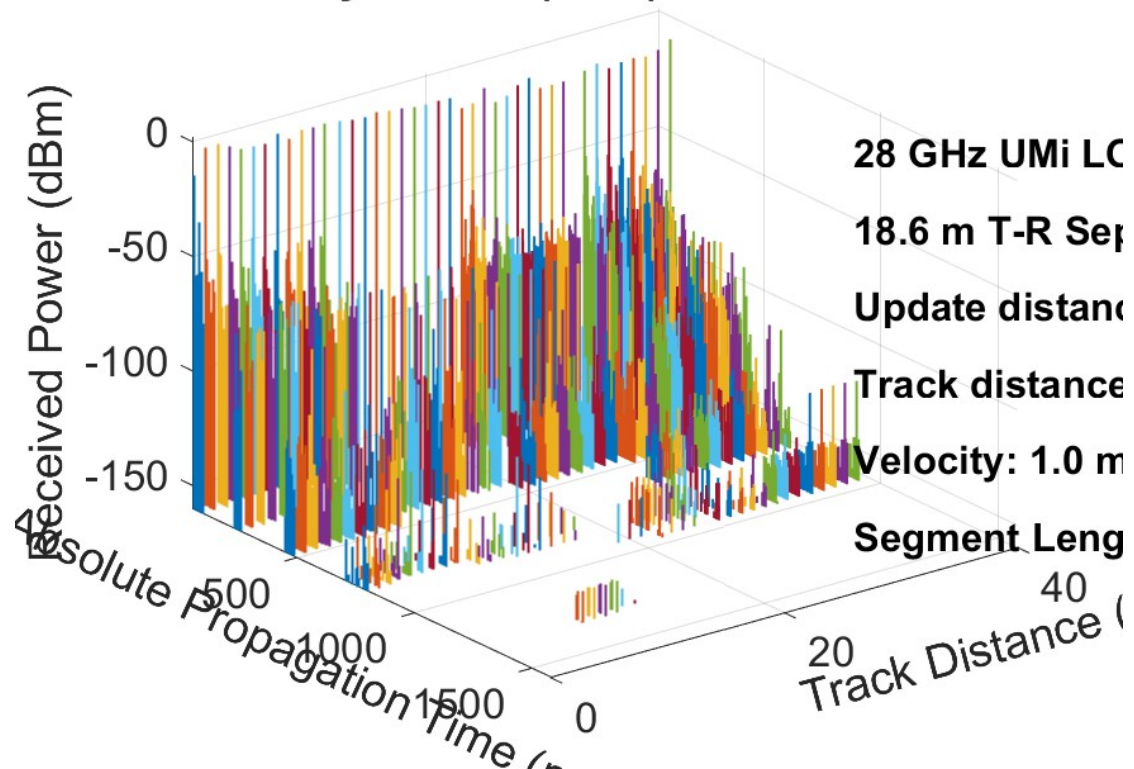
Εικόνα 40: Διαδρομή χρήστη

Βασικοί παράμετροι εισόδου

- Αριθμός στοιχείων κεραίας TX N_t :3
- Αριθμός στοιχείων κεραίας RX N_r :3
- Αριθμός στοιχείων κεραίας TX ανά γραμμή W_t : 3
- Αριθμός στοιχείων κεραίας RX ανά γραμμή W_r : 3

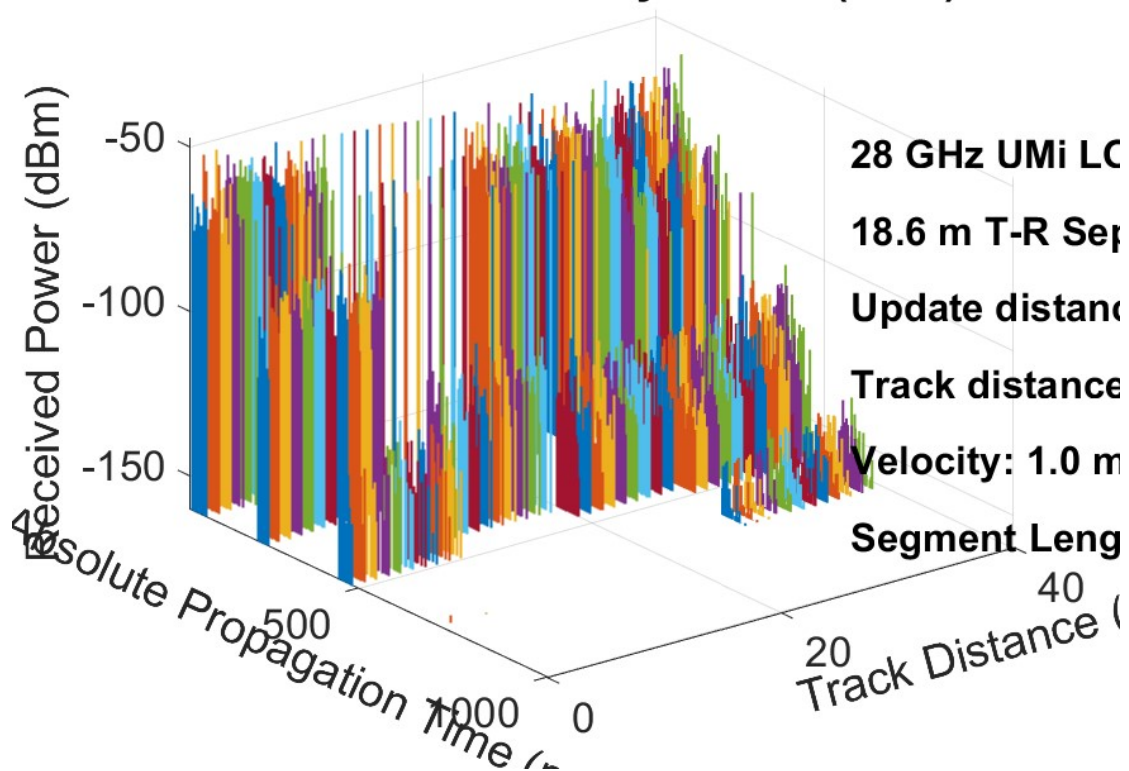
Με βάση τα αποτελέσματα προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα (εικόνα 41 και 42) για απόσταση διαχωρισμού T-R 18.6m. Σε περιβάλλον LOS.

nal Power Delay Profile (PDP) Evolution with Stron



Εικόνα 41: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP

Omnidirectional Power Delay Profile (PDP) Evolution

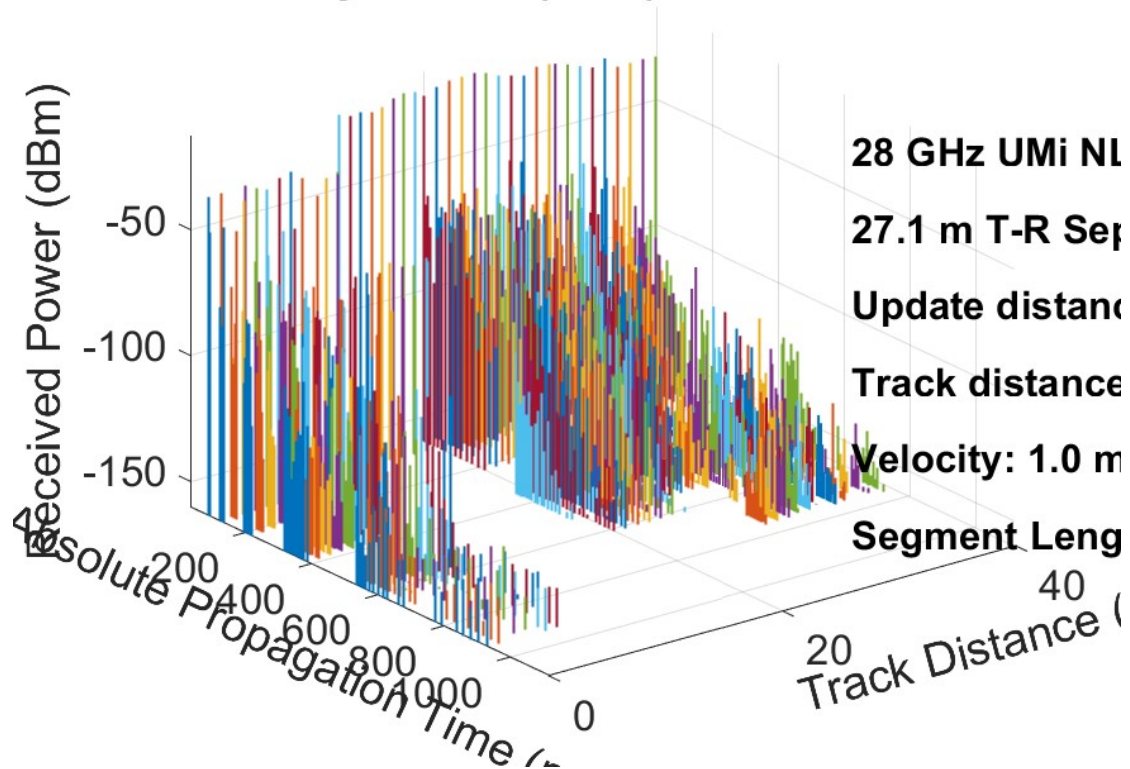


Εικόνα 42: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP

Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις, δηλαδή αλλάζοντας τα στοιχεία της κεραίας από 2 σε 3, βρισκόμενοι στο ίδιο περιβάλλον με οπτική επαφή (LOS) και διατηρώντας την ίδια απόσταση πομπού με δέκτη 18,6, δεν παρατηρούμε κάποια αλλαγή στην ισχύ του δέκτη στα κατευθυντικά και πανκατευθυντικά PDP.

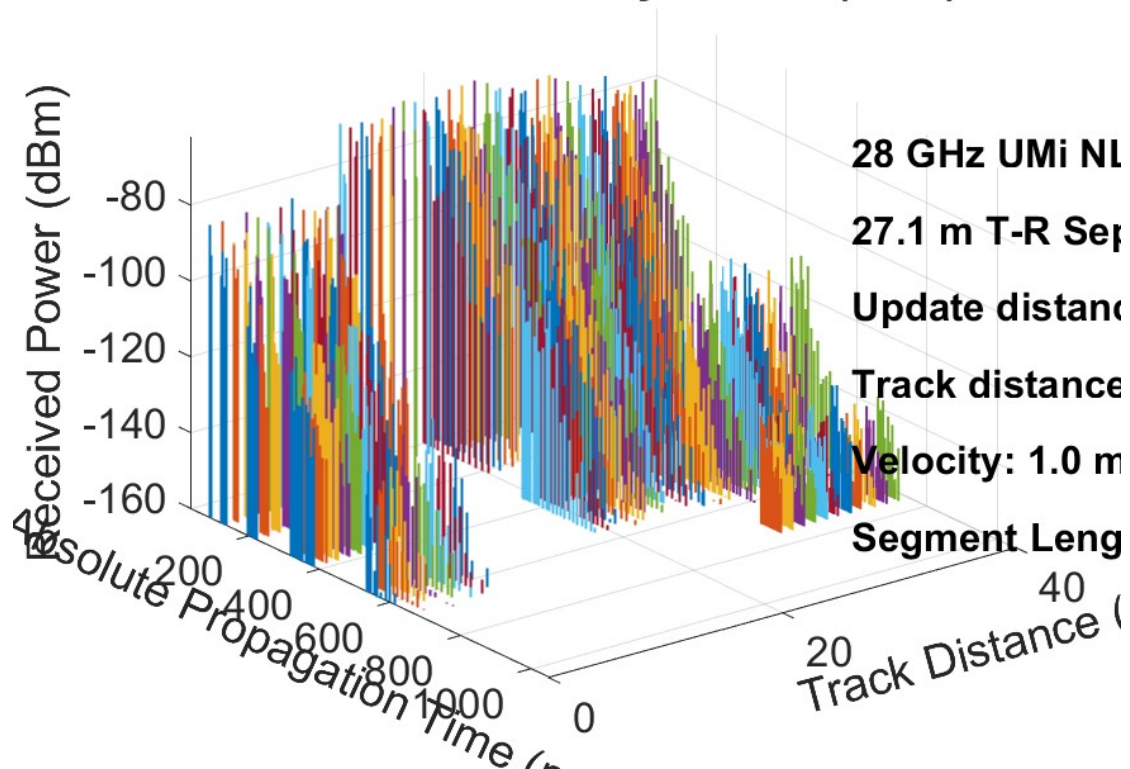
Αλλάζοντας το περιβάλλον σε χωρίς οπτική επαφή προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα (εικόνα 43 και 44) για απόσταση διαχωρισμού T-R 27,1m.

Unidirectional Power Delay Profile (PDP) Evolution with Stron

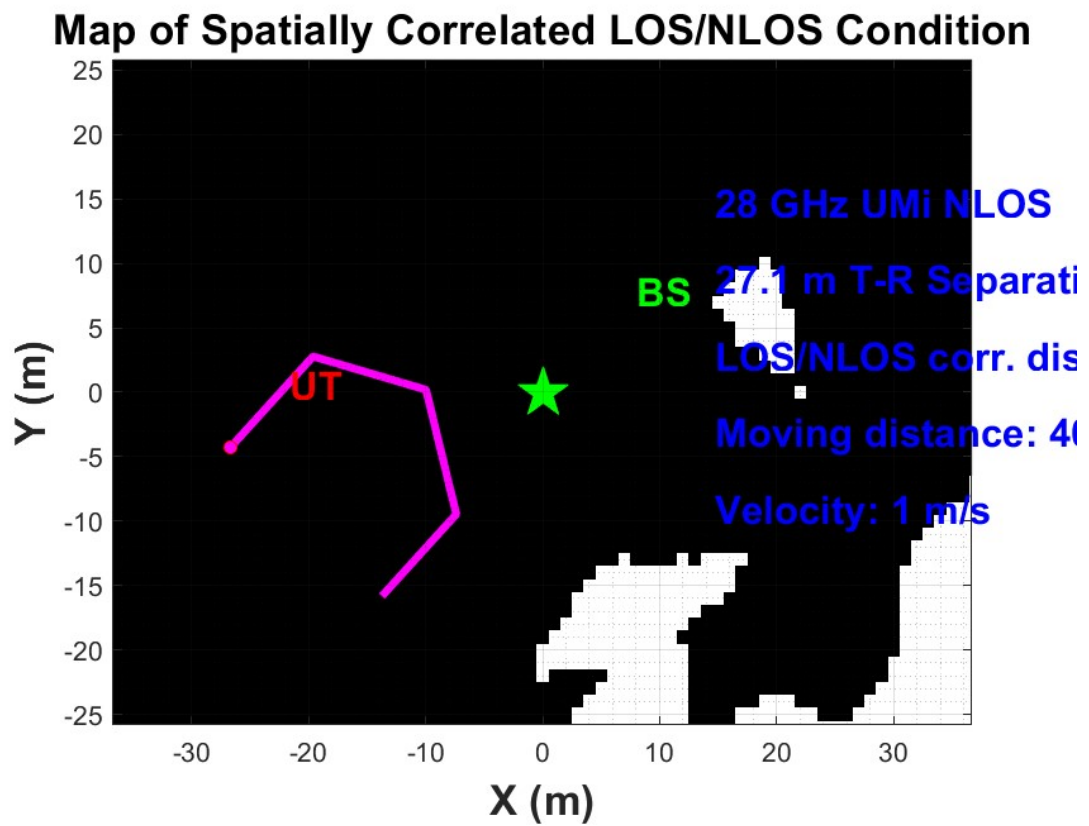


Εικόνα 43: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP

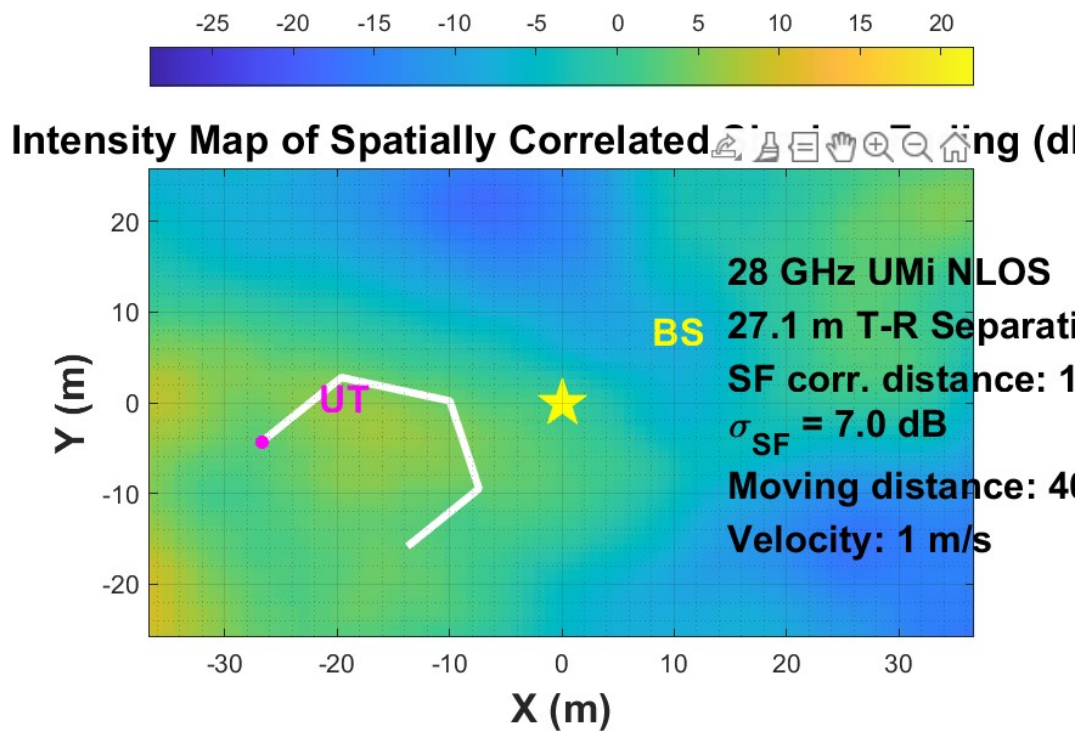
Omnidirectional Power Delay Profile (PDP) Evolution



Εικόνα 44: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP

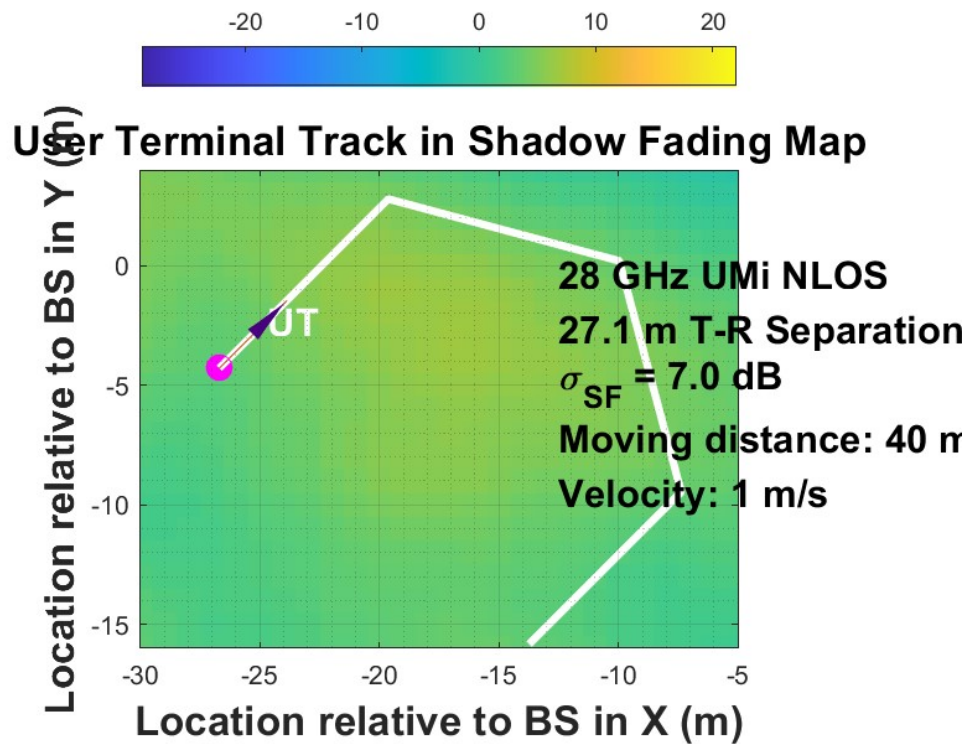


Εικόνα 45: Χάρτης χωρικά συσχετισμένων συνθηκών LOS/NLOS



Εικόνα 46: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωιάζει με τις θέσεις BS και UT.

Η απόσταση διαχωρισμού είναι 27,1m



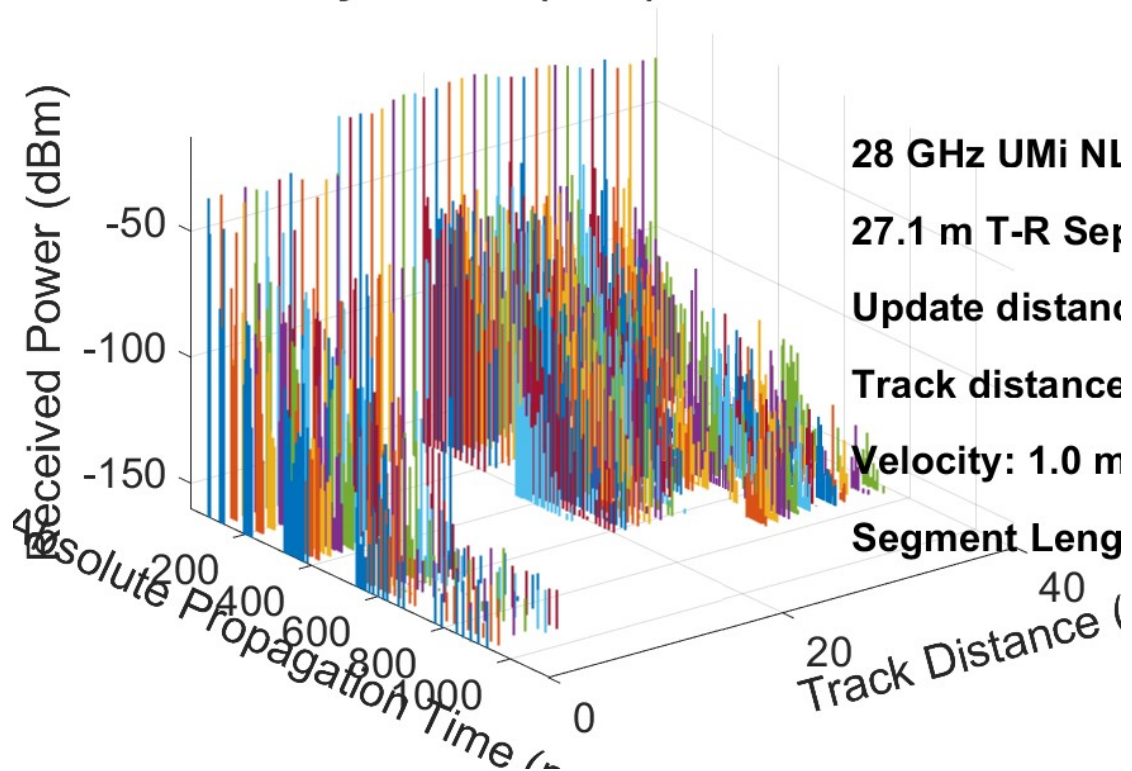
Εικόνα 47: Διαδρομή χρήστη

Βασικοί παράμετροι εισόδου

- Αριθμός στοιχείων κεραίας TX N_t :3
- Αριθμός στοιχείων κεραίας RX N_r :3
- Αριθμός στοιχείων κεραίας TX ανά γραμμή W_t : 3
- Αριθμός στοιχείων κεραίας RX ανά γραμμή W_r : 3

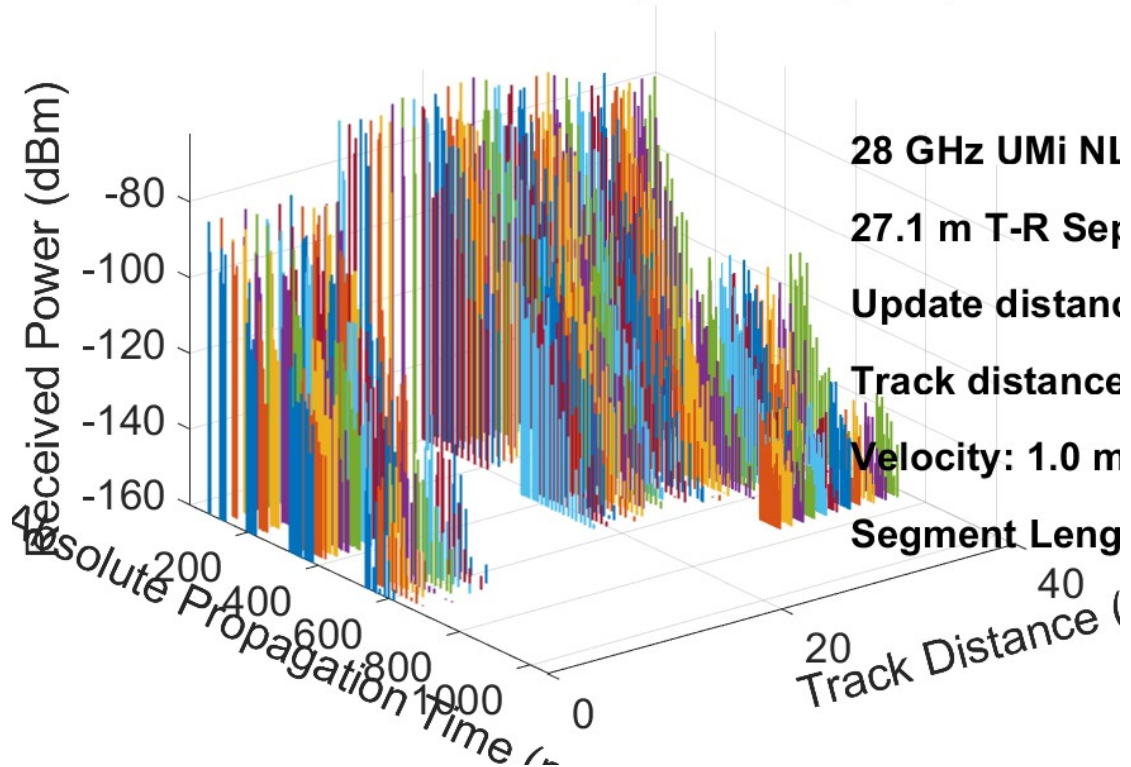
Με βάση τα αποτελέσματα προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα (εικόνα 48 και 49) για απόσταση διαχωρισμού T-R 27,1m. Σε περιβάλλον NLOS.

nal Power Delay Profile (PDP) Evolution with Stron



Εικόνα 48: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP

Omnidirectional Power Delay Profile (PDP) Evolution



Εικόνα 49: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP

Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις, δηλαδή αλλάζοντας τα στοιχεία της κεραίας από 2 σε 3, βρισκόμενοι στο ίδιο περιβάλλον με οπτική επαφή (NLOS) και διατηρώντας την ίδια απόσταση πομπού με δέκτη 27,1, δεν παρατηρούμε κάποια αλλαγή στην ισχύ του δέκτη στα κατευθυντικά και πανκατευθυντικά PDP.

4.4 4^η Περίπτωση

Θεωρώντας σε μία πόλη ότι ένα όχημα κινείται με ταχύτητα 30m/s σε εξάγωνη τροχιά (Σχήμα 13) έχοντας οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης πραγματοποιήσαμε την παρακάτω προσομοίωση, επιλέξαμε σενάριο εξωτερικού χώρου με χωρική συνέπεια θέτοντας της ακόλουθες παραμέτρους εισόδου στο NYUSIM GUI:

- Σενάριο: UMi
- Συχνότητα: 28GHz
- Εύρος Ζώνης RF: 800MHz
- Εύρος απόστασης: Standard (10-500m)
- Περιβάλλον: LOS
- Κάτω όριο απόστασης διαχωρισμού T-R(m):10m
- Άνω όριο απόστασης διαχωρισμού T-R(m):50m
- Ισχύς TX: 30dBm
- Ύψος σταθμού βάσης:3m(αγνοείται για σενάριο UMi)
- Ύψος τερματικού χρήστη: 1,5 m
- Βαρομετρική πίεση: 1013,25mbar
- Υγρασία:50 %
- Θερμοκρασία:20 °C
- Πόλωση: Co-Pol
- Ρυθμός βροχής: 0
- Απώλεια φυλλώματος: όχι
- Απόσταση στο φύλλωμα: 0
- Απόσβεση φυλλώματος: 0,4 dBm
- Απώλεια διείσδυσης από εξωτερικό σε εσωτερικό(O2I)
- Τύπος συστοιχίας TX: ULA
- Τύπος συστοιχίας RX: ULA
- Αριθμός στοιχείων κεραίας TX Nt:1
- Αριθμός στοιχείων κεραίας RX Nr:1
- Διάστημα κεραίας TX: 0,5
- Διάστημα κεραίας RX: 0,5
- Αριθμός στοιχείων κεραίας TX ανά γραμμή Wt: 1
- Αριθμός στοιχείων κεραίας RX ανά γραμμή Wr: 1
- Αζιμούθιο TX κεραίας HPBW:10°
- Αζιμούθιο RX κεραίας HPBW:10°
- Ανύψωση TX κεραίας HPBW:10°
- Ανύψωση RX κεραίας HPBW:10°

Θέτοντας την Χωρική συνέπεια : On

- Απόσταση συσχέτισης ξεθωριάσματος σκιάς: 10m
- Απόσταση συσχέτισης LOS/NLOS συνθήκης: 15m
- Τύπος κομματιού χρήστη: εξάγωνο

- Απόσταση διαδρομής: 40m
- Ενημέρωση απόστασης: 1m
- Κατεύθυνση κίνησης: 45°
- Ταχύτητα χρήστη: 30 m/s
- Μήκος πλευράς: 10 m
- Προσανατολισμός: φορά ρολογιού
- Μεταβάσεις τμημάτων: Ναι

Ανθρώπινο Μπλοκάρισμα : On

- Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για το ανθρώπινο μπλοκάρισμα: όχι
- Μέση εξασθένηση: 14,4 dB
- Ρυθμός μετάβαση από μη σκιασμένη κατάσταση σε κατάσταση αποσύνθεσης: 0,2 /sec
- Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση αποσύνθεσης σε σκιασμένη κατάσταση: 8,1 /sec
- Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση σκιασμένη σε κατάσταση ανόδου: 7,8 /sec
- Ρυθμός μετάβασης από κατάσταση ανόδου σε μη σκιασμένη κατάσταση: 6,7 /sec

Τα αποτελέσματα δίνονται με βάση την απόσταση μεταξύ δύο στιγμιότυπων καναλιών που είναι η απόσταση ενημέρωσης, που σημαίνει ότι οι συντελεστές καναλιού ενημερώνονται για κάθε 1m που διανύει κατά μήκος μιας διανυθείσας διαδρομής. Στον πίνακα 4 δίνεται η ισχύς στο δέκτη από τα 40 στιγμιότυπα των DIRPDPInfo.txt και OMNIPDPInfo.txt για ταχύτητες 30m/s και 1m/s σε περιβάλλον με οπτική επαφή.

Received Power (dBm) - LOS			
Ταχύτητα 30m/s	Ταχύτητα 1m/s	Ταχύτητα 30m/s	Ταχύτητα 1m/s
Κατευθυντική	Κατευθυντική	Πανκατευθυντικά	Πανκατευθυντικά
-20,7	-20,7	-59.8	-59.8
-16,3	-16,1	-59.8	-59.8
-12,6	-13	-59.8	-59.8
-14,9	-17,2	-59.9	-59.9

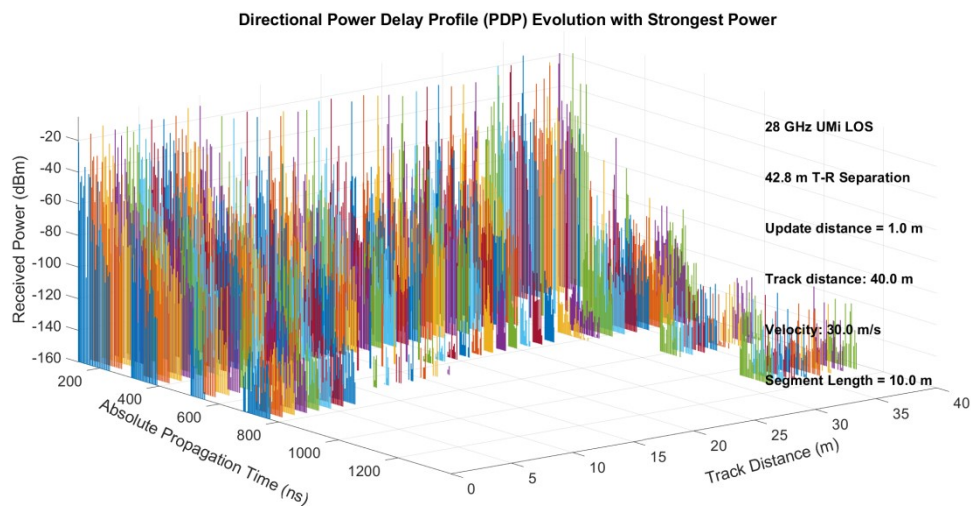
Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

-13,8	-16,1	-59.7	-59.7
-15,5	-16,5	-59.3	-59.3
-14,4	-15,6	-59.5	-59.5
-14,7	-15,3	-59.3	-59.3
-13,7	-14,9	-59.1	-59.1
-11,5	-12	-59.1	-59.1
-11,5	-12	-59.2	-59.2
-26,9	-26,7	-58.9	-58.9
-30,7	-30,5	-58.5	-58.5
-26,4	-26,7	-57.9	-57.9
-22,3	-22,2	-57.7	-57.7
-23,4	-22,8	-57.6	-57.6
-25	-24,7	-57.8	-57.8
-22,9	-22,6	-58.0	-58.0
-23,1	-22,8	-58.5	-58.5
-26,5	-26,2	-59.0	-59.0
-26,5	-26,1	-59.5	-59.5
-27,1	-27,1	-59.5	-59.5
-29,5	-29,6	-59.9	-59.9
-38,3	-36,5	-59.9	-59.9
-20,8	-20,7	-59.9	-59.9
-23,3	-23,1	-60.1	-60.1
-21,9	-22,2	-60.5	-60.5
-23,9	-24,3	-60.9	-60.9
-24,2	-24,8	-61.3	-61.3
-23,2	-23,5	-61.9	-61.9

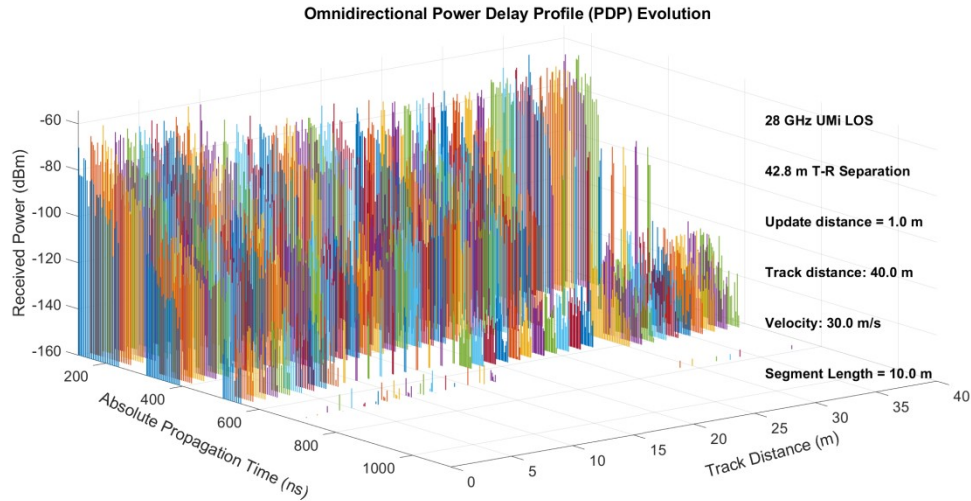
-23,2	-23,5	-62.6	-62.6
-23,3	-23,5	-62.6	-62.6
-16,9	-16,9	-62.3	-62.3
-13,9	-14	-62.2	-62.2
-14	-13,8	-62.2	-62.2
-13,7	-12,6	-62.2	-62.2
-19,2	-19,1	-62.2	-62.2
-17,9	-17,8	-62.5	-62.5
-13,1	-12,3	-63.2	-63.2
-14,2	-13,7	-63.1	-63.1

Πίνακας 4: Η ισχύς στο δέκτη των DIRPDPInfo.txt και OMNIPDPInfo.txt για ταχύτητες 30m/s και 1m/s.

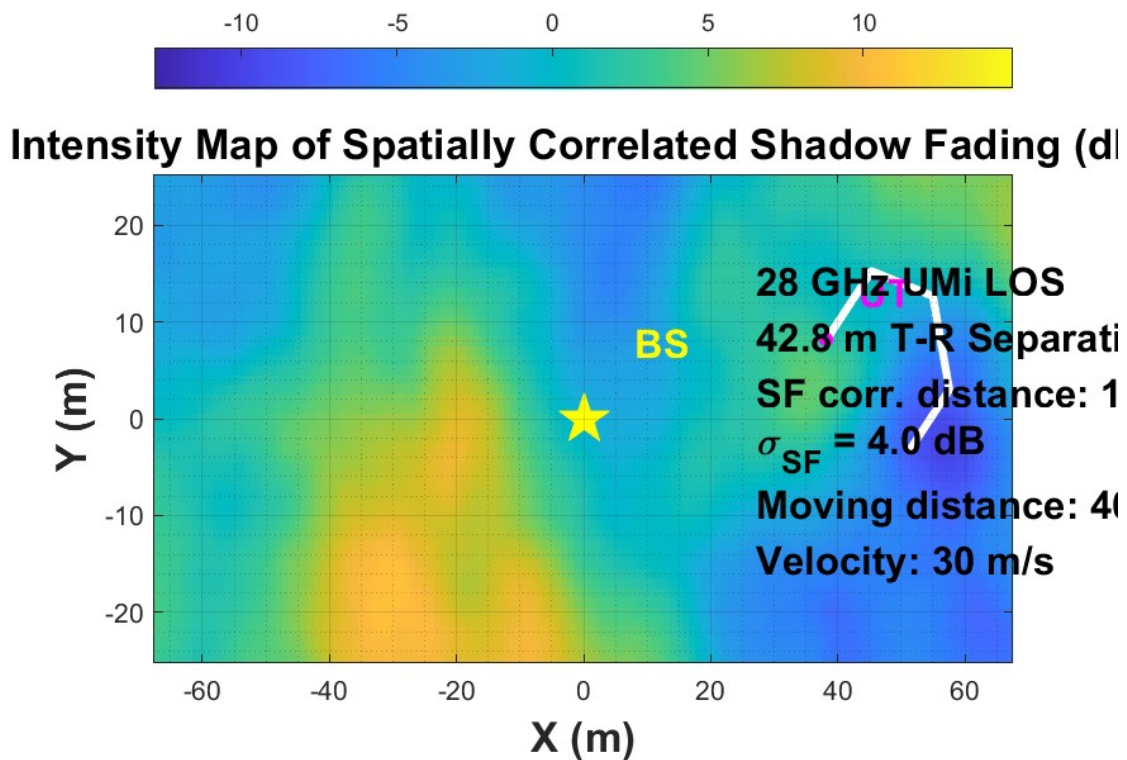
Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτουν το σχήμα 50 και το σχήμα 51 για διαδοχικά κατευθυντικά και πανκατευθυντικά PDP αντίστοιχα.



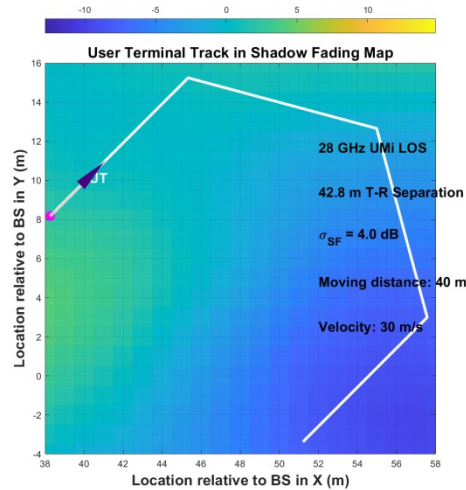
Εικόνα 50: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP



Εικόνα 51: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP



Εικόνα 52:Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωιάζει με τις θέσεις BS και UT.



Εικόνα 53: Διαδρομή χρήστη

Θεωρώντας σε μία πόλη ότι ένα όχημα κινείται με ταχύτητα 30m/s σε εξάγωνη τροχιά χωρίς οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης πραγματοποιήσαμε την παρακάτω προσομοίωση, επιλέξαμε σενάριο εξωτερικού χώρου με χωρική συνέπεια.

Τα αποτελέσματα δίνονται με βάση την απόσταση μεταξύ δύο στιγμιότυπων καναλιών που είναι η απόσταση ενημέρωσης, που σημαίνει ότι οι συντελεστές καναλιού ενημερώνονται για κάθε 1m που διανύει κατά μήκος μιας διανυθείσας διαδρομής. Στον πίνακα 5 δίνεται η ισχύς στο δέκτη από τα 40 στιγμιότυπα των DIRPDPIInfo.txt και OMNIPDPIInfo.txt για ταχύτητες 30m/s και 1m/s σε περιβάλλον χωρίς οπτική επαφή.

Received Power (dBm) -NLOS			
Ταχύτητα 30m/s	Ταχύτητα 1m/s	Ταχύτητα 30m/s	Ταχύτητα 1m/s
Κατευθυντική	Κατευθυντική	Πανκατευθυντικά	Πανκατευθυντικά
-39,6	-39,6	-77.4	-77.4
-42,5	-42,3	-78.2	-78.2
-42,1	-44,4	-78.3	-78.3
-40,8	-41,7	-78.9	-78.9
-39,8	-41,1	-79.8	-79.8
-43,4	-43,5	-79.6	-79.6

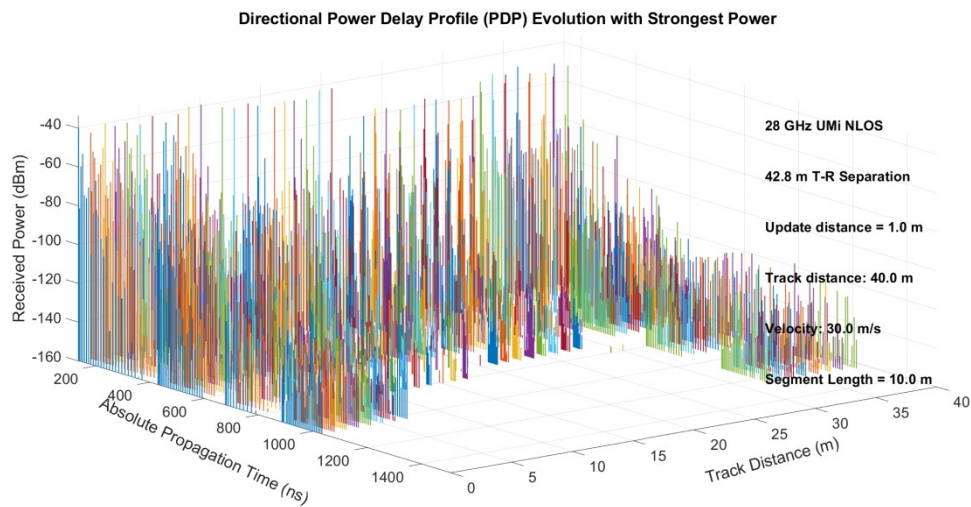
Προσομοίωση Millimeter Wave καναλιών με χωρική συνέπεια για 5G δίκτυα

-49,3	-47,7	-79.7	-79.7
-41,7	-44,5	-80.2	-80.2
-43,7	-45,6	-80.2	-80.2
-45	-42,8	-80.1	-80.1
-45	-42,8	-80.4	-80.4
-49	-49,1	-80.3	-80.3
-51,4	-51,6	-79.5	-79.5
-48,2	-48,8	-79.7	-79.7
-42,5	-42,8	-79.9	-79.9
-46,3	-46,9	-79.8	-79.8
-44,9	-45,8	-79.0	-79.0
-43	-43,6	-79.1	-79.1
-43,6	-44,5	-79.0	-79.0
-47,6	-48,5	-78.6	-78.6
-47,6	-48,5	-78.0	-78.0
-61,2	-62,4	-77.7	-77.7
-60,1	-63,9	-76.8	-76.8
-63,9	-68,9	-76.5	-76.5
-53,7	-53,9	-76.0	-76.0
-55,8	-55,7	-75.6	-75.6
-54,2	-54,2	-75.3	-75.3
-56	-56,1	-75.2	-75.2
-57,2	-58,1	-75.2	-75.2
-55,9	-55,9	-75.2	-75.2
-55,9	-55,9	-75.4	-75.4
-56,1	-55,9	-75.2	-75.2

-48,2	-48,2	-74.8	-74.8
-46,4	-46,4	-74.6	-74.6
-46,8	-46,7	-74.3	-74.3
-48,6	-48,2	-74.2	-74.2
-48,4	-48,3	-73.6	-73.6
-48,9	-48,8	-74.2	-74.2
-47	-46,8	-74.5	-74.5
-47,9	-47,8	-74.6	-74.6

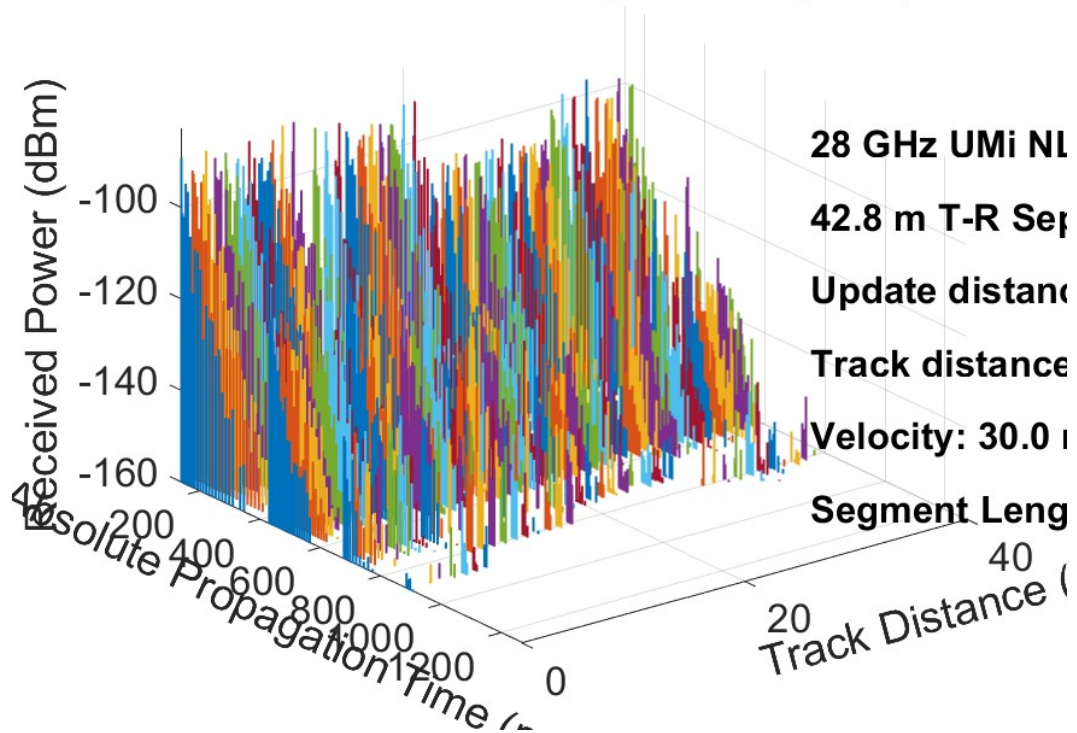
Πίνακας 5: Η ισχύς στο δέκτη των DIRPDPInfo.txt και OMNIPDPInfo.txt για ταχύτητες 30m/s και 1m/s, χωρίς οπτική επαφή.

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα (εικόνα 54 και 55) για διαδοχικά κατευθυντικά και πανκατευθυντικά PDP αντίστοιχα.

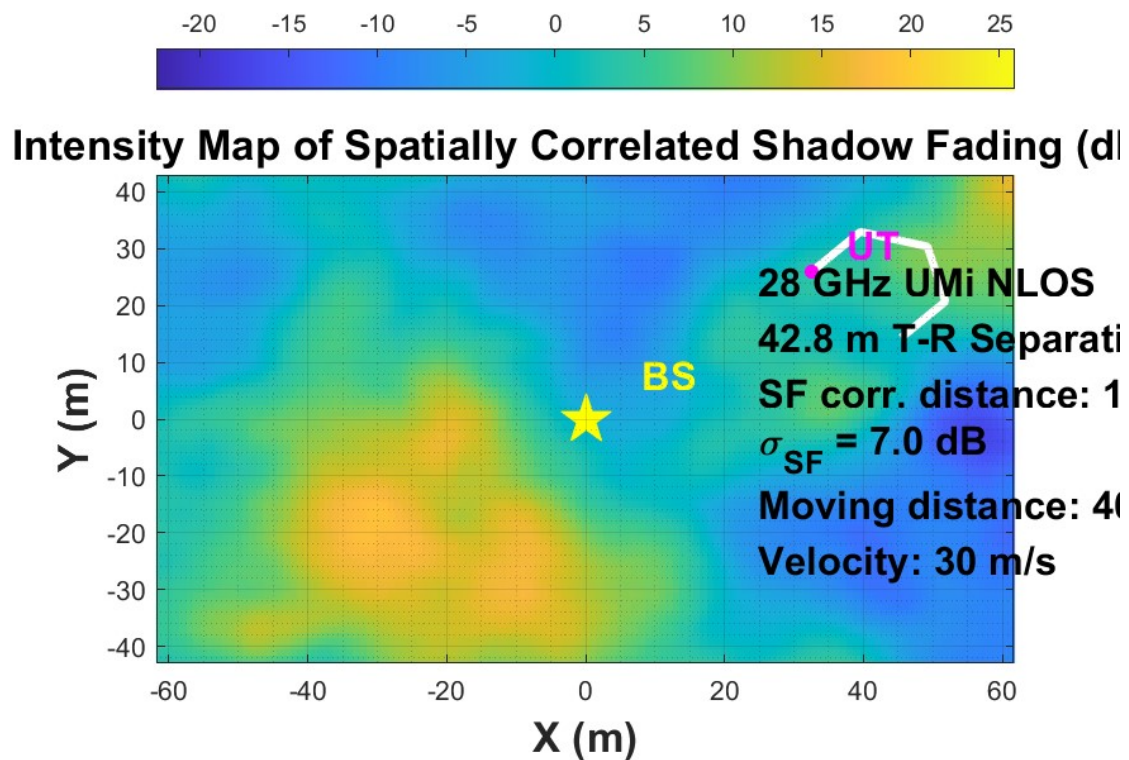


Εικόνα 54: Διαδοχικά κατευθυντικά PDP με ταχύτητα 30m/s, σε περιβάλλον NLOS.

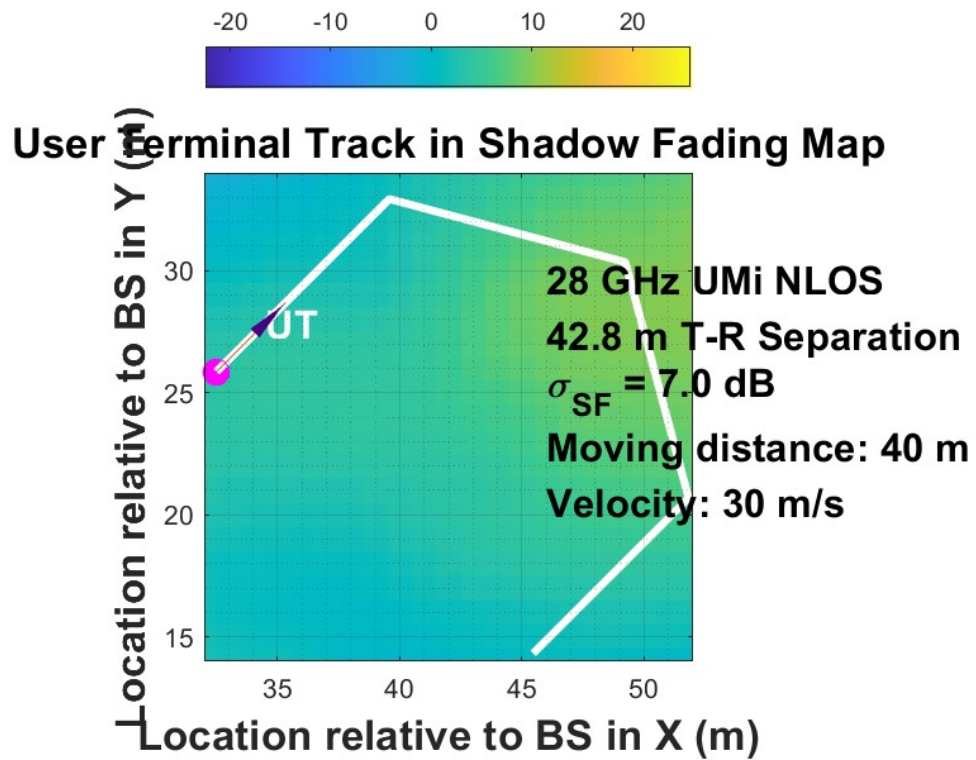
Omnidirectional Power Delay Profile (PDP) Evolution



Εικόνα 55: Διαδοχικά πανκατευθυντικά PDP, με ταχύτητα 30m/s, σε περιβάλλον NLOS



Εικόνα 56: Χάρτης χωρικά συσχετισμένης σκιάς που ξεθωριάζει με τις θέσεις BS και UT.



Εικόνα 57: Διαδρομή Χρήστη

Αναλύοντας τα παραπάνω αποτελέσματα, συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της ταχύτητας του UT επηρεάζει την ισχύ στο δέκτη στα κατευθυντικά κανάλια. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της ταχύτητας του UT από 1m/s σε 30m/s, έχοντας μια μικρή απόσταση διαχωρισμού ανάμεσα στον πομπό και στο δέκτη στα 42,8m η ισχύς στο δέκτη μειώνεται λίγο (δέκατα).

Συμπεράσματα

Χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής NYUSIM σε κοντινές αποστάσεις σε εξωτερικό περιβάλλον έχοντας χωρική συνέπεια για την προσομοίωση των μεταβαλλόμενων συνθηκών καναλιού ενός χρήστη καθώς κινείται σε μια περιοχή.

Στην παρούσα εργασία είδαμε ότι η διασταυρωμένη πόλωση(XPD) επηρεάζει την ισχύ στο δέκτη. Βλέπουμε μεγάλη εξασθένηση του σήματος στο δέκτη εξαιτίας της πόλωσης. Επίσης παρατηρούμε ότι μεγάλο ρόλο στην εξασθένηση της ισχύς παίζει το περιβάλλον που γίνεται η μετάδοση του σήματος. Πιο συγκεκριμένα σε περιβάλλον που δεν υπάρχουν εμπόδια (LOS) η ισχύς στο δέκτη είναι μεγαλύτερη, σε αντίθεση σε περιβάλλον που υπάρχουν εμπόδια (NLOS). Όσο πιο πολλά εμπόδια υπάρχουν ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη τόσο μικρότερη είναι η ισχύς στο δέκτη.

Παρατηρήσαμε ότι το αζιμούθιο δεν επηρεάζει την ισχύ στο δέκτη όταν ο πομπός και ο δέκτης έχει την ίδια γωνία HPBW. Επίσης και το πλήθος των στοιχείων της κεραίας σε πομπό και δέκτη δεν φαίνεται να επηρεάζουν την ισχύ στο δέκτη. Η απόσταση του πομπού με τον δέκτη είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την ισχύς στο δέκτη.

Τέλος είδαμε ότι η ταχύτητα του UT σε κοντινή απόσταση επηρεάζει την ισχύ στο δέκτη. Δηλαδή όταν ο δέκτης κινείται με μεγάλη ταχύτητα η ισχύς στο δέκτη μειώνεται λίγο. Αυτό μπορούμε να το διακρίνουμε γιατί στη νέα έκδοση του NYUSIM 3.1 μπορούν να εισαχθούν δεκαδικά στην λειτουργία χωρικής συνέπειας.

Βιβλιογραφία

1. Ms. Anju Uttam Gawas.(2015). An Overview on Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G-6G. *IJRITCC*, VOLUME 3 ISSUE 5.
2. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/what-is-5g.html#~faq>
3. Chataut R, Akl R. (2020). Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction. *Sensors*.
4. Kansal L., Berra S., Mounir M., Miglani R., Dinis R. & Rabie K. (2022). Performance Analysis of Massive MIMO-OFDM System Incorporated with Various Transforms for Image Communication in 5G Systems. *Electronics* .
5. <https://www.5gtechnologyworld.com/the-basics-of-5gs-modulation-ofdm/>
6. <https://www.3gpp.org>
7. Chataut R. & Akl R. (2020). Massive MIMO Systems for 5G and Beyond Networks-Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction. *Sensors*
8. <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/MIMO>
9. Chopra SR. (2018). A Review on MIMO OFDM Technology. *JETIR*, Volume 5, Issue 12.
10. Paliwal S., Dhabhai H. & Mathur A. (2019). A Review Paper on Multiple Input Multiple Output (MIMO) Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). *IJSDR* ,Volume 4, Issue 6.
11. Rappaport T., Xing Y, Kanhere O., Ju S., Madanayake A., Mandal S., Alkhateeb A. & Trichopoulos G. (2019). Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond. *IEEE ACCESS*.
12. <https://www.5gmmwave.com/5g-mmwave-frequency-bands/5g-mmwave-band-n257-28ghz/>
13. <https://spectrum.ieee.org/5g-bytes-beamforming-explained>
14. https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things
15. <https://www2.stardust-testing.com/en/5g-and-impact-on-iots>

16. T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez.(2013). Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!. IEEE Access, vol. 1, pp. 335–349.
17. T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, Jr., M. K. Samimi, and S. Sun. (2015). Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design (Invited Paper). IEEE Transactions on Communications, vol. 63, no. 9, pp. 3029– 3056.
18. H. J. Liebe, G. A. Hufford, and M. G. Cotton. (1993). Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz. AGARD Conference Proceedings 542.
19. J. J. A. Lempinen, J. K. Laiho-Steffens, and A. F. Wacker. (1997). Experimental results of cross polarization discrimination and signal correlation values for a polarization diversity scheme. IEEE 47th Vehicular Technology Conference, vol. 3.
20. T. S. Rappaport and S. Deng. (2015). 73 GHz wideband millimeter-wave foliage and ground reflection measurements and models. IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), pp. 1238–1243.
21. www.5gworkshops.com
22. S. Ju and T. S. Rappaport. (2018). Simulating motion - incorporating spatial consistency into the NYUSIM channel model. IEEE 88th Vehicular Technology Conference Workshops, pp. 1–6.
23. S. Ju and T. S. Rappaport. (2018). Millimeter-wave extended nyusim channel model for spatial consistency. IEEE Global Communications Conference (Globecom), pp. 1–6.
24. G. R. MacCartney, Jr., T. S. Rappaport, and S. Rangan. (2017). Rapid fading due to human blockage in pedestrian crowds at 5g millimeter-wave frequencies.IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp. 1–7.
25. S. Sun, G. R. MacCartney Jr., and T. S. Rappaport. (2017). A Novel Millimeter-Wave Channel Simulator and Applications for 5G Wireless Communications. IEEE International Conference on Communications (ICC).
26. S. Ju, Y. Xing, O. Kanhere, and T. S. Rappaport. (2019). A Millimeter-Wave Channel Simulator NYUSIM with Spatial Consistency and Human Blockage. IEEE Global Communications Conference, pp. 1–6.