

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών *Συστήματα*
*Ασύρματης Επικοινωνίας***

Μεταπτυχιακή Διατριβή



**Μελέτη και Προσομοίωση της Χρήσης Μη Επανδρωμένων
Ιπτάμενων Οχημάτων για τη Βελτίωση της Επίδοσης των
Ασύρματων Κινητών Δικτύων**

Δημήτριος Γρίκας

**Επιβλέπων Καθηγητής
Νικόλαος Νομικός**

Μάιος 2020

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών
Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Μελέτη και Προσομοίωση της Χρήσης Μη Επανδρωμένων
Ιπτάμενων Οχημάτων για τη Βελτίωση της Επίδοσης των
Ασύρματων Κινητών Δικτύων

Δημήτριος Γρίκας

Επιβλέπων Καθηγητής
Νικόλαος Νομικός

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στα Συστήματα Ασύρματης επικοινωνίας από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Μάιος 2020

ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η παράθεση των νέων τεχνολογιών που προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς (5G). Έμφαση δίνεται σε τρεις τομείς. Ο πρώτος είναι η νέα τεχνική πολλαπλής πρόσβασης μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβαση (Non Orthogonal Multiple Access - NOMA) η οποία εξετάζεται για χρήση στα δίκτυα 5G. Γίνεται επίσης ανάλυση νέων υπηρεσιών επικοινωνίας που θα επεκτείνουν την χρήση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας σε νέου τομείς. Επιπλέον εξετάζεται η χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicles - UAVs) για την επέκταση της κάλυψης και χωρητικότητας των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Χρησιμοποιούνται μοντέλα τα οποία βασίζονται σε πρακτικά σενάρια λειτουργίας υπαρχόντων δικτύων. Προσομοιώνεται η μετάδοση μεταξύ σταθμού βάσης και συσκευής κινητής τηλεφωνίας από πολλαπλές διαδρομές (multipath fading) υπό συνθήκες οπτικής ή μη επαφής. Τα μοντέλα εξετάζονται ως προς τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και τον ρυθμό σφαλμάτων για διάφορες ψηφιακές διαμορφώσεις και διαφορετικές συνθήκες ασύρματου καναλιού. Το κύριο συμπέρασμα το οποίο προκύπτει είναι ότι η ύπαρξη οπτικής επαφής μεταξύ σταθμού βάσης και συσκευής κινητής τηλεφωνίας επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα ως προς τον ρυθμό σφαλμάτων και τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Έπειτα πραγματοποιείται προσομοίωση ενός μοντέλου στο οποίο εξετάζεται η χρήση μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος ως σταθμός βάσης ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα θεωρείται ότι τοποθετείται μεταξύ ενός επίγειου σταθμού βάσης και μιας συσκευής κινητής τηλεφωνίας. Το ασύρματο κανάλι σε αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει δύο μέρη. Το πρώτο εντοπίζεται μεταξύ σταθμού βάσης και οχήματος και χαρακτηρίζεται από ελεύθερη εκπομπή. Το δεύτερο εμφανίζεται μεταξύ οχήματος και συσκευής κινητής τηλεφωνίας και χαρακτηρίζεται από συνθήκες οπτικής επαφής. Έπειτα συγκρίνεται με μοντέλο στο οποίο γίνεται μετάδοση υπό συνθήκες μη οπτικής επαφής. Τα μοντέλα εξετάζονται υπό συγκεκριμένες συνθήκες ασύρματου καναλιού για τις ίδιες ψηφιακές διαμορφώσεις σε συνθήκες αστικού περιβάλλοντος.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η επέκταση της μετάδοσης υπό οπτική επαφή επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα σε όλο το εύρος ψηφιακών διαμορφώσεων. Στο τελευταίο μέρος αναλύονται συμπεράσματα σχετικά με την εφικτότητα της χρήσης μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων και μελλοντικές κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα σχετικά με την χρήση τους.

Summary

The goal of this thesis is to present the new technologies which are expected to be implemented in the fifth generation of cellular networks (5G). Emphasis is placed on three fields. The first is the Non Orthogonal Multiple Access technique which is expected to be integrated into the 5G networks. An analysis of new communication services which will expand the use of cellular networks in new fields and applications is also conducted. In addition, the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for the expansion of network coverage and capacity is examined. Models based on practical scenarios in the function of existing cellular networks are used. These simulate multipath fading which occurs between a base station and a mobile device under line of sight and non line of sight conditions. The models are examined for bit error rates and data throughput for various digital modulation orders and wireless channel conditions. The most important conclusion is that wireless transmission under line of sight conditions yields better results regarding the bit error rate and data throughput performance metrics. A model which simulates the integration of a UAV is examined. The vehicle acts as a relay between a terrestrial base station and a mobile device. The wireless channel is segmented into two parts. The first one is governed by free space transmission between the base station and the UAV. In the second part transmission between the UAV and the mobile device occurs under line of sight conditions. This model is compared to a model where transmission under non line of sight conditions takes place between a base station and a mobile device. Both models are examined for bit error rate and data throughput performance for various digital modulation orders. The wireless channel conditions for both models are case specific and are chosen to best reflect conditions prevalent in an urban environment. The results verify that using UAV to take advantage of line of sight radio propagation results in better performance across the range of digital modulations tested. Finally, conclusions are drawn regarding the viability of the integration of UAVs in cellular networks and directions for future research are given.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας της σχολής θετικών και εφαρμοσμένων επιστημών του ανοιχτού πανεπιστημίου Κύπρου. Οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κο Νικόλαο Νομικό, για την πολύτιμη υποστήριξή του, τις παραγωγικές υποδείξεις του και το πολύ καλό κλίμα συνεργασίας που διαμόρφωσε συμβάλλοντας τα μέγιστα για την κατάρτιση της διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή και στόχος εργασίας.....	1
1.1	Εισαγωγή στα δίκτυα 5G.	1
1.2	Προκλήσεις στα δίκτυα 5G.	9
1.3	Χρήση UAV για επέκταση δικτύου κινητής τηλεφωνίας..	10
1.4	Μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση...	15
1.5	Επικοινωνία μηχανής-προς-μηχανή..	19
1.6	Επικοινωνία συσκευής-προς-συσκευή.	23
1.7	Στόχος της εργασίας.....	26
1.8	Συνεισφορά της εργασίας.....	29
2	Ζητήματα χρήσης μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων.....	30
2.1	Βελτίωση κάλυψης και χωρητικότητας δικτύου.	31
2.2	Σχεδιασμός πορείας πτήσης και βέλτιστες θέσεις.	37
2.3	Κατανάλωση ενέργειας..	42
2.4	Ασφάλεια δεδομένων.....	49
3	Περιγραφή βασικών εννοιών.....	54
3.1	Υποστήριξη μη ορθογώνιας μεθόδου πολλαπλής πρόσβασης μέσω μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος.	54
3.2	Υποστήριξη υπηρεσιών επικοινωνιών συσκευής-προς-συσκευή μέσω μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος.	57
3.3	Υποστήριξη υπηρεσιών επικοινωνιών μηχανής-προς-μηχανή μέσω μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος.	58
3.4	Βασικοί μηχανισμοί διάδοσης.	59
3.5	Μοντέλα απωλειών.....	62
3.6	Κατανομές Rice-Rayleigh..	63
3.7	Μέθοδος διαμόρφωσης QAM..	66
3.8	Μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης με ορθογώνια συχνότητα.	68
4	Προσομοιώσεις βασικών καναλιών.....	70
4.1	Περιγραφή μοντέλου προσομοίωσης.	70
4.2	Προσομοίωση καναλιού Rayleigh..	74
4.3	Προσομοίωση καναλιού Rice..	90
4.4	Ανάλυση αποτελεσμάτων καναλιού Rayleigh.....	103

4.5 Ανάλυση αποτελεσμάτων καναλιού Rice.....	106
4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων καναλιών Rice και Rayleigh.....	108
5 Προσομοιώσεις σύνθετου καναλιού.....	110
5.1 Προσομοίωση καναλιού Free Space Loss-Rice.....	113
5.2 Προσομοίωση καναλιού Rayleigh.....	120
5.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων καναλιών Free Space Loss-Rice και Rayleigh.....	127
6 Συμπεράσματα-Μελλοντικές κατευθύνσεις.....	131
Βιβλιογραφία.....	134

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή και στόχος εργασίας

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας βρίσκονται στην τέταρτη γενιά τους (4G), έχοντας εισάγει μια σειρά από νέες τεχνολογίες και δυνατότητες. Η αναλογική τηλεφωνία των δικτύων πρώτης γενιάς αντικαταστάθηκε από την ψηφιακή στη δεύτερη. Η τρίτη γενιά εισήγαγε υπηρεσίες δεδομένων, ενώ στην τέταρτη εφαρμόστηκαν τεχνικές μεταγωγής πακέτου αυξάνοντας την αποδοτικότητα.

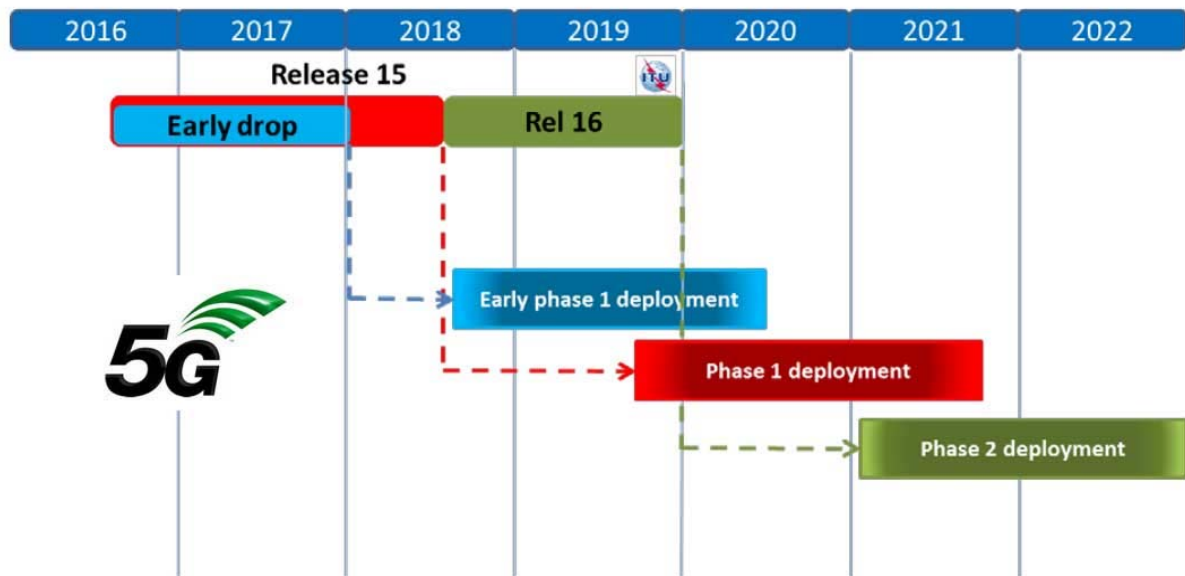
Οι αυξανόμενες δυνατότητες δικτύωσης επέτρεψαν την χρήση κινητών συσκευών και εφαρμογών που άλλαξαν τον τρόπο με τον οποίο εκτελείται η επικοινωνία και άλλες καθημερινές δραστηριότητες. Παράλληλα αυξανόμενη είναι και η χρήση συσκευών με ικανότητες δικτύωσης για μια πληθώρα λειτουργιών, όπως συστήματα ασφαλείας ή εποπτείας που έχουν την δυνατότητα να αποστέλλουν συμβάντα σε χρήστες υπό την μορφή SMS σε πραγματικό χρόνο. Επίσης τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση στην χρήση εφαρμογών μέσω διαδικτύου σε επιβατικά οχήματα για σκοπούς προστασίας κλοπής ή ελέγχου πρόσβασης. Επιπλέον ερευνάται η πιθανότητα χρήσης μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων. Εξετάζεται η χρήση τους ως εναέριοι σταθμοί βάσης σε περιπτώσεις όπου η κάλυψη από τα υπάρχοντα δίκτυα είναι ανεπαρκής λόγω εμποδίων ή αδύνατη λόγω της τοπολογίας. Λόγω της ευκολίας που συνεπάγεται η μεταφορά και χρήση τους εξετάζεται παράλληλα και η περίπτωση να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση βλαβών ή φυσικών καταστροφών που έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην κάλυψη υπάρχοντων δικτύων. Ιδιαίτερη σημασία σε ένα τέτοιο σενάριο δίνεται στα χαρακτηριστικά των ασύρματων καναλιών, στο μοτίβο πτήσης και στην τοπολογία που θα πρέπει να δημιουργηθεί.

1.1 Εισαγωγή στα δίκτυα 5G

Η πέμπτη γενιά δικτύων (5G), προβάλλεται ως το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των δικτύων κινητών επικοινωνιών. Η τεχνολογία εξελίσσεται σύμφωνα με την προδιαγραφή IMT-2020 του International Telecommunication Union (ITU). Η προδιαγραφή κοινοποιήθηκε στην βιομηχανία το 2015 [1].

Ο οργανισμός προτυποποίησης 3rd Generation Partnership Project (3GPP) εργάζεται πάνω στην τεχνολογία 5G NR (New Radio) με σκοπό την οριστικοποίησή

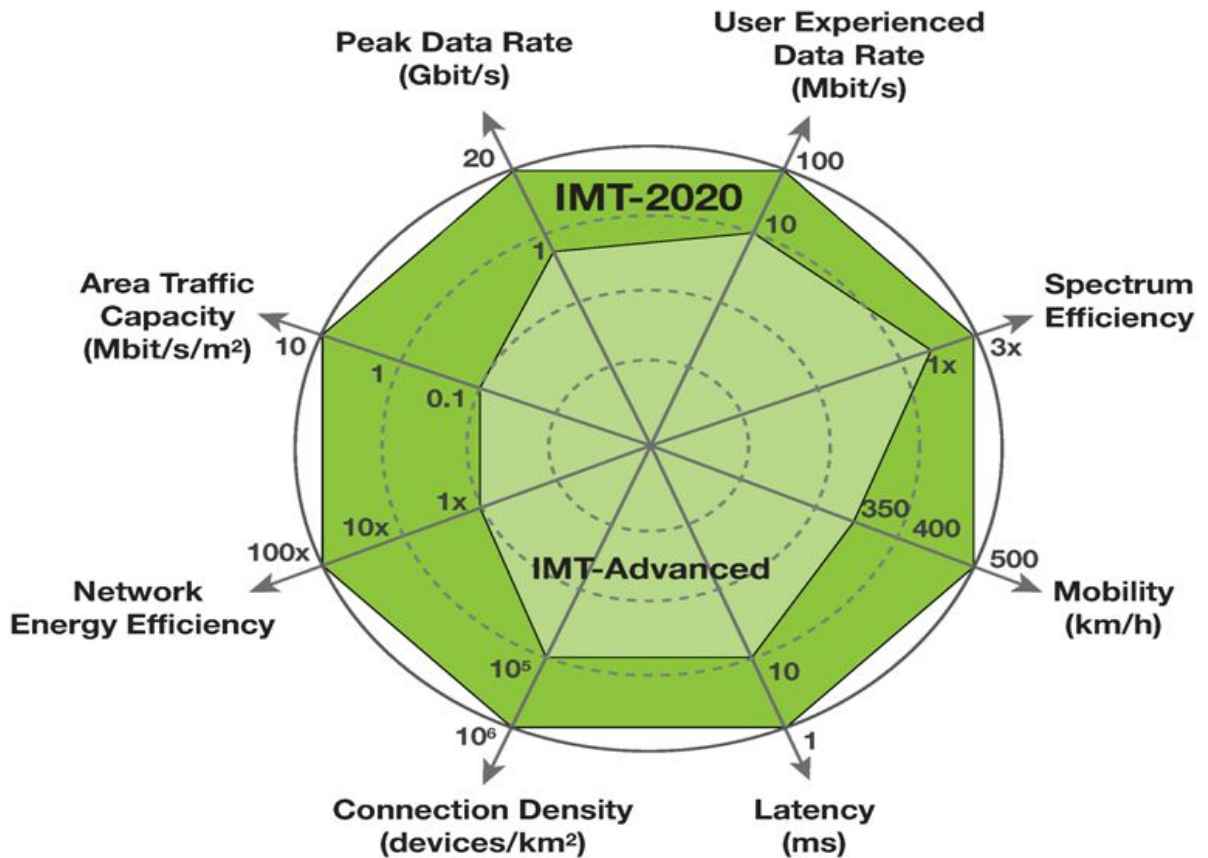
των χαρακτηριστικών της και την υιοθέτησή της ως το παγκόσμιο πρότυπο ασύρματου καναλιού για τα δίκτυα 5G.



Εικόνα 1. Ο οδικός χάρτης για την εξέλιξη των προτύπων του 5G. Πηγή: 3GPP [2]

Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται ο οδικός χάρτης για την εξέλιξη της πέμπτης γενιάς κινητών δικτύων. Το αρχικό σύνολο προτύπων με την ονομασία Release 15 δόθηκε στην δημοσιότητα το 2017. Περιλαμβάνει κοινά στοιχεία με το πρότυπο LTE (Long Term Evolution) για τα δίκτυα τέταρτης γενιάς. Αντικαταστάθηκε το 2018 από το Release 16 το οποίο δεν έχει οριστικοποιηθεί. Τα πρότυπα προβλέπουν μεταξύ άλλων συχνότητες λειτουργίας ως τα 6 GHz για εξωτερικούς χώρους και ως τα 28 GHz για εσωτερικούς. Το αντίστοιχο εύρος ασύρματου καναλιού για κάθε περίπτωση είναι ως τα 100 MHz και το 1 GHz [3]. Επιπλέον το Release 16 περιλαμβάνει μια νέα τεχνική μετάδοσης σήματος (Beamforming) και την χρήση μεθόδου πολλαπλής εισόδου και εξόδου (Multiple Input and Multiple Output – MIMO) [4]. Παράλληλα το 2018 ξεκίνησε και η πρώτη ανάπτυξη δικτύων. Σύμφωνα με το 3GPP οι εργασίες προτυποποίησης θα έχουν ολοκληρωθεί το 2020.

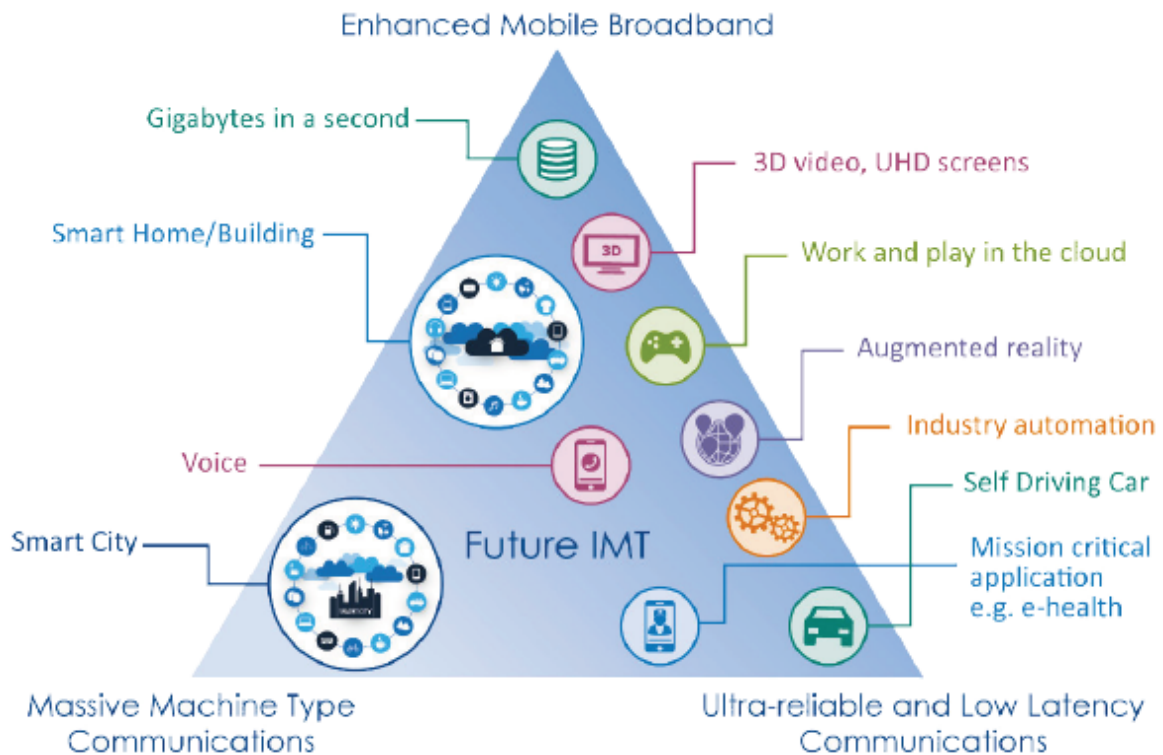
Οι αρχικοί στόχοι αφορούν την βελτίωση της υπηρεσίας δεδομένων, υποστηρίζοντας μεγαλύτερο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών και μεγαλύτερες ταχύτητες. Οι βελτιώσεις που αναμένονται σε σχέση με τα δίκτυα τέταρτης γενιάς φαίνονται σχηματικά στην εικόνα 2.



Εικόνα 2. Βελτιώσεις των δικτύων 5G(IMT-2020) σε σχέση με τα δίκτυα 4G (IMT-Advanced).

Πηγή: ITU [5]

Όπως φαίνεται στην εικόνα 2 με την νέα γενιά δικτύων αναμένεται να αυξηθεί ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (Peak Data Rate), ο ρυθμός μετάδοσης προς τον χρήστη (User Experienced Data Rate) και της συνολικής κίνησης ανά περιοχή κάλυψης (Area Traffic Capacity). Επιπλέον το πρότυπο στοχεύει σε τριπλάσια αποδοτικότητα φάσματος στο ίδιο εύρος ασύρματου καναλιού (Spectrum Efficiency). Βελτίωση προβλέπεται επίσης στους τομείς της κινητικότητας (Mobility), της χρονικής υστέρησης του σήματος (Latency) και του αριθμού των συνδεδεμένων χρηστών (Connection Density). Η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας (Network Energy Efficiency) είναι επίσης μία παράμετρος του νέου προτύπου.



Εικόνα 3. Αναμενόμενες εφαρμογές των δικτύων 5G. Πηγή: ITU [6]

Πέρα από τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά του δικτύου σκοπός για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς είναι να εισαχθούν νέες τεχνολογίες και δυνατότητες. Στη εικόνα 3 παρατίθενται οι νέοι και υπάρχοντες τομείς εφαρμογών [6].

1. Enhanced mobile broadband (eMBB) – Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται βελτιωμένες υπηρεσίες ευρυζωνικής πρόσβασης σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Προβλέπονται επίσης εφαρμογές αυξημένης και εικονικής πραγματικότητας και παροχή εταιρικών υπηρεσιών.

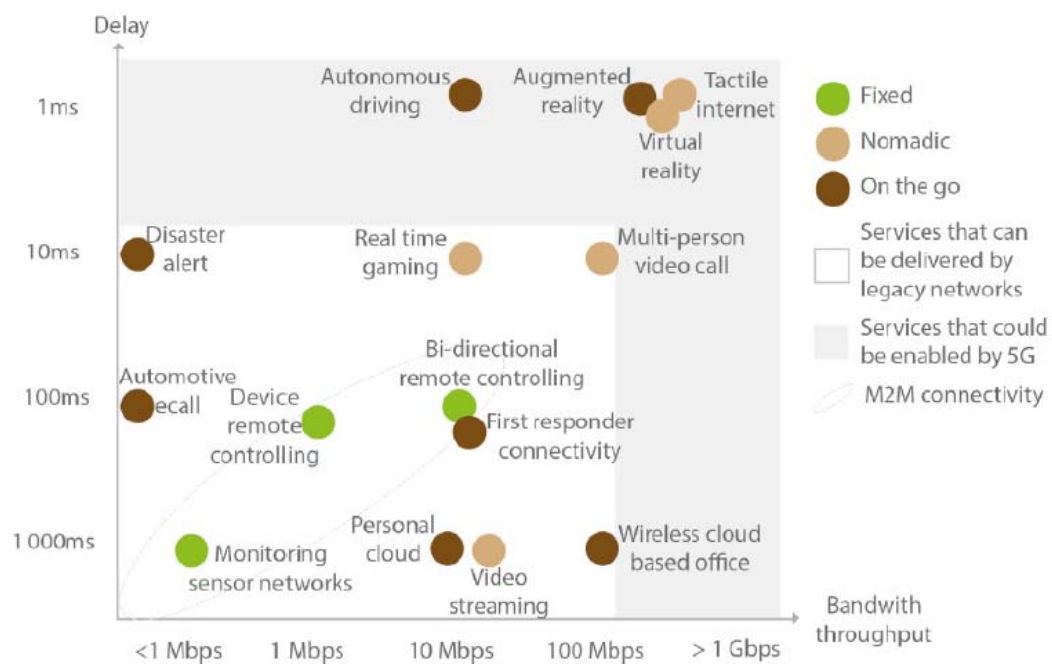
2. Massive machine-type communications (mMTC) – Η κατηγορία αυτή αφορά εφαρμογές Internet of Things (IoT), παρακολούθηση αγαθών, εφαρμογές απομακρυσμένης διαχείρισης αστικών υποδομών, μονάδων αγροτικής παραγωγής και οικιακών συσκευών / λειτουργιών.

3. Ultra-reliable and low-latency communications (URLLC) – Αυτή η κατηγορία εξυπηρετεί εφαρμογές αυτόνομων οχημάτων, παρακολούθησης και διαχείρισης δικτύων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, εφαρμογές τηλεϊατρικής, συστήματα βιομηχανικού αυτοματισμού.

Παρατηρείται μια στροφή από τις τυπικές ως τώρα χρήσεις των δικτύων κινητής τηλεφωνίας σε νέους τομείς δραστηριοτήτων. Πρόκειται για τομείς όπου η διεξόδυση ήταν πολύ μικρή, όπως η αυτοματοποίηση οικιακών ή αστικών υποδομών, η

μηδαμινή όπως η βιομηχανία. Επιπλέον στοχεύονται τομείς όπως η τεχνολογία οχημάτων, εφαρμογές cloud ή εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας. Οι τομείς αυτοί είναι είτε νέοι, είτε απαιτούν μεγαλύτερες ταχύτητες δεδομένων από αυτές που είναι εφικτές σήμερα, είτε βασίζονται στην διακίνηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο με την μικρότερη δυνατή καθυστέρηση. Ανάλογα με την εφαρμογή η επικοινωνία μπορεί να είναι και αυτόνομη. Συνολικά για την δικτύωση συσκευών που θα χρησιμοποιούνται σε αυτές τις περιπτώσεις αναγνωρίζονται δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη αναφέρεται ως επικοινωνίες μηχανής-προς-μηχανή (Machine-to-Machine communications - M2M), όπου δύο συσκευές χρησιμοποιούν το δίκτυο για την απευθείας επικοινωνία τους. Η δεύτερη ονομάζεται επικοινωνίες συσκευής-προς-συσκευή (Device-to-Device communications - D2D) με τις συσκευές να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους.

Σημαντικό μέρος του των απαιτήσεων των νέων δικτύων αποτελούν η μέγιστη επιτρεπτή καθυστέρηση (latency) και οι απαιτούμενοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων (data rate). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην εξέλιξη των δικτύων 5G ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, στην μεγαλύτερη κάλυψη δικτύου και όχι στη χρήση τυπικών υπηρεσιών δικτύου κινητής τηλεφωνίας.



Εικόνα 4. Απαιτήσεις καθυστέρησης και ρυθμού μετάδοσης δεδομένων ανά τύπο εφαρμογής. Πηγή: ITU [6]

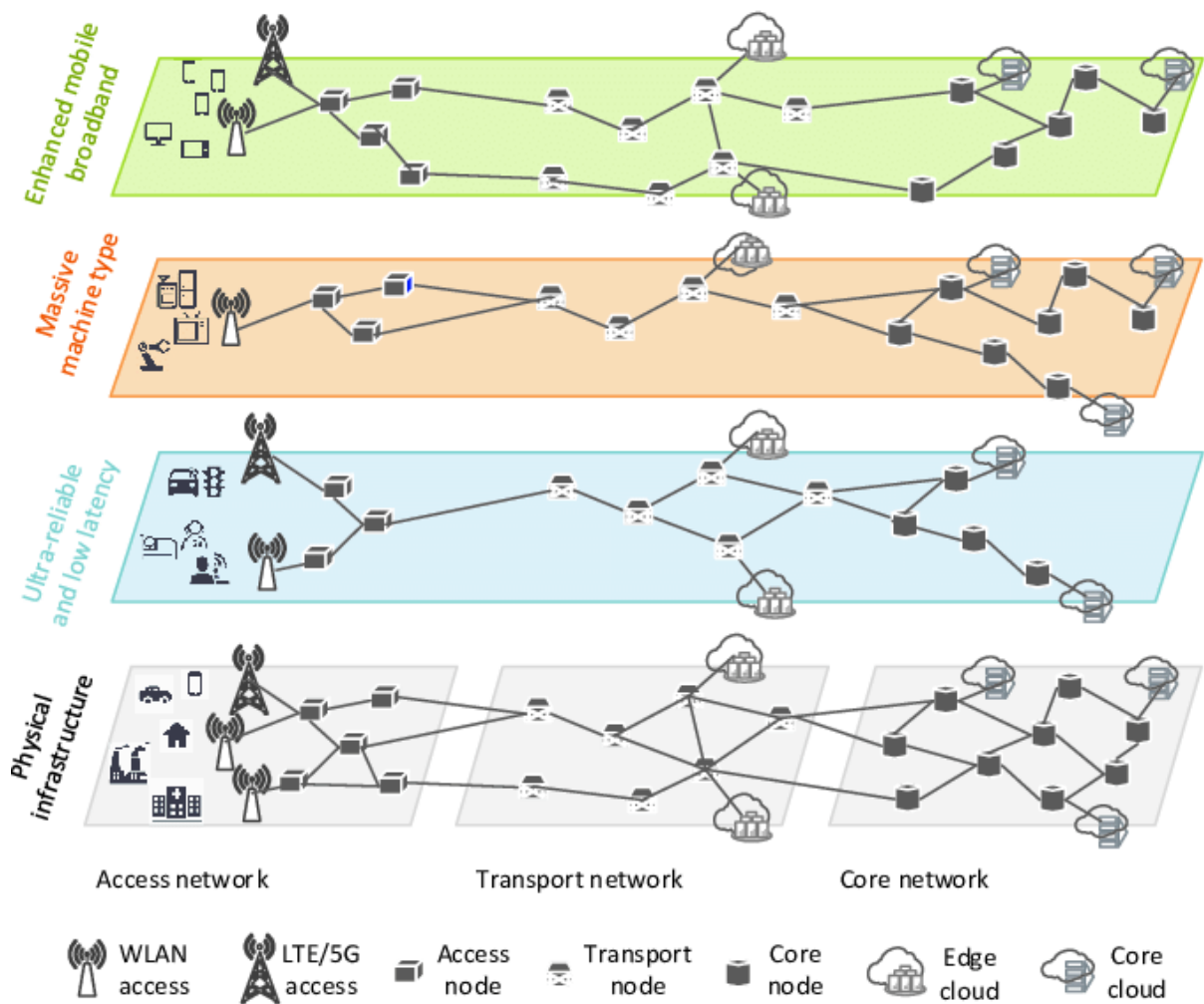
Η εικόνα 4 δείχνει για διάφορες υπηρεσίες που χρησιμοποιούν ασύρματα δίκτυα το που τοποθετείται η κάθε μια ως προς την καθυστέρηση (latency) σε σχέση με τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης (Bandwidth Throughput). Εκτός από το πεδίο εφαρμογής εισάγεται και ο διαχωρισμός της θέσης του χρήστη. Επιπλέον δείχνει για καθυστέρηση 1-10 ms και ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 100Mbps-1Gbps τις υπηρεσίες οι οποίες θα είναι πλέον εφικτές από τα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Στο γράφημα φαίνονται και οι υπηρεσίες που μπορούν να εξυπηρετηθούν από τα υπάρχοντα δίκτυα.

Όσον αφορά τις συχνότητες λειτουργίας και τα διαθέσιμα κανάλια η προδιαγραφή TS 38.101 και μεταγενέστερες κατά 3GPP προβλέπουν την χρήση μιας νέας τεχνολογίας με την ονομασία 5G NR. Σε αυτή χρησιμοποιούνται δύο ζώνες λειτουργίας. Η τωρινή ισχύουσα προδιαγραφή είναι η TS 38.104 [7].

1. Frequency Range 1 (FR1) 410 MHz – 7125 MHz με 86 ζώνες συχνοτήτων
2. Frequency Range 2 (FR2) 24250 MHz – 52600 MHz με 4 ζώνες συχνοτήτων

Τυπικά το εύρος του ασύρματου καναλιού είναι 5, 10, 15, 20 MHz στην FR1 και 50, 100, 200, 400 MHz στην FR2. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις χαμηλότερης συχνότητας ζώνες στην FR1 υπάρχει επικάλυψη με ζώνες συχνότητας δικτύων 4G.

Κατά την αρχική υλοποίηση δικτύων 5G προβλέπεται η χρήση υπάρχουσας Long-Term Evolution (LTE) υποδομής (Non Standalone Mode). Έπειτα θα υλοποιηθεί μια 5G υποδομή αποτελούμενη αποκλειστικά από νέα δικτυακά τμήματα (Standalone Mode). Ένα δομικό διάγραμμα της αρχιτεκτονικής του συστήματος είναι το παρακάτω.



Εικόνα 5. Βασική διαστρωμάτωση δικτύου 5G. Πηγή: IEEE [8]

Η νέα γενιά δικτύων προορίζεται να καλύψει μια ευρεία γκάμα εφαρμογών σε διάφορα νέα πεδία όπως η βιομηχανία, η δικτύωση οχημάτων, η τηλεϊατρική κ.α. Για την κάλυψη των διαφορετικών αναγκών έχει εισαχθεί η λογική του δικτυακού διαχωρισμού (network slicing). Στην εικόνα 5 φαίνεται η λογική του διαχωρισμού σε επιμέρους στρώματα. Έχει υιοθετηθεί με σκοπό την ευέλικτη κάλυψη όλων των διαφορετικών αναγκών ως προς κάλυψη, ταχύτητα και υστέρηση χρησιμοποιώντας κοινή υποδομή.

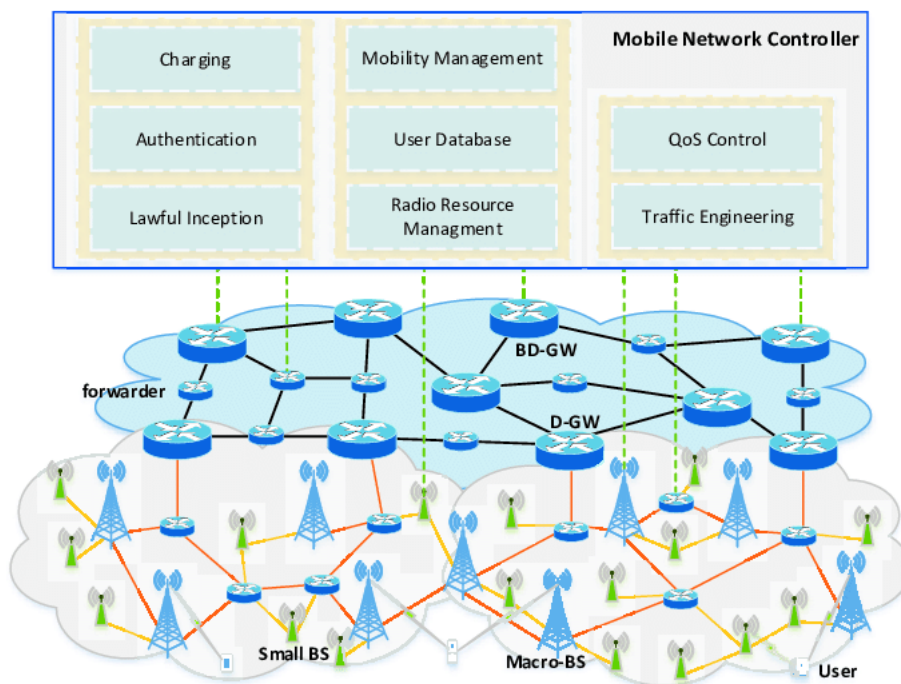
Οι υπηρεσίες δεδομένων δρομολογούνται από το δίκτυο κορμού (core network), στο οποίο υπάρχει διασύνδεση με υποδομές νέφους (cloud) και IP ή και MPLS (Multi-Protocol Label Switching) δίκτυα κορμού. Τα δύο τελευταία είναι παρόντα σε διάφορους βαθμούς ήδη στις δικτυακές υποδομές τηλεπικοινωνιακών παρόχων.

Εκτός του παραπάνω διαχωρισμού υπάρχει και η λογική του διαχωρισμού ανάλογα με την λειτουργία. Διακρίνεται το επίπεδο ελέγχου (control plane), όπου τοποθετούνται τα πρωτόκολλα με τα οποία ελέγχεται η σύνδεση του τελικού χρήστη

με το δίκτυο για λειτουργίες όπως συνδεσιμότητα, μεταπομπή χρηστών και διαχείριση ράδιο-πόρων και radio resource management.

Αντίστοιχα στο επίπεδο χρήστη (user plane) τα πρωτόκολλα διαχειρίζονται απ' άκρο σε άκρο (end to end) την υπηρεσία δεδομένων, την ποιότητα της υπηρεσίας (Quality of Service-QoS) και τη διασύνδεση του ασύρματου δικτύου με το δίκτυο κορμού. Ο διαχωρισμός αυτός υπάρχει ήδη από την προτυποποίηση των δικτύων 4G. Στην περίπτωση των δικτύων πέμπτης γενιάς έχει αναδιαμορφωθεί για να είναι σε θέση να ανταπεξέλθει στους μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων και τους διαφορετικούς τύπους εφαρμογών.

Μια νέα τεχνική που έχει προταθεί για τα δίκτυα 5G είναι αυτή της δικτύωσης καθορισμένης από λογισμικό (Software Defined Networking-SDN). Αποσκοπεί στη βελτίωση της ευελιξίας στην διαχείριση του δικτύου με την χρήση προγραμματιζόμενων ελεγκτών. Η βασική αρχή του SDN είναι η χρήση εικονικοποίησης (virtualization) για όσες περισσότερες λειτουργίες γίνεται. Συνολικά η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών (Network Function Virtualization - NFV) [9].



Εικόνα 6. Χρήση SDN λειτουργίας σε δίκτυο 5G. Πηγή: IEEE [10]

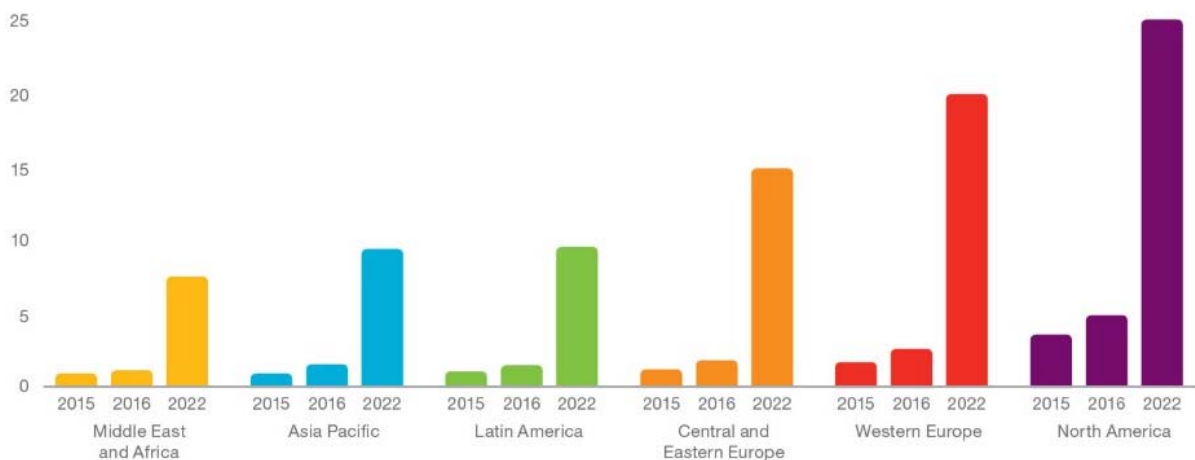
Στην εικόνα 6 φαίνεται η επίδραση του SDN ή ελεγκτή κινητού δικτύου (mobile network controller). Αναλαμβάνοντας τις λειτουργίες ελέγχου και διαχείρισης σκοπός

είναι να απελευθερωθούν πόροι δικτύου οι οποίοι διατίθενται για την εξυπηρέτηση των υπηρεσιών. Καθώς η υλοποίηση του ελεγκτή θα βασίζεται σε λογισμικό, οι όποιες αλλαγές απαιτούνται για την κάλυψη νέων αναγκών θα καθίστανται πιο εύκολες.

1.2 Προκλήσεις στα δίκτυα 5G

Τα δίκτυα 5G αναμένεται ότι θα εξυπηρετήσουν μία ευρεία γκάμα από εφαρμογές και έτσι παρουσιάζεται μία σειρά από προκλήσεις οι οποίες θα πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η πρώτη και σημαντικότερη πρόκληση η οποία παρουσιάζεται είναι η κάλυψη των αναγκών που υπάρχουν στην σημερινή αγορά τηλεπικοινωνιών ως προς τις υπηρεσίες δεδομένων. Από τα 3G δίκτυα και μετά, με την κυριαρχία φορητών συσκευών (smartphones, tablets) και υπηρεσιών, όπως για παράδειγμα iTunes, YouTube mobile, Netflix παρατηρείται μια σαφής αύξηση της κίνησης ανά χρήστη όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 7.

Data traffic per smartphone (GB per month)



Εικόνα 7. Μηνιαία χρήση δεδομένων για τα έτη 2015 και 2016 και πρόβλεψη για το έτος 2022 [11]

Τίθεται επομένως το ζήτημα της δικτυακής υποδομής η οποία είναι απαραίτητη σε backhaul / backbone επίπεδο για την υποστήριξη των ρυθμών μετάδοσης που υπόσχεται η πέμπτη γενιά δικτύων. Οι παραπάνω υποδομές αυξάνουν τις ταχύτητες και την χωρητικότητα του δικτύου αλλά και την πολυπλοκότητα και το κόστος της υλοποίησης και συντήρησης. Ήδη από την υιοθέτηση των δικτύων 4G έχει ξεκινήσει η χρήση δικτύων οπτικών ινών. Ανάλογα με την περίπτωση η επέκτασή τους κρίνεται

απαραίτητη. Η νομοθεσία όμως που υπάρχει τουλάχιστον στην Ελλάδα για την απόκτηση άδειας για την εγκατάσταση δικτύων οπτικών ινών εισάγει χρονοβόρες διαδικασίες που απαιτούν εγκρίσεις φορέων του δημοσίου τομέα και της τοπικής αυτοδιοίκησης για την διέλευση των δικτύων από κοινόχρηστες υποδομές. Οι εναλλακτικές λύσεις, όπως η χρήση μικροκυματικών ή δορυφορικών ζεύξεων είναι εξίσου δαπανηρές.

Όσον αφορά την κάλυψη των χρηστών από το ασύρματο δίκτυο υπάρχει το ζήτημα της επέκτασης του τελευταίου. Τα δίκτυα 5G λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες όπου η εξασθένηση του σήματος είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Για την αντιμετώπιση φαινομένων διάλειψης και εξασθένησης του σήματος σε περιοχές με πυκνή δόμηση επιβάλλεται η χρήση περισσότερων μικροκυψελών. Εισάγεται επομένως αυξημένο κόστος στην λειτουργία του δικτύου. Η επέκταση των δικτύων θα είναι ακόμη πιο δαπανηρή καθώς προβλέπεται η χρήση τους σε εφαρμογές, όπως η βιομηχανία και η γεωργία. Είναι πεδία όπου η παρακολούθηση και διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι κρίσιμα στοιχεία. Πρόκειται όμως για περιβάλλοντα όπου ως τώρα η ασύρματη κάλυψη δεν είναι ιδανική. Η χρήση μεγάλου αριθμού μικροκυψελών (microcells) που θα προσφέρουν κάλυψη σε μια μικρή σχετικά περιοχή δεν θεωρείται αποδοτική λόγω κόστους και εξόδων συντήρησης. Η λύση αυτή εμπίπτει και σε εμπόδια τα οποία σχετίζονται με αντιλήψεις σχετικά με την αρνητική επίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην δημόσια υγεία, για την οποία απαιτείται καλύτερη ενημέρωση του κοινού. Επιπλέον θα πρέπει να συνυπολογιστεί και η περίπτωση φυσικών καταστροφών ή βλαβών μεγάλης έκτασης. Τυπικά η γρήγορη αποκατάσταση ανάλογα με τις συνθήκες ενδεχομένως να μην είναι εφικτή, ενώ σχεδόν σίγουρα θα είναι δαπανηρή.

1.3 Χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων για επέκταση δικτύου κινητής τηλεφωνίας

Οι παραπάνω παράγοντες (κόστος, πρακτικά ζητήματα, νομοθεσία) έχουν ωθήσει την βιομηχανία τηλεπικοινωνιών στο να αναζητήσει εναλλακτικές όσον αφορά την κάλυψη που πρέπει να προσφέρουν τα νέα δίκτυα. Μία λύση που εξετάζεται είναι αυτή των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicle – UAV). Το μικρό μέγεθός τους, η ευκολία με την οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πεδίο και η δυνατότητα απομακρυσμένου χειρισμού τα καθιστούν μια πολλά υποσχόμενη λύση στα θέματα της αντιμετώπισης φυσικών καταστροφών και εναέριας παρακολούθησης.

Η πρόοδος που έχει επιτευχθεί στον τομέα έχει επιτρέψει τη δημιουργία εναέριων οχημάτων με έμφαση στους τομείς της ευελιξίας και αυτονομίας. Αρχικά η χρήση των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων ήταν περιορισμένη στους τομείς της ασφάλειας και των στρατιωτικών εφαρμογών ως μέσα έρευνας χώρου, συλλογής πληροφοριών ή επιθετικών αεροσκαφών. Εντούτοις τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί και εμπορικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα ως μέσα εναέριας φωτογράφισης ή βιντεοσκόπησης. Σε σύγκριση με ένα τυπικό δίκτυο που βασίζεται σε επίγειους σταθμούς βάσης η χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων είναι πιο ευέλικτη στην διαχείριση και πιο εύκολα υλοποιήσιμη. Μοναδική απαραίτητη προϋπόθεση είναι η διατήρηση οπτικής κατά κύριο λόγο επαφής των UAV με τους σταθμούς του επίγειου δικτύου [12].

Μια βασική κατεύθυνση που εξετάζεται για την ενσωμάτωσή τους στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι η χρήση ενός αριθμού μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων για την επέκταση των υπαρχόντων δικτύων, παρέχοντας μια on-demand πλατφόρμα. Ανάλογα με τον αριθμό των οχημάτων και τις θέσεις ή τις πορείες πτήσης αυτών θα είναι εφικτό να καλυφθούν επιπρόσθετες ανάγκες ή να αντιμετωπιστούν προβλήματα στην λειτουργία των δικτύων. Τα οχήματα θα είναι σε θέση να λειτουργούν είτε ως κινητοί εναέριοι σταθμοί βάσης (Base Stations-BS) για το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας είτε ως σημεία πρόσβασης (Access Points-AP) για τοπικά ασύρματα δίκτυα. Εξετάζεται επίσης η χρήση μεμονωμένων οχημάτων ή αριθμού αυτών που θα συνεργάζονται σε μια ad-hoc τοπολογία.

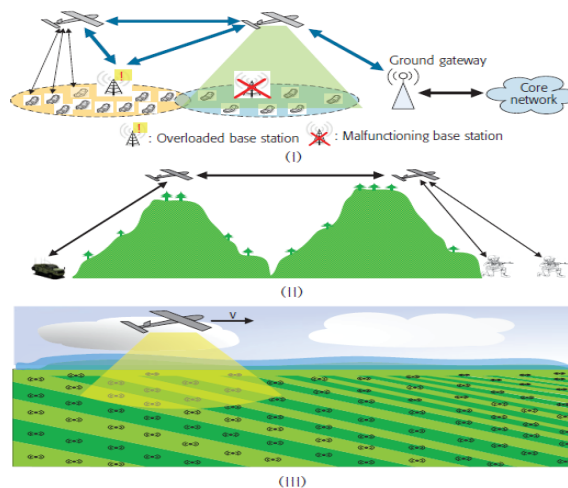
Το κύριο πλεονέκτημα που προσφέρεται από τα παραπάνω σενάρια είναι μια αποδοτική σε σχέση με το κόστος χρήση και πιο γρήγορη ανάπτυξη των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων στις απαιτούμενες θέσεις ή πορείες πτήσης. Αυτό τα καθιστά μια ιδανική λύση σε επείγουσες περιπτώσεις ή περιπτώσεις επικοινωνίας η οποία δεν αναμένεται να διαρκέσει για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, η ευκολία αλλαγής θέσης μπορεί να αλλάξει δυναμικά τις δυνατότητες κάλυψης. Ως αποτέλεσμα το δίκτυο θα μπορεί να ανταπεξέλθει σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και ανάγκες.

Το έτερο σημαντικό πλεονέκτημα είναι η εγκαθίδρυση ζεύξεων που θα βασίζονται κατά κύριο λόγο στην απευθείας οπτική επαφή (Line of Sight-LoS). Η θέση του οχήματος στον αέρα τυπικά θα είναι μακριά από εμπόδια στο ύψος του τελικού χρήστη. Το γεγονός αυτό αυξάνει κατακόρυφα τις πιθανότητες εγκαθίδρυσης τέτοιων ζεύξεων στις οποίες το ασύρματο κανάλι εμφανίζει λιγότερες απώλειες λόγω σκέδασης, περίθλασης ή διάθλασης από εμπόδια. Θεωρητικά σε μια τέτοια

περίπτωση θα είναι εφικτή η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, αυξάνοντας το χρόνο παραμονής του οχήματος στον αέρα.

Οι Zeng, Zhang και Lim [12] προτείνουν τρεις τρόπους αξιοποίησης στα κινητά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας οι οποίοι απεικονίζονται στην εικόνα 8 και αναλύονται ως εξής:

1. Καθολική κάλυψη δικτύου από μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα τα οποία αναπτύσσονται για να υποστηρίξουν το υπάρχον δίκτυο. Παραδείγματα αποτελούν η χρήση για αποκατάσταση της κάλυψης σε περίπτωση βλάβης μεγάλης έκτασης και η υποβοήθηση σταθμών βάσης για εξυπηρέτηση της κίνησης σε περιοχές με μεγάλη ζήτηση.
2. Υποβοηθούμενη αναμετάδοση από μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα τα οποία αναπτύσσονται για την παροχή συνδεσιμότητας σε χρήστες οι οποίοι λόγω απόστασης δεν είναι εφικτό να έχουν αξιόπιστες ζεύξεις με επίγειους σταθμούς βάσης.
3. Συλλογή και διασπορά πληροφοριών από μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα. Τυπικό παράδειγμα είναι η χρήση για μετάδοση δεδομένων από και προς αυτόνομες συσκευές σε αυτοματοποιημένες παραγωγικές διαδικασίες.



Εικόνα 8. Τυπικές χρήσεις μη επανδρωμένων ιπτάμενων: (I) Καθολική κάλυψη δικτύου, (II) Υποβοηθούμενη αναμετάδοση από, (III) Συλλογή και διασπορά πληροφοριών [12]

Σε κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα θα πρέπει να υποστηρίζουν τις εξής τοπολογίες, με τις απαιτήσεις σε χωρητικότητα να υπαγορεύονται από τις εφαρμογές και τον αριθμό των χρηστών:

1. Διασύνδεση δικτύου κορμού μεταξύ μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος και επίγειου σταθμού
2. Διασύνδεση δικτύου κορμού μεταξύ μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων
3. Απευθείας διασύνδεση τελικού χρήστη και μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος

Με στόχο τη μείωση του φόρτου δεδομένων στους επίγειους σταθμούς δικτύων που καλύπτουν αστικές περιοχές, οι Sharma, Bennis και Kumar [13] προτείνουν την χρήση μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος για την δημιουργία πολλαπλών ενδιάμεσων ζεύξεων με επίγειους σταθμούς βάσης.

Διερευνάται παράλληλα η χρήση τεχνικών επικοινωνίας συσκευής-προς-συσκευής [12], [13]. Η τεχνική αποσκοπεί στην απευθείας σύνδεση μεταξύ χρηστών και προβλέπει την αντικατάσταση επίγειων σταθμών από μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα σε πολλές περιπτώσεις. Τα τελευταία θα επιδρούν ως ενδιάμεσοι κόμβοι για τη διατήρηση του καναλιού επικοινωνίας. Επίσης, τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα θα χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των τελικών χρηστών με το δίκτυο επικοινωνιών, αλλά και για τη διευκόλυνση της απευθείας σύνδεσης μεταξύ των χρηστών. Για την υλοποίηση του ασύρματου καναλιού μεταξύ χρηστών ή μεταξύ χρήστη-μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος-δικτύου προβλέπεται η χρήση υπάρχουσας υποδομής και των ίδιων φασμάτων συχνοτήτων μειώνοντας περαιτέρω το κόστος υλοποίησης [14].

Ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η ενσωμάτωση των εναέριων οχημάτων στο υπάρχον δίκτυο, στις παραπάνω περιπτώσεις επικρατούν δύο περιβάλλοντα διάδοσης. Αυτά τα κανάλια εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τα αντίστοιχα κανάλια που συναντώνται σε ένα επίγειο δίκτυο.

Αναμφίβολα το πιο σημαντικό κανάλι είναι μεταξύ μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος και εδάφους, λόγω της ύπαρξης του τελικού χρήστη επί του τελευταίου. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων αναμένεται να υπάρχουν διαθέσιμα ασύρματα κανάλια τα οποία θα προέρχονται από οπτική επαφή. Ωστόσο, είναι πιθανό να παρουσιαστούν διαλείψεις σκίασης μεγάλης διάρκειας από το έδαφος, κτίρια ή από το ίδιο το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα καθώς αυτό κινείται. Επιπλέον οι τυπικοί μηχανισμοί διάδοσης που συναντώνται και σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι πιθανόν να είναι εμφανιστούν. Το αποτέλεσμα αυτών θα είναι η δημιουργία διαλείψεων πολλαπλών διαδρομών προς τον δέκτη. Ακόμη, συνιστώσες του σήματος

από αντανακλάσεις εδάφους αποτελούν έναν ακόμη παράγοντα που θα πρέπει επίσης να συνυπολογιστεί.

Το δεύτερο είδος καναλιού είναι αυτό μεταξύ δύο οχημάτων. Σε αυτή την περίπτωση οι επιδράσεις από εμπόδια στο έδαφος μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες με την συνιστώσα του σήματος που προέρχεται από οπτική επαφή να είναι η επικρατούσα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω δεν αφορούν μόνο τα κανάλια μέσω των οποίων θα μεταδίδονται δεδομένα, αλλά και τα κανάλια τα οποία θα πρέπει να εγκαθιδρυθούν έτσι ώστε να εξυπηρετούνται λειτουργίες ελέγχου δικτύου και μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων.

Παρά τα πλεονεκτήματα που προσφέρει μια πιθανή χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων στα παραπάνω σενάρια υπάρχουν και μερικές σημαντικές προκλήσεις.

Η πιο σημαντική σχετίζεται με τους περιορισμούς που θα παρουσιαστούν λόγω του μεγέθους, του βάρους και της ισχύος εκπομπής και της χωρητικότητας της μπαταρίας των οχημάτων. Οι παράγοντες αυτοί θέτουν όρια ως προς την εμβέλεια, το ωφέλιμο φορτίο και το χρόνο που ένα μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα θα μπορεί να είναι στον αέρα. Η μεταβαλλόμενη φύση των ασύρματων καναλιών θα έχει ως αποτέλεσμα τη μη σταθερή κατανάλωση ισχύος από τον εξοπλισμό που θα φέρει το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα. Τα παραπάνω καθιστούν υποχρεωτικό ένα μηχανισμό διαχείρισης ενέργειας και τη θέσπιση κριτηρίων βάσει των οποίων θα αποφασίζεται η χρήση των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων.

Επιπλέον, η δυναμική τοπολογία που θα δημιουργηθεί ως αποτέλεσμα των εναέριων κινητών σταθμών βάσης θα θέσει ιδιαίτερες δυσκολίες στο συντονισμό την κίνησης ενός μεγάλου αριθμού οχημάτων, αλλά και στις λειτουργίες ελέγχου πτήσης ή και θέσης, ελέγχου και εποπτείας μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων σε πραγματικό χρόνο και ελέγχου λειτουργιών δικτύου.

Μια τελευταία πρόκληση η οποία παρουσιάζεται αφορά το ύψος πτήσης ή θέσης για το σενάριο στατικών εναέριων οχημάτων. Η αύξηση του θα οδηγεί τυπικά σε μεγαλύτερες απώλειες του σήματος κοντά στο έδαφος. Από την άλλη όμως θα ελαττώσει την επίδραση από εμπόδια, δίνοντας μεγαλύτερες πιθανότητες για ζεύξεις μέσω οπτικής επαφής μεταξύ χρηστών και του οχήματος και επομένως μεγαλύτερη κάλυψη.

1.4 Μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση

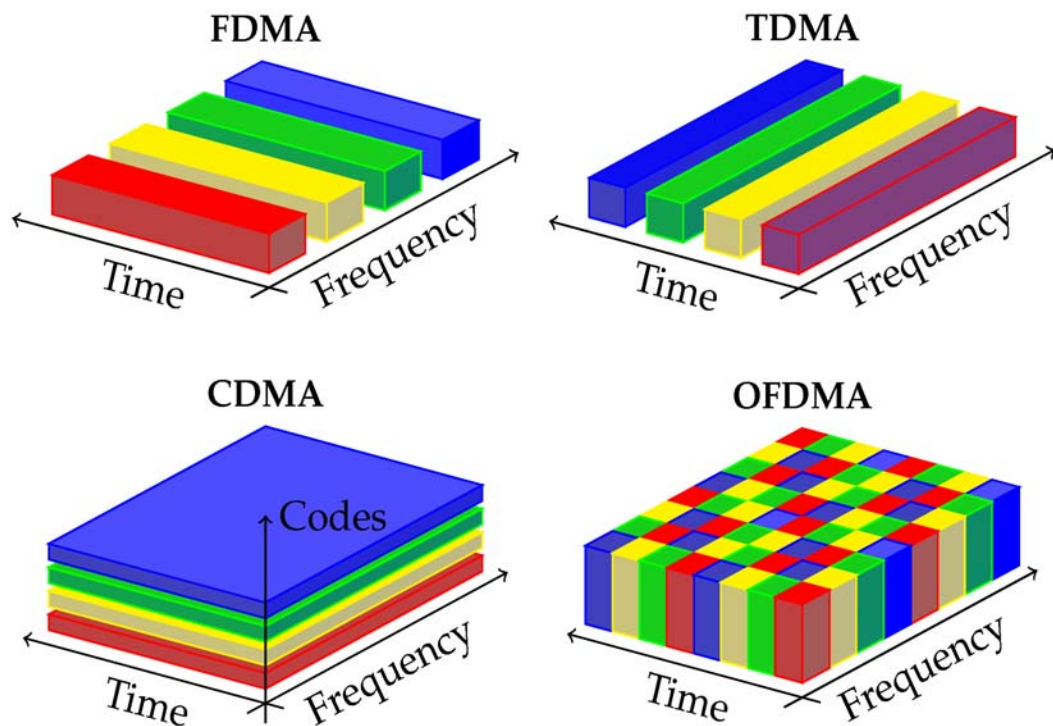
Η μέθοδος πρόσβασης των χρηστών στο φυσικό μέσο εξελίσσονταν με κάθε γενιά δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Επιγραμματικά ανά γενιά δικτύου χρησιμοποιούνται οι εξής τεχνικές:

Μέθοδος πρόσβασης	Γενιά δικτύου
Frequency Division Multiple Access-FDMA	1G
Time Division Multiple Access-TDMA	2G
Code Division Multiple Access-CDMA	3G
Orthogonal Frequency Division Multiple Access-OFDMA	4G

Πίνακας 1. Μέθοδος πρόσβασης φυσικού μέσου ανά γενιά δικτύου κινητής τηλεφωνίας

Οι μέθοδοι πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιήθηκαν στις πρώτες τέσσερις γενιές δικτύων χρησιμοποίησαν διάφορα χαρακτηριστικά του σήματος και του φυσικού μέσου. Στην μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiple Access-FDMA) το διαθέσιμο φάσμα χωρίζεται σε μη επικαλυπτόμενα κανάλια, με το κάθε κανάλι να χρησιμοποιείται αποκλειστικά από έναν χρήστη. Στην μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access-TDMA) σε όλους τους χρήστες δίνεται μία χρονοθυρίδα (timeslot) κατά τη διάρκεια της οποίας εκπέμπουν δεδομένα. Στα δίκτυα τρίτης γενιάς υιοθετήθηκε η μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης με κωδικοποίηση (Code Division Multiple Access-CDMA) όπου οι χρήστες κατελάμβαναν το μέσο ταυτόχρονα. Για την αποφυγή παρεμβολών εφαρμόστηκαν ταυτόχρονα τεχνικές εξάπλωσης φάσματος (spread spectrum) κατά την εκπομπή και χρήση κωδικοποίησης. Η μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική συχνότητα (Orthogonal Frequency Division Multiple Access-OFDMA) επιτρέπει την ταυτόχρονη εκπομπή από πολλαπλούς χρήστες μέσω της ορθογώνιας απόδοσης υπό-φορέων (subcarriers) συγκεκριμένου εύρους ανά χρήστη.

Μια γραφική αναπαράσταση δίνεται στην εικόνα 9. Τα διαφορετικά χρώματα σε κάθε σχήμα υποδηλώνουν ξεχωριστούς χρήστες.



Εικόνα 9. Γραφική αναπαράσταση των τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης [15]

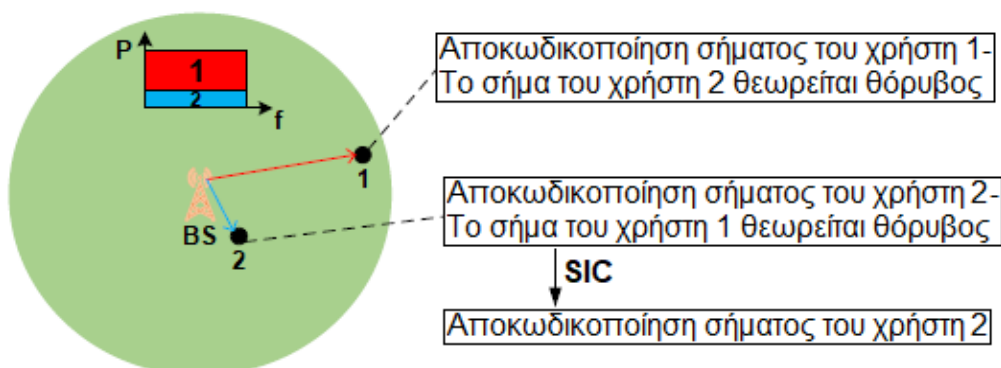
Οι παραπάνω μέθοδοι επέτρεψαν την χρήση των δικτύων από έναν συνεχώς αυξανόμενο αριθμό συσκευών. Η ορθογώνια χρήση δικτυακών πόρων όπως συχνότητα ή χρόνος, επέτρεψε την σχετικά απλή υλοποίησή τους. Σημαντικά μειονεκτήματα πάντοτε ήταν η απαίτηση για αποδοτική χρήση του διαθέσιμου φάσματος και ο προκαθορισμένος αριθμός των χρηστών που ήταν εφικτό να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα. Λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων των δικτύων 5G απαιτούνται περαιτέρω βελτιώσεις για την πολλαπλή πρόσβαση. Ένας από τους αρχικούς στόχους είναι η τριπλάσια αποδοτικότητα φάσματος. Επιπλέον αναμένεται δεκαπλάσια πυκνότητα συνδέσεων με τη χρήση των δικτύων από συσκευές IoT. Για να καλυφθούν οι αυξημένες απαιτήσεις προτάθηκε μια νέα μέθοδος μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access-NOMA).

Βασικό σημείο της NOMA είναι ότι οι χρήστες που είναι συνδεδεμένοι σε μια κυψέλη χρησιμοποιούν από κοινού το σύνολο του φάσματος. Ο πομπός του σταθμού βάσης εκπέμπει το ίδιο σήμα προς όλους τους χρήστες. Το τελευταίο είναι προϊόν πολυπλεξίας ως προς την ισχύ εκπομπής προς κάθε χρήστη. Το ποσοστό της ισχύος ανά χρήστη στο τελικό σήμα ρυθμίζεται από το σταθμό βάσης κατά την

εκπομπή. Ο κυριότερος παράγοντας που το καθορίζει είναι τα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού μεταξύ σταθμού και χρήστη. Το ποσοστό της ισχύος είναι κάθε φορά τόσο ώστε να αποφεύγονται ισχυρές παρεμβολές ή διακοπή επικοινωνίας. Επομένως το ποσοστό θα είναι μεγαλύτερο καθώς οι συνθήκες του ασύρματου καναλιού θα είναι χειρότερες. Από αυτό προκύπτει το σχήμα κωδικοποίησης και ο τελικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων.

Στον τελικό χρήστη ο δέκτης εκτελεί μια λειτουργία αποκωδικοποίησης μέσω της οποίας ανακτά την συνιστώσα του σήματος που τον αφορά. Η διαδικασία αποκωδικοποίησης ονομάζεται διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (Successive Interference Cancellation - SIC). Η διαδικασία εκμεταλλεύεται τα διαφορετικά ποσοστά ισχύος μεταξύ των συνιστωσών του πολυπλεγμένου σήματος. Τυπικά ο δέκτης με το υψηλότερο ποσοστό ισχύος απορρίπτει τα σήματα με χαμηλότερα ποσοστά ισχύος ως θόρυβο. Οι υπόλοιποι δέκτες αποκωδικοποιούν τα σήματα με μεγαλύτερη ισχύ και τα αφαιρούν από το συνολικό. Ταυτόχρονα οι συνιστώσες με χαμηλότερα ποσοστά ισχύος αφαιρούνται ως θόρυβος. Η αφαιρετική αυτή διαδικασία επιτρέπει σε κάθε δέκτη να ανακτήσει από το πολυπλεγμένο σήμα το μέρος εκείνο που τον αφορά. Η παραπάνω διαδικασία ακολουθείται στην φορά μετάδοσης από τον σταθμό προς τον δέκτη (downlink). Παρόμοια λειτουργία ακολουθείται και στην αντίστροφη φορά μετάδοσης (uplink). Το παραπάνω μοντέλο λειτουργίας αναφέρεται ως NOMA στο πεδίο της ισχύος (Power Domain Non-Orthogonal Multiple Access - PD-NOMA).

Η ρύθμιση της ισχύος εκπομπής μεταξύ σταθμού βάσης και δέκτη είναι κρίσιμη για δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι η διατήρηση του καναλιού επικοινωνίας εφόσον ο δέκτης κινείται εντός εμβέλειας του σταθμού. Ο δεύτερος είναι η αποτελεσματική λειτουργία της λειτουργίας SIC στον δέκτη [16][17].



Εικόνα 10. Γραφική αναπαράσταση Non Orthogonal Multiple Access με χρήση SIC στον δέκτη [18]

Η εικόνα 10 αναπαριστά έναν σταθμό βάσης (BS) ο οποίος εξυπηρετεί ταυτόχρονα τους δέκτες 1 και 2. Ο πράσινος κύκλος αναπαριστά την περιοχή κάλυψης του σταθμού. Το γράφημα συχνότητας-ισχύος εκπομπής αναπαριστά τα διαφορετικά επίπεδα ισχύος για την χρήση του ίδιου φάσματος συχνοτήτων. Ο δέκτης 1 είναι σε μεγαλύτερη απόσταση από τον σταθμό βάσης σε σχέση με τον δέκτη 2, οπότε το ασύρματο κανάλι του θα έχει περισσότερες απώλειες. Επομένως ο σταθμός βάσης εκπέμπει με περισσότερη ισχύ προς τον δέκτη 1. Ας θεωρηθούν τα ασύρματα κανάλια h_1 και h_2 και οι συντελεστές ισχύος a_1 και a_2 , για τους δέκτες 1 και 2 αντίστοιχα. Οι διαφορές μεταξύ των καναλιών έχουν ως επόμενο ότι θα ισχύουν οι παρακάτω συνθήκες

$a_1 \geq a_2$ η εκπομπή προς τον δέκτη 1 γίνεται με μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος
 $|h_1| \leq |h_2|$ ο δέκτης 2 επικοινωνεί με τον σταθμό βάσης υπό καλύτερες συνθήκες

Μέσω της διαδικασίας επιλεκτικής αποκωδικοποίησης και απόρριψης συνιστωσών του σήματος επιτυγχάνονται ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις, πρώτα για το δέκτη 1

$$\log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 a_1^2}{|h_1|^2 + a_2^2 + \frac{1}{p}} \right) \quad (1)$$

Αντίστοιχα για το δέκτη 2:

$$\log_2 \left(1 + p |h_2|^2 + a_2^2 \right) \quad (2)$$

Η διαδικασία SIC στον δέκτη 2 θα είναι πάντοτε εφικτή εφόσον ισχύει ότι [15]

$$\log_2 \left(1 + \frac{|h_2|^2 a_1^2}{|h_2|^2 + a_2^2 + \frac{1}{p}} \right) \geq \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 a_1^2}{|h_1|^2 + a_2^2 + \frac{1}{p}} \right) \quad (3)$$

Ο παράγοντας p είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio - SNR) κατά την εκπομπή σε dB. Τα τελευταία χρόνια έχουν δημοσιοποιηθεί διάφορες

μελέτες σχετικά με τα οφέλη σε σχέση με την μέθοδο OFDMA που χρησιμοποιείται στα δίκτυα 4G. Για συγκεκριμένες παραμέτρους έχουν καταγραφεί τα παρακάτω αποτελέσματα: [19]

Παράμετροι εξομοίωσης	Απόδοση
Σε μικρή απόσταση από τον σταθμό 16QAM σε μεγάλη απόσταση από τον σταθμό QPSK Αποκωδικοποίηση σήματος με την χρήση SIC	OFDMA: 3.8 Mbps / NOMA: 5 Mbps
Εύρος Ζώνης: NOMA-5,4MHz / OFDMA- 2,7MHz Κεραία: 2x2 MIMO	Αύξηση ρυθμού δεδομένων 61% σε σχέση με OFDMA (Downlink)

Πίνακας 2. Σύγκριση μεθόδων πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική συχνότητα (OFDMA) και μη ορθογώνιας (NOMA) [19]

Η πιο σημαντική βελτίωση που εισάγει η παραπάνω μέθοδος αφορά την αποδοτική χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Μέχρι και τη μέθοδο OFDMA στα δίκτυα 4G, ο σταθμός βάσης αποδίδει μέρος του διαθέσιμου φάσματος σε ένα δέκτη ανεξάρτητα από τις επικρατούσες συνθήκες ασύρματου καναλιού, με αρνητικά αποτελέσματα για την επίδοση του δικτύου. Στην μέθοδο NOMA η ταυτόχρονη διάθεση του φάσματος σε όλους τους δέκτες είναι πιο αποτελεσματική.

Σε όλες τις προηγούμενες μεθόδους ένας δέκτης με μεγαλύτερη ισχύ λήψης και ευνοϊκότερες συνθήκες ασύρματου καναλιού από έναν άλλο έχει προτεραιότητα στην επικοινωνία με τον σταθμό βάσης. Επομένως ένας δέκτης που επικοινωνεί με τον σταθμό με υποδεέστερες συνθήκες έχει χρονική υστέρηση στην μετάδοση δεδομένων, με αρνητικά αποτελέσματα στην λειτουργία εφαρμογών. Η ταυτόχρονη επικοινωνία όλων των δεκτών με τον σταθμό του δικτύου αποτρέπει το φαινόμενο. Παράλληλα εισάγει χαμηλή υστέρηση σε όλους τους δέκτες, μαζική σύνδεση συσκευών και περισσότερο ισότιμη αντιμετώπιση των χρηστών.

1.5 Επικοινωνία μηχανής-προς-μηχανή

Ένας τομέας στον οποίον αναμένεται ευρεία χρήση δικτύων πέμπτης γενιάς είναι αυτός της απευθείας επικοινωνίας μηχανής-προς-μηχανή (Machine-to-Machine Communications-M2M). Αυτός ο τρόπος επικοινωνίας χρησιμοποιείται ήδη κυρίως σε

βιομηχανικές εφαρμογές. Η κύρια χρήση τους είναι η συλλογή μετρήσεων και δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και η μετέπειτα επεξεργασία τους από κατάλληλο λογισμικό. Συνήθως δίκτυα που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές βασίζονται σε έναν κεντρικό κόμβο ο οποίος συλλέγει δεδομένα από αισθητήρες. Αυτός με την σειρά του τα μεταδίδει σε προσωπικούς σταθμούς εργασίας. Μια χαρακτηριστική εφαρμογή είναι τα βιομηχανικά συστήματα SCADA (Supervisor Control And Data Acquisition).

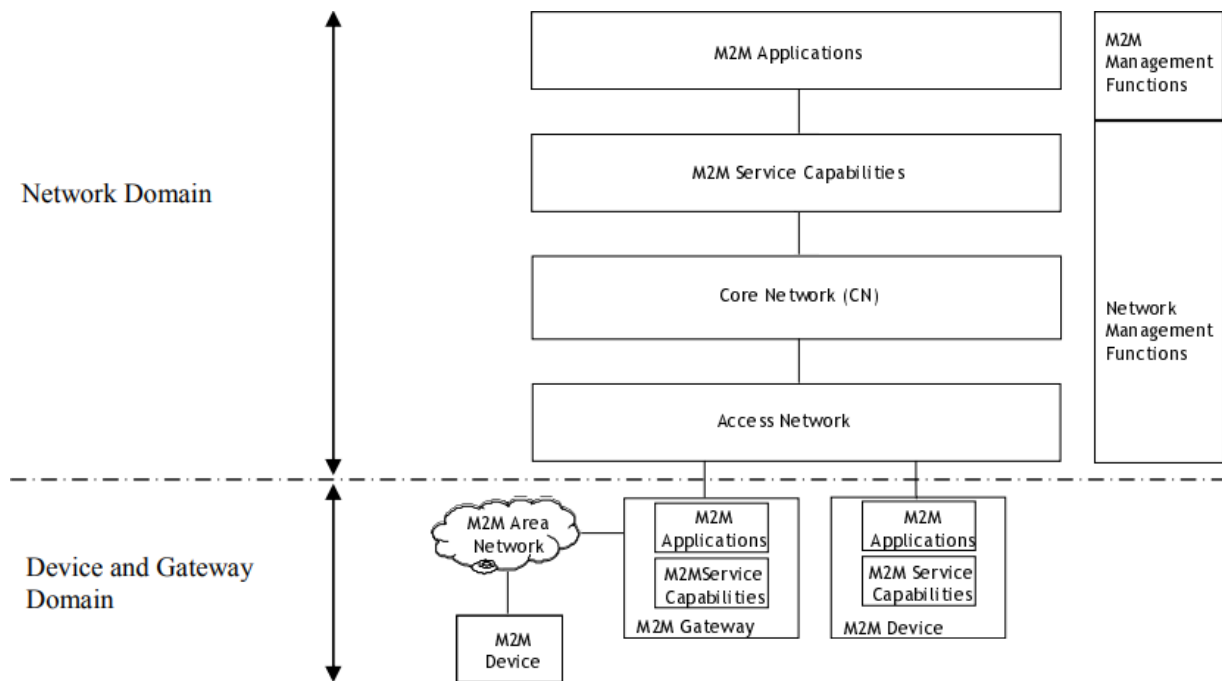
Τα τελευταία χρόνια η βασική μορφή ενός τέτοιου δικτύου έχει αλλάξει προς ένα πιο αποκεντρωμένο μοντέλο. Η διαδεδομένη χρήση IP δικτύων έχει επιτρέψει την δημιουργία δικτύων τα οποία έχουν την δυνατότητα να μεταδώσουν δεδομένα απευθείας στους χρήστες. Η αλλαγή αυτή έχει μειώσει τον χρόνο που απαιτείται για την μετάδοση και επεξεργασία δεδομένων ενώ θεωρείται και πιο αποδοτική από άποψης κατανάλωσης ενέργειας. Ο παράγοντας ο οποίος ώθησε την παραπάνω αλλαγή ήταν η αλλαγή του τρόπου δικτύωσης συσκευών. Τις τελευταίες δύο περίπου δεκαετίες παρατηρείται η αλλαγή από ενσύρματη δικτύωση σε χρήση 802.11 ή GSM/UMTS/LTE δικτύων. Η μετάβαση αυτή πλεονεκτεί σε ορισμένους τομείς.

Ο πρώτος και πιο σημαντικός είναι ότι απάλλαξε τους οργανισμούς και χρήστες από την ανάγκη δημιουργίας δικτυακών υποδομών, ειδικά στην περίπτωση της χρήσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Ακόμα και στην περίπτωση της χρήσης ασύρματων τοπικών δικτύων, η επέκτασή της χωρητικότητας και της κάλυψης αυτών είναι γενικά πιο εύκολη διαδικασία σε σύγκριση με ένα τυπικό ενσύρματο τοπικό δίκτυο.

Ο δεύτερος τομέας είναι ότι πλέον ήταν εφικτή μια νέα γενιά εφαρμογών συλλογής και μετάδοσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Αυτές οι εφαρμογές επέτρεψαν ή και βασίστηκαν στην δυνατότητα της κινητικότητας των συσκευών και των χρηστών. Η μετάβαση αυτή ήταν παράλληλη με την πρόοδο στον τομέα της μικροηλεκτρονικής που επέτρεψε την κατασκευή μικρότερων πομποδεκτών.

Οι εφαρμογές αυτές μπορούν να συνδέσουν απομακρυσμένους χρήστες και συσκευές. Οι εφαρμογές εκτείνονται σε τομείς όπως η βιομηχανική παραγωγή, η γεωργία, η δικτύωση οχημάτων για πρόγνωση βλαβών, η δημιουργία “έξυπνων” υποδομών σε πόλεις, εφαρμογές Internet-of-Things και άλλες. [20]

Η βασική αρχιτεκτονική μίας υποδομής κατά ETSI έχει ως εξής:



Εικόνα 11. Βασική αρχιτεκτονική υποδομής επικοινωνίας μηχανής-προς-μηχανή κατά ETSI [21]

Σε αυτήν ορίζονται τα δύο βασικά πεδία συσκευής-πύλης (Device and Gateway Domain) και δικτύου (Network Domain).

Στο πεδίο συσκευής-πύλης διακρίνονται τα εξής στοιχεία:

1. Συσκευή M2M: Εκτελεί εφαρμογές με ταυτόχρονη χρήση κατάλληλων υπηρεσιών (M2M Service Capabilities). Συνδέεται απευθείας στο πεδίο δικτύου μέσω του δικτύου πρόσβασης (Access Network). Η συσκευή εκτελεί απευθείας τις διαδικασίες επικοινωνίας με το επίπεδο δικτύου. Η συσκευή μπορεί να παρέχει υπηρεσίες και σε άλλες συσκευές οι οποίες δεν θα είναι ορατές από το πεδίο δικτύου. Εναλλακτικά η συσκευή συνδέεται μέσω μίας πύλης (M2M Gateway). Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ένα ενδιάμεσο δίκτυο (M2M Area Network). Η πύλη λειτουργεί σαν proxy για τις συσκευές οι οποίες συνδέονται με το πεδίο δικτύου. Οι λειτουργίες ταυτοποίησης, ελέγχου πρόσβασης και διαχείρισης απομακρυσμένων συσκευών είναι κοινές και για τους δύο τρόπους επικοινωνίας. Έχει προβλεφθεί η ύπαρξη διαφορετικών πυλών προς διαφορετικά δίκτυα.
2. M2M Area Network: Χρησιμοποιείται για την διασύνδεση συσκευών με πύλες (M2M Gateways) προς το πεδίο δικτύου. Πρόκειται για τοπικά δίκτυα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιούν πρωτόκολλα όπως IEEE 802.11, Zigbee, Bluetooth.

3. M2M Gateway: Εκτελεί εφαρμογές με ταυτόχρονη χρήση κατάλληλων υπηρεσιών (M2M Service Capabilities) και χρησιμοποιείται σαν proxy μεταξύ του πεδίου δικτύου και συσκευών. Είναι δυνατή και η χρήση του σαν σημείο συλλογής δεδομένων.

Στο πεδίο δικτύου διακρίνονται τα εξής στοιχεία:

1. Δίκτυο πρόσβασης το οποίο συνδέει τα στοιχεία του πεδίου συσκευής-πύλης με το Core δίκτυο. Η μορφή του δικτύου αυτού ποικίλλει, καθώς αυτό μπορεί να είναι ενσύρματο ή ασύρματο. Παραδείγματα αποτελούν τεχνολογίες xDSL, δορυφορικά συστήματα, UMTS/LTE ή Wi-Fi.
2. Δίκτυο κορμού το οποίο εκτελεί τις παρακάτω λειτουργίες.
 - IP διασύνδεση των συσκευών
 - Έλεγχος M2M υπηρεσιών και δικτύου
 - Περιορισμός συσκευών

Το στοιχείο αυτό μπορεί να είναι μέρος ενός δικτύου κορμού κινητής τηλεφωνίας η δεδομένων. Η ETSI προβλέπει την ύπαρξη διαφορετικών μορφών του στοιχείου αυτού που θα έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και λειτουργίες.

1. M2M Service Capabilities: Μέσω του στοιχείου παρέχονται λειτουργίες προς διάφορες εφαρμογές με τη χρήση λειτουργιών του Core δικτύου.
2. M2M Applications: Παρέχει την διεπαφή (interface) προς τον τελικό χρήστη.
3. Network Management Functions: Αφορά τις λειτουργίες ελέγχου και επίβλεψης των Access και Core δικτύων.
4. M2M Management Functions: Είναι το σύνολο των λειτουργιών ελέγχου των υπηρεσιών εντός του πεδίου δικτύου. Ο έλεγχος συσκευών αποτελεί διαφορετική υπηρεσία.

Ένα σημαντικό πρόβλημα της χρήσης τέτοιων υπηρεσιών είναι η επίδραση τους στην χωρητικότητα ενός δικτύου [22]. Συσκευές και αισθητήρες τείνουν να παράγουν συγχρονισμένα σημαντικά ποσά δεδομένων προς το δίκτυο στο οποίο συνδέονται. Η συμπεριφορά είναι ιδιαίτερα αισθητή στο σύνηθες σενάριο όπου ένας αριθμός αισθητήρων θα τεθεί σε λειτουργία ταυτόχρονα και θα στείλει δεδομένα μέσα από μια ασύρματη ζεύξη ή επίγειο κύκλωμα. Αλλαγές στην τοπολογία δικτύου ή στην δρομολόγηση των δεδομένων συνήθως έχουν την ίδια επίδραση. Ως αποτέλεσμα απαιτείται μεγαλύτερος ρυθμός δεδομένων από την συσκευή προς το δίκτυο (uplink). Αντίθετα, οι συσκευές κινητής τηλεφωνίας απαιτούν μεγαλύτερους ρυθμούς

μετάδοσης στην κάτω ζεύξη (downlink) από το δίκτυο προς τη συσκευή καθώς συνεχώς λαμβάνουν ροή δεδομένων για εφαρμογές και άλλα δεδομένα με την μορφή αρχείων, εικόνων ή αρχείων video.

Η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση και των δύο διαφορετικών εφαρμογών με εντελώς διαφορετικές ανάγκες σε εύρος δεδομένων σε κάθε κατεύθυνση (uplink-downlink) μέσω της χρήσης κοινών πόρων δημιουργεί νέες προκλήσεις. Η συγκέντρωση μεγάλου αριθμού αισθητήρων, αυτόνομων συσκευών και κινητών τηλεφώνων αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα στην κοινή χρήση του δικτύου και μια κατάσταση διαρκούς συναγωνισμού για την πρόσβαση σε αυτό. Στην σημερινή εποχή η χρήση υπηρεσιών δεδομένων από κινητές συσκευές είναι πολλαπλάσια σε σχέση με προηγούμενα χρόνια. Η υιοθέτηση τεχνολογιών Internet-of-Things και επικοινωνιών μηχανής-προς-μηχανή θα δημιουργήσει επιπλέον όγκο δεδομένων που θα κληθεί να διαχειριστεί ένα δίκτυο. Ως τώρα η χρήση δικτύων 4G δεν επιτρέπει την μαζική υιοθέτηση των παραπάνω τεχνολογιών. Αυτός είναι ένας από τους λόγους για τις αλλαγές που έχουν γίνει στο πρότυπο των δικτύων 5G προς αύξηση της χωρητικότητας και της ταχύτητάς τους.

1.6 Επικοινωνία συσκευής-προς-συσκευή

Ένα από τα ζητήματα που παρουσιάζει συνεχείς προκλήσεις από την εποχή των δικτύων 4G είναι η παροχή υπηρεσιών δεδομένων υψηλών ταχυτήτων μέσω ενός δικτύου υψηλής χωρητικότητας. Προς το σκοπό αυτό υιοθετήθηκαν αλλαγές και βελτιώσεις για να καλυφθούν οι αυξανόμενες ανάγκες κατά την σύσταση του προτύπου LTE-Advanced, που αποτέλεσε μια εξέλιξη των δικτύων 4G. Ο τομέας στον οποίο κρίνονται απαραίτητες βελτιώσεις είναι αυτός των υπηρεσιών με τοπικό χαρακτήρα, κυρίως στην απευθείας επικοινωνία μεταξύ των χρηστών. Μια λύση που προτάθηκε ήταν αυτή της χρήσης μη αδειοδοτημένου φάσματος. Ένα παράδειγμα είναι η σύσταση ad-hoc δικτύων, στα οποία όμως η λειτουργία χωρίς παρεμβολές από γειτονικά συστήματα δεν είναι εγγυημένη.

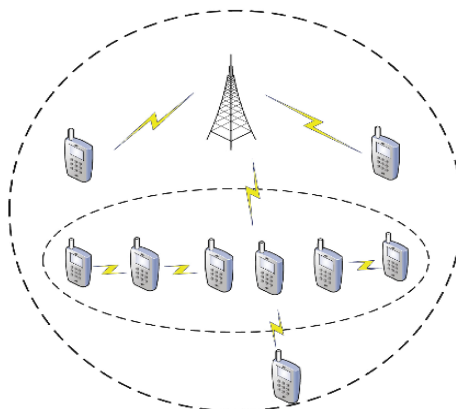
Η εναλλακτική λύση που κερδίζει έδαφος είναι η απευθείας επικοινωνία συσκευής-προς-συσκευή. Σε αυτή την περίπτωση δύο συσκευές επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους χωρίς να παρεμβάλλεται σταθμός βάσης από το δίκτυο. Η επικοινωνία βασίζεται σε εκπομπές χαμηλής ισχύος, με σκοπό τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του φάσματος. Στην περίπτωση των δικτύων 5G, η τεχνική αναμένεται ότι θα αυξήσει τη χωρητικότητά τους σε μεγάλο βαθμό [23].

Οι επικοινωνίες συσκευής-προς-συσκευή κατά βάση αποτελούν έναν ευέλικτο τρόπο επικοινωνίας. Η ποικιλία συνδέσεων που μπορεί να υπάρχει ταυτόχρονα σε μια κινητή συσκευή (LTE, Wi-Fi, Bluetooth) επιτρέπει πολλές επιλογές ως προς τις μεθόδους επίτευξης ζεύξεων, τη διαχείριση του φάσματος και την παροχή υπηρεσιών. Επιπρόσθετα, συσκευές που επικοινωνούν με αυτόν τον τρόπο δεν απαιτείται να είναι εντός εμβέλειας του ίδιου σταθμού βάσης.

Η βασική εφαρμογή που προτείνεται είναι η μετάδοση δεδομένων μεταξύ συσκευών. Σε αυτή την περίπτωση θα είναι εφικτή η επικοινωνία μεταξύ δύο ή πολλών συσκευών. Επίσης εμφανίζεται η δυνατότητα χρήσης της μεθόδου σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών ή βλαβών που έχουν καταστήσει ανενεργούς τους σταθμούς βάσης.

Επιπλέον, μια συσκευή με γρήγορη διασύνδεση στο διαδίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενδιάμεσος σταθμός αναμετάδοσης (relay) για δεδομένα τα οποία θα λαμβάνει από έναν σταθμό βάσης και έπειτα θα διαμοιράζει σε άλλες. Σε αυτή την περίπτωση μία συσκευή με χαμηλή ή καθόλου λήψη θα μπορεί να επικοινωνεί απευθείας με την relay συσκευή. Μέσω αυτής της ad-hoc τοπολογίας θα επεκτείνεται η κάλυψη του δικτύου. Η χρήση περισσότερων από μίας συσκευών με απευθείας επικοινωνία με τον σταθμό βάσης είναι επίσης πιθανή. [24]

Υπάρχει επίσης και το σενάριο όπου μια συσκευή με πολλούς υπολογιστικούς πόρους θα μπορεί να αναλαμβάνει υπολογιστικό φόρτο από άλλες συσκευές. Η διαδικασία συλλογικά ονομάζεται offloading και είναι ακόμη σε ερευνητικό στάδιο. Οι παραπάνω λειτουργίες θα έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία μιας υβριδικής



τοπολογίας όπως αυτής της εικόνας 12.

Εικόνα 12. Βασική τοπολογία επικοινωνιών συσκευής-προς-συσκευή [24]

Ένα σενάριο χρήσης επικοινωνιών συσκευής-προς-συσκευή περιλαμβάνει τη χρήση τους σε συνδυασμό με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Σε αυτή την περίπτωση η χρήση αυτής της μεθόδου επικοινωνίας θα χρησιμοποιηθεί επικουρικά σε περιπτώσεις μαζικής διασύνδεσης συσκευών. Επίσης εμφανίζονται νέες δυνατότητες στους τομείς της επέκτασης της κάλυψης σε περιοχές που δεν είναι εφικτή με χρήση σταθμών βάσης ή για την αντιμετώπιση καταστροφικών βλαβών του δικτύου που επηρεάζουν την κάλυψη.

Ως προς το είδος του φάσματος που θα χρησιμοποιείται αυτό διαχωρίζεται σε δύο κύριους τύπους.

Ο πρώτος τύπος ονομάζεται inband, όπου χρησιμοποιείται το ίδιο φάσμα για το οποίο έχει άδεια εκμετάλλευσης ο εκάστοτε πάροχος. Το φάσμα αυτό μπορεί να διαιρείται σε μη επικαλυπτόμενα μέρη τα οποία να χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για επικοινωνίες συσκευής-προς-συσκευή ή για χρήση από συσκευές κινητής τηλεφωνίας. Σε αυτή την περίπτωση το σχετικό μέρος του δικτύου ονομάζεται επικαλύπτων (overlay). Στην εναλλακτική της χρήσης ενιαίου φάσματος και για τις δύο εφαρμογές αντίστοιχα χρησιμοποιείται η ονομασία επικαλυπτόμενου (underlay). Το επικαλύπτων είναι πιο εύκολα υλοποιήσιμο, αλλά η χρήση του φάσματος σε ένα επικαλυπτόμενο δίκτυο είναι πιο αποδοτική, καθώς οι ζεύξεις που δημιουργούνται είναι οπτορουνιστικού τύπου και δεν καταλαμβάνουν μόνιμα μέρος του φάσματος.

Ο δεύτερος κύριος τύπος ονομάζεται outband. Η κύρια διαφορά είναι ότι χρησιμοποιεί μη αδειοδοτούμενο φάσμα, με τις ζώνες ISM των 2.4 GHz ή των 38 GHz να είναι οι πιο προφανείς επιλογές. Σε αυτές δεν παρεμβάλλεται δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Χρήση αυτών των ζωνών εξαλείφει στις παρεμβολές μεταξύ χρηστών εφαρμογών για επικοινωνίες συσκευής-προς-συσκευή και χρηστών κινητής τηλεφωνίας όταν βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Παρεμβολές όμως σε αυτές τις ζώνες εμφανίζονται από δίκτυα 802.11x ή συσκευές Bluetooth. Διαχωρίζονται οι περιπτώσεις της αυτόνομης επικοινωνίας, όπου η επικοινωνία συσκευής-προς-συσκευή ελέγχεται από τους ίδιους τους χρήστες και της ελεγχόμενης όπου η χρήση πόρων και οι ζεύξεις ελέγχονται από το δίκτυο.

Στο Release 12 του προτύπου LTE-Advanced από το 3GPP ορίζονται τρία βασικά σενάρια για επικοινωνίες συσκευής-προς-συσκευή σε σχέση με τη θέση των συσκευών και την κάλυψή τους από το δίκτυο της κινητής τηλεφωνίας. Στο πρώτο όλες οι συσκευές είναι εντός κάλυψης του δικτύου. Στο δεύτερο μερικές συσκευές είναι εκτός εμβέλειας, ενώ στο τρίτο καμία συσκευή δεν είναι εντός κάποιας περιοχής κάλυψης.

Η απόδοση πόρων του δικτύου για την επικοινωνία μπορεί να γίνεται είτε από τις συσκευές είτε από το σταθμό βάσης. Σε επίπεδο επικοινωνίας οι συσκευές δεν αποστέλλουν μηνύματα που να επιβεβαιώνουν την σωστή λήψη δεδομένων (acknowledgements).

Η τοπολογία μπορεί να είναι ενός άλματος (hop) στην περίπτωση που δύο συσκευές ανταλλάσσουν απευθείας δεδομένα ή πολλαπλών αλμάτων. Το είδος της τοπολογίας θα επηρεάζει και τον αριθμό των ζεύξεων που δημιουργούνται. Μια παραλλαγή της πρώτης τοπολογίας είναι η άμεση επικοινωνία μεταξύ ομάδων συσκευών.

Ο συγχρονισμός της λειτουργίας βασίζεται σε μετάδοση μηνυμάτων εντός της τοπολογίας. Οι συσκευές θα πρέπει να βρίσκονται εντός εμβέλειας του ίδιου σταθμού βάσης διαφορετικά η λειτουργία του γίνεται λιγότερο αποδοτική. Ο συγχρονισμός είναι απαραίτητος για την σωστή διαχείριση του χρόνου και των συχνοτήτων εκπομπής και για την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Ο συγχρονισμός δεν είναι απαραίτητο να είναι καθολικός, αλλά πρέπει να υπάρχει μεταξύ συσκευών σε άμεση εγγύτητα.

Προτείνεται κατά την ενεργοποίηση μιας συσκευής να ανακαλύπτονται άλλες συσκευές με τις οποίες είναι εφικτή η επικοινωνία. Η ανακάλυψη συσκευών (peers) είναι εφικτό να γίνεται και από τους σταθμούς βάσης. Ένα πρόβλημα το οποίο παρουσιάζεται αφορά την απόδοση συχνοτήτων. Σε γενικές γραμμές προτείνεται ο διαμοιρασμός του φάσματος σε και η επιλογή τυχαίων συχνοτήτων. Η συχνότητα που θα επιλέγεται είναι αυτή μέσω της οποίας θα επιτυγχάνονται επιθυμητά χαρακτηριστικά, όπως ρυθμός μετάδοσης, στην ζεύξη.

Ως προς το ζήτημα των παρεμβολών αναγνωρίζονται δύο περιπτώσεις. Σε inband επικοινωνία, ο διαμοιρασμός των συχνοτήτων μπορεί να οδηγήσει σε παρεμβολή μεταξύ της επικοινωνίας μεταξύ συσκευών και του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Σε outband επικοινωνία οι παρεμβολές μπορεί να προέρχεται από άλλες εφαρμογές στην ίδια συχνότητα. Οι παρεμβολές μπορούν να μειωθούν με ταυτόχρονη μείωση της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος. Σε αυτή την περίπτωση όμως θα υπάρχει μείωση της ισχύος στον δέκτη. Διαφορετικές διαμορφώσεις και μια στοχευόμενη ελάχιστη ελάχιστη ποιότητα υπηρεσιών κατά την επικοινωνία αποτελούν πιθανές λύσεις.

1.7 Στόχος της εργασίας

Τα ζητήματα τα οποία προκύπτουν από την ενσωμάτωση εναέριων οχημάτων σε ένα υφιστάμενο δίκτυο καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο:

1. Το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα να διατηρεί το ίδιο επίπεδο ποιότητας στις παρεχόμενες υπηρεσίες στον τελικό χρήστη.
2. Η επικοινωνία του μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος με το επίγειο δίκτυο θα πρέπει να είναι συνεχής. Ιδανικά θα πρέπει να υπάρχει οπτική επαφή με κάποιον υπάρχον σταθμό βάσης. Τίθεται επομένως το πρόβλημα της θέσης ή και της πορείας του μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος. Αυτή θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να παρέχει την απαιτούμενη κάλυψη αλλά και να μην διαταράσσεται ή διακόπτεται η επικοινωνία του με το υπόλοιπο δίκτυο.
3. Τα χαρακτηριστικά των ασύρματων καναλιών μεταξύ μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος-χρήστη και μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος-σταθμού βάσης δεν είναι εύκολο να προβλεφθούν καθώς αφορούν κινητούς σταθμούς. Σε δοκιμές που έχουν γίνει έχει βρεθεί ότι ακόμη και το ίδιο το UAV είναι ικανό να προκαλεί διαλείψεις του σήματος [12].
4. Η αυτονομία, το ύψος πτήσης, η ευκολία μετακίνησης του οχήματος από περιοχή σε περιοχή ανάλογα με τις ανάγκες είναι πρακτικά ζητήματα που πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη.

Σκοπός της εργασίας σε σχέση με τα παραπάνω είναι αρχικά η μελέτη της λειτουργίας ενός δικτύου 5G. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης θα αναδείξουν τα προβλήματα στα οποία η χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων θα μπορούσε να είναι μια πιθανή λύση. Τομείς ιδιαίτερης σημασίας είναι η κάλυψη του δικτύου, η ανοχή σε παράγοντες που επιφέρουν διακοπές του σήματος και ο ρυθμός απόδοσης. Έπειτα θα εκτελεστεί η προσομοίωση της λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου με τη χρήση μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος. Μη λαμβάνοντας υπόψη τα πτητικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του οχήματος έμφαση δίνεται στην λειτουργία του ως σταθμός ενός ασύρματου δικτύου.

Το σενάριο εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την θέση του σε σχέση με το υπάρχον δίκτυο και τους τελικούς χρήστες. Ως επί το πλείστον προβλέπεται ότι οι ασύρματες ζεύξεις θα βασίζονται είτε στην απευθείας οπτική επαφή είτε σε μια ισχυρή συνιστώσα του σήματος που θα προέρχεται από αυτή. Η δεύτερη περίπτωση προκύπτει όταν υπάρχει ανάκλαση ή περίθλαση του σήματος σε κάποιο εμπόδιο. Αν και δεν θεωρείται ιδανική περίπτωση είναι ωστόσο πιθανή, ειδικά σε περιοχές με εμπόδια, όπως λόφοι ή κτίρια. Στην περίπτωση χαμηλών υψών πτήσης θα πρέπει να συνυπολογιστεί και να καθοριστεί η επίδραση επιπλέον φαινομένων εξασθένησης, με κυριότερες τις πολυδιαδρομικές διαλείψεις (multipath fading) από τις αντανάκλασεις του εδάφους και των κτιρίων/εμποδίων.

Στη συνέχεια, θα εκτιμηθεί η επιρροή διαφόρων παραμέτρων στον ρυθμό σφαλμάτων (Bit Error Rate - BER). Η συμπεριφορά των ζεύξεων στις οποίες εμπλέκεται το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα είναι επίσης ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Η ισχύς λήψης θα παρουσιάζει αναπόφευκτες διακυμάνσεις ή γρήγορες διαλείψεις (fast fading) των ασύρματων καναλιών, κυρίως λόγω εμποδίων. Το αποτέλεσμα θα είναι υποβάθμιση η διακοπή της επικοινωνίας. Τα φαινόμενα αυτά εξαρτώνται και από την κίνηση του μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος ή των χρηστών, ενώ εδώ εισέρχεται και η πιθανότητα ύπαρξης επιπλέον μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων πλησίον του τελικού χρήστη ώστε να υπάρχει δυνατότητα μεταπομπής (handover). Η ανοχή του συστήματος σε τέτοια φαινόμενα αποτελεί από μόνη της αντικείμενο ενδιαφέροντος. Θα πρέπει να εξεταστεί επομένως η συμπεριφορά ενός συστήματος όταν εισέρχονται παράγοντες εξασθένησης.

Το τρίτο ζήτημα προς ανάλυση είναι οι ρυθμοί μετάδοσης οι οποίοι επιτυγχάνονται. Το άμεσο αποτέλεσμα σε πτώση της μεγάλης μείωσης της ισχύος του σήματος είναι οι διακοπές στην επικοινωνία. Εκτός αυτού όμως ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων επηρεάζεται άμεσα και από τις διακυμάνσεις του σήματος. Η ποιότητα της εμπειρίας από την χρήση του δικτύου υποβαθμίζεται σημαντικά με τις αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης. Για παράδειγμα μια τηλεφωνική επικοινωνία η οποία διακόπτεται και επανέρχεται από μια ξαφνική εξασθένηση του σήματος, μπορεί να αντιμετωπιστεί. Διακυμάνσεις του ρυθμού μετάδοσης όμως είναι δυνατό να προκαλέσουν προβλήματα σε εφαρμογές που βασίζονται σε μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα ας θεωρηθεί η πιθανότητα χρήσης μιας ζεύξης για την απομακρυσμένη συλλογή δεδομένων. Σε αυτό το σενάριο οι διαλείψεις μπορεί να προκαλέσουν απώλεια δεδομένων και μη καταγραφή συμβάντων τα οποία ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να χρήζουν περαιτέρω ενεργειών. Για τους παραπάνω λόγους οι διακυμάνσεις στον ρυθμό μετάδοσης εξαιτίας των διαλείψεων στο ασύρματο κανάλι πρέπει να παρατηρηθούν και να ερμηνευθούν. Σε αυτό το σενάριο οι διαλείψεις μπορεί να προκαλέσουν απώλεια δεδομένων και μη καταγραφή συμβάντων τα οποία ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να χρήζουν περαιτέρω ενεργειών. Για τους παραπάνω λόγους οι διακυμάνσεις στον ρυθμό μετάδοσης εξαιτίας των διαλείψεων στο ασύρματο κανάλι πρέπει να παρατηρηθούν και να ερμηνευθούν.

Από το σύνολο των παραπάνω τελικός σκοπός είναι:

1. Η μελέτη της συμπεριφοράς ενός δικτύου 5G, των προβλημάτων που παρουσιάζονται στην λειτουργία του και οι τομείς που χρήζουν βελτίωσης.
2. Η μελέτη των αποτελεσμάτων που επιτυγχάνονται ως προς τους ίδιους τομείς με την προσθήκη μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων. Επιπλέον θα πρέπει να συγκριθούν με τα ευρήματα της αρχικής μελέτης.
3. Η διερεύνηση της εφικτότητας του σεναρίου μέσω της προσομοίωσης. Θα πρέπει να διαπιστωθεί αν το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα μπορεί να λειτουργήσει ως σταθμός του δικτύου ή αν θα είναι εφικτή η επέκταση του δικτύου μέσω αυτού. Επίσης θα πρέπει να ερευνηθεί η απόδοση του δικτύου.

Το τελικό αποτέλεσμα των συνθηκών της προσομοίωσης θα είναι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων τον οποίο θα αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης. Οι τιμές που λαμβάνει καθορίζουν και τις εφαρμογές για τις οποίες το σενάριο κρίνεται κατάλληλο.

1.8 Συνεισφορά της εργασίας

Η συνεισφορά της εργασίας εστιάζεται σε τέσσερις τομείς. Αρχικά γίνεται μια συνολική παρουσίαση των δικτύων 5G. Έμφαση δίνεται στις νέες τεχνολογίες που εισάγονται και στις νέες υπηρεσίες που αυτές καθιστούν εφικτές. Έπειτα γίνεται παράθεση των πλεονεκτημάτων, προβλημάτων και προκλήσεων που προκύπτουν από την χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων ως μέρη ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Στα πλαίσια αυτού του σεναρίου παρατίθενται βασικά σημεία που αφορούν τα χαρακτηριστικά της ασύρματης μετάδοσης. Επιπλέον γίνεται προσομοίωση μοντέλων τα οποία αποδεικνύουν την εγκυρότητα αυτών των βασικών χαρακτηριστικών. Τα μοντέλα αυτά είναι δυνατό να επεκταθούν έτσι ώστε να περιλαμβάνουν πρόσθετα χαρακτηριστικά όπως διαφορετικές συνθήκες μετάδοσης και τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης.

Κεφάλαιο 2

Ζητήματα χρήσης μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων

Τα δίκτυα 5G αναμένεται να επιδείξουν μεγάλη ετερογένεια ως προς δύο παράγοντες. Αυτοί είναι η απαιτούμενη υποδομή και οι απαραίτητοι πόροι για την υποστήριξη διαφορετικών υπηρεσιών και για την διασύνδεση διαφορετικών συσκευών. Η έρευνα επομένως εστιάζει στην κατασκευή κυψελών που θα είναι σε θέση να υποστηρίξουν νέες δυνατότητες. Μερικές από τις τεχνικές στις οποίες εστιάζεται η έρευνα είναι οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης και επικοινωνίας που έχουν ήδη αναφερθεί. Μια πρόκληση που προκύπτει από τα παραπάνω είναι η υποστήριξη διαφορετικών υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις.

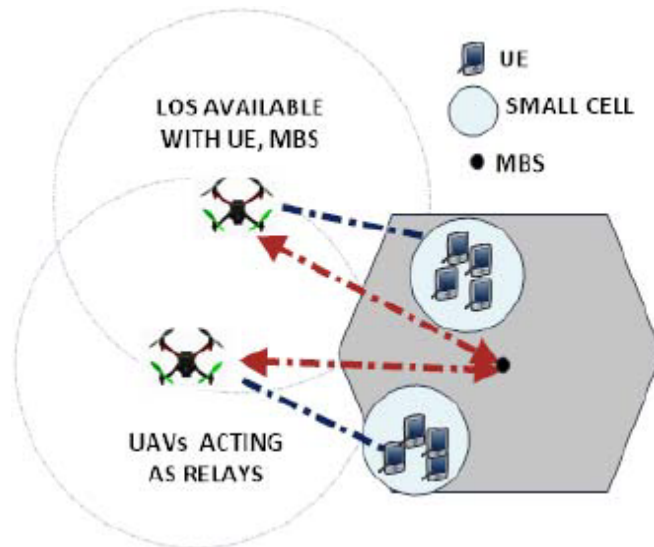
Επιπλέον εισέρχεται ο παράγοντας του περιβάλλοντος μετάδοσης το οποίο καθορίζεται από παράγοντες όπως δόμηση ή βλάστηση. Από τα χαρακτηριστικά αυτού προκύπτουν κατά κύριο λόγο και οι μηχανισμοί διάδοσης προς το έδαφος και τους τελικούς χρήστες. Σε κάθε περίπτωση ανεξαρτήτως του είδους τη υπηρεσίας και των απαιτήσεων αυτής σε πόρους δικτύου, το ζητούμενο όπως έχει αναφερθεί είναι η επέκταση της κάλυψης του δικτύου μέσω της εκμετάλλευσης μετάδοσης προς το έδαφος που θα βασίζεται στην οπτική επαφή.

Τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα είναι ο άλλος κύριος παράγοντας ο οποίος παρουσιάζει ζητήματα προς διερεύνηση και επίλυση. Αρχικά υπάρχει η ανάγκη για παροχή υπηρεσιών δικτύου υπό καθεστώς περιορισμένης διαθέσιμης ενέργειας και επομένως περιορισμένου χρόνου παραμονής στον αέρα. Ο περιορισμός πρέπει να συνυπολογιστεί στον σχεδιασμό πορείας πτήσης ή στην θέση στον αέρα, πάντοτε με γνώμονα την τήρηση κανόνων ασφαλείας πτήσεων και την εκτέλεση των απαιτούμενων λειτουργιών εντός του δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

2.1 Βελτίωση κάλυψης και χωρητικότητας δικτύου

Μία βασική ανάλυση της απόδοσης τηλεπικοινωνιακών δικτύων με την χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων επιτρέπει τον καθορισμό της επίδρασης αυτών στην ποιότητα των υπηρεσιών. Κύριοι τομείς στους οποίους δίνεται έμφαση είναι η πιθανότητα επιτυχούς κάλυψης και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Η ανάλυση ενός συστήματος βοηθά και στην καλύτερη κατανόηση των περιορισμών που θα υπάρχουν.

Ιδιαίτερης σημασίας για την ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος είναι η ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου του καναλιού προς το έδαφος. Σε αυτή την περίπτωση ο καθοριστικός παράγοντας φαίνεται να είναι το ύψος πτήσης. Μια βασική τοπολογία που απεικονίζει ένα πιθανό σενάριο χρήσης δίνεται στην εικόνα 13.



Εικόνα 13. Βασική τοπολογία για την χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων [25]

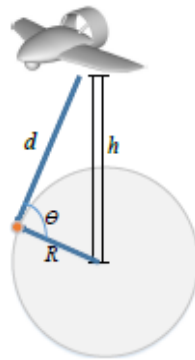
Το μοντέλο που απεικονίζεται αποσκοπεί στην συνεχόμενη παροχή δεδομένων από τον σταθμό βάσης (Macrocell Base Station - MBS) προς τους τελικούς χρήστες (User Equipment – UE). Τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα επιδρούν ως ενδιάμεσοι σταθμοί για την εγκαθίδρυση ζευξιών που βασίζονται στην οπτική επαφή. Η παρουσία δύο μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων στον αέρα ενδεχομένως δημιουργεί πρόβλημα παρεμβολών στις πορείες πτήσης και τις θέσεις αυτών [26].

Μεταξύ των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων και των τελικών χρηστών δημιουργούνται απευθείας ζεύξεις μέσω των οποίων γίνεται διαμοιρασμός της κίνησης (Load Balancing). Παράλληλα υπάρχουν και οι απευθείας ζεύξεις με τους σταθμούς βάσης. Η αύξηση του αριθμού των χρηστών στην παραπάνω τοπολογία

αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα συμφόρησης, καθώς δεν θα είναι πιθανό να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα χωρίς κάποιο ποσοστό απώλειας δεδομένων. Το πρόβλημα αναμένεται να είναι ιδιαίτερα εμφανές στα δίκτυα 5G, όπου οι υπάρχουσες υποδομές δεν είναι σε θέση να καλύψουν την εκτιμώμενη ζήτηση. Μια λύση για την αντιμετώπιση του παραπάνω ζητήματος είναι ο έγκαιρος εντοπισμός περιοχών όπου υπάρχει μεγάλη ζήτηση.

Ένας παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του συστήματος είναι η ζεύξη οπισθόδρομης μετάδοσης μεταξύ οχήματος και επίγειου δικτύου. Σε αντίθεση με το τελευταίο, η μοναδική δυνατότητα που υπάρχει για την διασύνδεση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων με το δίκτυο κορμού είναι η χρήση ασύρματων ζεύξεων. Η δυνατότητα χρήσης ζεύξεων με δορυφόρους, ενώ θεωρητικά είναι εφικτή εισάγει μεγάλη καθυστέρηση [27].

Εξετάζεται η θέση του οχήματος ως προς το έδαφος καθώς αυτό βρίσκεται σε χαμηλό ύψος [28].



Εικόνα 14. Πλατφόρμα σε χαμηλό ύψος [28]

Οι εξασθενήσεις για οπτική επαφή (4) και μη οπτική επαφή (5) δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις [29]

$$L_{LOS} (dB) = 20 \log \left(\frac{4f_c d}{c} \right) + L_{LOS} \quad (4)$$

$$L_{NLOS} (dB) = 20 \log \left(\frac{4f_c d}{c} \right) + L_{NLOS} \quad (5)$$

$$d^2 = R^2 + h^2 \quad (6)$$

Η εξασθένιση εξαρτάται επομένως από την συχνότητα, την απόσταση και από τις μέσες τιμές απωλειών λόγω

απόστασης. Για τα μεγέθη της εικόνας 14 η πιθανότητα να υπάρχει μετάδοση υπό καθεστώς οπτικής επαφής δίνεται από την σχέση

$$P_{LOS} = \frac{1}{1 + \alpha \exp\left(-\beta \frac{180\theta}{\pi}\right) - \alpha} \quad (7)$$

Η σχέση δίνει αυξημένη πιθανότητα για αύξηση της γωνίας ανύψωσης θ . Καθώς η γωνία αυξάνεται η σκίαση μειώνεται μέχρι το σημείο όπου είναι πιθανό να προκύψει ασύρματο κανάλι υπό καθαρή οπτική επαφή μεταξύ οχήματος και εδάφους. Οι παράγοντες α και β είναι σταθερές που προκύπτουν από περιβάλλον διάδοσης. Αντίστοιχα η πιθανότητα για μετάδοση υπό καθεστώς μη οπτικής επαφής δίνεται από τον τύπο

$$P_{NLOS} = 1 - P_{LOS} \quad (8)$$

Η μέση τιμή των απωλειών συναρτήσει του ύψους δίνεται από τον τύπο

$$L_{(R,h)} = P_{LOS} L_{LOS} + P_{NLOS} L_{NLOS} \quad (9)$$

Αν υποθεθεί ότι εκπέμπεται προς το έδαφος ισχύς σήματος ίση με P_t , τότε η μέση ισχύς λήψης θα προκύπτει από

$$P_r = P_t - L_{(R,h)} \quad (10)$$

Επιπλέον ισχύει ότι ένα σημείο στο έδαφος θα καλύπτεται επαρκώς από το εκπεμπόμενο σήμα εφόσον για τον λόγω ισχύος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio - SNR) ισχύει ότι

$$SNR_r = \frac{P_t}{N L_{(R,h)}} \geq SNR_{th} \quad (11)$$

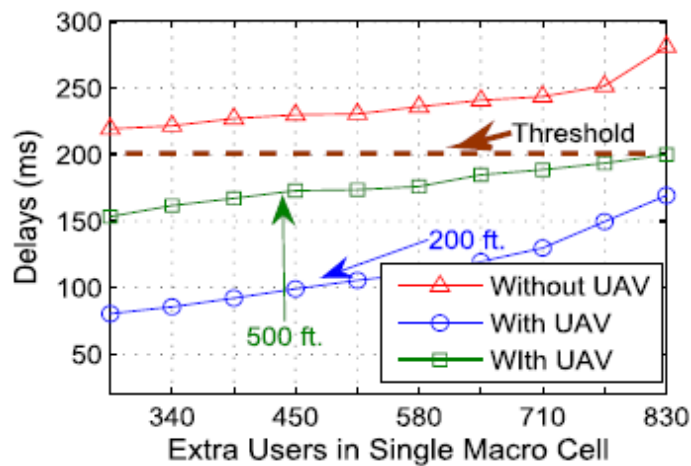
Ως N θεωρείται η ισχύς θορύβου και SNR_{th} το όριο του SNR το οποίο πρέπει να υπάρχει για επαρκή κάλυψη.

Η προσομοίωση του συστήματος [25] παρουσιάζει αποτελέσματα που αφορούν την καθυστέρηση, χωρητικότητα και την αξιοπιστία του δικτύου. Κριτήριο για εγκαθίδρυση ζεύξεων μεταξύ του μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος και χρηστών στο έδαφος είναι η ύπαρξη οπτικής επαφής μεταξύ των δύο. Η κατάλληλη

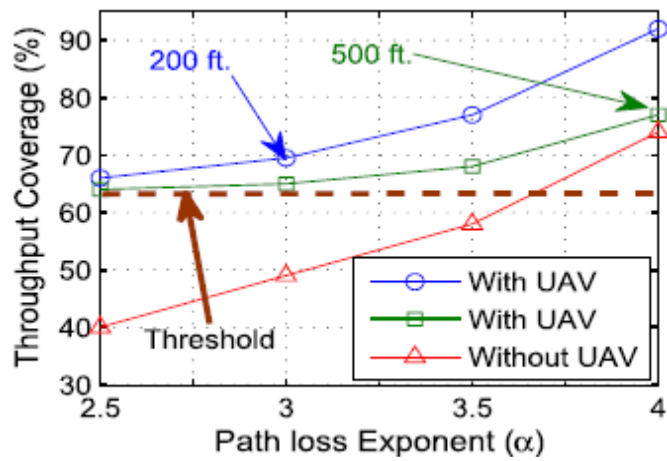
θέση του είναι αποτέλεσμα συμβιβασμού μεταξύ μεγάλου ύψους, που εισάγει καθυστέρηση στην ζεύξη και χαμηλού ύψους το οποίο προκαλεί παρεμβολές από εμπόδια. Οι παράμετροι προσομοίωσης δίνονται στον πίνακα 3.

Περιοχή προσομοίωσης	10.000 x 10.000 τετρ. Μίλια
Αριθμός επίγειων σταθμών βάσης	10
Αριθμός οχημάτων ανά κυψέλη	6
Ύψος πτήσης	200-500 πόδια
Αριθμός χρηστών ανά κυψέλη	200
Φάσμα ισχύος θορύβου	-170 dBm / Hz
Μέγεθος πακέτου	1024 bits
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	256 kbps
Συντελεστής ισχύος απωλειών	4
Ισχύς εκπομπής οχήματος	35 dBm
Εύρος καναλιού	10 MHz
Αριθμός ενεργών χρηστών	400

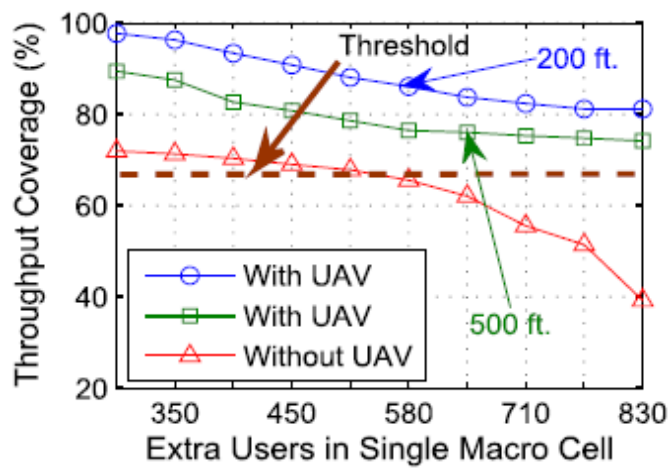
Πίνακας 3. Παράμετροι προσομοίωσης συστήματος [25]



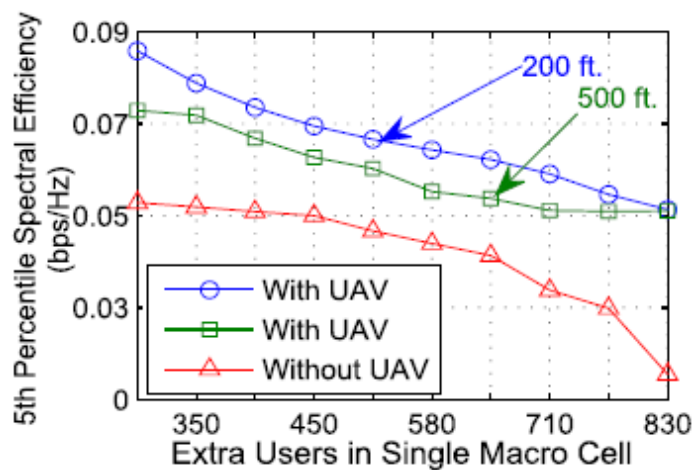
Διάγραμμα 1. Διάγραμμα καθυστέρησης δικτύου / Πρόσθετων χρηστών [25]



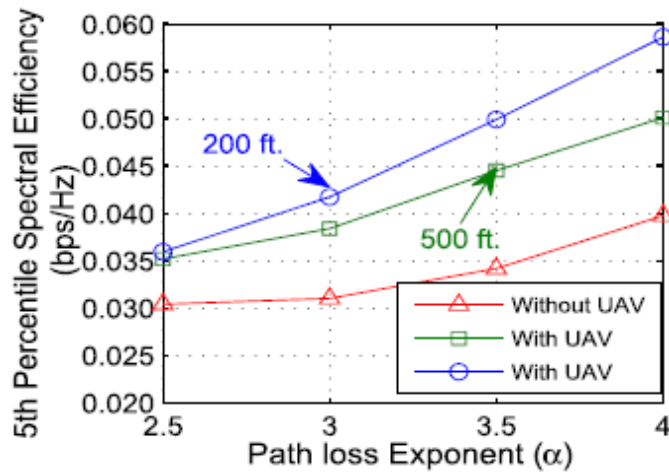
Διάγραμμα 2. Διάγραμμα κάλυψης δικτύου / Συντελεστή ισχύος απωλειών [25]



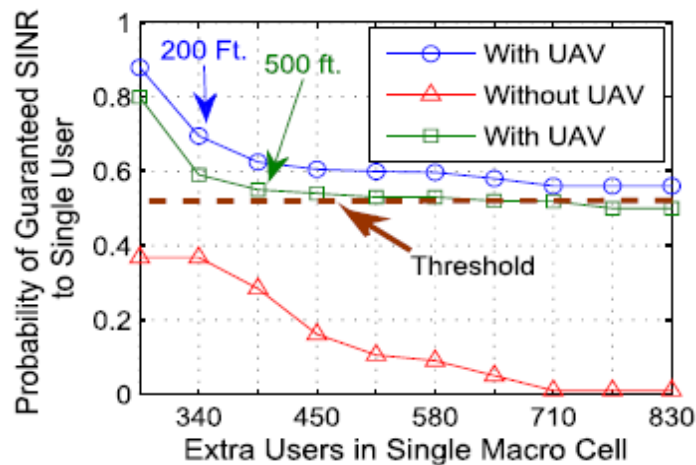
Διάγραμμα 3. Διάγραμμα κάλυψης δικτύου / Πρόσθετων χρηστών ανά σταθμό βάσης [25]



Διάγραμμα 4. Διάγραμμα αποδοτικότητας φάσματος / Πρόσθετων χρηστών ανά σταθμό βάσης [25]



Διάγραμμα 5. Διάγραμμα αποδοτικότητας φάσματος / Συντελεστή ισχύος απωλειών [25]



Διάγραμμα 6. Διάγραμμα πιθανότητας εγγυημένου SINR / Πρόσθετων χρηστών ανά σταθμό βάσης [25]

Στα διαγράμματα 1-6 χρησιμοποιείται ένα κάτω όριο 200 msec για την καθυστέρηση του δικτύου. Πέρα από αυτό η τιμή της απώλειας πακέτων παρουσιάζει μεγάλη αύξηση. Χρησιμοποιούνται δύο τιμές ύψους πτήσης στα 200 και 500 πόδια για τις προσομοιώσεις. Επιπλέον ορίζεται όριο 0.3 για το SINR.

Η υιοθέτηση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων υπολογίζεται ότι επιφέρει 37% μικρότερη καθυστέρηση σε σχέση με την περίπτωση χρήσης μόνο σταθμών βάσης. Στα διαγράμματα 2 και 3 φαίνεται βελτίωση της κάλυψης ανεξαρτήτως ύψους πτήσης. Επιπλέον παρατηρείται πιο αποδοτική χρήση του φάσματος στα διαγράμματα 4 και 5. Τέλος στο διάγραμμα 6 φαίνεται ότι η χρήση των οχημάτων εγγυάται τιμές του SINR πέρα από την κατώτερη αποδεκτή τιμή.

2.2 Σχεδιασμός πορείας πτήσης και βέλτιστες θέσεις

Η πορεία πτήσης ενός μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος είναι ένα ζήτημα στο οποίο επιδρούν διάφοροι παράγοντες. Αρχικά πρέπει να ληφθεί υπόψη το ζήτημα της περιορισμένης διαθέσιμης ενέργειας που είναι διαθέσιμη. Αυτή περιορίζει τον χρόνο παραμονής στον αέρα. Ο χρόνος αυτός μειώνεται ακόμη περισσότερο αν συνυπολογιστεί ο παράγοντας της κατανάλωσης του μεταφερόμενου εξοπλισμού. Υπάρχει επίσης η αναγκαιότητα διατήρησης επαρκών αποθεμάτων ενέργειας για τήρηση των κανόνων ασφαλείας και ο απαιτούμενος ανάλογα με την κατάσταση χρόνος παραμονής στον αέρα. Επιπλέον η τοπολογία του δικτύου λόγω των κινούμενων χρηστών δεν είναι σταθερή. Η πορεία και το ύψος πτήσης των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων θα πρέπει να είναι σε θέση να αντεπεξέλθει στην αναγκαιότητα διατήρησης ενός επιθυμητού επιπέδου κάλυψης και ποιότητας υπηρεσιών.

Η βελτιστοποίηση της θέσης ή και πορείας πτήσης είναι ένα ζήτημα το οποίο ερευνάται σε σχέση με την μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης [30] ή την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας [31].

Για την εύρεση της ιδανικής θέσης και πορείας πτήσης πρέπει καταρχάς να αναλυθεί η κίνηση του οχήματος στον χώρο. Η κίνηση μπορεί να αναλυθεί σε διάφορες φάσεις για τις οποίες ισχύουν διαφορετικές ταχύτητες κίνησης.

Η κατανάλωση ενέργειας για κίνηση με σταθερή ταχύτητα V σε απόσταση d δίνεται από

$$E_U = P_{(V)} \frac{d}{V} \quad (12)$$

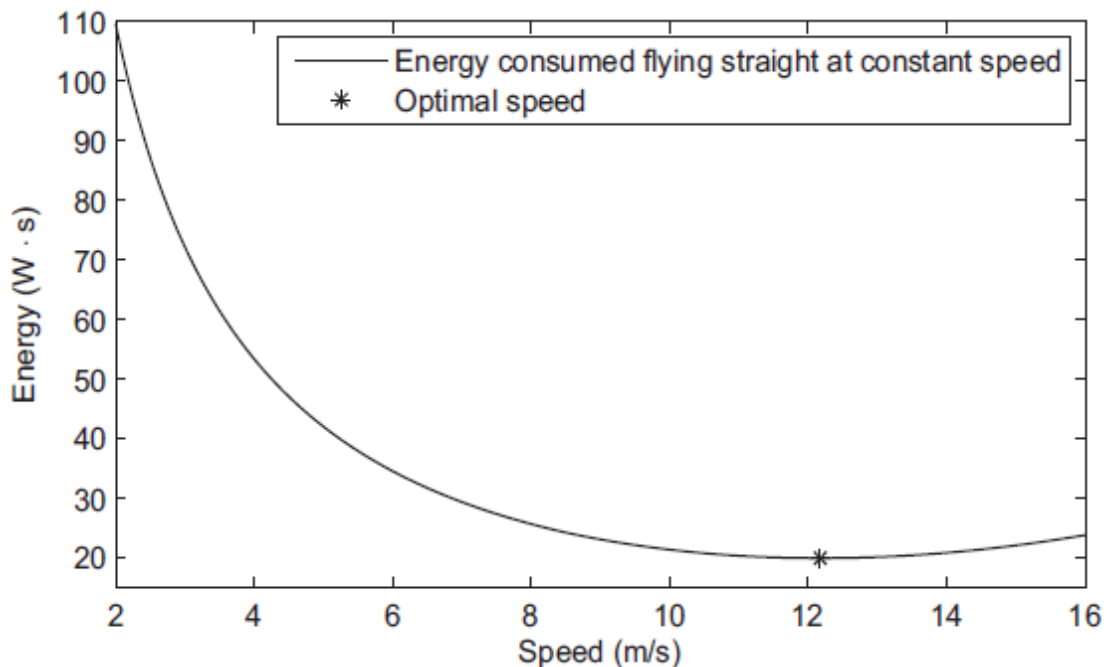
Αντίστοιχα για την κίνηση κατά την άνοδο και την κάθοδο σε ύψη με διαφορά Δh η κατανάλωση ενέργειας δίνεται από

$$E_{\text{ανόδου}} = P_{\text{ανόδου}} \frac{\Delta h}{V_{\text{ανόδου}}} \quad (13)$$

$$E_{\text{καθόδου}} = P_{\text{καθόδου}} \frac{\Delta h}{V_{\text{καθόδου}}} \quad (14)$$

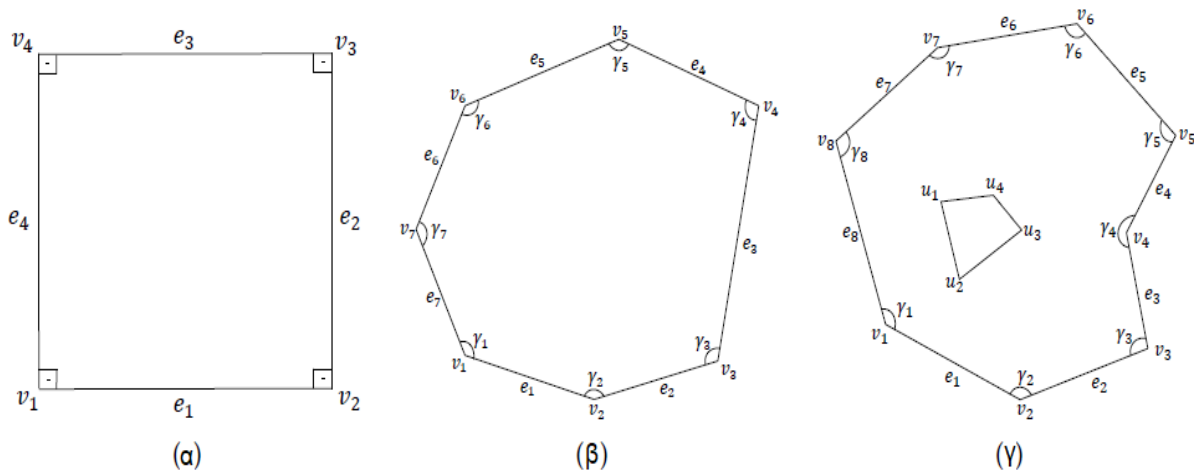
Οι τιμές ισχύος εξαρτώνται σε από το βάρος, την κατανάλωση των κινητήρων κατά τις φάσεις της πτήσης και την κατανάλωση του εξοπλισμού που μεταφέρει το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα. Σε αυτές θα πρέπει να προστεθεί η πρόσθετη κατανάλωση που προκύπτει από την κίνηση με τις ταχύτητες που αναπτύσσονται κατά τις φάσεις της πτήσης.

Για να καλυφθεί μια συγκεκριμένη απόσταση εντός ενός χρονικού διαστήματος η ενέργεια που θα δαπανηθεί θα ισούται με το άθροισμα της ενέργειας που απαιτείται για όλες τις φάσεις της πτήσης που περιλαμβάνουν επιτάχυνση, κίνηση με σταθερή ταχύτητα και επιβράδυνση. Όλες οι παραπάνω τιμές ενέργειας εξαρτώνται από την ταχύτητα. Επομένως η βέλτιστη ταχύτητα κίνησης είναι αυτή για την οποία ελαχιστοποιείται το άθροισμα των επιμέρους ενεργειών.



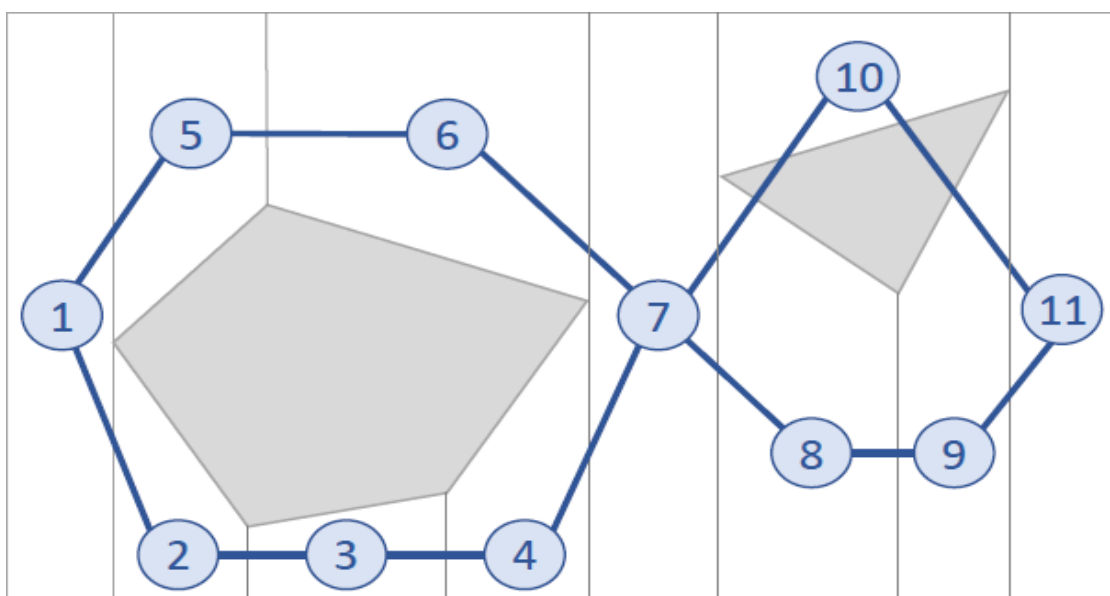
Διάγραμμα 7. Διάγραμμα κατανάλωσης ενέργειας / ταχύτητας κίνησης [31]

Μια βασική ιδέα σχετικά με τον καθορισμό της πορείας πτήσης είναι ο διαχωρισμός της σε τμήματα μεταξύ κορυφών στην περιοχή κάλυψης [32].



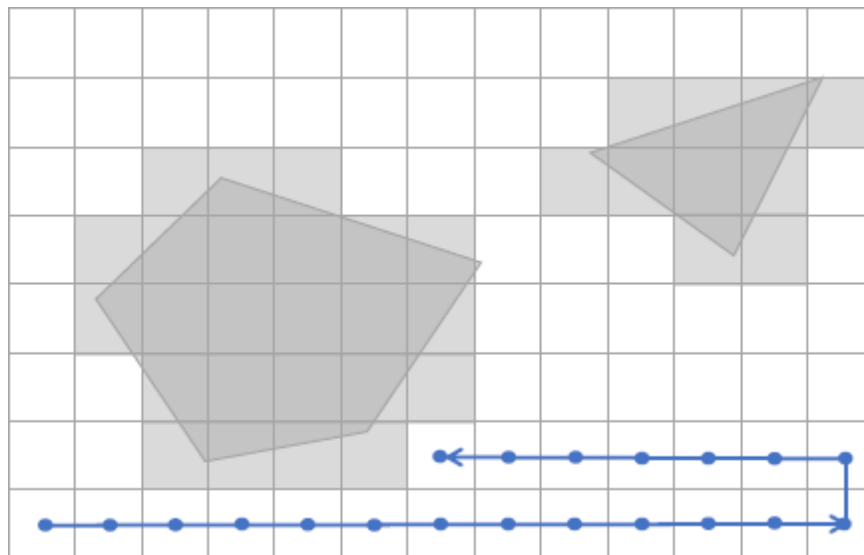
Εικόνα 15. Πορείες πτήσης (α) παραλληλόγραμμη, (β) πολυγωνική (γ) πολυγωνική με ζώνη απαγόρευσης πτήσης [32]

Το κάθε τμήμα v_i περιγράφεται από συντεταγμένες. Η πορεία πτήσης μπορεί να περιλαμβάνει και περιοχές στις οποίες απαγορεύεται η πτήση. Οι αντίστοιχες κορυφές u_i θεωρούνται ως εμπόδια. Το σχήμα και μέγεθος της περιοχής είναι ζητήματα τα οποία σχετίζονται με την περιοχή κάλυψης. Για την διαχείριση του προβλήματος η περιοχή κάλυψης μπορεί να διασπαστεί σε κελιά καθιστώντας το πρόβλημα της πτήσης σε όλη την περιοχή ζήτημα καθορισμού πτήσης από ένα κελί στο επόμενο [33]. Στην εικόνα 16 η πορεία πτήσης αποτελείται από τα σημεία 1 ως 11.

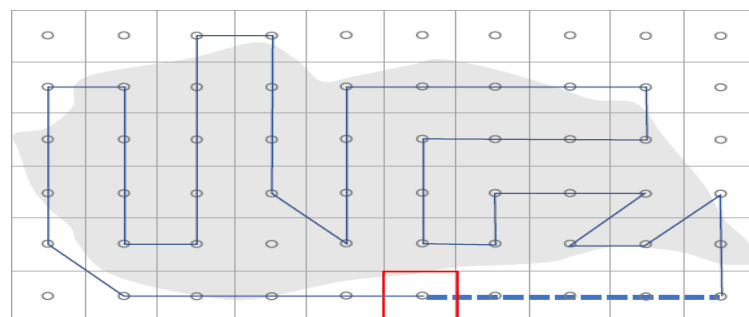


Εικόνα 16. Παράδειγμα κατακερματισμού πορείας πτήσης [32]

Μια άλλη τακτική είναι ο διαχωρισμός της περιοχής κάλυψης σε πλέγμα [34]. Ο διαχωρισμός κατακερματίζει την περιοχή κάλυψης σε νοητές μικρότερες υποπεριοχές. Η μέθοδος διαχείρισης του πλέγματος αποσκοπεί στην χάραξη πορείας πτήσης εντός των περιορισμών χρόνου ή διαθέσιμης ενέργειας για την δημιουργία της πορείας. Το μέγεθος κάθε υποπεριοχής θα πρέπει να είναι ίσο με την εμβέλεια του μεταφερόμενου τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Ως αποτέλεσμα η πορεία πτήσης θα αποτελείται από έναν αριθμό σημείων από τα οποία θα πρέπει να μεταβεί το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα. Το κάθε σημείο θα συνοδεύεται και από ένα σύνολο πληροφοριών. Αυτές θα αφορούν ύψος πτήσης, αλλαγή πορείας ή και ταχύτητας, και συντεταγμένες. Η τεχνική απεικονίζεται στις εικόνες 17 και 18.

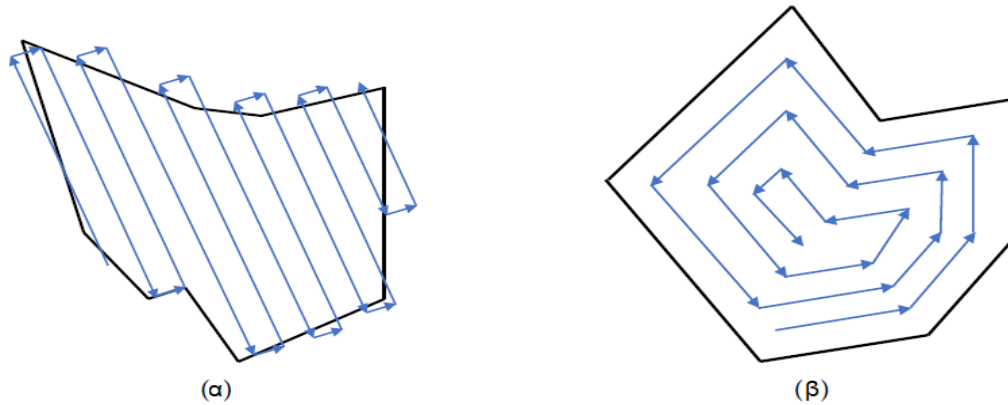


Εικόνα 17. Χρήση πλέγματος για καθορισμό πορείας πτήσης. Η κουκκίδα στο κέντρο κάθε υποπεριοχής αντιστοιχεί σε σημείο πλοήγησης [32]



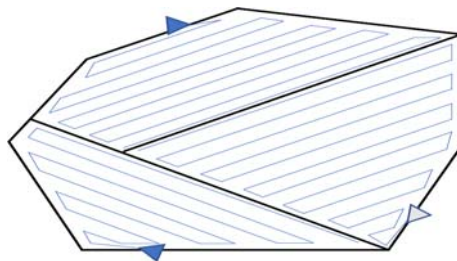
Εικόνα 18. Χρήση πλέγματος για καθορισμό πορείας πτήσης. Η υποπεριοχή με κόκκινη σήμανση απεικονίζει το σημείο έναρξης και λήξης της πορείας πτήσης [32]

Άλλη τακτική που μπορεί να εφαρμοστεί είναι η θεώρηση μιας περιοχής με την χρήση μίας διαδρομής όπως στην εικόνα 19. Από υπολογιστικής άποψης σε μία τέτοια αντιμετώπιση θα είναι πιο εύκολο να υλοποιηθεί η επαναλαμβανόμενη κίνηση με την χρήση επαναλαμβανόμενων μοτίβων πτήσης.



Εικόνα 19. Θεώρηση περιοχής για καθορισμό πορείας πτήσης (α) Παλινδρομικό μοντέλο, (β) σπειροειδές μοντέλο [32]

Οι παραπάνω μέθοδοι καλύπτουν την περίπτωση ενός μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος. Όπως έχει αναφερθεί υπάρχουν οφέλη ως προς την κατανάλωση ενέργειας και επομένως τον χρόνο παραμονής στον αέρα στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ένας αριθμός μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων για την κάλυψη μιας περιοχής. Σε αυτή την περίπτωση, ανάλογα με τις ιδιομορφίες της περιοχής κάλυψης η μέθοδος μπορεί να περιλαμβάνει μεμονωμένες πορείες πτήσης σε υποπεριοχές με ξεχωριστές πορείες πτήσης [35], ή μία πορεία πτήσης με ομαδοποίηση των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων [36]. Η απεικόνιση των τεχνικών κατάρτισης των πορειών πτήσης δίνεται στις εικόνες 20 και 21 αντίστοιχα.



Εικόνα 20. Κατάτμηση περιοχής για καθορισμό πορείας πτήσης και ανάθεση υποπεριοχών [32]



Εικόνα 21. Κάλυψη περιοχής με την χρήση ομάδας μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων [32]

Η γενική προσέγγιση είναι ότι η πορεία πτήσης πρέπει να αντικατοπτρίζει την πολυπλοκότητα και ιδιομορφίες της περιοχής κάλυψης. Επιπλέον λόγω περιορισμένης διαθέσιμης ενέργειας και πεπερασμένου χρόνου παραμονής στον αέρα πρέπει να υπάρξει συμβιβασμός μεταξύ ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας και μεγιστοποίησης της κάλυψης. Ωστόσο χαρακτηριστικά του μοντέλου πτήσης όπως ελιγμοί σε μικρότερες πορείες πτήσης έχουν επίπτωση στην κατανάλωση ενέργειας. Η τελευταία επηρεάζεται και από τα κατασκευαστικά και πτητικά χαρακτηριστικά. Ως αποτέλεσμα ο σχεδιασμός πρέπει να συμπεριλαμβάνει όλες τις πτητικές παραμέτρους και τις απαιτήσεις της εφαρμογής για μια δοθείσα περιοχή.

2.3 Κατανάλωση ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας των οχημάτων αποτελεί από κατασκευαστικής άποψης την πιο σημαντική πρόκληση στην υιοθέτηση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Τα οχήματα τροφοδοτούνται από μπαταρίες οι οποίες πρέπει να τροφοδοτήσουν το σύστημα ελέγχου πτήσης και τον εξοπλισμό ο οποίος θα μεταφέρεται. Επομένως τίθεται το ζήτημα του χρόνου διαθεσιμότητας και των αναγκών σε ενέργεια ώστε να είναι εφικτή η χρήση. Επομένως πρέπει να καθοριστούν οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τις ενεργειακές ανάγκες των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων [37]. Κατά κύριο λόγο ο καθοριστικός παράγοντας είναι η εφαρμογή για την οποία προορίζεται το όχημα. Από το είδος αυτής προκύπτει και ο χρόνος για τον οποίο το όχημα θα πρέπει να είναι σε λειτουργία ανεξαρτήτως από το αν θα είναι στατικό ή θα ακολουθεί κάποια πορεία πτήσης. Επιπλέον το μέγεθος των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων

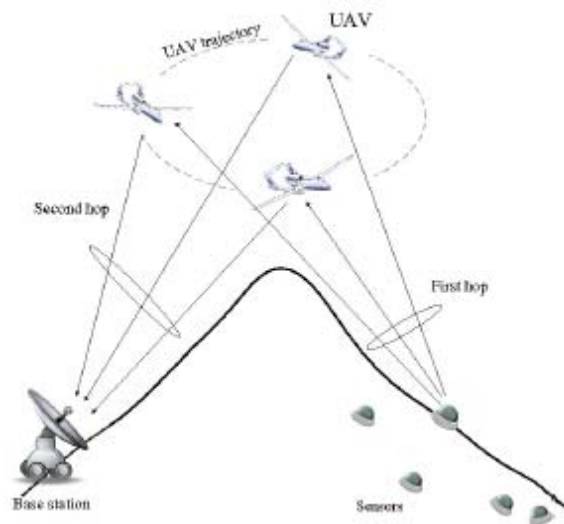
καθορίζεται κατά μεγάλο ποσοστό από τον εξοπλισμό που μεταφέρουν. Αυτός όμως επιδρά αυξητικά στο βάρος απογείωσης. Ως ελάχιστη διαθέσιμη ενέργεια επομένως καθορίζεται αυτή η οποία θα επιτρέψει στο όχημα να μεταφέρει τον κατάλληλο εξοπλισμό και να χρησιμοποιηθεί για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι απαιτήσεις σε ενέργεια του τηλεπικοινωνιακού συστήματος εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την απόσταση μεταξύ του οχήματος με σταθμούς βάσης και συσκευές στο έδαφος. Αύξηση της απόστασης η εμφάνιση εμποδίων θα οδηγήσουν σε υποβάθμιση των συνθηκών διάδοσης. Για την αντιμετώπιση αυτών θα πρέπει να δαπανηθεί περισσότερη ενέργεια.

Υπάρχουν όμως και άλλοι παράγοντες οι οποίοι πρέπει να συνυπολογιστούν. Καταρχήν υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης δυσμενών καιρικών συνθηκών. Όπως και σε κανονικά αεροσκάφη αυτές επηρεάζουν την πτήση. Ως αποτέλεσμα για την τήρηση της πορείας πτήσης και την σταθερότητα στον αέρα δαπανάται περισσότερη ενέργεια.

Εκτός των παραπάνω υπάρχει και τα ζητήματα της ασφάλειας πτήσεων. Οργανισμοί πολιτικής αεροπορίας ανά τον κόσμο θεσπίζουν σταδιακά αυστηρότερους κανόνες σχετικά με την ασφάλεια, την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την μείωση του θορύβου [38].

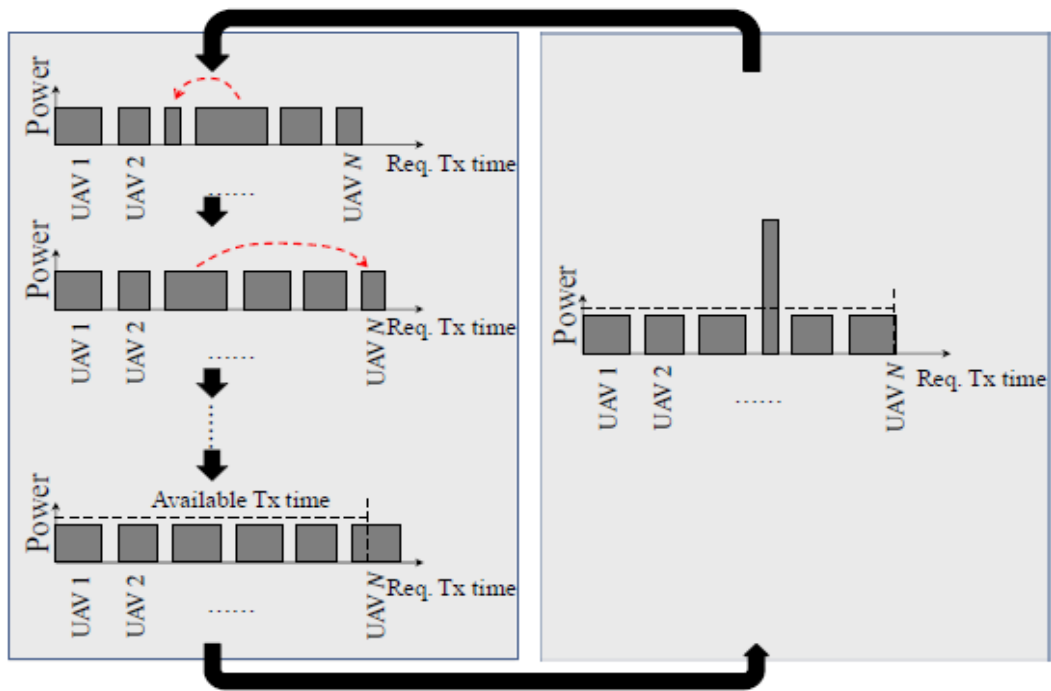
Η αυξανόμενη χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων στον ίδιο εναέριο χώρο με άλλα αεροσκάφη έχει οδηγήσει σε θέσπιση κανόνων που επηρεάζουν ζητήματα όπως το μέγιστο βάρος, οι διαστάσεις και το μέγιστο ύψος πτήσης. Παράλληλα επεκτείνονται οι κανόνες που αφορούν ζητήματα όπως αποφυγή συγκρούσεων [39].

Ένα πρόβλημα το οποίο πρέπει να αντιμετωπιστεί προκύπτει από τον αριθμό των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων στον αέρα. Στην περίπτωση που μόνο ένα όχημα καλύπτει μια περιοχή, ο εξοπλισμός που φέρει θα πρέπει να συνδεθεί με έναν αριθμό χρηστών. Για κάθε έναν από αυτούς οι συνθήκες του ασύρματου καναλιού θα είναι διαφορετικές, ενώ δεν θα είναι βέλτιστες για όλους τους χρήστες. Το ζήτημα περιπλέκεται από το γεγονός ότι η λειτουργία του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού δεν πρέπει να υπόκειται σε μείωση της απαιτούμενης ενέργειας. Από τα παραπάνω προκύπτει η ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση της διαθέσιμης ενέργειας και η μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας ενός οχήματος. Μια τακτική η οποία ερευνάται είναι η κάλυψη μιας περιοχής από πολλαπλά οχήματα [40] [41].



Εικόνα 22. Βασική τοπολογία για την χρήση πολλαπλών μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων [40]

Η τεχνική βασίζεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιείται ένας μια μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης βασιζόμενη στο χρόνο (Time Division Multiple Access – TDMA). Τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα χρησιμοποιούν προκαθορισμένες πορείες πτήσης συλλέγοντας τα δεδομένα από τις συσκευές στο έδαφος. Οι συσκευές στο έδαφος αποστέλλουν δεδομένα προς όλα τα οχήματα με συγκεκριμένη τιμή ισχύος εκπομπής. Έπειτα το κάθε όχημα χρησιμοποιεί μια συγκεκριμένη χρονοθυρίδα (Time slot) για να τα αποστείλει στον σταθμό βάσης. Εκτός των δεδομένων προς τον σταθμό βάσης μεταδίδονται και πληροφορίες που αφορούν την ισχύ λήψης από το έδαφος. Τα δεδομένα αποστέλλονται με ισορροπημένη κατανάλωση ενέργειας επεκτείνοντας τον χρόνο παραμονής κάθε οχήματος στον αέρα. Τα πακέτα που μεταδίδονται, τάξη της ψηφιακής διαμόρφωσης και η ισχύ εκπομπής είναι διαφορετικά ανά όχημα. Αυτό επιτρέπει την προσαρμογή της μετάδοσης μεταξύ του σταθμού βάσης και το κάθε οχήματος ανάλογα με τις συνθήκες του κάθε ασύρματου καναλιού. Βασιζόμενος στις τιμές της ισχύος λήψης του κάθε καναλιού ο σταθμός βάσης καθορίζει τα πακέτα και τον ρυθμό μετάδοσης αυτών τα οποία το κάθε όχημα έπειτα θα μεταδώσει προς το έδαφος. Προτείνεται ο παρακάτω αλγόριθμος για την προσαρμογή ρυθμών μετάδοσης και ισχύος εκπομπής.

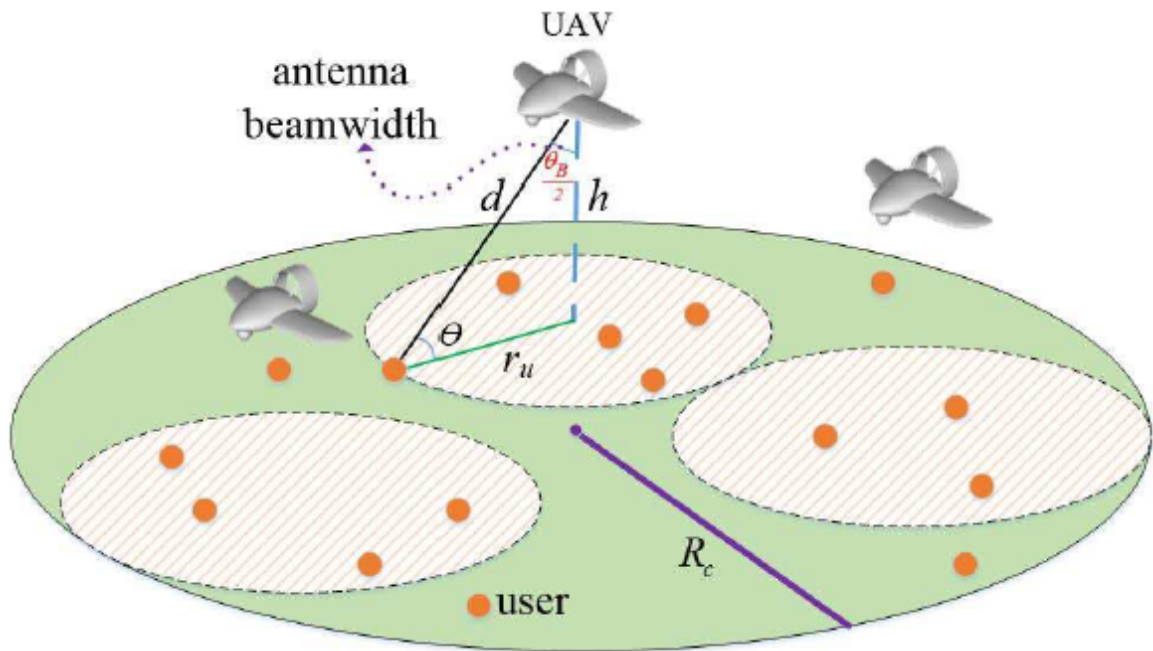


Εικόνα 23. Γραφική αναπαράσταση αλγόριθμου. Αριστερά απεικονίζεται η χρήση ενέργειας κάθε ιπτάμενου οχήματος. Δεξιά δίνεται η αύξηση στην τάξη διαμόρφωσης ώστε ο ρυθμός μετάδοσης να συνάδει με τον διαθέσιμο χρόνο μετάδοσης. Οι περιοχές με σκούρο γκρι χρώμα απεικονίζουν κατανάλωση ενέργειας. [40]

Κατά την προσομοίωση του αλγόριθμου θεωρείται ότι τα οχήματα κινούνται με σταθερή ταχύτητα 10m/s σε μια περιοχή ακτίνας 2 χιλιομέτρων με τον σταθμό βάσης στο κέντρο αυτής. Οι απώλειες στα ασύρματα κανάλια μεταξύ οχημάτων και σταθμού βάσης προκύπτουν μόνο από απόσταση καθώς θεωρείται ότι εγκαθιδρύονται ζεύξεις που βασίζονται στην οπτική επαφή. Προκύπτει ότι η κατανάλωση ενέργειας κάθε οχήματος είναι δυνατόν να μειωθεί κατά 50% επεκτείνοντας τον χρόνο λειτουργίας κατά 33%.

Μια άλλη προσέγγιση για την μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας ασχολείται με την βέλτιστη θέση και πορεία πτήσης. Στόχος είναι η μεγιστοποίηση της κάλυψης προς το έδαφος με χρήση της λιγότερης δυνατής ισχύος μετάδοσης [6]. Οι καθοριστικοί παράγοντες στην περίπτωση αυτή είναι το ύψος πτήσης και το κέρδος των κατευθυντικών κεραιών που χρησιμοποιούνται. Οι τιμές τους είναι δυνατό να προσαρμοστούν στο μέγεθος και τις απαιτήσεις της περιοχής κάλυψης. Το μοντέλο συστήματος το οποίο εξετάζεται στο [42] περιλαμβάνει μια κυκλική περιοχή ακτίνας R_c . Εντός αυτής υπάρχει ένας αριθμός χρηστών. Προβλέπεται ότι η κάλυψη θα

προέλθει από έναν αριθμό οχημάτων σε ύψος h . Η απεικόνιση του μοντέλου δίνεται στην εικόνα 24.



Εικόνα 24. Γραφική αναπαράσταση μοντέλου βελτιστοποίησης θέσης [42]

Η ισχύς λήψης στο έδαφος δίνεται παρακάτω για ζεύξη που προκύπτει από οπτική επαφή (14) και για μη οπτική επαφή αντίστοιχα (15)

$$P_R(dB) = P_t + G_{3dB} + L_{dB} - \psi_{LOS} \quad (14)$$

$$P_R(dB) = P_t + G_{3dB} + L_{dB} - \psi_{NLOS} \quad (15)$$

Ως P_t θεωρείται η ισχύς εκπομπής, G το κέρδος της κεραίας του οχήματος. Ο παράγοντας ψ προέρχεται από κατανομή διαλείψεων. Οι απώλειες δίνονται από τον τύπο

$$L_{dB} = 10 \log \frac{4\pi f d}{c} \quad (16)$$

Ενώ η πιθανότητα οπτικής επαφής δίνεται από τον τύπο

$$P_{LOS} = a \left(\frac{180\theta}{\pi} - 15 \right)^\gamma \quad (17)$$

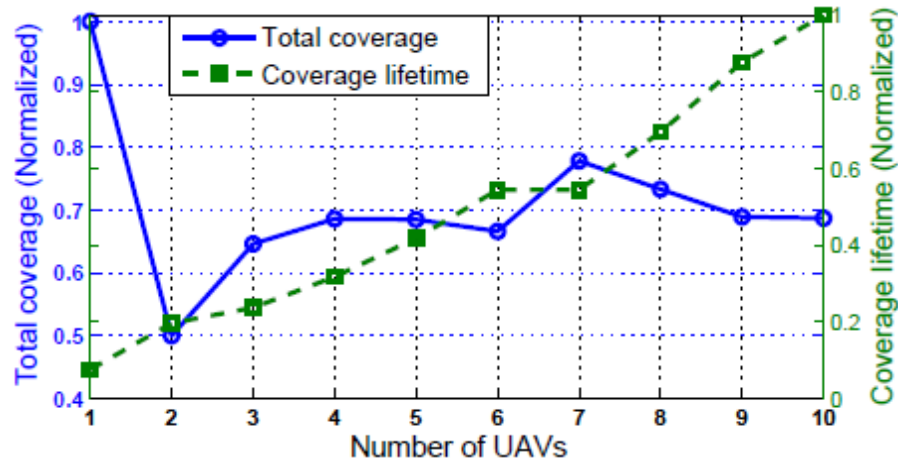
οι παράγοντες a και γ είναι σταθερές που εξαρτώνται από το περιβάλλον.

Οι παράμετροι προσομοίωσης δίνονται στον πίνακα 4. Οι τιμές των παραγόντων α και γ έχουν επιλεγεί για αστικό περιβάλλον.

Συχνότητα εκπομπής	2 GHz
Παράγοντας α	0.6
Παράγοντας γ	0.11
Γωνία Beamwidth	80ο/100ο
Ακτίνα κυκλικής περιοχής κάλυψης	5000 μ
Ισχύς εκπομπής	35 dBm

Πίνακας 4. Παράμετροι προσομοίωσης συστήματος [42]

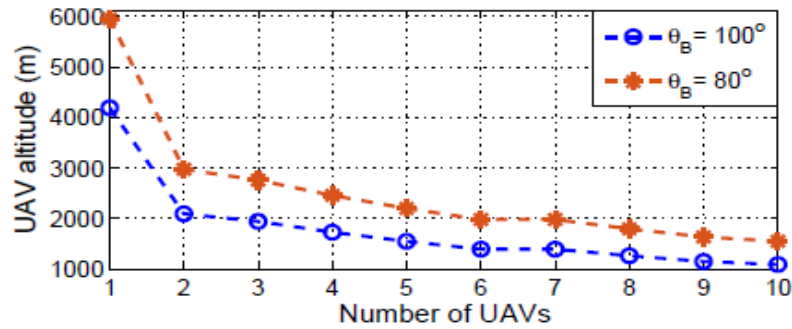
Η προσομοίωση του συστήματος δείχνει ότι αύξηση του αριθμού των οχημάτων οδηγεί σε αύξηση του χρόνου κάλυψης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 8. Διάγραμμα κάλυψης / διάρκειας κάλυψης / Αριθμού μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων [42]

Το διάγραμμα 8 δείχνει τον συσχετισμό κάλυψης και διάρκειας αυτής για αυξανόμενο αριθμό οχημάτων σε περιοχή ακτίνας πέντε χιλιομέτρων και για γωνία beamwidth 80°. Η αύξηση του αριθμού των οχημάτων σημαίνει ότι η ισχύς εκπομπής του καθενός μπορεί να μειωθεί. Ως αποτέλεσμα μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας και αυξάνεται η διάρκεια ζωής των μπαταριών που επιφέρει αύξηση παραμονής στον αέρα. Η κάλυψη όπως παρατηρείται για ένα μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα είναι η μέγιστη δυνατή αλλά παράλληλα αντιστρόφως ανάλογη της διάρκειας αυτής. Ο αριθμός των οχημάτων επομένως εξαρτάται από το μέγεθος της περιοχής και την απαιτούμενη διάρκεια κάλυψης.

Στο διάγραμμα 9 το ύψος πτήσης πρέπει να μειωθεί καθώς αυξάνεται ο αριθμός οχημάτων που καλύπτουν την περιοχή μελέτης.

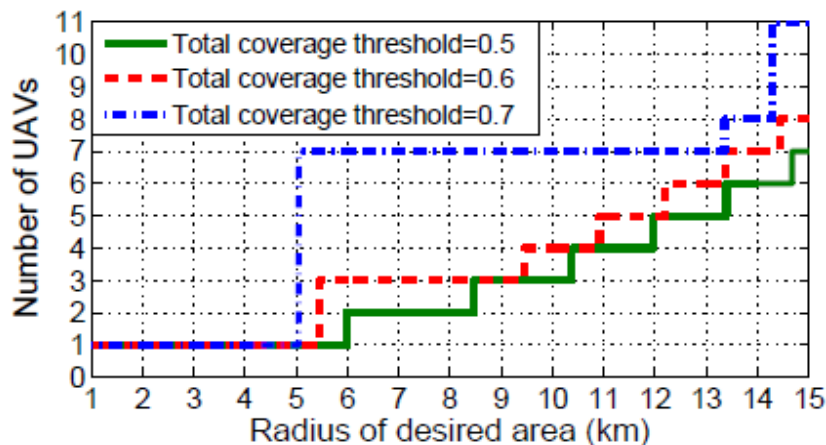


Διάγραμμα 9. Διάγραμμα ύψους πτήσης / Αριθμού μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων [42]

Ένα ζήτημα από την αύξηση του αριθμού των οχημάτων είναι ενδεχόμενες παρεμβολές μεταξύ τους. Για την αντιμετώπιση αυτών το ύψος πτήσης θα πρέπει να μειώνεται σε

$$\frac{r_u}{\tan \frac{\theta_B}{2}} \quad (19)$$

όπου r_u και θ_B η ακτίνα περιοχής κάλυψης μεμονωμένου μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος και η μισή γωνία beamwidth αντίστοιχα. Ενδεικτικά για αύξηση του αριθμού μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων από 3 σε 6 παρατηρείται μείωση του ύψους πτήσης στα 1300 μέτρα από 2000.



Διάγραμμα 10. Διάγραμμα Αριθμού μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων / Ακτίνας επιθυμητής περιοχής κάλυψης [42]

Στο διάγραμμα 10 παρατηρείται ότι καθώς το όριο για να θεωρηθεί κάλυψη επιτυχής απαιτούνται περισσότερα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα. Ο αριθμός αυτών είναι αντιστρόφως ανάλογος της ακτίνας της περιοχής κάλυψης.

2.4 Ασφάλεια δεδομένων

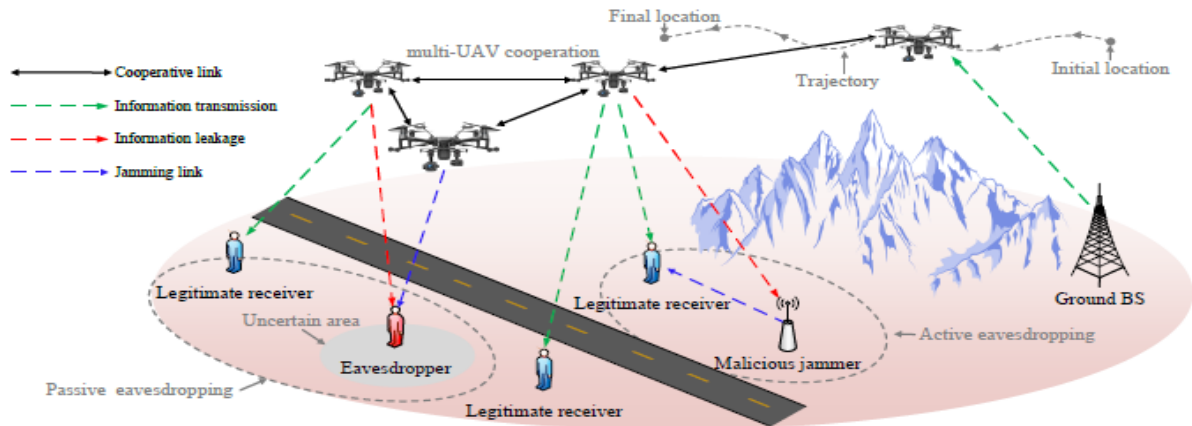
Το φυσικό μέσο που χρησιμοποιείται στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας παρουσιάζει ιδιαίτερες προκλήσεις στο θέμα της προστασίας των δεδομένων. Κύριος λόγος είναι η απουσία καλωδιακής ή και σταθερής υποδομής σε μέρος του δικτύου. Ως αποτέλεσμα δεν απαιτείται από τον επιτιθέμενο φυσική πρόσβαση σε κάποια υποδομή. Οι πιο κοινές μορφές επιθέσεων αποσκοπούν στην υποκλοπή δεδομένων λόγω της ευρείας χρήσης σύγχρονων συσκευών οι οποίες χρησιμοποιούν εφαρμογές ηλεκτρονικού εμπορίου ή εφαρμογές που απαιτείται κάποιας μορφής ταυτοποίηση του χρήστη. Ως αποτέλεσμα μέσω ενός δικτύου διακινούνται δεδομένα όπως προσωπικά στοιχεία, τραπεζικά δεδομένα ή πληροφορίες για την υγεία ενός χρήστη. Για την αντιμετώπιση των επιθέσεων οι πάροχοι υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας έχουν υιοθετήσει μέτρα σε όλη την διαδρομή των δεδομένων. Ως αποτέλεσμα υπάρχει το στρώμα ασφάλειας το οποίο απαντάται σε τυπικά δίκτυα κορμού και πρόσβασης. Συνήθως περιλαμβάνει λειτουργίες ελέγχου και αποτροπής ανεπιθύμητης πρόσβασης και βαθμίδες firewall. Επιπλέον υπάρχει κρυπτογράφηση των δεδομένων στο μέρος της διαδρομής προς τον τελικό χρήστη. Αυτή γίνεται με την μέθοδο ανταλλαγής κλειδιών. Στην προδιαγραφή TS 33.401 του 3GPP [43] ορίζονται κλειδιά αυθεντικοποίησης για διάφορες λειτουργίες του δικτύου και για έλεγχο υπηρεσιών με μήκος από 128 ως 256 bits.

Η παραπάνω προσέγγιση δεν μπορεί να λειτουργήσει για ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα. Ο κύριος λόγος για την ακαταλληλότητα των μεθόδων που εφαρμόζονται στα δίκτυα 4G οφείλεται στον δυναμικό χαρακτήρα το δικτύου. Η κινητικότητα των μη επανδρωμένων οχημάτων και η ευέλικτη τοπολογία στην οποία συμμετέχουν καθιστά δυσκολότερη την διαδικασία διαμοιρασμού και διαχείρισης κλειδιών. Επιπλέον μια τέτοια λύση είναι υπολογιστικά πολύπλοκη και ανάλογα με την υλοποίηση ενεργοβόρα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τρωτό σημείο δεν αποτελεί μόνο η ζεύξη μεταξύ μη επανδρωμένου οχήματος και τελικού χρήστη. Η ζεύξη μεταξύ μη επανδρωμένου οχήματος και επίγειων σταθμών με τους οποίους συνδέεται στην πορεία πτήσης παρουσιάζει ένα επιπλέον πρόβλημα. Η ζεύξη αυτή μεταφέρει δεδομένα που

αφορούν την τηλεμετρία και την διαχείριση. Μια διανεμημένη επίθεση άρνησης υπηρεσίας (Distributed Denial-of-Service – DDoS attack) θα μπορούσε να οδηγήσει σε κατάρρευση της ζεύξης και απώλεια επικοινωνίας με το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα και παράλληλα διακοπή υπηρεσιών τους τελικούς χρήστες [44]. Η χρήση παρεμβολών είναι μια πιθανή εφαρμογή μιας τέτοιας επίθεσης.

Μία τυπική απεικόνιση των προκλήσεων στο θέμα της ασφάλειας δίνεται στην εικόνα 25 [45].



Εικόνα 25. Απεικόνιση των ζητημάτων ασφαλείας σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας με την χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων [45]

Στην εικόνα 25 αναγνωρίζονται οι εξής οντότητες. Υπάρχει ο νόμιμος δέκτης (legitimate receiver), ο υποκλοπέας (eavesdropper), και ο κακόβουλος παρεμβολέας (malicious jammer). Η υποκλοπή δεδομένων σε μια τέτοια τοπολογία μπορεί να είναι παθητική ή ενεργητική.

Στην πρώτη περίπτωση ο υποκλοπέας προσπαθεί να αποκτήσει ευαίσθητα δεδομένα χωρίς να υποβαθμίσει την ποιότητα του σήματος λήψης στον νόμιμο δέκτη. Η τακτική βασίζεται στην απόκρυψη του υποκλοπέα μέσω της παθητικής στάσης του. Ο εντοπισμός του με οπτικά ή άλλα μέσα τυπικά θεωρείται πολύ δύσκολος. Στην περίπτωση της ενεργητικής υποκλοπής αντίθετα υπάρχει επίπτωση στην ποιότητα των υπηρεσιών στον νόμιμο δέκτη. Ο κακόβουλος παρεμβολέας μπορεί να υποβαθμίσει την χωρητικότητα του καναλιού.

Για την αποφυγή των παραπάνω περιπτώσεων εξετάζονται διάφορες τεχνικές. Έμφαση δίνεται κατά κύριο λόγο στην προστασία στο φυσικό μέσο για αποφυγή λύσεων που θα επιφέρουν αρνητικές επιπτώσεις στην υπολογιστική ισχύ και την κατανάλωση ενέργειας. Μία πρώτη τεχνική που εξετάζεται συνδυάζει τον σχεδιασμό πορείας και την απόδοση πόρων [46]. Η βασική αρχή είναι ότι καθώς το μη

επανδρωμένο όχημα πλησιάζει έναν υποκλοπέα μειώνει την ισχύ εκπομπής ή διακόπτει την εκπομπή. Παράλληλα απομακρύνεται από την περιοχή με την μέγιστη ταχύτητα για να μειώσει την έκθεση. Όταν αντίστοιχα πλησιάζει σε νόμιμο δέκτη μειώνει την ταχύτητά του για την μετάδοση των δεδομένων. Μία απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία της μεθόδου είναι η γνώση της ακριβής θέσης του υποκλοπέα. Έχοντας ως επιπλέον δεδομένα την θέση του δέκτη και τα σημεία έναρξης και τερματισμού της πορείας πτήσης μπορεί να καθοριστεί η πορεία για αποφυγή του υποκλοπέα και αύξηση της ασφάλειας.

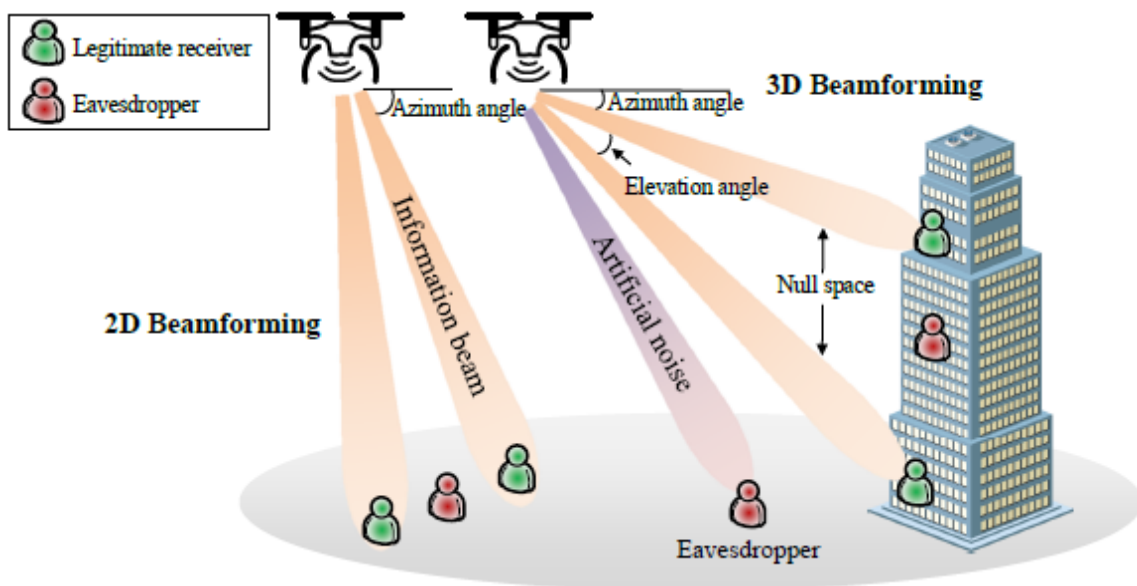
Όταν η θέση του υποκλοπέα είναι γνωστή μόνο εν μέρει ή προκύπτει από στατιστική ανάλυση τότε θα πρέπει να εφαρμοστεί μια διαφορετική προσέγγιση. Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται η μέθοδος σχεδιασμού στιβαρών ενώσεων. Λαμβάνει υπόψη το χειρότερο σενάριο, όπου η ασαφής περιοχή του υποκλοπέα μπορεί να μοντελοποιηθεί με βάση την πιθανότητα ύπαρξής του. Αν το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα βρίσκεται κοντά σε αυτήν την περιοχή τότε μειώνει την ισχύ εκπομπής ή διακόπτει την μετάδοση. Με την χρήση μιας βελτιστοποιημένης πορείας πτήσης είναι εφικτή η πορεία πτήσης προς τους νόμιμους δέκτες.

Για να αντιμετωπιστούν υποκλοπείς χωρίς να είναι γνωστή η θέση τους μια προσέγγιση είναι η μετάδοση θορύβου. Αυτή λαμβάνει μέρος σε κενό χώρο του καναλιού προς τον νόμιμο δέκτη. Η μέθοδος χρησιμοποιεί πολλαπλά μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα τα οποία συνεργάζονται για να μεταδώσουν δεδομένα μόνο όταν είναι κοντά στον δέκτη. Με αυτήν προσέγγιση η χωρητικότητα του καναλιού προς τον δέκτη αυξάνεται ενώ παράλληλα μειώνεται η διαθέσιμη χωρητικότητα την οποία μπορεί να εκμεταλλευτεί ο υποκλοπέας. Ένα ζήτημα που υπάρχει σε αυτή την προσέγγιση είναι ότι απαιτείται υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας για την μετάδοση θορύβου σε σχέση με την μετάδοση δεδομένων. Ως αποτέλεσμα η αποτελεσματική εφαρμογή αυτής της τεχνικής βασίζεται σε μοτίβα κατανομής ενέργειας.

Η χρήση πολλαπλών μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την αντιμετώπιση παρεμβολών. Με αυτή την προσέγγιση υπάρχουν περισσότεροι βαθμοί ελευθερίας, μεγαλύτερη ευελιξία και αύξηση των διαθέσιμων πόρων. Ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατή η εφαρμογή της είναι η δημιουργία μιας νοητής συστοιχίας κεραιών για την ενίσχυση του σήματος εκπομπής. Οι πορείες πτήσης μπορούν να σχηματιστούν είτε για την αντιμετώπιση παρεμβολών, είτε για την μετάδοση δεδομένων. Κριτήριο για τις πορείες πτήσης είναι

η γνώση των θέσεων των υποκλοπέων, οπότε εφαρμόζεται μια από τις μεθόδους που έχουν αναφερθεί.

Η χρήση συστοιχίας κεραιών εξετάζεται και για χρήση από μεμονωμένο μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται τεχνικές beamforming για αύξηση της ισχύος λήψης στον νόμιμο δέκτη και υποβάθμιση της ισχύος του αντίστοιχου σήματος που μπορεί να λάβει ένας υποκλοπέας. Οι τεχνικές beamforming που εξετάζονται είναι δύο. Η πρώτη είναι η δυσδιάστατη, όπου το σήμα εκπέμπεται ορθογωνικά προς την κατεύθυνση του υποκλοπέα. Αυτή η μέθοδος δεν εκμεταλλεύεται τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος και μπορεί να μην έχει τα καλύτερα αποτελέσματα. Η τρισδιάστατη μέθοδος αντίθετα επιτυγχάνει μεγαλύτερη κάλυψη εκπέμποντας ξεχωριστές ακτινοβολίες στον χώρο. Είναι πιο κατάλληλη για δέκτες που καταλαμβάνουν διαφορετικές θέσεις σε έναν τρισδιάστατο χώρο. Οι νόμιμοι δέκτες και οι υποκλοπέες είναι εύκολο να διαχωριστούν λόγω της θέσης τους ως προς το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα. Η σχηματική απεικόνιση των δύο τεχνικών beamforming δίνεται στην εικόνα 26.



Εικόνα 26. Χρήση τεχνικών beamforming για αποφυγή υποκλοπών [45]

Μια τεχνική που εκμεταλλεύεται την υψηλή κατευθυντικότητα είναι η χρήση χιλιοστομετρικού μήκους κύματος για μετάδοση προς το έδαφος. Η θέση και πορεία πτήσης είναι δυνατό να καθοριστεί έτσι ώστε να γίνει μέγιστη δυνατή εγκαθίδρυση ζεύξεων προς τους δέκτες που να βασίζονται στην οπτική επαφή. Ως αποτέλεσμα οι

όποιες επιπτώσεις στο σήμα από εμπόδια θα είναι ελάχιστες, Λόγω του μεγάλου εύρους που τυπικά θα έχει ένα τέτοιο κανάλι θα είναι εφικτή η μετακύλιση συχνότητας καθιστώντας πιο δύσκολη την διαδικασία εντοπισμού της και επομένως την υποκλοπή των δεδομένων.

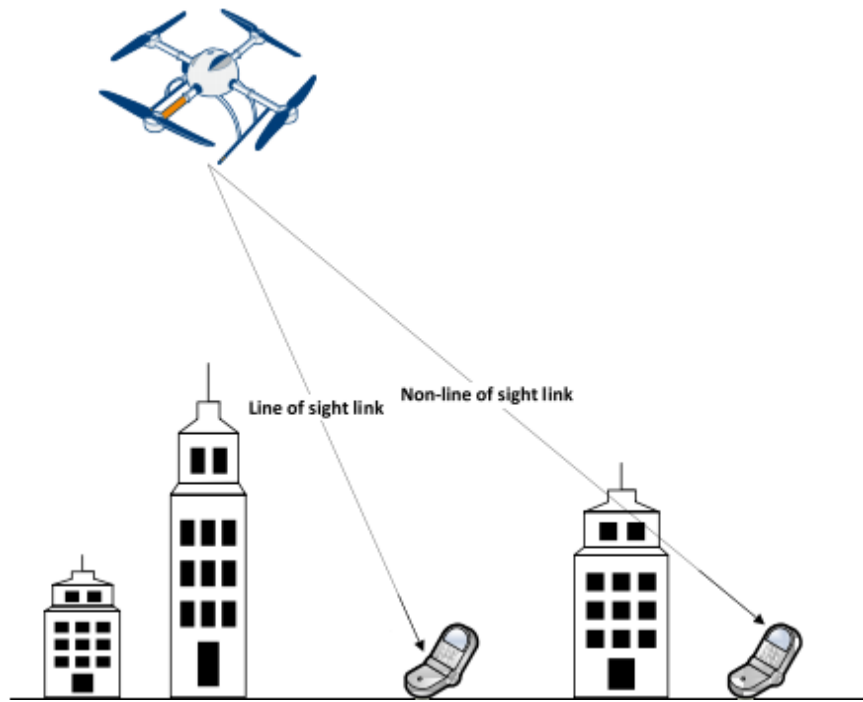
Κεφάλαιο 3

Περιγραφή βασικών εννοιών

Στο κεφάλαιο περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων των μοντέλων που εξετάζονται στα επόμενα κεφάλαια. Βασίζονται στην παρατήρηση της συμπεριφοράς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα του συστήματος η κατανόηση των μηχανισμών και των μοντέλων είναι πολύ σημαντική. Χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση πρακτικών ζητημάτων κατά την σχεδίαση και υλοποίηση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων όπως η επιλογή φάσματος συχνοτήτων εκπομπής και λήψης ή η διαρρύθμιση της τοπολογίας του δικτύου. Επιπλέον παρατίθενται σενάρια όπου εξετάζεται η χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων σε συνδυασμό με τις παραπάνω τεχνικές επικοινωνίας και πολλαπλής πρόσβασης προς επαύξηση των δυνατοτήτων των δικτύων 5G. Σε αυτό το πλαίσιο και για την υποστήριξη των διάφορων υπηρεσιών εξετάζεται η χρήση είτε μεμονωμένων μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων είτε σε ομάδες. Σε κάθε περίπτωση η δικτυακή υποδομή θα αναλαμβάνει τις λειτουργίες ελέγχου και διαχείρισης πόρων του δικτύου αλλά και των πορειών πτήσης και τις θέσεις των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων [47].

3.1 Υποστήριξη μη ορθογώνιας μεθόδου πολλαπλής πρόσβασης μέσω μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος

Όπως έχει αναφερθεί κύριο στοιχείο στην λειτουργία μη ορθογώνιας μεθόδου πολλαπλής πρόσβασης είναι διαφορετικές συνθήκες ασύρματου καναλιού που επικρατούν μεταξύ διαφορετικών δεκτών. Βάσει αυτών εκτελείται και η διαδοχική σε κάθε δέκτη αφαίρεση συνιστωσών από το συνολικό σήμα. Λόγω της κινητικότητας του, ένα μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα έχει την δυνατότητα να εκμεταλλευτεί τις διαφορετικές συνθήκες των καναλιών των χρηστών καθώς θα μεταβάλλεται η ισχύς που αποδίδεται ανά συνιστώσα του σήματος. Στο σενάριο που παρατίθεται παρακάτω εξετάζεται η χρήση της τεχνικής για την εξυπηρέτηση χρηστών στο έδαφος. Το βασικό μοντέλο του συστήματος παρατίθεται στην εικόνα 25.



Εικόνα 27. Βασικό μοντέλο συστήματος με την χρήση μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος [48]

Θεωρείται ένα στατικό μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα σε χαμηλό ύψος. Αυτό παρέχει κάλυψη σε μια κυκλική περιοχή όπου ο απομακρυσμένος χρήστης καθορίζει την ακτίνα αυτής. Το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα θεωρείται ότι επομένως βρίσκεται στο κέντρο της κυκλικής περιοχής σε συγκεκριμένο ύψος. Ανεξάρτητα από τις συνθήκες καναλιού και την ύπαρξη ή όχι οπτικής επαφής προς το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα ο γενικός κανόνας είναι ότι ο λόγος ισχύος προς θόρυβο στον δέκτη θα είναι αντιστρόφως ανάλογος από την απόστασή του από το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα [48]. Κατά κύριο λόγο οι ζεύξεις σε ένα τέτοιο σενάριο χωρίζονται δύο είδη βάσει της ύπαρξης ή μη οπτικής επαφής. Στην άμεση εγγύτητα του μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος δεν θεωρείται ότι θα υπάρχουν απώλειες του σήματος από ανακλάσεις ή άλλους μηχανισμούς διάδοσης. Συνολικά το κανάλι μεταξύ του δέκτη στο έδαφος και του μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος όμως διαχωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες. Επομένως θεωρείται ότι θα υπάρχει ένα κανάλι τύπου Rice λόγω οπτικής επαφής ή διαφορετικά τύπου Rayleigh. Το παραπάνω ισχύει ειδικά στην περίπτωση μιας αστικής περιοχής. Η δόμηση και άλλες κατασκευές αναμένεται να παρεμβάλλονται μεταξύ του μη επανδρωμένου οχήματος και της περιοχής κάλυψης. Ως συνέπεια θα εμφανιστεί το φαινόμενο της διάδοσης από πολλαπλές διαδρομές (multipath fading).

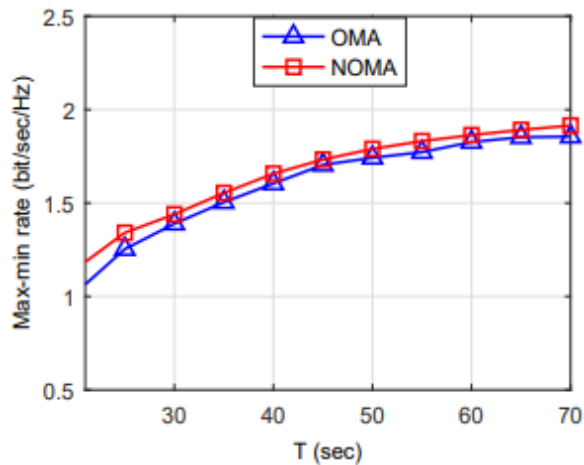
Λόγω του παραπάνω εισέρχεται ο κρίσιμος παράγοντας της θέσης που πρέπει να κατέχει το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα στο χώρο. Κατά κανόνα σε ένα ιδανικό σενάριο αυτό θα πρέπει να τοποθετηθεί σε μια θέση χάρη στην οποία θα είναι εφικτή η δημιουργία ενός καναλιού τύπου Rice. Σε αυτό επομένως θα πρέπει να υπάρχει μια πολύ ισχυρή συνιστώσα από οπτική επαφή.

Η ισχύς στη ζεύξη προς το έδαφος (downlink) θα είναι η διαφορά μεταξύ της ισχύος εκπομπής από το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα και των απωλειών κατά μήκος της διαδρομής. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από την ύπαρξη ή όχι οπτικής επαφής, το ύψος πτήσης και τους παράγοντες απωλειών (path loss exponents). Αυτοί τυπικά προέρχονται από γνωστά μοντέλα απωλειών, όπως Free Space Loss ή εμπειρικά μοντέλα απωλειών όπως Okumura-Hata.

Η τεχνική μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης απαιτεί την συγκρότηση συσκευών σε ζεύγη για να λειτουργήσει η τεχνική της διαδοχικής ακύρωσης. Για την σωστή υλοποίησή της ο δέκτης πιο κοντά στο μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα θα πρέπει να είναι σε θέση να απομονώσει την παρεμβολή από το σήμα του πιο απομακρυσμένου δέκτη. Υπάρχουν μελέτες που χρησιμοποιούν κριτήρια όπως την πιθανότητα διακοπών [49]. Τα ζεύγη των συσκευών για τις οποίες θα εφαρμόζεται η τεχνική ακύρωσης παρεμβολών θα πρέπει να έχουν διακριτές διαφορές ως προς τις συνθήκες καναλιού που θα επιφέρουν διαφορές ως προς την ισχύ λήψης.

Η περίπτωση της χρήσης πολλαπλών μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων για την κάλυψη μιας περιοχής είναι πιο πολύπλοκη στην ανάλυση. Σε αυτό το σενάριο η επιλογή των χρηστών που θα συνδεθούν με το κάθε μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα είναι ο καθοριστικός παράγοντας. Εξετάζονται κριτήρια όπως η απόσταση μεταξύ δεκτών από μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα ή η μέση ισχύς λήψης.

Τα τελευταία χρόνια έχουν δημοσιευτεί διάφορες μελέτες στις οποίες προσομοιώνεται η απόδοση της τεχνικής μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης για προτεινόμενα μοντέλα. Ανεξαρτήτως από το μοντέλο και τις παραδοχές που αυτά περιέχουν το συμπέρασμα που προκύπτει είναι η ανωτερότητα της τεχνικής μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης.

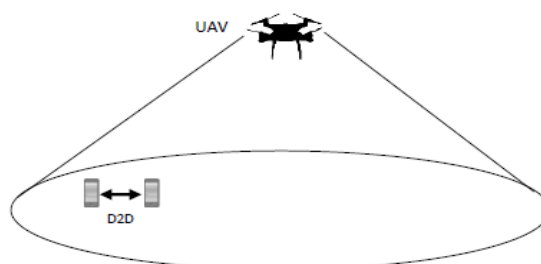


Διάγραμμα 11. Σύγκριση ρυθμών μετάδοσης ορθογώνιας (OMA) και μη ορθογώνιας μεθόδου πολλαπλής πρόσβασης (NOMA) [46]

Στο παραπάνω γραφήματα δίνεται μια σύγκριση μέγιστων και ελάχιστων ρυθμών μετάδοσης μεταξύ ορθογώνιας και μη ορθογώνιας μεθόδου πολλαπλής πρόσβασης για τυχαίους χρήστες σε μια περιοχή ενός τετραγωνικού χιλιομέτρου. Το ύψος πτήσης του UAV είναι 100 μέτρα. Ο χρόνος στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος κίνησης του UAV το οποίο ακολουθεί μια προκαθορισμένη διαδρομή [50].

3.2 Υποστήριξη υπηρεσιών επικοινωνιών συσκευής-προς-συσκευή μέσω μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος

Στην περίπτωση της υποστήριξης υπηρεσιών επικοινωνιών συσκευής-προς-συσκευή οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η σωστή λειτουργία του συστήματος είναι οι ίδιοι όπως παραπάνω. Η θέση ή πορεία πτήσης του μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος σε συνδυασμό με το περιβάλλον μετάδοσης θα καθορίζουν κατά μεγάλο ποσοστό το αν η μετάδοση προς το έδαφος θα γίνεται υπό συνθήκες οπτικής ή μη επαφής. Μια γραφική απεικόνιση είναι η εξής



Εικόνα 28. Βασικό μοντέλο ζεύξης μέσω μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος [51]

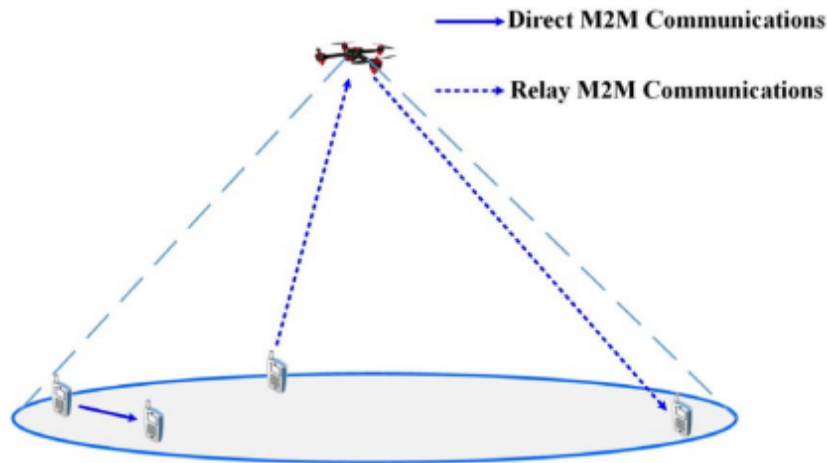
Στην εικόνα 28 φαίνεται η περιοχή κάλυψης εντός της οποίας βρίσκονται δύο συσκευές. Η διαχείριση της επικοινωνίας συσκευής-προς-συσκευή γίνεται από το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα. Σε αντίθεση με το μοντέλο που περιγράφεται για την τεχνική μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση οι θέσεις των συσκευών στο έδαφος δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις από το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα. Το κριτήριο ως προς τη θέση είναι να βρίσκονται εντός της περιοχής κάλυψής του. Για την εκκίνηση μια απευθείας επικοινωνίας μεταξύ των δύο συσκευών θα πρέπει να ακολουθηθούν κάποια βήματα.

Αρχικά οι συσκευές θα συνδεθούν με το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα. Η σύνδεση θα γίνεται με τον ίδιο τρόπο που μια κινητή συσκευή σε ένα δίκτυο 4G συνδέεται σε ένα τυπικό σταθμό βάσης. Για την εύρεση συσκευών με τις οποίες είναι εφικτή μια σύνδεση επικοινωνιών συσκευής-προς-συσκευή μια τεχνική που έχει προταθεί είναι αυτή της αποστολής μηνυμάτων μεταξύ μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων και συσκευών [51]. Έπειτα το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα αναλαμβάνει την σύνδεση των συσκευών. Η ίδια λογική μπορεί να ακολουθηθεί και για την κατάργηση ζεύξεων.

Ένα ζήτημα το οποίο προκύπτει είναι η αντιμετώπιση των παρεμβολών. Για μια συσκευή στο έδαφος, αυτές θα προέρχονται από το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα αλλά και από άλλες συσκευές στο έδαφος. Η αύξηση του ύψους πτήσης ή αιώρησης είναι μια λύση η οποία αυξάνει τις απώλειες του σήματος και μειώνει τις παρεμβολές. Από την άλλη αυξάνει την πιθανότητα για εγκαθίδρυση ζεύξεων από οπτική επαφή καθώς το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα απομακρύνεται από το έδαφος. Αυτές οι δύο παράμετροι εξαρτώνται κυρίως από την ευαισθησία των δεκτών στο έδαφος την μορφολογία του περιβάλλοντος και τις συνθήκες που επικρατούν στα κανάλια μετάδοσης. Η πυκνότητα των συσκευών εντός της περιοχής κάλυψης του μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος θα πρέπει επίσης να συνυπολογιστεί [52].

3.3 Υποστήριξη υπηρεσιών επικοινωνιών μηχανής-προς-μηχανή μέσω μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος

Η περίπτωση των επικοινωνιών μηχανής-προς-μηχανή παρουσιάζει περισσότερο ενδιαφέρον για την αντιμετώπιση σεναρίων όπου η υπάρχουσα δικτυακή υποδομή αντιμετωπίζει προβλήματα λόγω βλαβών ή φυσικών καταστροφών. Επιπλέον εξετάζεται για την δρομολόγηση υπηρεσιών Internet-of-Things μέσω δικτύων κινητής τηλεφωνίας.



Εικόνα 29. Βασικό μοντέλο ζεύξης επικοινωνιών μηχανής-προς-μηχανή μέσω μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος [53]

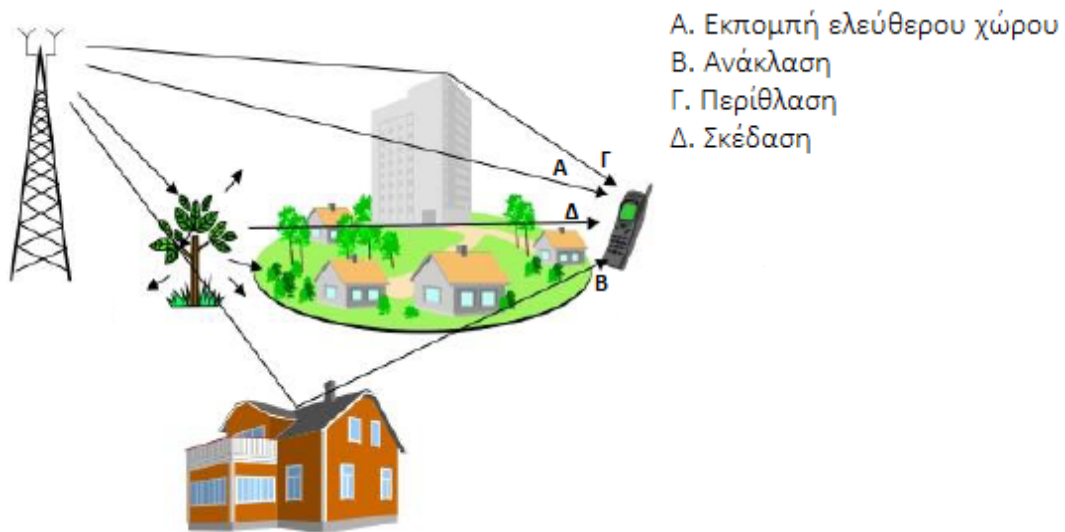
Εντός της περιοχής κάλυψης είναι δυνατό να υπάρξουν απευθείας ζεύξεις μεταξύ συσκευών ή με το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα ως ενδιάμεσο. Οι λειτουργίες δικτύου αναλαμβάνονται από το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα. Ένα πρόβλημα το οποίο θα πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η διαχείριση του φάσματος. Το εύρος του καναλιού που θα χρησιμοποιεί κάθε συσκευή, ειδικότερα αυτές που θα συνδέονται με το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα θα πρέπει να μην προκαλεί παρεμβολές. Οι απαιτήσεις κάθε συσκευής και των αντίστοιχων εφαρμογών που θα εκτελεί επιφέρουν διαφορετικές απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης καθώς και ο αριθμός των συσκευών εντός της περιοχής κάλυψης περιπλέκουν το πρόβλημα.

3.4 Βασικοί μηχανισμοί διάδοσης

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί μηχανισμοί διάδοσης [54]. Αυτοί έχουν ως εξής:

1. Η ανάκλαση (Reflection) προκύπτει όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προσκρούει σε λείες επιφάνειες με πολύ μεγάλες διαστάσεις ως προς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Τέτοιες επιφάνειες τυπικά είναι η επιφάνεια της Γης, τοίχοι ή κτίρια.
2. Η διάθλαση (Transmission Through) εμφανίζεται όταν το σήμα διέρχεται από κάποιο υλικό. Τα χαρακτηριστικά του υλικού επιφέρουν απώλειες στην ισχύ του σήματος. Ταυτόχρονα υπάρχει κάμψη στην κατεύθυνση εκπομπής της ακτινοβολίας.

3. Η περίθλαση (Diffraction) προκαλείται από την πρόσπτωση της ακτινοβολίας σε γωνίες ή σε επιφάνεια με ακμές. Τα κύματα καμπυλώνονται γύρω από τις ακμές του εμποδίου σε περιοχές όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή σύμφωνα με την αρχή του Huygens. Καλείται και σκίαση (shadowing).
4. Η σκέδαση (Scattering) προκαλείται όταν το διαδιδόμενο κύμα προσκρούει σε επιφάνειες με διαστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος και διασκορπίζεται σε όλες τις κατευθύνσεις. Παραδείγματα αποτελούν λάμπες φωτισμού ή φανάρια δίπλα από δρόμους ή βλάστηση.



Εικόνα 30. Γραφική αναπαράσταση μηχανισμών διάδοσης [55]

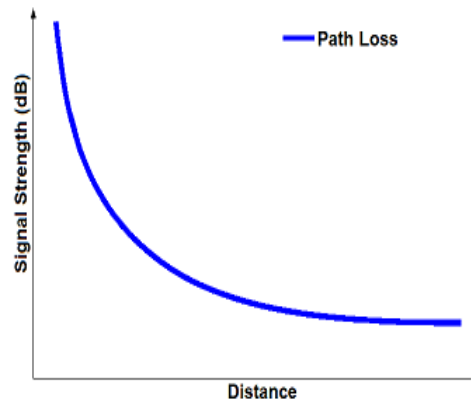
Οι παραπάνω μηχανισμοί έχουν διαφορετικές επιδράσεις και επιφέρουν εξασθένηση στην ισχύ της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας. Η πιο σημαντική είναι ότι το κύμα φτάνει από διαφορετικές κατευθύνσεις στον δέκτη. Το φαινόμενο αναφέρεται ως multipath propagation. Το σήμα που λαμβάνεται στον δέκτη είναι η διανυσματική πρόσθεση όλων των συνιστωσών που προκύπτουν από τις πολλαπλές διαδρομές.

Όταν υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ των συνιστωσών αυτών εμφανίζεται το φαινόμενο των διαλείψεων (Fading). Επιπλέον παρατηρείται απώλεια διαδρομής (path loss) λόγω απόστασης. Με την αύξηση της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη μειώνεται η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η μοντελοποίηση των απωλειών διαδρομής αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πεδίο έρευνας.

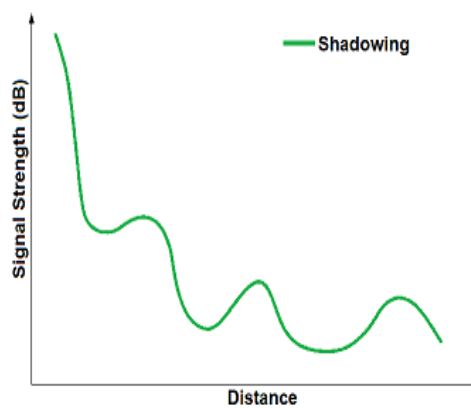
Η παρουσία μεταβαλλόμενων εμποδίων ως προς το υλικό το μέγεθος και τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες επιφέρει μια διαφορετικού τύπου επίδραση η οποία ονομάζεται διάλειψη σκιάς ή σκίαση (Shadowing). Τέλος πρέπει να αναφερθεί και η

περίπτωση της ταχείας διάλειψης (Fast Fading) [56]. Προκύπτει από την εποικοδομητική και καταστροφική παρεμβολή των πολλαπλών εκδόσεων του σήματος που φτάνουν στο δέκτη που λαμβάνονται με διαφορετικές φάσεις.

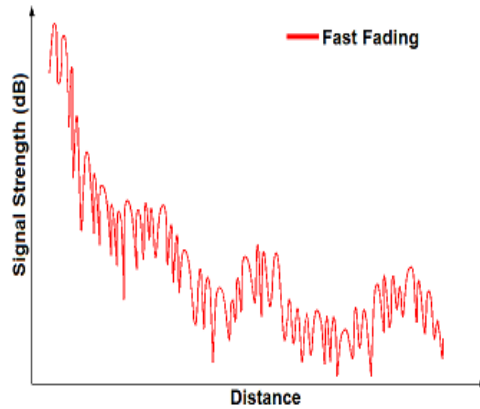
Γραφικά η συνολική ισχύς ενός ληφθέντος σήματος απεικονίζεται ως εξής



Διάγραμμα 12. Απώλειες σε dB λόγω απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη [57]

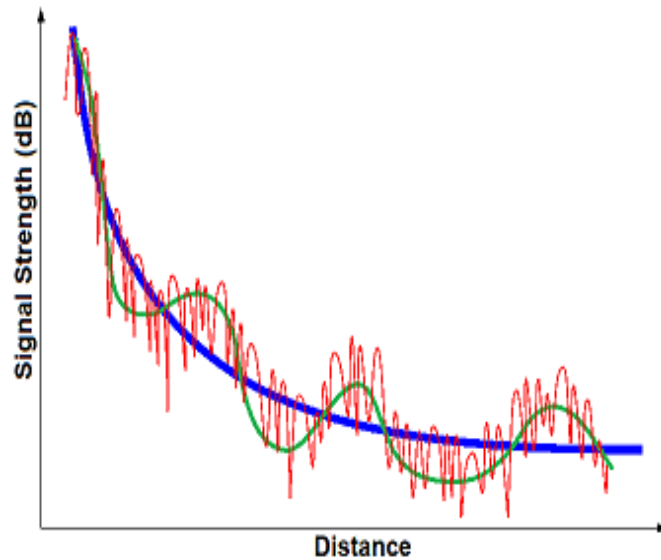


Διάγραμμα 13. Απώλειες σε dB λόγω σκίασης μεταξύ πομπού και δέκτη [57]



Διάγραμμα 14. Απώλειες σε dB λόγω σκίασης μεταξύ πομπού και δέκτη [57]

Η συμβολή των παραπάνω επιμέρους σημάτων έχει ως αποτέλεσμα το συνολικό



σήμα στον δέκτη

Διάγραμμα 15. Συνολική ισχύς ληφθέντος σήματος [57]

3.5 Μοντέλα απωλειών

Τα μοντέλα απωλειών είναι μαθηματικές εκφράσεις για τον υπολογισμό των απωλειών ισχύος του σήματος. Ισχύουν για συγκεκριμένες συνθήκες και χρησιμοποιούνται κατά την φάση του σχεδιασμού ενός συστήματος. Η χρήση τους είναι απαραίτητη ώστε να γίνει σωστή εκτίμηση της λειτουργίας και της απόδοσης του συστήματος. Απώτερος σκοπός είναι η σωστή σχεδίαση του συστήματος με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Τα μοντέλα απωλειών χωρίζονται σε εμπειρικά, ημί-εμπειρικά και θεωρητικά ή ντετερμινιστικά. Τα πρώτα προκύπτουν από μετρήσεις σε συγκεκριμένο περιβάλλον και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε παρόμοιες συνθήκες. Τα ημί-εμπειρικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη φυσικούς μηχανισμούς διάδοσης και τη γεωμετρία του περιβάλλοντος. Επιπλέον χρησιμοποιούν παραμέτρους που έχουν προκύψει από εμπειρικές μετρήσεις. Τα θεωρητικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη μόνο φυσικούς μηχανισμούς διάδοσης και τη γεωμετρία του περιβάλλοντος.

Το πιο βασικό μοντέλο υπολογισμού απώλειας διαδρομής είναι το μοντέλο απωλειών ελευθέρου χώρου (Free Space Loss) [58]. Λαμβάνει υπόψη μόνο την απευθείας διαδρομή που προκύπτει από την οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για υπολογισμό της ραδιοκάλυψης σε εσωτερικούς χώρους όπου υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ του σημείου εκπομπής (πχ. Access Point) και του χρήστη.

Θεωρείται ότι η πρώτη ζώνη Fresnel δεν παρεμποδίζεται ή ότι πιθανή παρεμπόδιση της δεν εισάγει σημαντική απώλεια. Η ελεύθερη απώλεια χώρου αυξάνεται κατά 6dB για κάθε διπλασιασμό είτε της συχνότητας ή της απόστασης. Δίνεται από τον τύπο

$$L_{FSL} (dB) = 32,5 + 20\log R + 20\log F \quad (20), \text{ όπου}$$

R	Απόσταση πομπού δέκτη (Km)
F	Συχνότητα εκπομπής (MHz)

Πίνακας 5. Παράμετροι μοντέλου Free Space Loss

Εκτός του παραπάνω μοντέλου ενδεικτικά αξίζει να αναφερθούν τα μοντέλα Plane Earth Loss (θεωρητικό), Okumura-Hata (Εμπειρικό) και το μοντέλο Ikegami (ντετερμινιστικό).

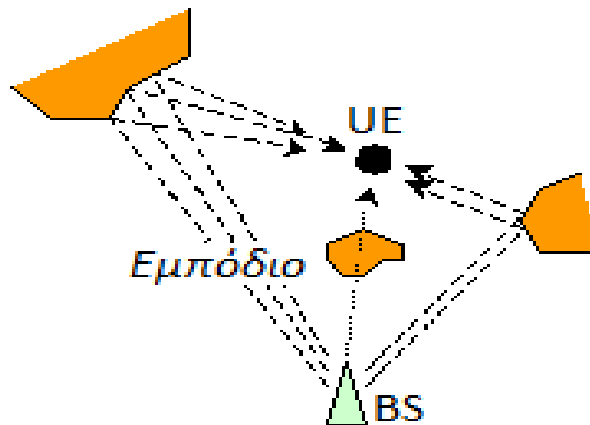
3.6 Κατανομές Rice-Rayleigh

Τα μοντέλα απωλειών υπολογίζουν μια μέση τιμή αυτών και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της μέσης τιμής της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος. Η τελευταία όμως στην πράξη υπόκειται σε τυχαίες μεταβολές που προκύπτουν από το περιβάλλον στο εντός του οποίου γίνεται η διάδοση της ακτινοβολίας. Οι μεταβολές αυτές προκαλούν διαλείψεις στην λήψη του σήματος οι

οποίες ονομάζονται διαλείψεις σκίασης. Η διακυμάνσεις θεωρείται ότι προκαλούνται ανά διαστήματα τα οποία είναι συγκρίσιμα με το μέγεθος εμποδίων όπως κτίρια η λόφοι. Για αυτό το λόγο θεωρούνται αργές διαλείψεις.

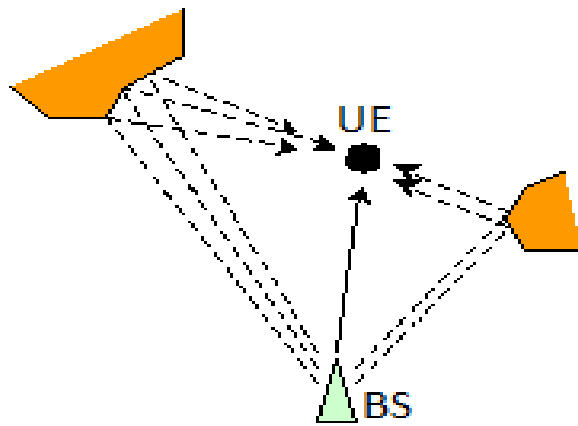
Εκτός όμως από τις αργές διαλείψεις, υπάρχουν και άλλες οι οποίες προκύπτουν με μεγαλύτερη ταχύτητα. Κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την ύπαρξη η μη οπτικής επαφής μεταξύ σταθμού βάσης και κινητής συσκευής. Η πρόβλεψη της μεταβολής του σήματος είναι εφικτή με την χρήση στατιστικών μεθόδων.

Στο σενάριο που δεν υπάρχει οπτική επαφή (non Line of Sight-nLoS) η ακτινοβολία μεταδίδεται κυρίως μέσω πολλαπλών ανακλάσεων ή λόγω σκέδασης. Ως αποτέλεσμα στον δέκτη φτάνουν πολλαπλά σήματα μέσω διαφορετικών διαδρομών (multipath propagation). Η διεύθυνση και θέση του πομπού δεν είναι εμφανής. Τα πολλαπλά σήματα δημιουργούν κυρίως απότομες διαλείψεις.



Εικόνα 31. Διάδοση από πολλαπλές διαδρομές για μη οπτική επαφή [59]

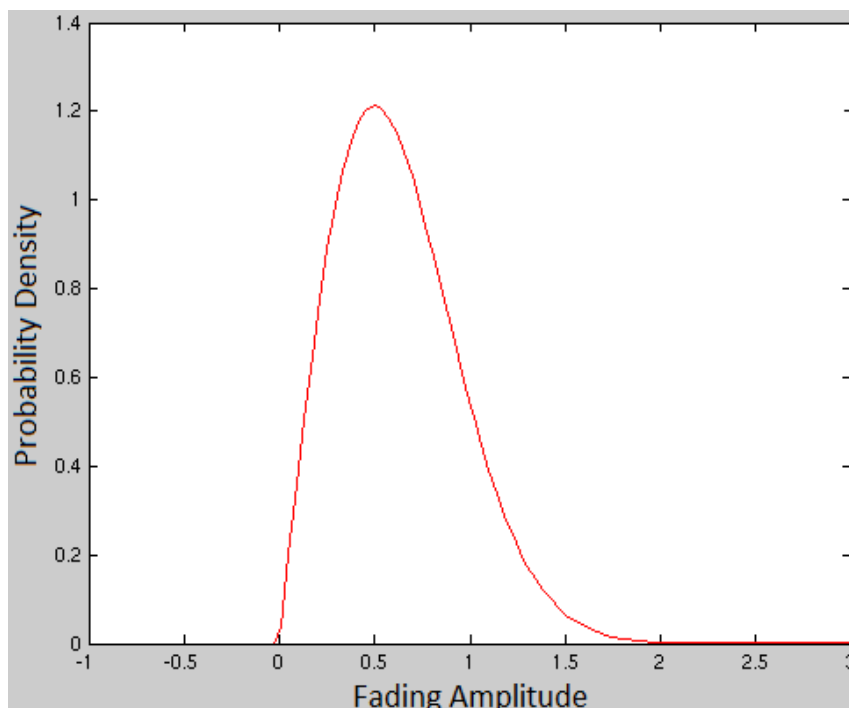
Αντίστοιχα στο σενάριο που υπάρχει οπτική επαφή υπάρχει μια ισχυρή συνιστώσα στην οποία προστίθενται μικρότερες συνιστώσες κυρίως λόγω ανακλάσεων. Η διάλειψη του σήματος είναι μικρότερη.



Εικόνα 32. Διάδοση από πολλαπλές διαδρομές για οπτική επαφή [59]

Για να υπολογιστούν οι απώλειες από τις διαλείψεις στις δύο παραπάνω περιπτώσεις χρησιμοποιούνται στατιστικές περιγραφές.

Η κατανομή Rayleigh περιγράφει τη διαδικασία της γρήγορης διάλειψης σε κινητά κανάλια όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή. Τα κανάλια αποκαλούνται κανάλια Rayleigh [60].

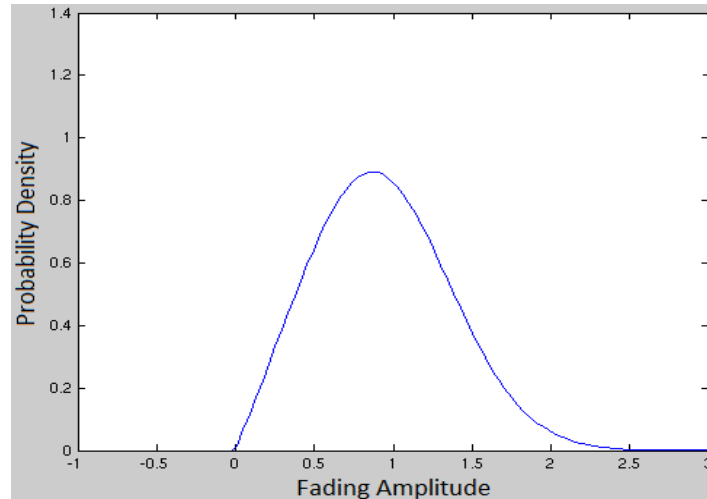


Διάγραμμα 16. Γράφημα κατανομής Rayleigh [61]

Το παραπάνω γράφημα δίνει την πιθανότητα εμφάνισης διαλείψεων για την περίπτωση της μη οπτικής επαφής. Δίνεται από τον τύπο

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (21)$$

Η αντίστοιχη κατανομή για την περίπτωση της ύπαρξης οπτικής επαφής ονομάζεται κατανομή Rice [62].



Διάγραμμα 17. Γράφημα κατανομής Rice [61]

Θεωρείται πιο συμμετρική κατανομή από την Rayleigh ως προς τα αποτελέσματα. Χαρακτηρίζεται από τον εξής τύπο

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-(r^2+s^2)/2\sigma^2} I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right) \quad (22)$$

Και για τις δύο κατανομές οι μεταβλητές έχουν ως εξής

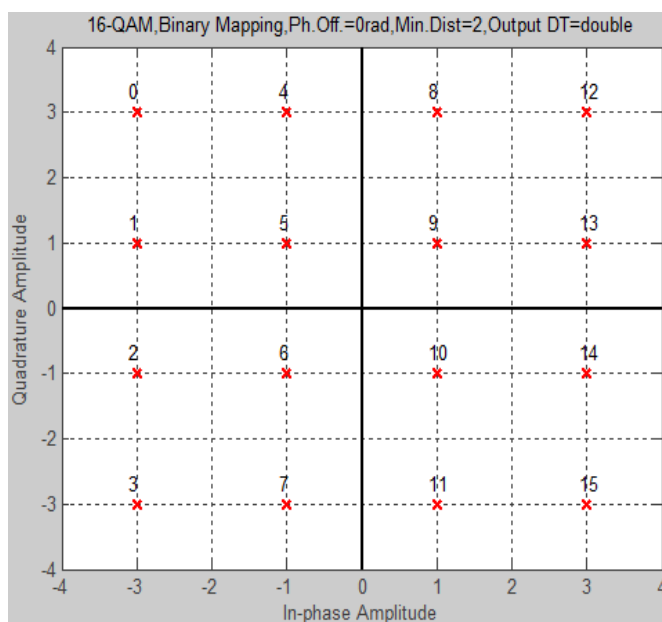
σ	Ισχύς σύνθετου σήματος βασικής ζώνης
r	Πιθανότητα διάλειψης
s	Πλάτος προστιθέμενης LoS συνιστώσας

Πίνακας 6. Παράμετροι κατανομών Rice και Rayleigh

Η κατανομή Rice χαρακτηρίζεται και από τον παράγοντα k ο οποίος ονομάζεται και παράγοντας Rice. Αυτός είναι ο λόγος της ισχύος της συνιστώσας που προκύπτει από οπτική επαφή προς την ισχύ των υπόλοιπων μεταβαλλόμενων συνιστωσών του σήματος.

3.7 Μέθοδος διαμόρφωσης QAM

Η μέθοδος διαμόρφωσης QAM (Quadrature Amplitude Modulation) είναι ψηφιακή και χρησιμοποιείται ευρέως σε ψηφιακά συστήματα μετάδοσης δεδομένων [63]. Η πιο διαδεδομένη χρήση της είναι στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών. Συνδυάζει την διαμόρφωση πλάτους (Amplitude modulation-AM) και την διαμόρφωση φάσης (Amplitude Phase Keying-APK) δύο φερόντων συχνοτήτων οι οποίες έχουν διαφορά φάσης. Τα σύμβολα τοποθετούνται σε έναν αστερισμό. Επιλέγοντας ανάλογα με την εφαρμογή το κατάλληλο μέγεθος αυτού του αστερισμού επιτυγχάνεται υψηλός βαθμός αποδοτικότητας του διαθέσιμου φάσματος. Ένα παράδειγμα διαγράμματος αστερισμού είναι το παρακάτω



Διάγραμμα 18. Διάγραμμα αστερισμού 16QAM [64]

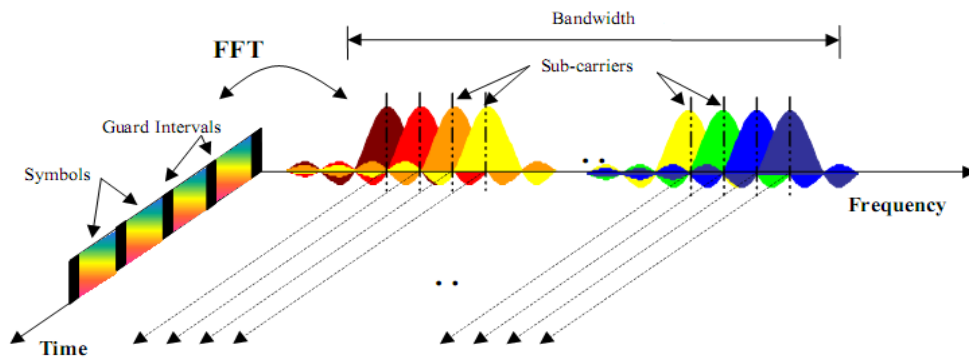
Ο αριθμός 16 στο παραπάνω παράδειγμα υποδηλώνει την τάξη της διαμόρφωσης. Κάθε κουκκίδα αντιπροσωπεύει ένα σύμβολο. Σε κάθε ένα σύμβολο περιέχονται $\log_2 M$ bits, όπου M ο αριθμός της διαμόρφωσης. Στο παραπάνω παράδειγμα επομένως κάθε σύμβολο περιέχει 4 bits. Όσο υψηλότερη η τάξη της διαμόρφωσης τόσο περισσότερα τα bits που μεταδίδονται ανά σύμβολο και επομένως τόσο μεγαλύτερος ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Καθώς όμως αυξάνει η τάξη της διαμόρφωσης και επομένως ο αριθμός των συμβόλων η απόσταση μεταξύ τους στο

παραπάνω γράφημα μειώνεται. Αυτό συμβαίνει λόγω του πεπερασμένου εύρους του εκάστοτε καναλιού το οποίο καλείται να υποστηρίξει μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Ως αποτέλεσμα αυξάνεται η πιθανότητα λανθασμένης ανάγνωσης συμβόλων στον δέκτη. Υπάρχει επομένως μια ανταλλαγή μεταξύ επίδοσης του συστήματος ως προς τα σφάλματα και απαιτούμενου εύρους. Στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας η διαμόρφωση ονομάζεται προσαρμοστική. Οι συνθήκες του ασύρματου καναλιού κατά κύριο λόγο επηρεάζουν την απόδοση της ζεύξης. Ως αποτέλεσμα η διαμόρφωση αλλάζει ανάλογα με τις συνθήκες για να διατηρηθεί ένα αποδεκτό επίπεδο ποιότητας (Quality of Service-QoS). Η κατάλληλη επιλογή διαμόρφωσης ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι ή ο σωστός σχεδιασμός του τηλεπικοινωνιακού συστήματος ώστε να υποστηρίξει τους επιθυμητούς ρυθμούς μετάδοσης ή να είναι εφικτή η σωστή λειτουργία του μέχρι ένα ποσοστό σφάλματος στο δέκτη αποτελούν ζητήματα κεφαλαιώδους σημασίας.

3.8 Μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης με ορθογώνια συχνότητα

Πρόκειται για τεχνική πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται κυρίως στις τηλεπικοινωνίες. Πεδία εφαρμογής εκτός των δικτύων κινητής τηλεφωνίας είναι και τεχνολογίες όπως xDSL και τα ασύρματα δίκτυα 802.11x.

Η μέθοδος διαχωρίζει το διαθέσιμο εύρος σε κανάλια (subcarriers) τα οποία διαμορφώνονται ψηφιακά. Η πιο συνηθής τεχνική διαμόρφωσης είναι η QAM που έχει αναφερθεί. Κάθε κανάλι μπορεί να έχει διαφορετική διαμόρφωση. Μέσω κάθε καναλιού μεταφέρονται σύμβολα ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από την τάξη της διαμόρφωσης. Μεταξύ των συμβόλων υπάρχουν περιοχές του σήματος οι οποίες δεν μεταφέρουν δεδομένα. Αυτές υπάρχουν για να περιορίσουν τις παρεμβολές μεταξύ γειτονικών συμβόλων και ονομάζονται guard intervals. Ο αριθμός των subcarriers εξαρτάται από το διαθέσιμο εύρος. Επομένως μεγαλύτερο εύρος έχει ως αποτέλεσμα περισσότερα subcarriers και επομένως μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.



Εικόνα 33. Γραφική αναπαράσταση πολυπλεξίας OFDM [65]

Ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transformation-FFT) χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση των δεδομένων. Η αντίστροφη διαδικασία (Inverse Fast Fourier Transformation-IFFT) ακολουθείται στο δέκτη. Η μέθοδος απαιτεί μεγάλη ακρίβεια στον διαχωρισμό και τον συγχρονισμό συχνοτήτων των subcarriers μεταξύ πομπού και δέκτη. Απόκλιση σε αυτές τις συχνότητες προκαλεί παρεμβολές (Inter-Carrier Interference - ICI). Τυπικά αυτές οφείλονται σε ασυμβατότητα μεταξύ πομπού και δέκτη ή στο φαινόμενο μετατόπισης Doppler. Το τελευταίο είναι σημαντικό για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Παρατηρείται όταν ο δέκτης κινείται και έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή συχνοτήτων λόγω της αλλαγής απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη.

Κεφάλαιο 4

Προσομοιώσεις βασικών καναλιών

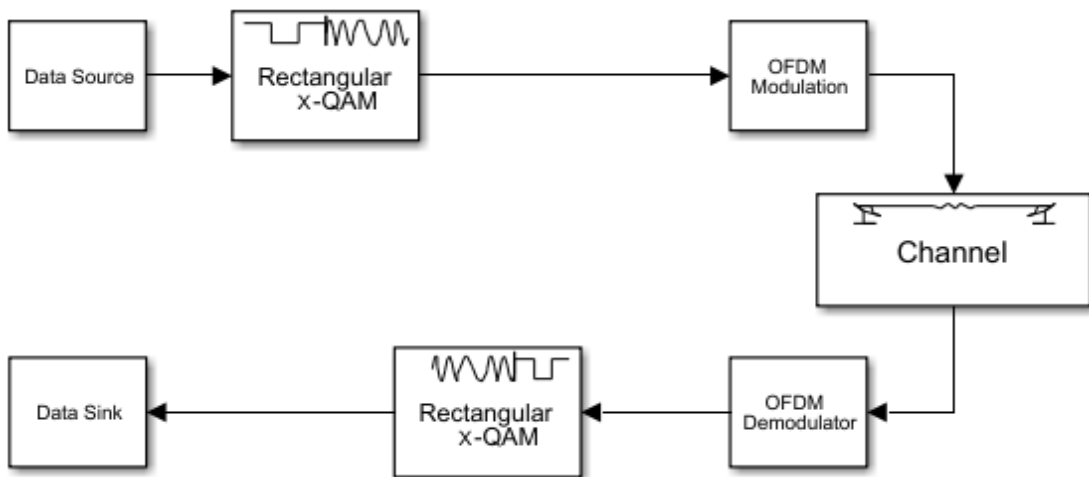
Εδώ και μερικές δεκαετίες η πρόοδος που έχει καταγραφεί στην επιστήμη των υπολογιστικών συστημάτων έχει επιτρέψει την δημιουργία και χρήση σημαντικών εργαλείων. Μια κατηγορία αυτών είναι προγράμματα τα οποία χρησιμοποιούνται για προσομοιώσεις μοντέλων. Η λογική πίσω από την προσομοίωση ενός μοντέλου περιλαμβάνει τρία στάδια. Το πρώτο είναι η επαλήθευση μιας αρχικής ιδέας ή θεωρίας. Το δεύτερο είναι η μελέτη των αποτελεσμάτων. Το τρίτο είναι η σύγκριση με υπαρκτές δομές που εκτελούν ίδιες λειτουργίες. Η σωστή προσομοίωση ενός υπό υλοποίηση συστήματος και η σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων οδηγεί σε επίπεδο εταιρικών δομών σε σωστές στρατηγικές αποφάσεις και αποφυγή λανθασμένων και συνήθως δαπανηρών επενδύσεων. Στις επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου παρατίθενται μοντέλα ασύρματων καναλιών και ερμηνεύονται τα

αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών. Για την διαδικασία χρησιμοποιείται το λογισμικό Matlab R2019b και η πλατφόρμα Simulink.

4.1 Περιγραφή μοντέλου προσομοίωσης

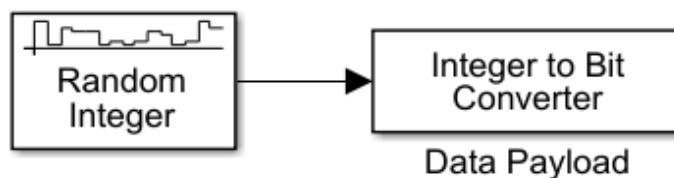
Οι κύριοι τύποι καναλιών που τυπικά συναντώνται σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας προέρχονται από τα στοχαστικά μοντέλα καναλιών Rice και Rayleigh που έχουν περιγραφεί στο κεφάλαιο 3.

Για την προσομοίωση των δύο τύπων καναλιών υπό διαφορετικές συνθήκες σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιείται το παρακάτω μοντέλο που δημιουργήθηκε στο Simulink του Matlab.



Διάγραμμα 19. Βασικό block διάγραμμα μοντέλου

Η βαθμίδα Data Source περιλαμβάνει τα παρακάτω



Διάγραμμα 20. Block διάγραμμα βαθμίδας Data Source

Η βαθμίδα Data Source περιλαμβάνει τις βαθμίδες Random Integer Generator και Integer to Bit Converter. Συνολικά οι βαθμίδες του μοντέλου είναι οι εξής

Random Integer Generator: Η βαθμίδα παράγει τυχαίους ακέραιους αριθμούς από το 0 ως το $M-1$. Η παράμετρος M είναι ο M -ary αριθμός που αντιστοιχεί στην εκάστοτε QAM διαμόρφωση.

Ο αριθμός δειγμάτων ανά frame και ο χρόνος κάθε frame επιλέγονται έτσι ώστε να παράγεται σταθερός ρυθμός δεδομένων για όλες τις διαμορφώσεις και τις συνθήκες καναλιού.

Οι παράμετροι δίνονται στην αρχή κάθε προσομοίωσης. Οι ακέραιοι αριθμοί που παράγονται είναι δεδομένα τύπου Double data type.

Integer to Bit Converter: Κάθε ακέραιος αριθμός μετατρέπεται σε πλήθος bits. Ο αριθμός αυτών είναι M . Σε όλες τις προσομοιώσεις το πιο σημαντικό bit είναι πρώτο στην αλληλουχία. Τα παραγόμενα bits είναι δεδομένα τύπου Double data type όπως οι ακέραιοι από τους οποίους δημιουργούνται.

Rectangular QAM Modulator: Σε αυτό το στάδιο του μοντέλου γίνεται η ψηφιακή διαμόρφωση των δεδομένων. Χρησιμοποιείται η μέθοδος QAM (Quadrature amplitude modulation) που χρησιμοποιείται και από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Η επιλογή της τάξης της διαμόρφωσης γίνεται με την αλλαγή της τιμής της παραμέτρου M -ary. Επιλέγεται κώδικας Gray για την διόρθωση λαθών στο διάγραμμα αστερισμού του σήματος. Στο διάγραμμα αστερισμού γίνεται κανονικοποίηση βάσεις της μέσης ισχύος του σήματος και με τιμή αναφοράς ισχύος το 1 Watt. Η τιμή της παραμέτρου offset που ρυθμίζει την περιστροφή του διαγράμματος αστερισμού σε rad ορίζεται ως μηδέν.

OFDM Modulator: Εκτελεί OFDM διαμόρφωση στα ψηφιακά διαμορφωμένα δεδομένα. Η παράμετρος FFT Length ορίζει τον αριθμό των φορέων (subcarriers) που χρησιμοποιούνται για την εκπομπή. Για τις δοκιμές ορίζεται σε 64. Ως guard bands ορίζονται οι φορείς αριστερά και δεξιά των φορέων που μεταφέρουν τα δεδομένα οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αποφυγή παρεμβολών από γειτονικούς φορείς. Για τις δοκιμές χρησιμοποιούνται οι τιμές 6 και 5 αριστερά και δεξιά αντίστοιχα. Για όλες τις προσομοιώσεις επιλέγεται εκπομπή ενός OFDM συμβόλου ανά αλληλουχία δεδομένων. Επιπλέον για σκοπούς σύγκρισης εξετάζεται η περίπτωση μονής κεραίας εκπομπής και μονής κεραίας λήψης.

Channel: Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις καναλιού για την προσομοίωση διαφορετικών συνθηκών. Η πρώτη είναι κανάλι τύπου Rayleigh. Πρόκειται για στοχαστικό μοντέλο καναλιού που προβλέπει ότι το σήμα λαμβάνεται στο δέκτη μέσω πολλαπλών διαδρομών. Η κύρια συνιστώσα του σήματος στον δέκτη δεν προκύπτει από οπτική επαφή. Η συνολική ισχύς των διαδρομών μεταξύ πομπού και

δέκτη επιλέγεται στα 0 dB. Στις δοκιμές επιλέγεται Doppler Shift στα 0.001 και 1 Hz για προσομοίωση στατικού και κινούμενου αντίστοιχα δέκτη.

Η δεύτερη περίπτωση είναι το κανάλι τύπου Rice. Η διαφοροποίηση με παραπάνω είναι ότι η κύρια συνιστώσα του σήματος στον δέκτη προκύπτει από οπτική επαφή. Χρησιμοποιούνται οι ίδιες παράμετροι για το Doppler Shift. Επιπλέον χρησιμοποιούνται τιμές 10 και 20 dB για τον παράγοντα k . Ο τελευταίος είναι ο λόγος της ισχύος της κύριας συνιστώσας του σήματος ως προς την ισχύ των υπόλοιπων συνιστωσών που προκύπτουν από τον μηχανισμό διάδοσης.

Η διαφοροποίηση των δύο παραπάνω παραμέτρων προσομοιώνει διαφορετικές συνθήκες καναλιού. Η τρίτη περίπτωση καναλιού που εξετάζεται είναι ένα σύνθετο κανάλι που εξετάζεται στο κεφάλαιο 5.

OFDM Demodulator: Εκτελεί την αποδιαμόρφωση του OFDM σήματος όπως έχει ληφθεί από το ασύρματο κανάλι. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι οι ίδιοι με την βαθμίδα OFDM διαμόρφωσης.

Rectangular QAM Demodulator: Εκτελεί την ψηφιακή ψηφιακή αποδιαμόρφωση των δεδομένων. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι οι ίδιοι με την βαθμίδα QAM διαμόρφωσης.

Από τα παραπάνω λαμβάνονται πίνακες τιμών για Modulation Error Rate, Bit Loss και Error bits. Οι πίνακες χρησιμοποιούνται για την δημιουργία διαγραμμάτων BER/SNR και Correct Bits/SNR βάσει των οποίων εξετάζονται οι παράμετροι προσομοίωσης και η απόδοση του κάθε συστήματος.

Παρακάτω εξετάζονται κανάλια τύπου Rice και Rayleigh. Από αρχικές δοκιμές έχει διαπιστωθεί ότι ο παράγοντας k και το Doppler Shift αντίστοιχα επιφέρουν σημαντική μεταβολή ως προς την απόδοση του κάθε μοντέλου. Εξετάζεται η συμπεριφορά του καναλιού Rayleigh για στατικό και κινούμενο δέκτη σε μεταβαλλόμενες θέσεις μεταξύ πομπού και δέκτη. Αυτή η συμπεριφορά απαντάται κατά κόρον σε πραγματική χρήση, καθώς ένας χρήστης συσκευής κινητής τηλεφωνίας κινείται στον χώρο και τα χαρακτηριστικά του σήματος μεταβάλλονται συνεχώς. Εξετάζεται επιπλέον η συμπεριφορά του καναλιού Rice ως προς την ισχύ της κύριας συνιστώσας του σήματος. Διαφορετικές τιμές του παράγοντα k προσομοιώνουν διαφορετικές συνθήκες του καναλιού από την πλευρά του δέκτη. Καθώς η τιμή του παράγοντα k αυξάνεται αυτό υποδηλώνει ότι ο δέκτης λαμβάνει μεγαλύτερη ισχύ από την συνιστώσα του σήματος που προκύπτει από οπτική επαφή και επομένως καλύτερες συνθήκες λήψης.

Τα μοντέλα εξετάζονται ώστε να υπάρχει μια ένδειξη της συμπεριφοράς ενός ασύρματου καναλιού υπό διαφορετικές συνθήκες και σε διαφορετικές ψηφιακές διαμορφώσεις. Δεν συνυπολογίζονται παράγοντες οι οποίοι σε ένα πραγματικό σενάριο επιφέρουν αλλαγή των συνθηκών στο περιβάλλον μετάδοσης.

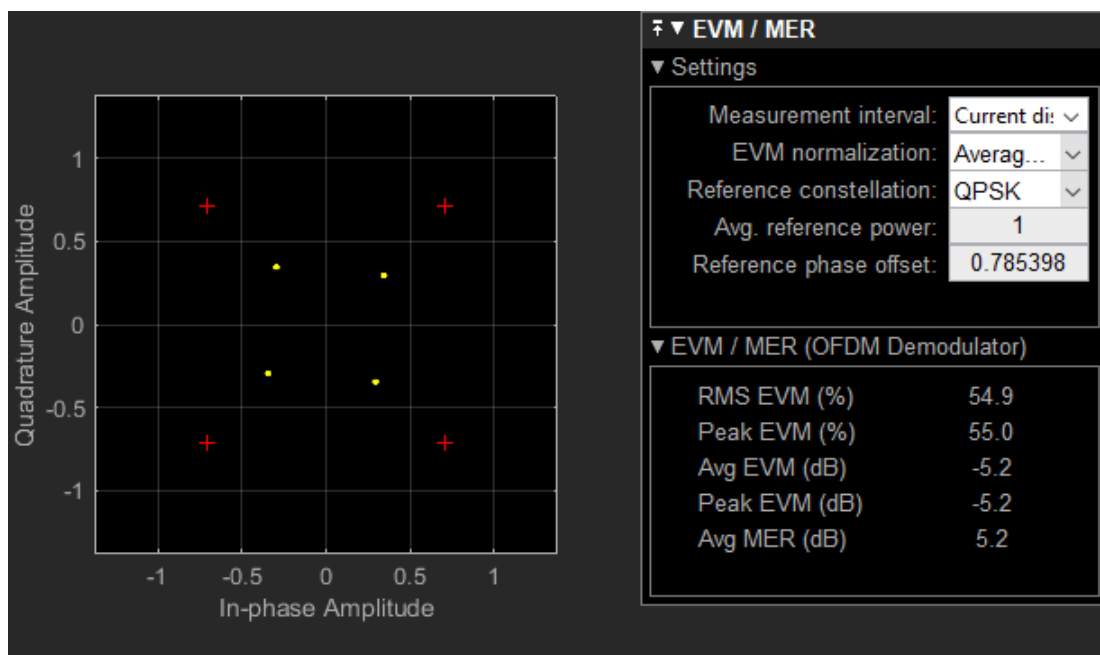
4.2 Προσομοίωση καναλιού Rayleigh

Παράμετροι προσομοίωσης				
Runtime	20000			
Random Integer Generator	M-ary Number	Sample Time	Samples/Frame	
	4 / 16 / 64 / 256	01/53	53	
Integer/Bit Converter	Bits/Integer			
	2 / 4 / 6 / 8			
QPSK Modulation	M-ary Number	Constellation Ordering	Decision Type	Normalization
	4 / 16 / 64 / 256	Gray	Hard	Avg Power
OFDM Modulation	FFT Length	Guard Bands	OFDM Symbols	
	64	6;5	1	
Rayleigh Channel	Max Doppler Shift			
	0.001 / 1Hz			
Αποτελέσματα προσομοίωσης - Doppler Shift 0.001 Hz				
Ψηφιακή διαμόρφωση QAM	4 QAM	16 QAM	64 QAM	256 QAM
Bit Loss (%)	0.511	0.441	0.45	0.46
Εσφαλμένα Bits	1085379	1872868	2863663	3902861
Συνολικά Bits	2120106	4240212	6360318	8480424
Αποτελέσματα προσομοίωσης - Doppler Shift 1 Hz				

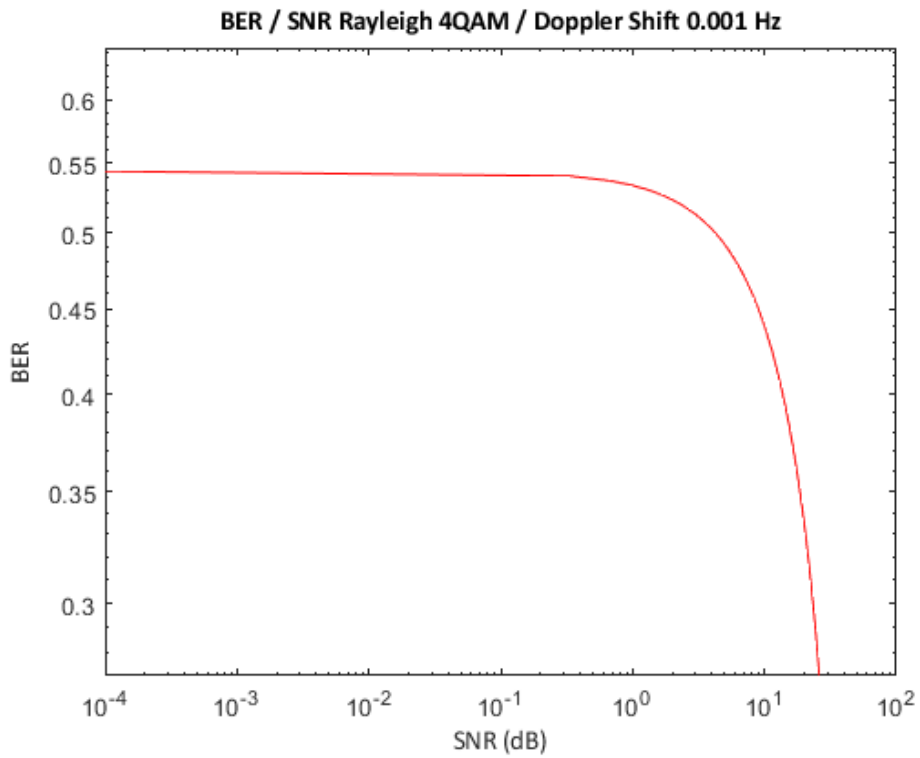
Ψηφιακή διαμόρφωση QAM	4 QAM	16 QAM	64 QAM	256 QAM
Bit Loss (%)	0.502	0.475	0.483	0.487
Εσφαλμένα Bits	1061960	2016299	3073754	4131384
Συνολικά Bits	2120106	4240212	6360318	8480424

Πίνακας 7. Παράμετροι και αποτελέσματα προσομοίωσης καναλιού Rayleigh

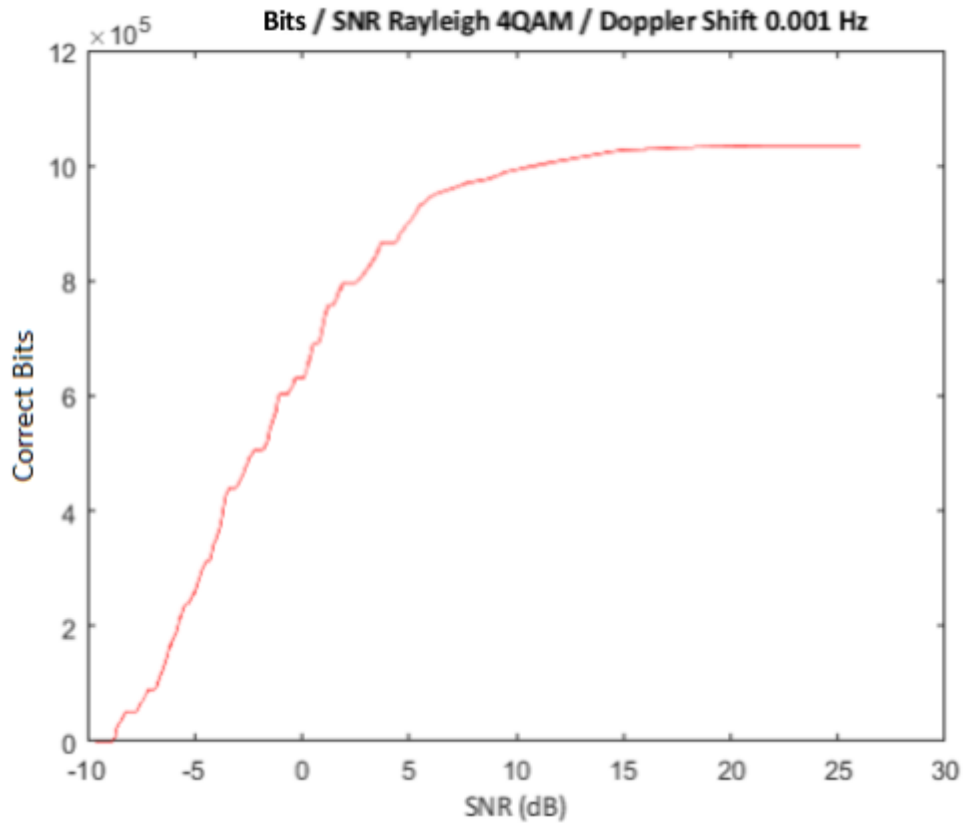
Εξετάζονται οι περιπτώσεις για διαμόρφωση από 4 ως 256 QAM και διαφορετική τιμή μετατόπισης Doppler. Ο δέκτης θεωρείται ακίνητος για τιμή 0,001 Hz και κινούμενος για 1 Hz. Στον πίνακα 5 καταγράφονται οι τιμές των παραμέτρων προσομοίωσης και τα αποτελέσματα για ποσοστό απωλειών , εσφαλμένα bits και τα συνολικά bits που μεταδόθηκαν ανά προσομοίωση. Τα διαγράμματα δημιουργούνται από τις τιμές στην λήψη του σήματος.



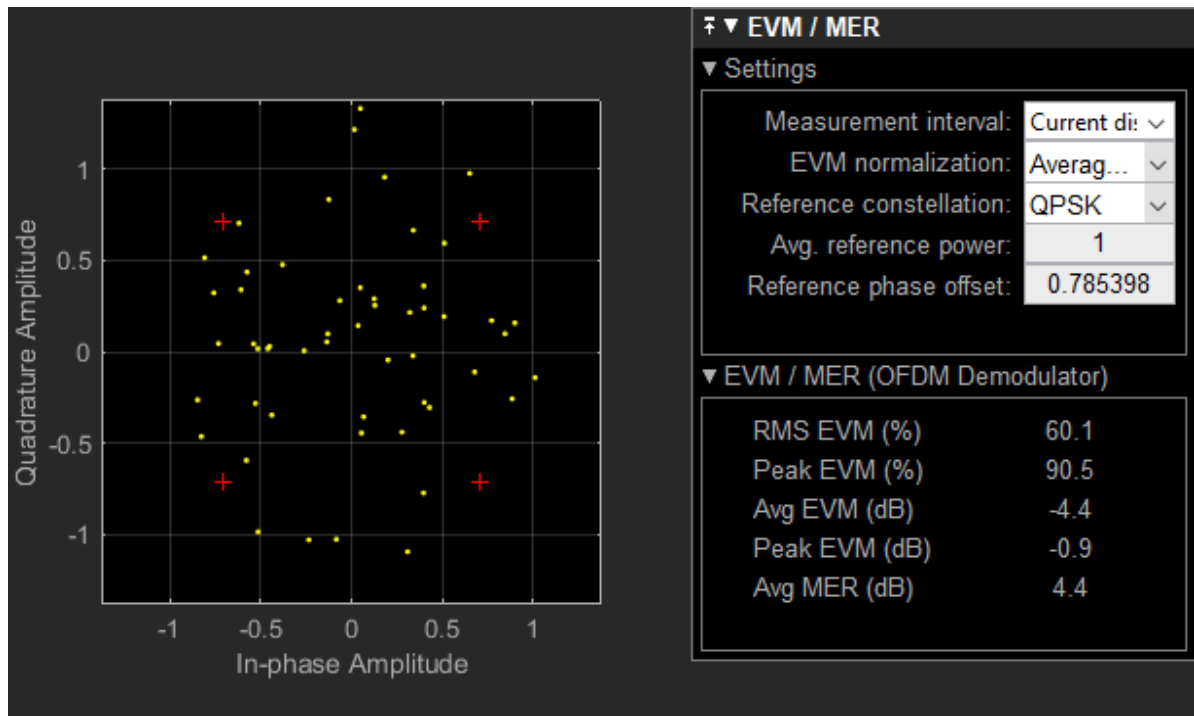
Διάγραμμα 21. Διάγραμμα αστερισμού Rayleigh / 4QAM / Doppler Shift 0.001 Hz



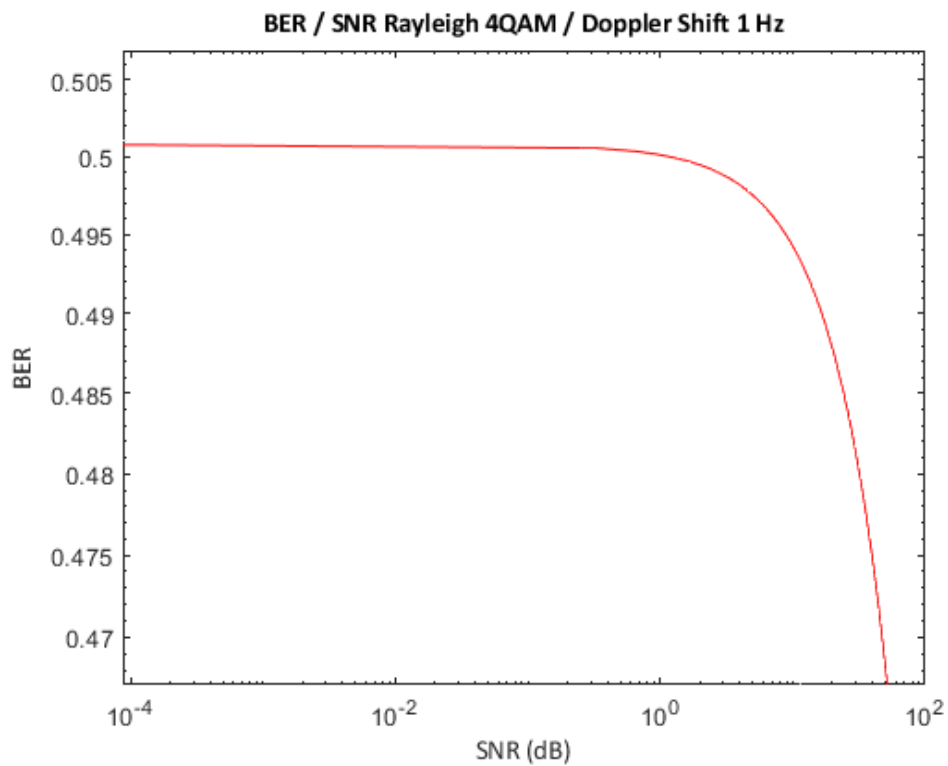
Διάγραμμα 22. Διάγραμμα BER/SNR Rayleigh / 4QAM / Doppler Shift 0.001 Hz



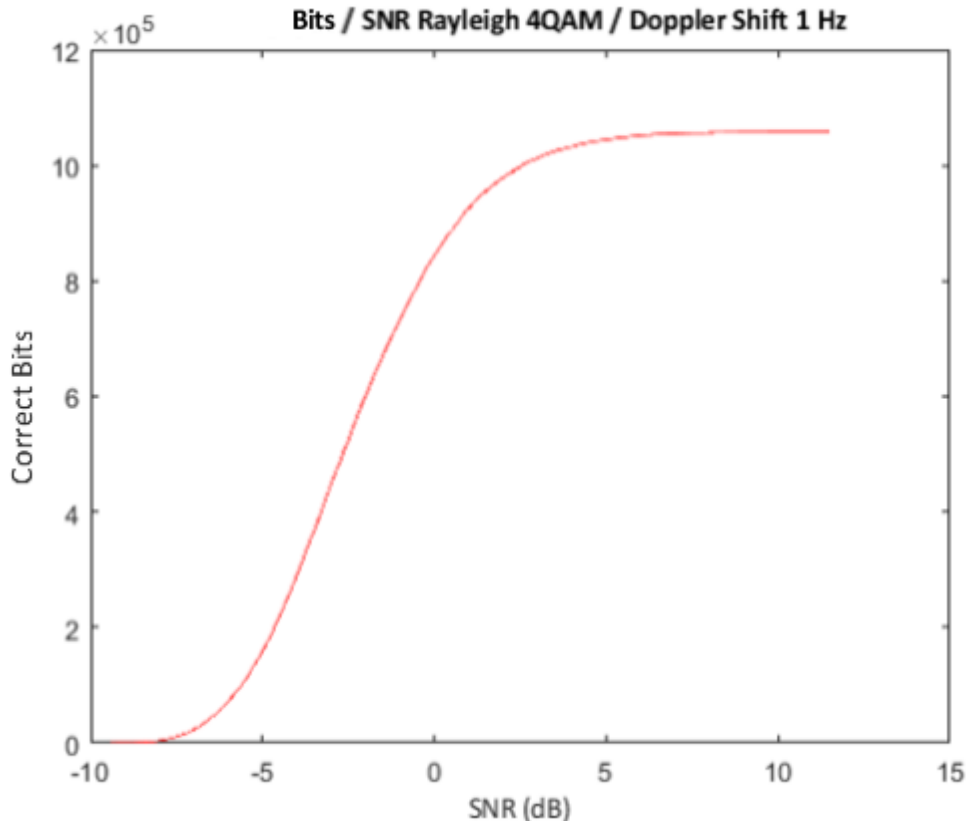
Διάγραμμα 23. Διάγραμμα Bits/SNR Rayleigh / 4QAM / Doppler Shift 0.001 Hz



Διάγραμμα 24. Διάγραμμα αστερισμού Rayleigh / 4QAM / Doppler Shift 1 Hz



Διάγραμμα 25. Διάγραμμα BER/SNR Rayleigh / 4QAM / Doppler Shift 1 Hz



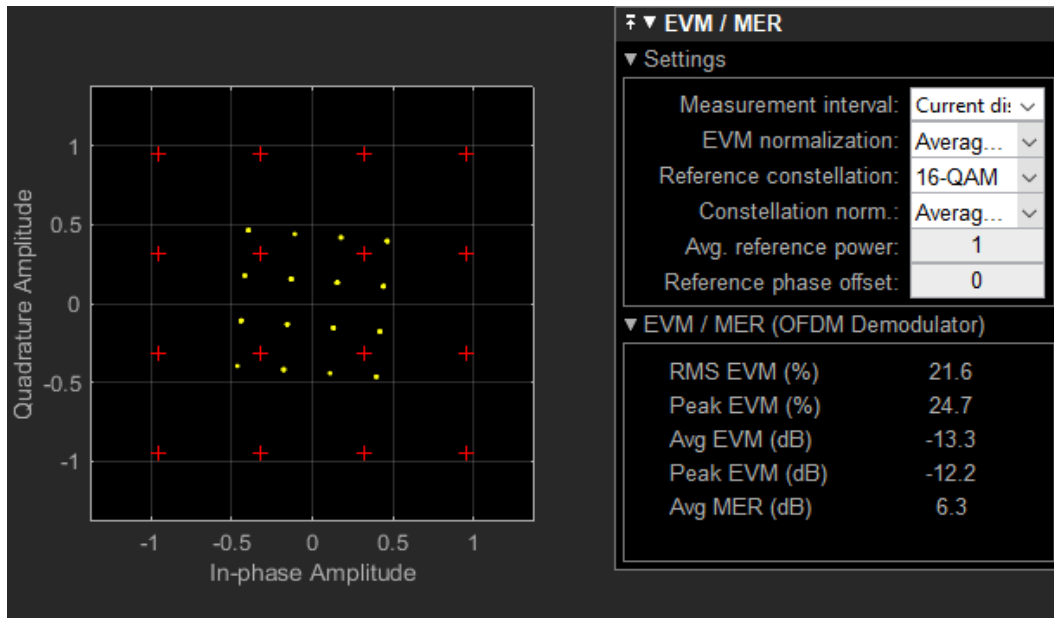
Διάγραμμα 26. Διάγραμμα Bits/SNR Rayleigh / 4QAM / Doppler Shift 1 Hz

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν στα διαγράμματα ασταθισμού 21 και 24 οι τιμές του εύρους σφάλματος διανύσματος (Error Vector Magnitude - EVM). Η τιμή της παραμέτρου δίνει για κάθε OFDM σύμβολο την απόσταση του από την ιδανική θέση την οποία θα έπρεπε να κατέχει στο διάγραμμα. Στο διάγραμμα 24 παρατηρούνται υψηλότερες τιμές τόσο για την μέση τετραγωνική τιμή (RMS EVM), όσο και για την μεγαλύτερη τιμή (Peak EVM). Η παρατήρηση συνάδει και με την γραφική απεικόνιση. Τα σύμβολα στο διάγραμμα 8 παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά.

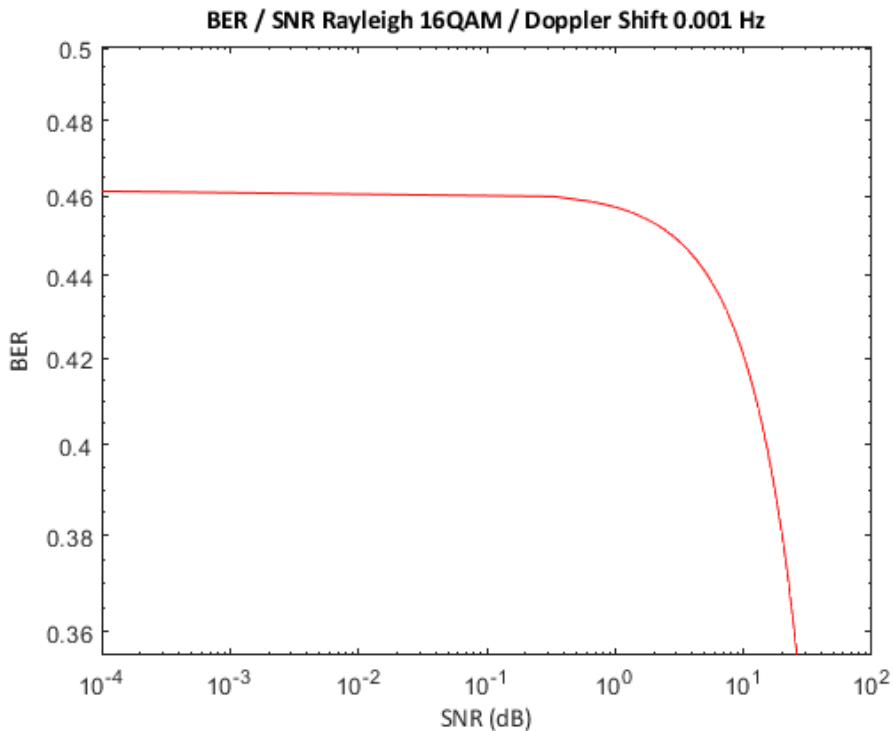
Παρατηρείται παραπλήσια επίδοση ως προς το ποσοστό σφαλμάτων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρατηρείται μεγάλο ποσοστό της τάξης του 50%. Αυτό οφείλεται στον χαμηλό ρυθμό μετάδοσης που προκύπτει από την τάξη διαμόρφωσης, καθώς μεταδίδονται μόνο 2 bits ανά OFDM σύμβολο.

Ως προς την απόδοση bits στον δέκτη παρατηρείται ότι είναι μηδενική για ιδιαίτερα χαμηλές τιμές του SNR. Η λήψη δεδομένων πρακτικά ξεκινά για SNR -5dB. Στην πρώτη περίπτωση όπως φαίνεται στο διάγραμμα 23 πέρα από τα 5dB υπάρχει αύξηση του αριθμού bits. Αυτός σταθεροποιείται περίπου στα 20dB. Στην δεύτερη όμως ο ρυθμός σταθεροποιείται για SNR περίπου 5 dB. Η σταθεροποίηση του

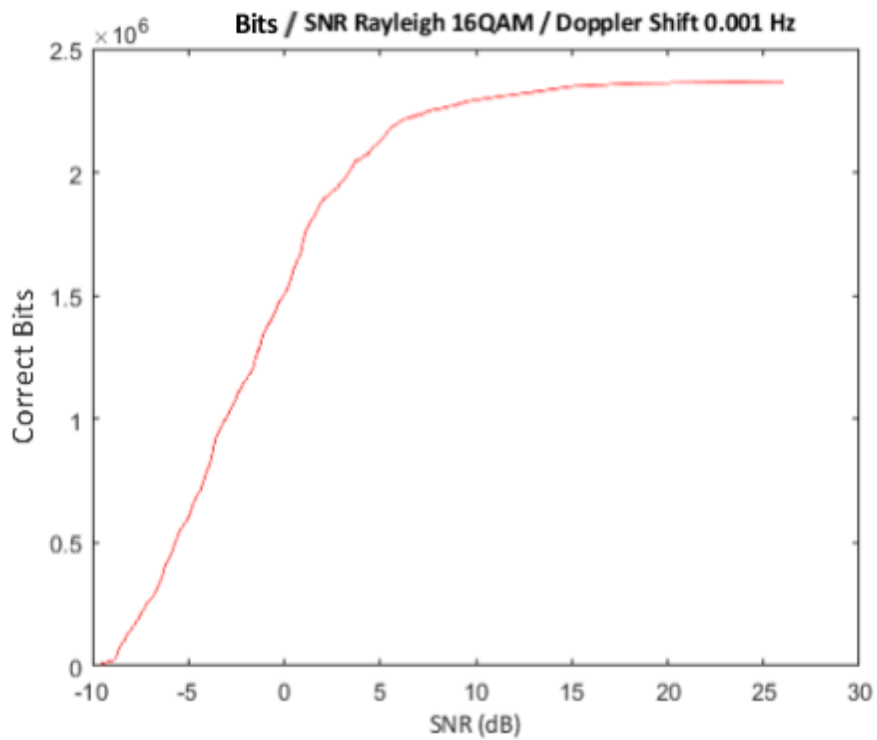
αριθμού bits σε υψηλότερο SNR για την περίπτωση μικρότερης τιμής μετατόπισης Doppler στο διάγραμμα 23 είναι φυσιολογική. Το διάγραμμα προσομοιώνει ακίνητο δέκτη, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι συνθήκες του ασύρματου καναλιού είναι σταθερές ή μεταβάλλονται πολύ αργά.



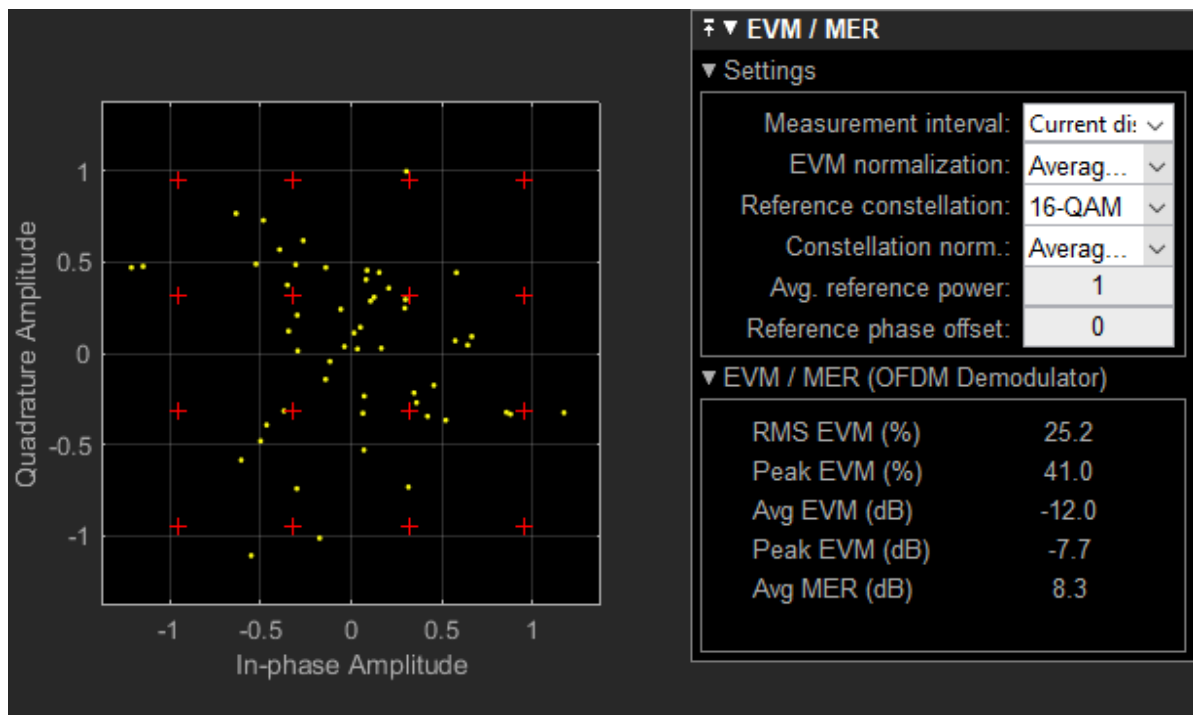
Διάγραμμα 27. Διάγραμμα αστερισμού Rayleigh / 16QAM / Doppler Shift 0.001 Hz



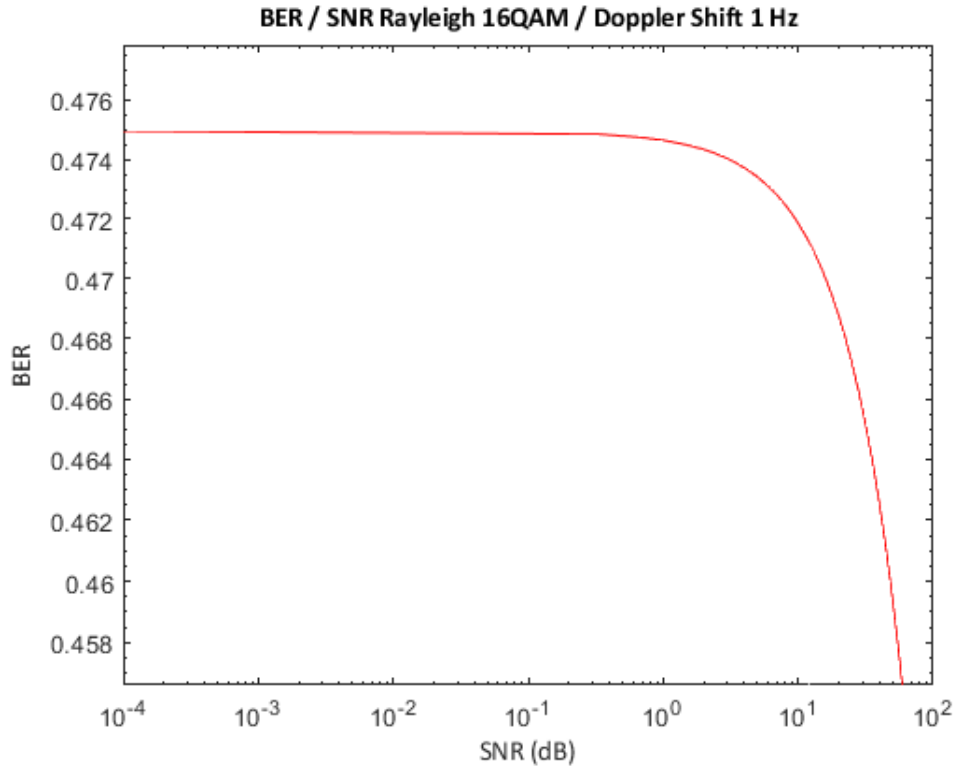
Διάγραμμα 28. Διάγραμμα BER/SNR Rayleigh / 16QAM / Doppler Shift 0.001 Hz



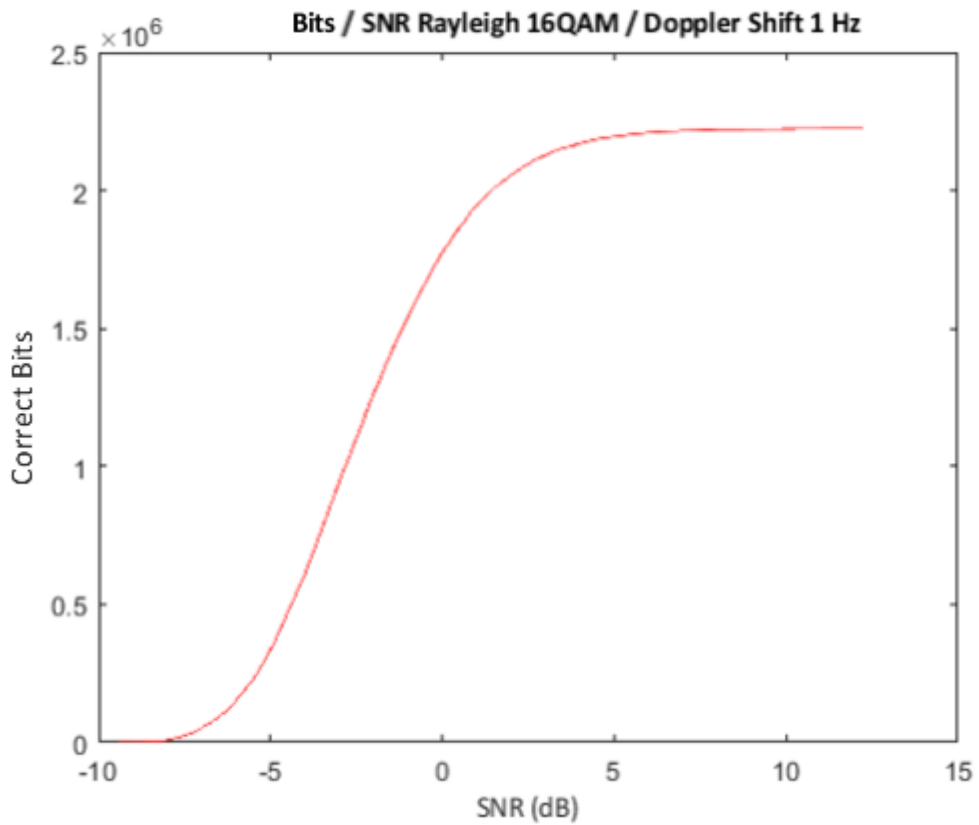
Διάγραμμα 29. Διάγραμμα Bits/SNR Rayleigh / 16QAM / Doppler Shift 0.001 Hz



Διάγραμμα 30. Διάγραμμα αστερισμού Rayleigh / 16QAM / Doppler Shift 1 Hz



Διάγραμμα 31. Διάγραμμα BER/SNR Rayleigh / 16QAM / Doppler Shift 1 Hz

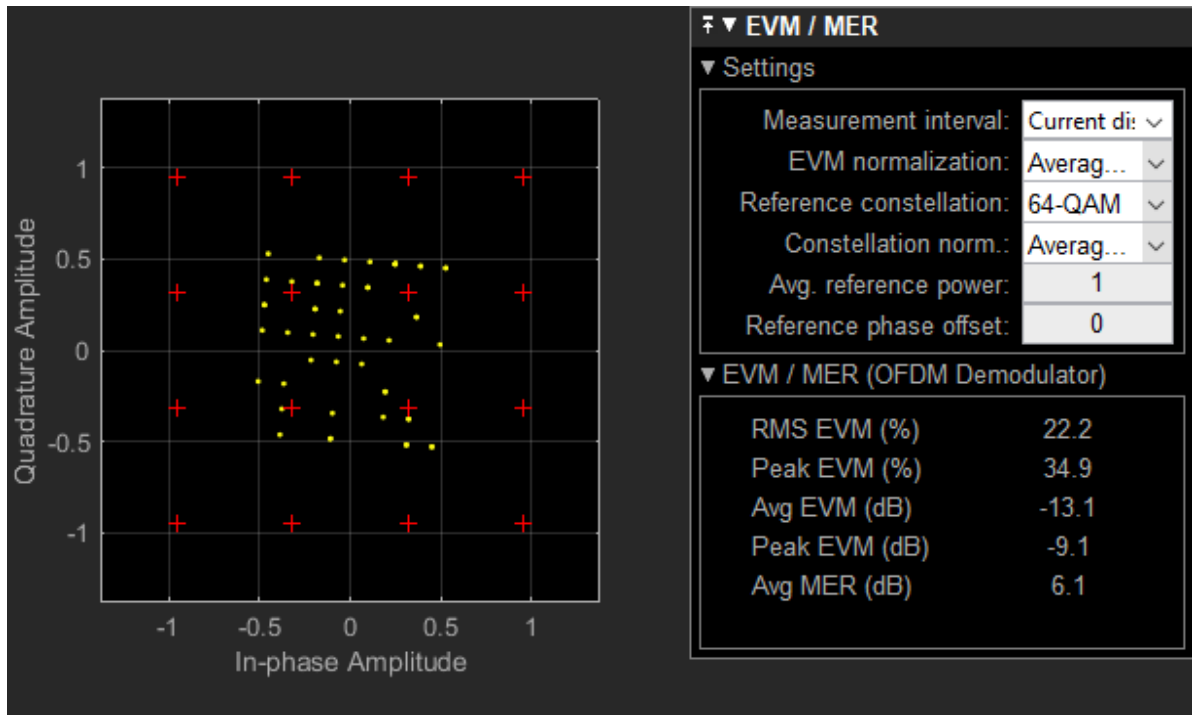


Διάγραμμα 32. Διάγραμμα Bits/SNR Rayleigh / 16QAM / Doppler Shift 1 Hz

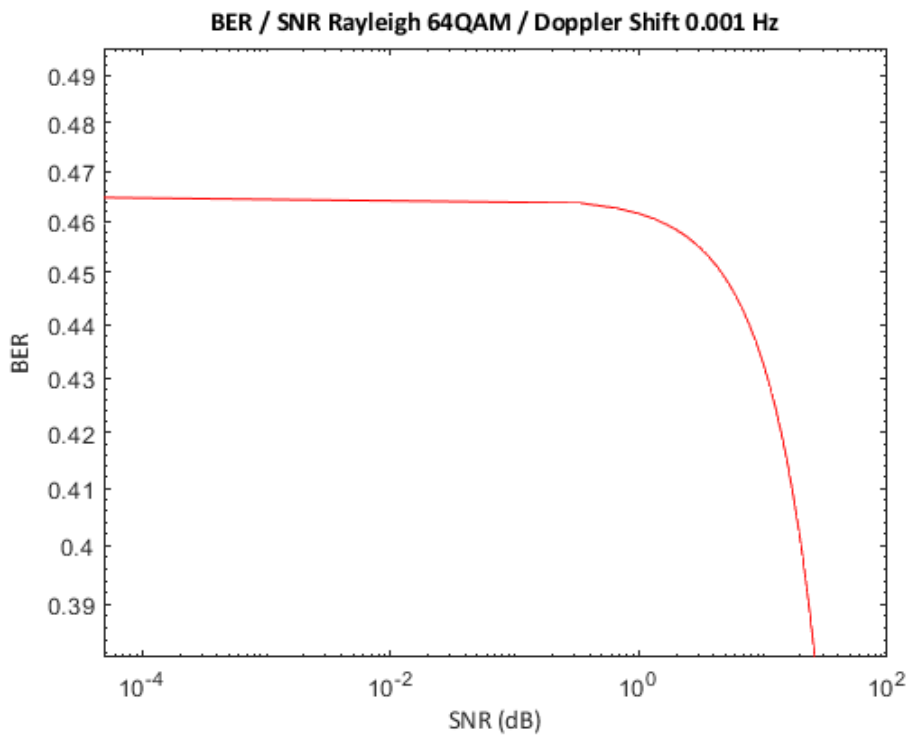
Στην περίπτωση της διαμόρφωσης 16 QAM η διαφορά στα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων γίνεται πιο εμφανής. Στα διαγράμματα αστερισμού 27 και 30 παρατηρείται σαφής αύξηση στην μέση και απόλυτη τιμή του EVM. Αντίστοιχα παρατηρείται και διασπορά συμβόλων στο διάγραμμα 30 που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη μετατόπιση Doppler.

Παρατηρείται μεγαλύτερο ποσοστό σφαλμάτων στο διάγραμμα 31 σε σχέση με το διάγραμμα 28. Η διαφορά οφείλεται στην αύξηση της μετατόπισης Doppler στο 1 Hz κατά την δεύτερη προσομοίωση. Επιπλέον στο διάγραμμα 31 παρατηρείται ότι το ποσοστό σφαλμάτων τείνει σε μηδενικές τιμές για υψηλότερες τιμές SNR από το διάγραμμα 28. Ποιοτικά αυτό σημαίνει ότι απαιτείται μεγαλύτερο SNR στην περίπτωση που ο δέκτης κινείται για μείωση των σφαλμάτων.

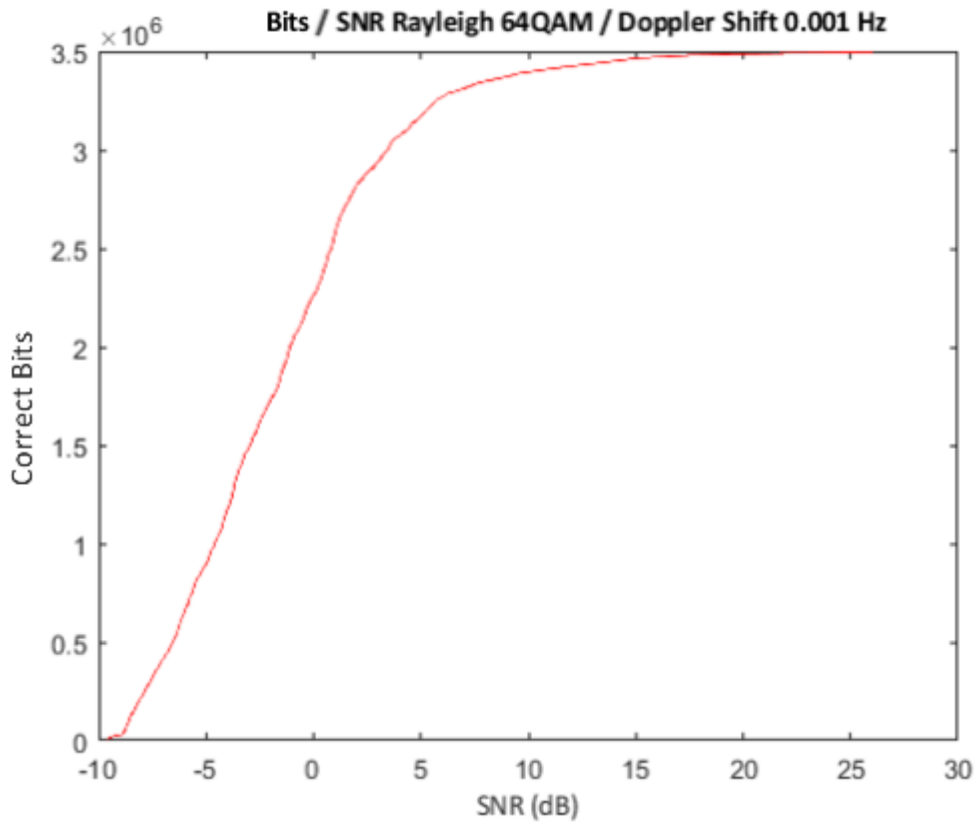
Ο αριθμός των bits και επομένως ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι υψηλότερος για την μικρότερη μετατόπιση Doppler. Αυτό είναι εμφανές συγκρίνοντας το αντίστοιχο διάγραμμα 13 με το διάγραμμα 16 που αντιστοιχεί σε μετατόπιση 1 Hz. Παρατηρείται και εδώ η συμπεριφορά όπου για μεγάλη μετατόπιση Doppler δεν υπάρχει αύξηση του αριθμού bits πέρα από τα 5dB SNR. Για αύξηση του SNR για μετατόπιση Doppler 0,001 Hz ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται αλλά η αύξηση είναι μικρή, Ο ρυθμός σφαλμάτων και στις δύο περιπτώσεις είναι μικρότερος από τις προσομοιώσεις για 4 QAM. Αυτό οφείλεται στον μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης, που οδηγεί όμως σε μεγαλύτερο αριθμό σφαλμάτων και για τις δύο προσομοιώσεις.



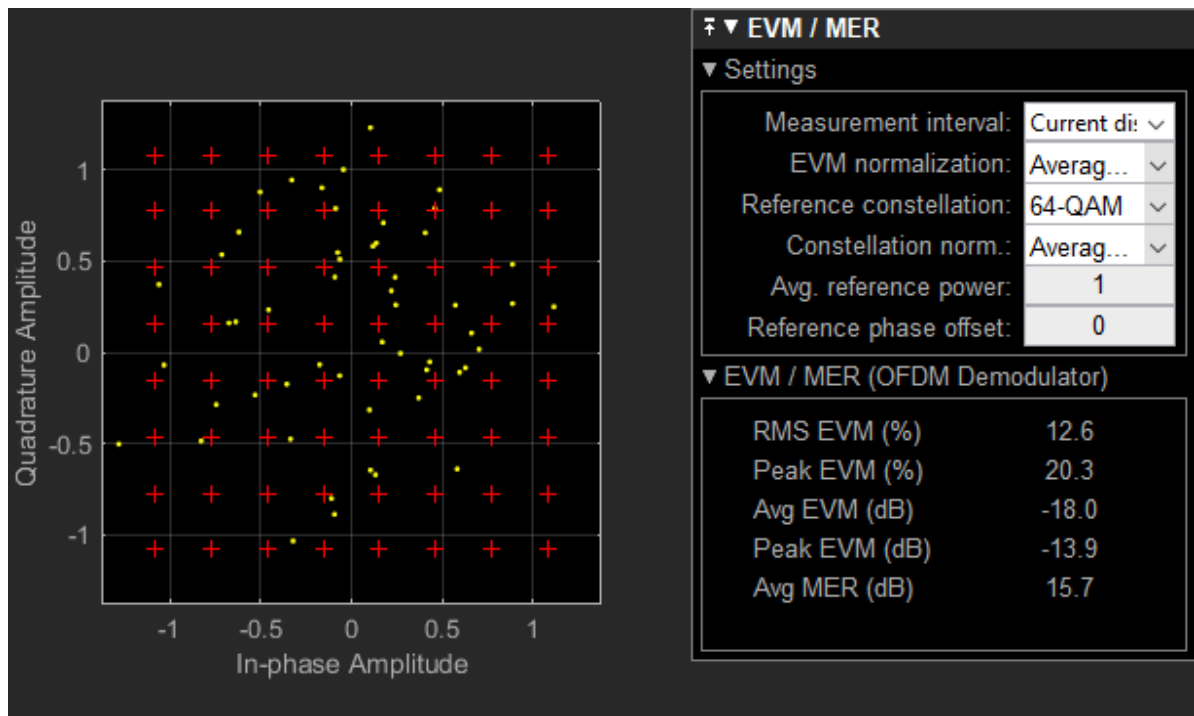
Διάγραμμα 33. Διάγραμμα αστερισμού Rayleigh / 64QAM / Doppler Shift 0.001 Hz



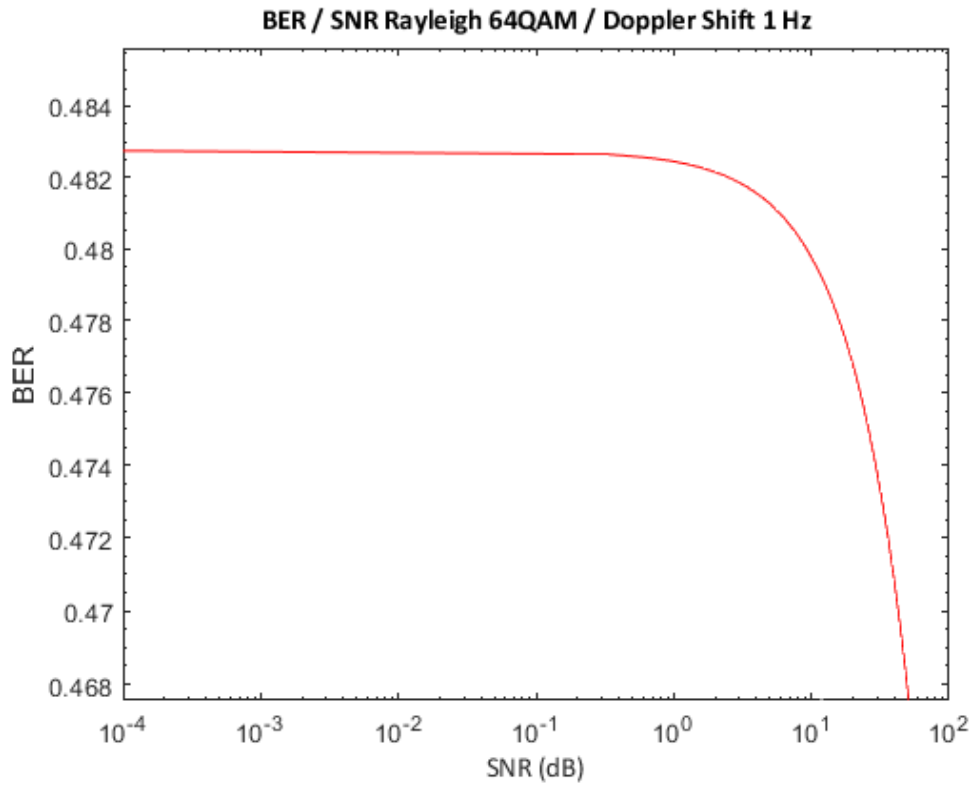
Διάγραμμα 34. Διάγραμμα BER/SNR Rayleigh / 64QAM / Doppler Shift 0.001 Hz



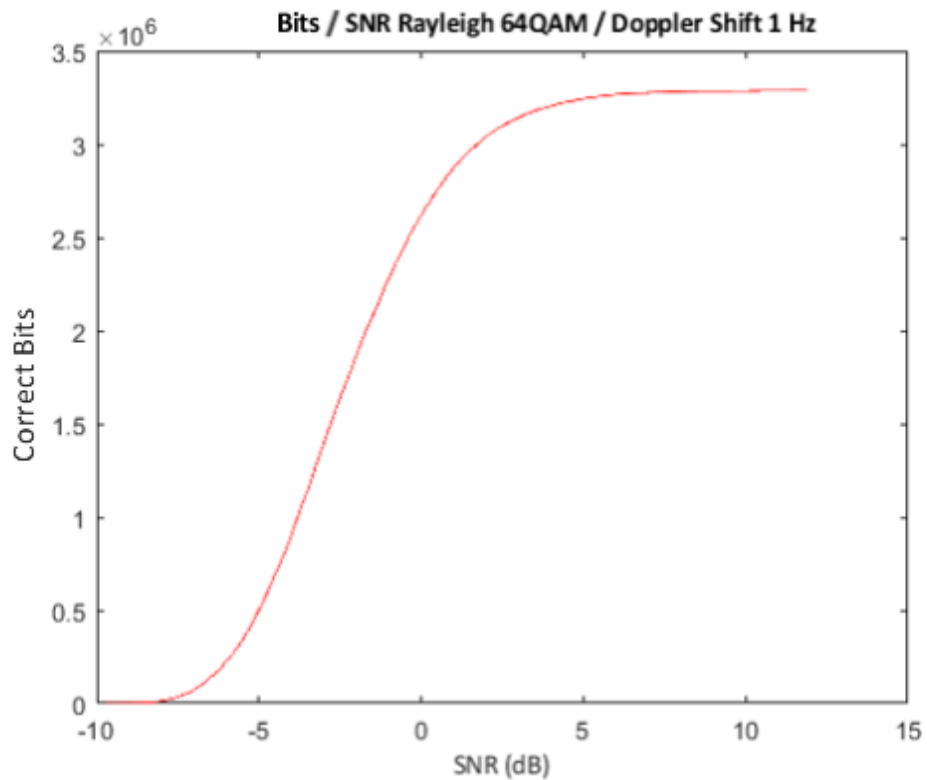
Διάγραμμα 35. Διάγραμμα Bits/SNR Rayleigh / 64QAM / Doppler Shift 0.001 Hz



Διάγραμμα 36. Διάγραμμα αστερισμού Rayleigh / 64QAM / Doppler Shift 1 Hz

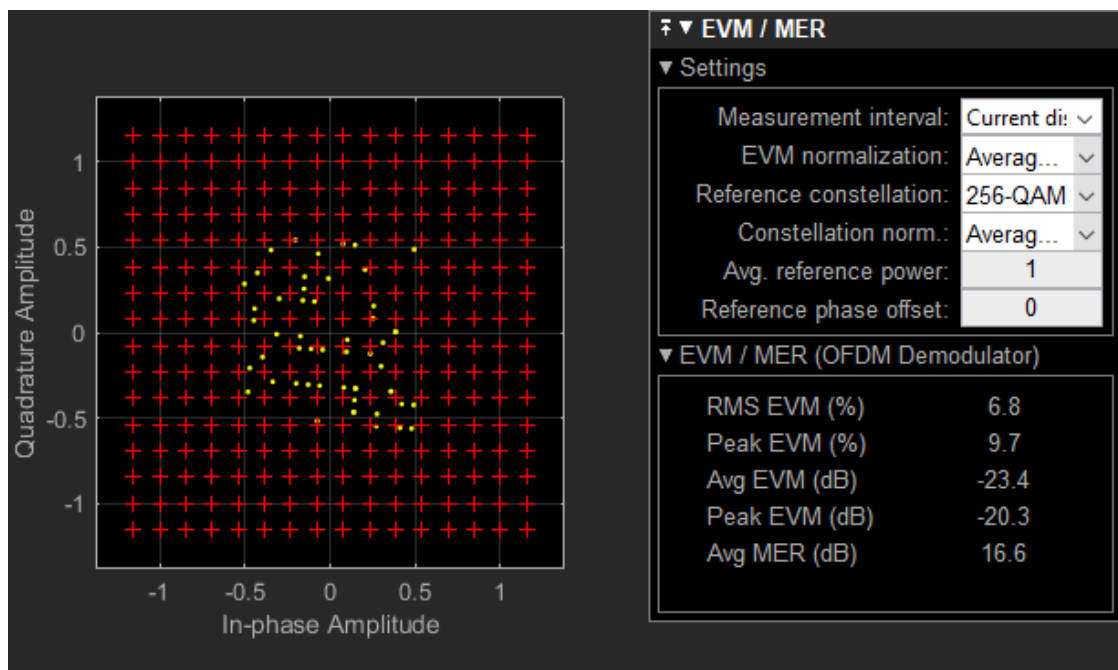


Διάγραμμα 37. Διάγραμμα BER/SNR Rayleigh / 64QAM / Doppler Shift 1 Hz

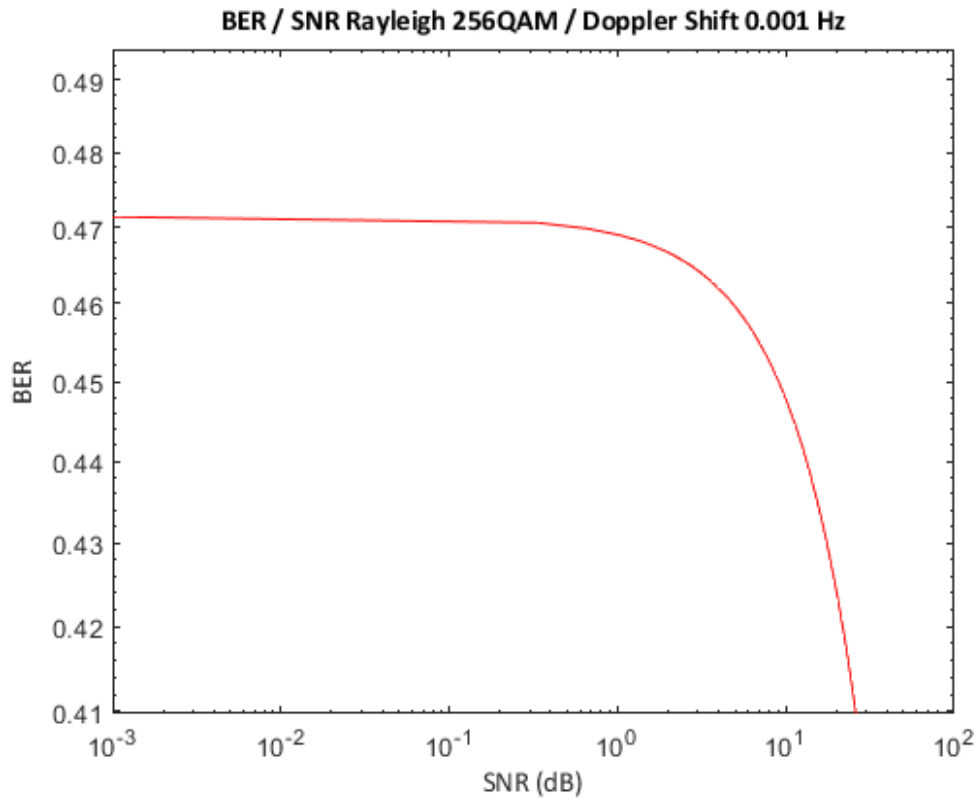


Διάγραμμα 38. Διάγραμμα Bits/SNR Rayleigh / 64QAM / Doppler Shift 1 Hz

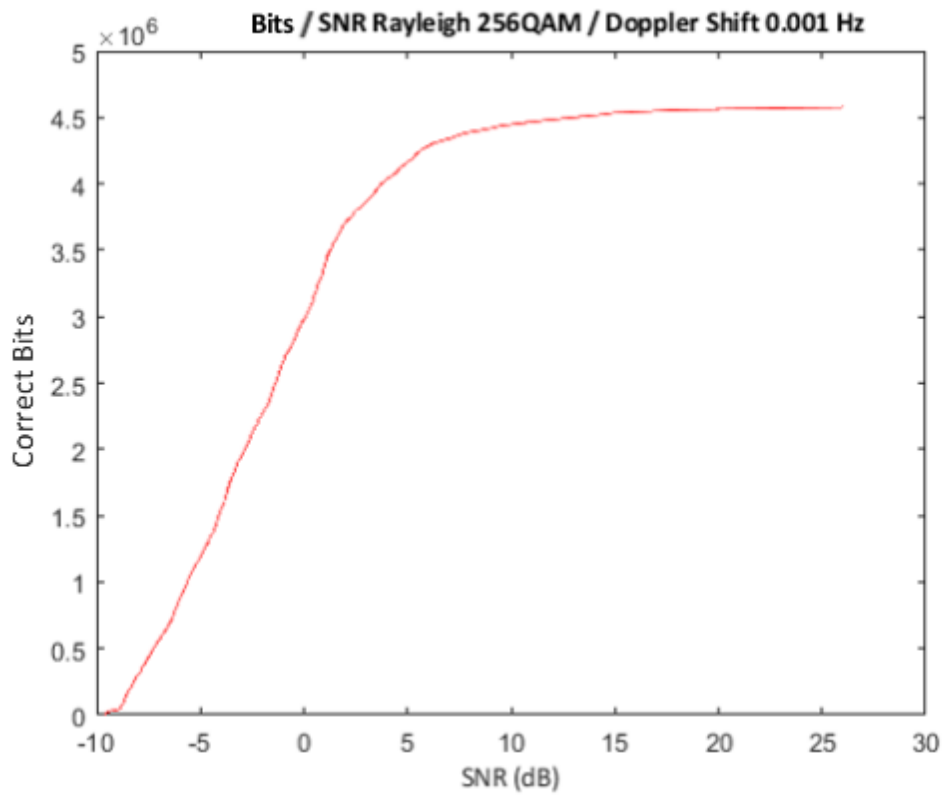
Για την μετατόπιση Doppler του 1 Hz στην διαμόρφωση 64 QAM παρατηρείται μεγάλη διασπορά. Ενώ η απόλυτη τιμή του EVM δεν είναι μεγαλύτερη, η μέση τιμή παρουσιάζει αύξηση όπως φαίνεται στα διαγράμματα 33 και 36. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα διαγράμματα 34 και 37. Λόγω της υψηλότερης τάξης διαμόρφωσης το ποσοστό σφαλμάτων τείνει στο μηδέν για τιμές του SNR που τείνουν προς τα 100 dB. Επιπλέον πρέπει να παρατηρηθεί η διαφορά μεταξύ των δύο μέγιστων τιμών. Για διαμόρφωση 16 QAM η διαφορά των μέγιστων τιμών του ρυθμού σφαλμάτων είναι περίπου 0.1 Σε αυτή την περίπτωση για διαμόρφωση 64 QAM έχει διπλασιαστεί. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η αύξηση της τάξης διαμόρφωσης επιφέρει χειρότερη απόδοση ως προς τα σφάλματα καθώς ο δέκτης κινείται χωρίς να διατηρεί οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης. Επιπλέον απαιτείται μεγαλύτερο SNR καθώς αυξάνει η τάξη της διαμόρφωσης για την μείωση του ρυθμού σφαλμάτων. Ως προς τον αριθμό bits για αμελητέα μετατόπιση Doppler ο αριθμός σωστά ληφθέντων bits έχει μεγαλύτερη μέγιστη τιμή. Μια παρατήρηση που προκύπτει από τα διαγράμματα 35 και 38 είναι η πιο απότομη αύξηση του αριθμού ορθών bits για μετατόπιση Doppler 0,001 Hz. Σε σχέση με την διαμόρφωση 16 QAM και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται διπλασιασμός των λανθασμένων bits. Οι μέγιστες τιμές του ποσοστού σφαλμάτων και των μεταδιδόμενων bits είναι μεγαλύτερες απόρροια της υψηλότερης τάξης διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται.



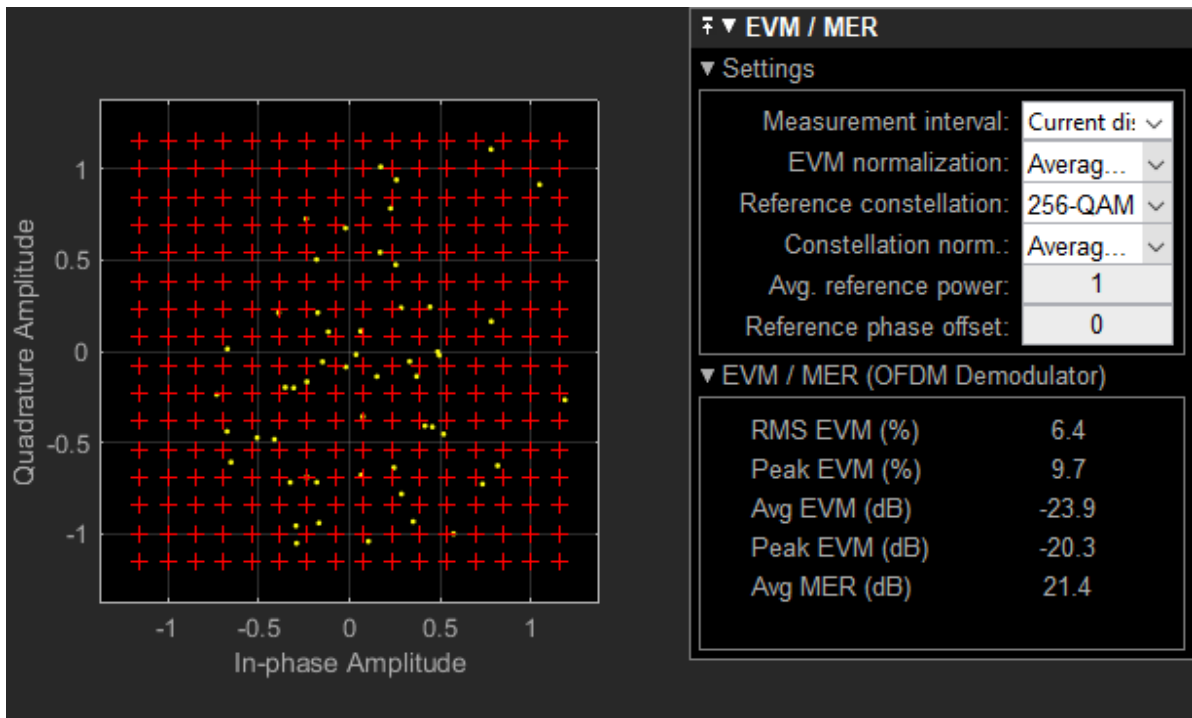
Διάγραμμα 39. Διάγραμμα αστερισμού Rayleigh / 256QAM / Doppler Shift 0.001 Hz



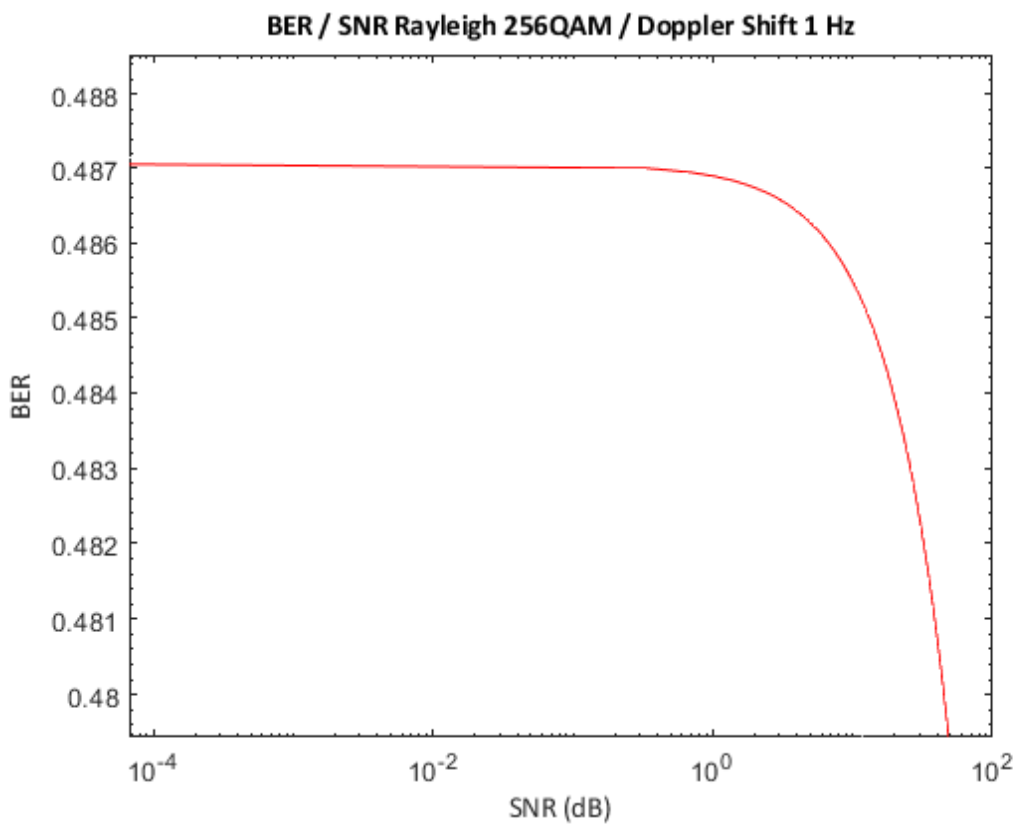
Διάγραμμα 40. Διάγραμμα BER/SNR Rayleigh / 256QAM / Doppler Shift 0.001 Hz



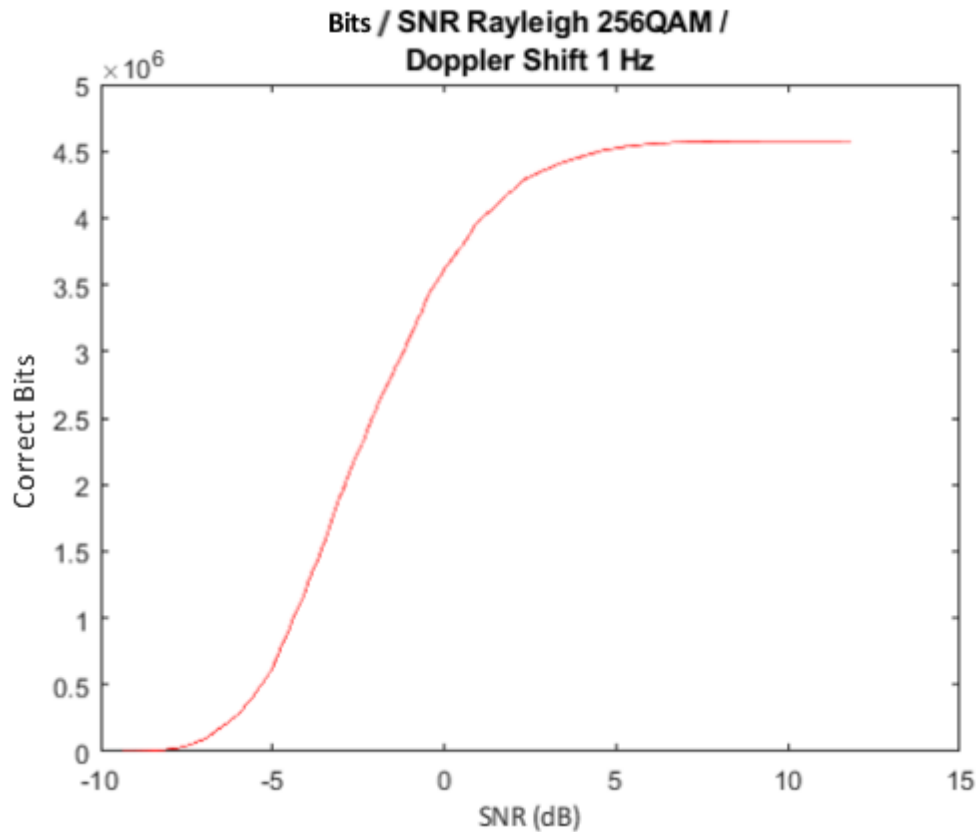
Διάγραμμα 41. Διάγραμμα Bits/SNR Rayleigh / 256QAM / Doppler Shift 0.001 Hz



Διάγραμμα 42. Διάγραμμα αστερισμού Rayleigh / 256QAM / Doppler Shift 1 Hz



Διάγραμμα 43. Διάγραμμα BER/SNR Rayleigh / 256QAM / Doppler Shift 1 Hz



Διάγραμμα 44. Διάγραμμα Bits/SNR Rayleigh / 256QAM / Doppler Shift 1 Hz

Στην περίπτωση της διαμόρφωσης 256 QAM παρατηρείται διασπορά συμβόλων στα διαγράμματα αστερισμού 23 και 26 ανεξαρτήτως μετατόπισης Doppler, η οποία όμως είναι μικρότερη για μετατόπιση 0,001 Hz. Οι μέσες και απόλυτες τιμές EVM όμως είναι παραπλήσιες. Αυτό είναι μια ένδειξη ότι σε αυτή την τάξη διαμόρφωσης ανεξαρτήτως συνθηκών ασύρματου καναλιού υπάρχει πρόβλημα στην σωστή φώραση των OFDM συμβόλων στον δέκτη.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα του ποσοστού σφαλμάτων 40 και 43 παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με τις προηγούμενες διαμορφώσεις. Για μετατόπιση Doppler 1 Hz απαιτείται μεγαλύτερο SNR στην λήψη για μείωση του ρυθμού σφαλμάτων. Επιπλέον η διαφορά μεταξύ των μέγιστων τιμών του ποσοστού σφαλμάτων είναι μικρότερη από την αντίστοιχη για διαμόρφωση 64 QAM.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 41 και 44 προκύπτει ότι ο αριθμός μεταδιδόμενων bits είναι παραπλήσιος. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι ανεξάρτητα από τις συνθήκες καναλιού η απόδοση του συστήματος είναι παρόμοια για τόσο υψηλή τάξη διαμόρφωσης.

Το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι αύξηση της τάξης διαμόρφωσης επιφέρει υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος ως προς τα σφάλματα ανεξαρτήτως συνθηκών ασύρματου καναλιού. Επιπλέον υπάρχει μια αυξανόμενη

διασπορά συμβόλων στα γραφήματα αστερισμού του δέκτη. Αυτά εμφανίζουν μειωμένη απόσταση μεταξύ των συμβολών καθώς αυξάνει η τάξη της διαμόρφωσης. Ως αποτέλεσμα υπάρχει αυξανόμενη δυσκολία στο να καθοριστεί το κάθε σύμβολο που λήφθηκε.

Η μέγιστη τιμή του ποσοστού σφαλμάτων που καταγράφεται στα διαγράμματα 28, 34 και 40 αυξάνεται για αυξανόμενη τάξη διαμόρφωσης και μετατόπιση Doppler 0,001 Hz. Οι μέγιστες αυτές τιμές είναι χαμηλότερες από αυτές των διαγραμμάτων 31, 39 και 43 για μετατόπιση 1 Hz. Επιπλέον σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα η τιμή του ποσοστού σφαλμάτων μειώνεται καθώς αυξάνεται η τιμή του SNR. Για μηδενική τιμή του ποσοστού σφαλμάτων η τιμή του SNR είναι αυξανόμενη καθώς αυξάνεται η τάξη της διαμόρφωσης. Επιπλέον οι τιμές SNR για μηδενικό ρυθμό σφαλμάτων και μετατόπιση Doppler 0,001 Hz είναι υψηλότερες από την μετατόπιση 1Hz. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι για μετάδοση υπό καθεστώς μη οπτικής επαφής απαιτείται μεγαλύτερο SNR στον δέκτη για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης όταν ο δέκτης κινείται.

Ως προς τον αριθμό λαμβανόμενων bits παρατηρείται ότι συγκρίνοντας τα διαγράμματα 23, 29, 35, 41 και 26, 32, 38 και 44 υπάρχει αύξηση καθώς αυξάνει η τάξη της διαμόρφωσης,

Στην πρώτη περίπτωση όμως καταγράφονται μεγαλύτερες μέγιστες τιμές για μετατόπιση Doppler 0,001 Hz. Η μόνη εξαίρεση είναι η περίπτωση της διαμόρφωσης 256 QAM όπου η απόδοση είναι παραπλήσια. Επίσης παρατηρείται ότι πέρα από τιμές SNR 5dB για μετατόπιση Doppler 1Hz δεν υπάρχει αύξηση του αριθμού δεδομένων. Αντίθετα για μετατόπιση 0,001 Hz πέρα από την τιμή των 5dB SNR υπάρχει αύξηση του αριθμού των bits η οποία όμως είναι μικρή.

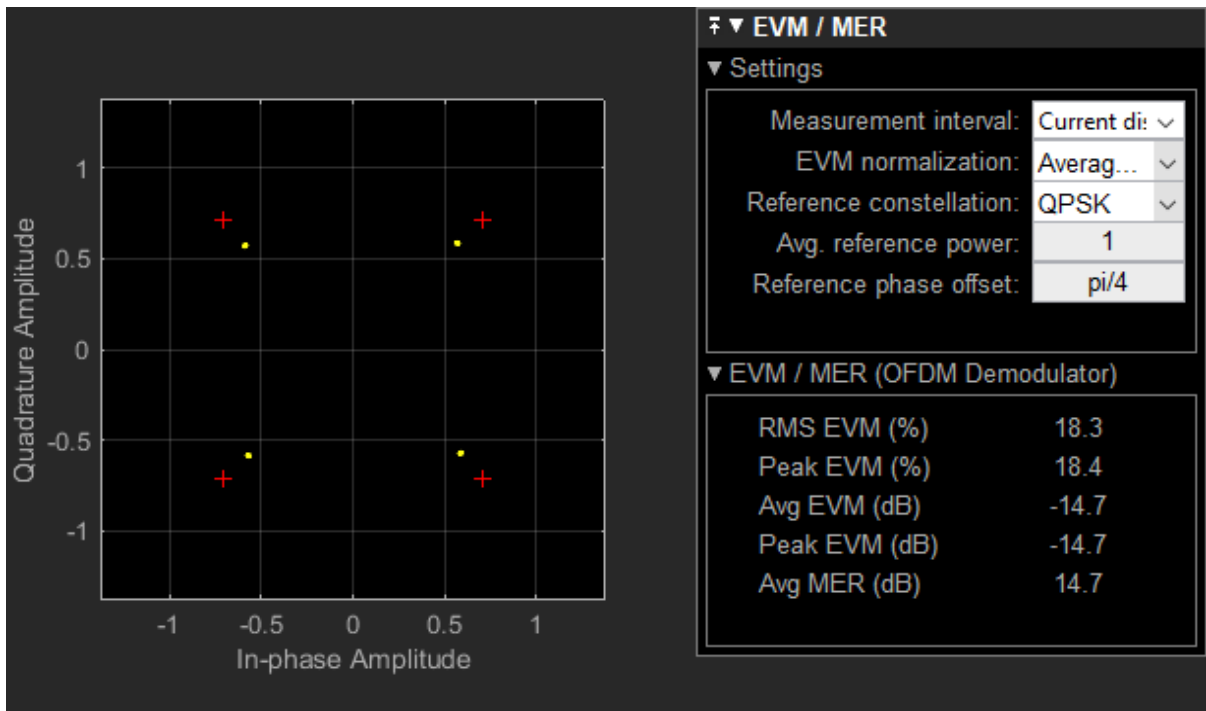
4.3 Προσομοίωση καναλιού Rice

Παράμετροι προσομοίωσης				
Runtime	20000			
Random Integer Generator	M-ary Number	Sample Time	Samples/ Frame	
	4 / 16 / 64 / 256	01/53	53	
Integer/Bit Converter	Bits/Integer			
	2 / 4 / 6 / 8			
QPSK Modulation	M-ary Number	Constellation Ordering	Decision Type	Normalization
	4 / 16 / 64 / 256	Gray	Hard	Avg Power
OFDM Modulation	FFT Length	Guard Bands	OFDM Symbols	
	64	6;5	1	
Rice Channel	K factor			
	10 / 20			
Αποτελέσματα προσομοίωσης - K factor 10				
Ψηφιακή διαμόρφωση QAM	4 QAM	16 QAM	64 QAM	256 QAM
Bit Loss (%)	0	0.066	0.152	0.228
Εσφαλμένα Bits	0	279007	967913	1936202
Συνολικά Bits	2120106	4240212	6360318	8480424
Αποτελέσματα προσομοίωσης - K factor 20				
Ψηφιακή διαμόρφωση QAM	4 QAM	16 QAM	64 QAM	256 QAM
Bit Loss (%)	0	0.027	0.1	0.176
Εσφαλμένα Bits	0	114582	639293	1496047
Συνολικά Bits	2120106	4240212	6360318	8480424

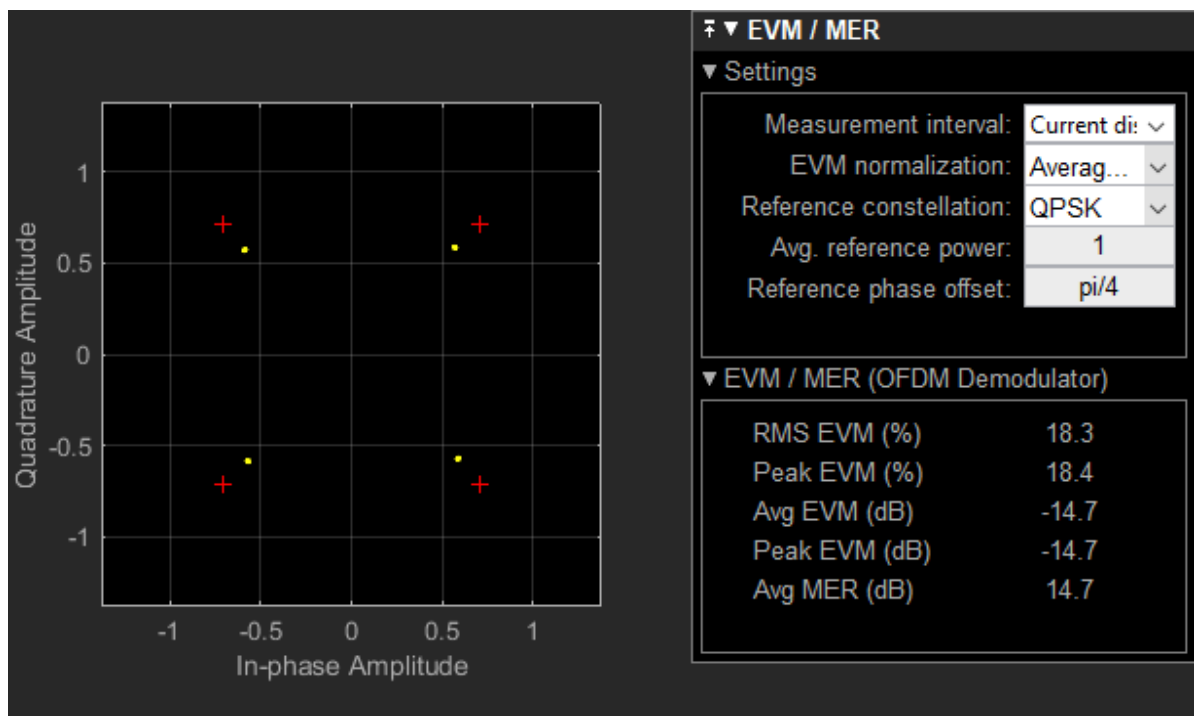
Πίνακας 8. Παράμετροι και αποτελέσματα προσομοίωσης καναλιού Rice

Εξετάζονται οι περιπτώσεις για διαμορφώσεις από 4 ως 256 QAM και διαφορετική τιμή του παράγοντα k . Οι προσομοιώσεις εκτελούνται για να εξεταστεί η συμπεριφορά για διαφορετική ισχύ της συνιστώσας οπτικής επαφής. Στον πίνακα 6 καταγράφονται οι τιμές των παραμέτρων προσομοίωσης και τα αποτελέσματα για ποσοστό απωλειών, εσφαλμένα bits και τα συνολικά bits που μεταδόθηκαν ανά

προσομοίωση. Τα διαγράμματα δημιουργούνται από τις τιμές στην λήψη του σήματος.



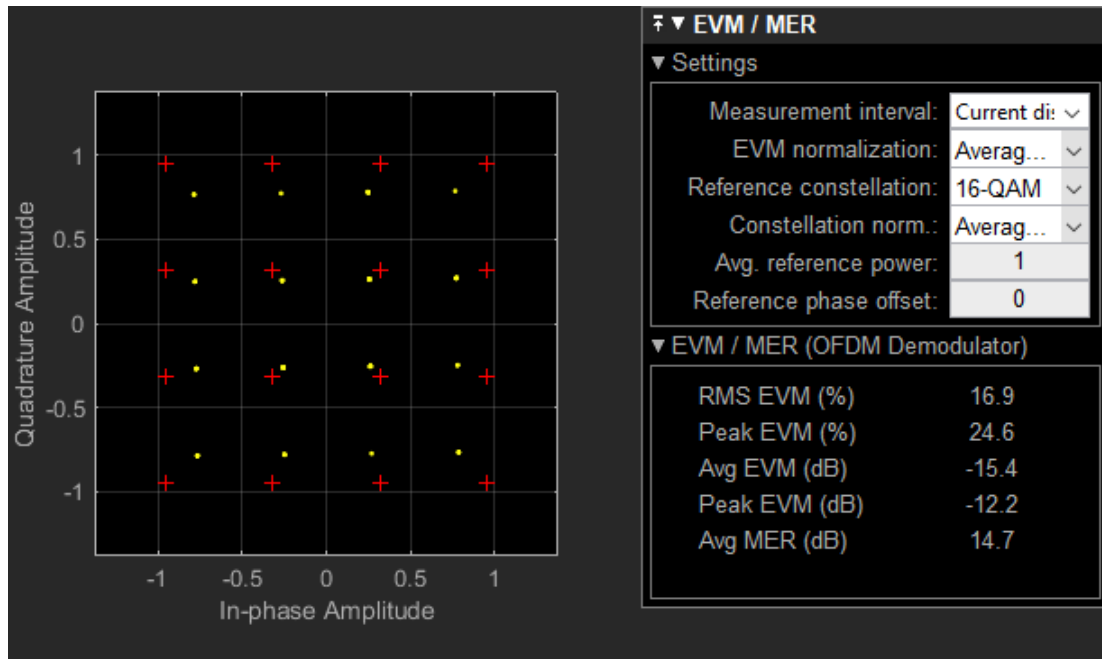
Διάγραμμα 45. Διάγραμμα αστερισμού Rice / 4QAM / k factor 10



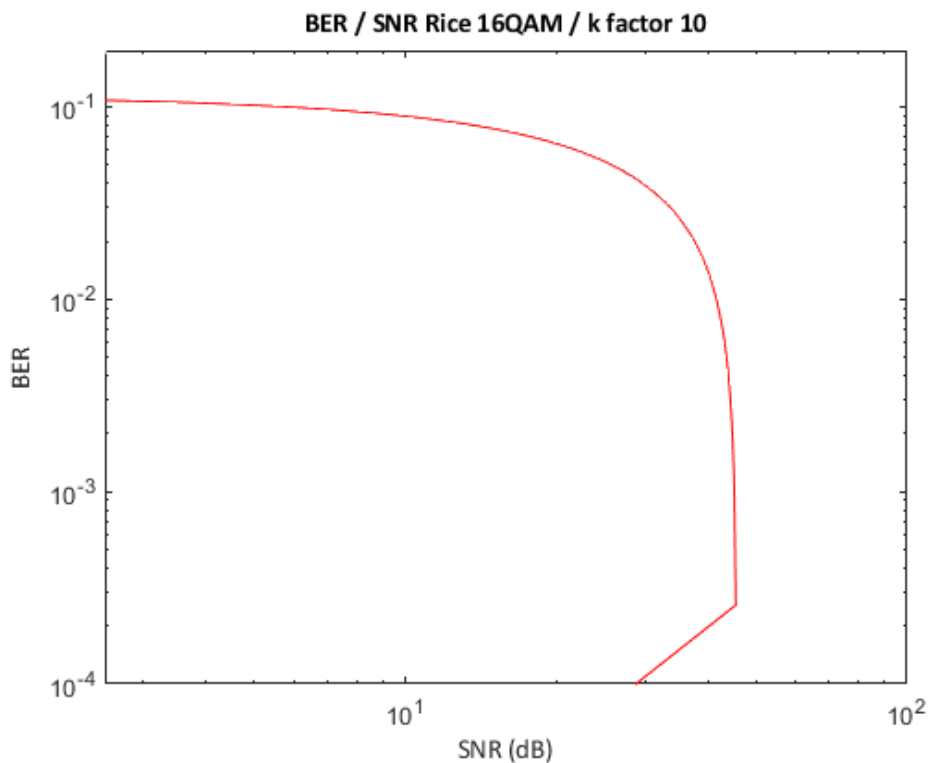
Διάγραμμα 46. Διάγραμμα αστερισμού Rice / 4QAM / k factor 20

Για διαμόρφωση 4 QAM δεν καταγράφονται απώλειες ανεξαρτήτως συνθηκών ασύρματου καναλιού. Επιπλέον δεν παρατηρείται διαφορά στην μέση και απόλυτη

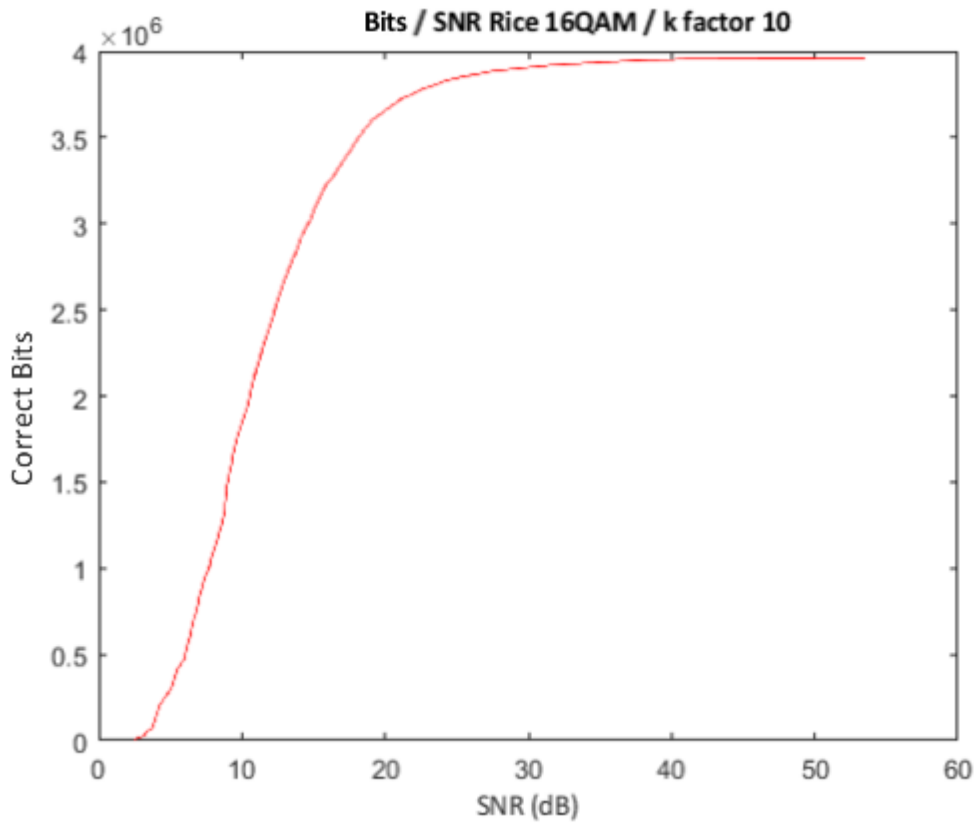
τιμή του EVM. Η απουσία σφαλμάτων σχετίζεται με την χαμηλή τάξη διαμόρφωσης και τον χαμηλό ρυθμό μετάδοσης. Μια σημαντική διαφορά σε σχέση με τα αντίστοιχα διαγράμματα για το κανάλι τύπου Rayleigh είναι η απουσία διασποράς των συμβόλων.



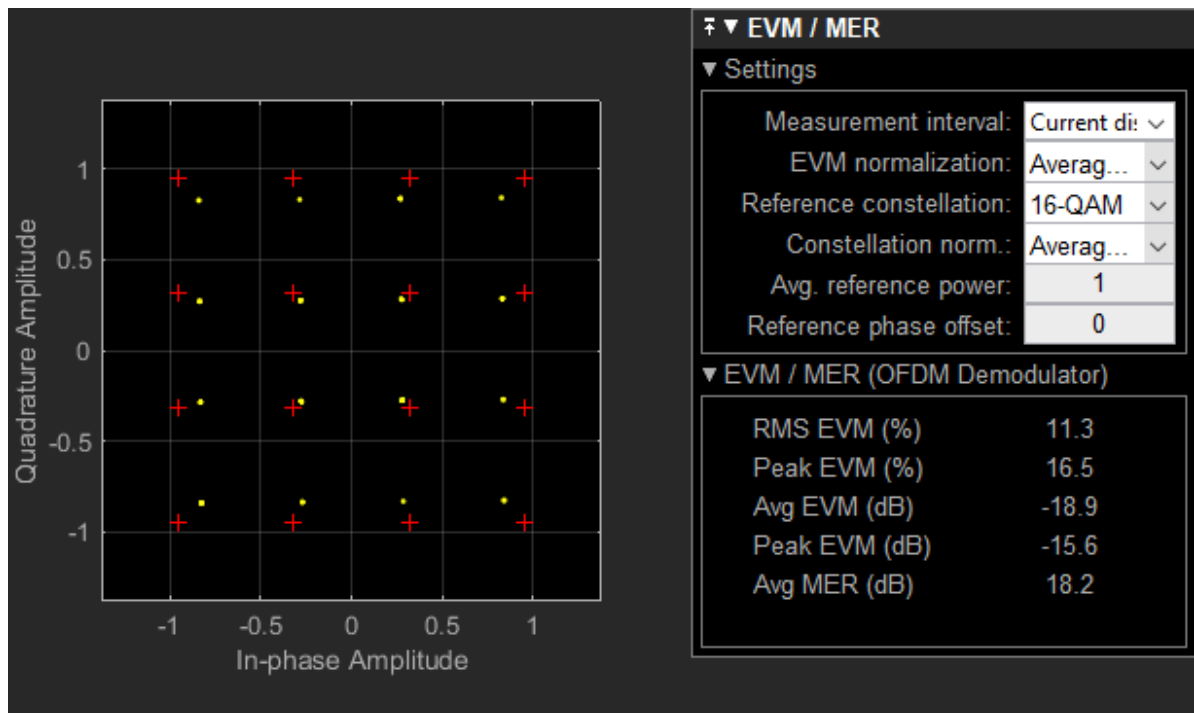
Διάγραμμα 47. Διάγραμμα αστερισμού Rice / 16QAM / k factor 10



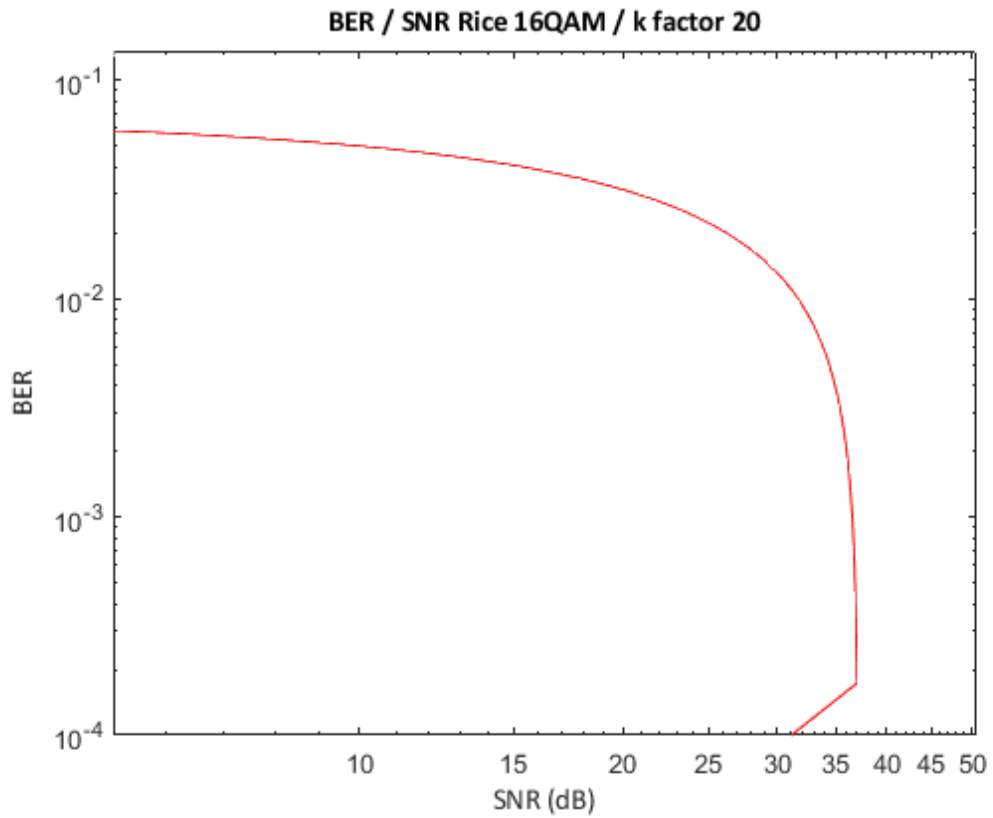
Διάγραμμα 48. Διάγραμμα BER/SNR Rice / 16QAM / k factor 10



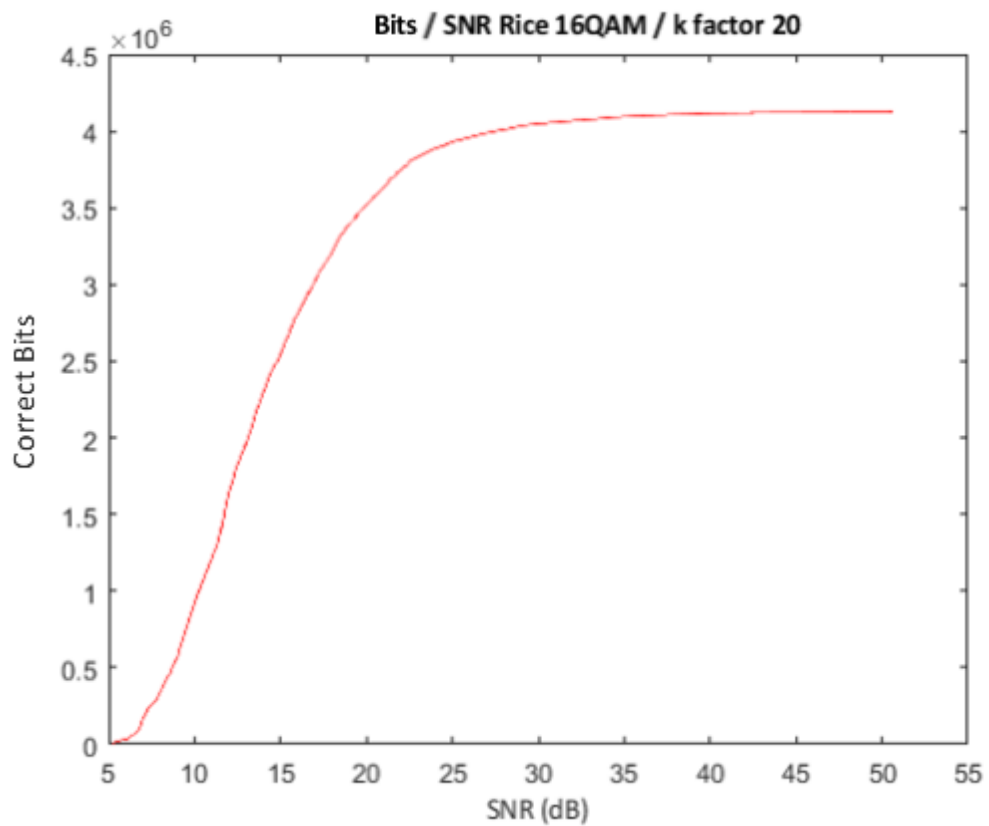
Διάγραμμα 49. Διάγραμμα Bits/SNR Rice / 16QAM / k factor 10



Διάγραμμα 50. Διάγραμμα αστερισμού Rice / 16QAM / k factor 20



Διάγραμμα 51. Διάγραμμα BER/SNR Rice / 16QAM / k factor 20

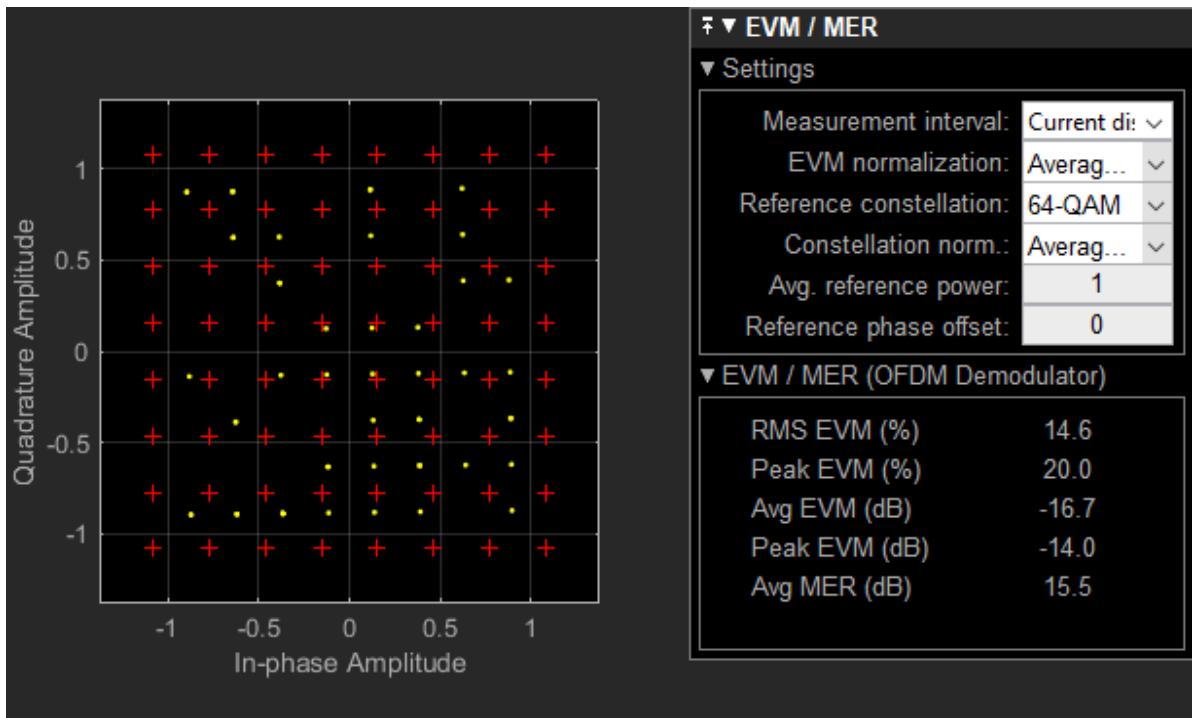


Διάγραμμα 52. Διάγραμμα Bits/SNR Rice / 16QAM / k factor 20

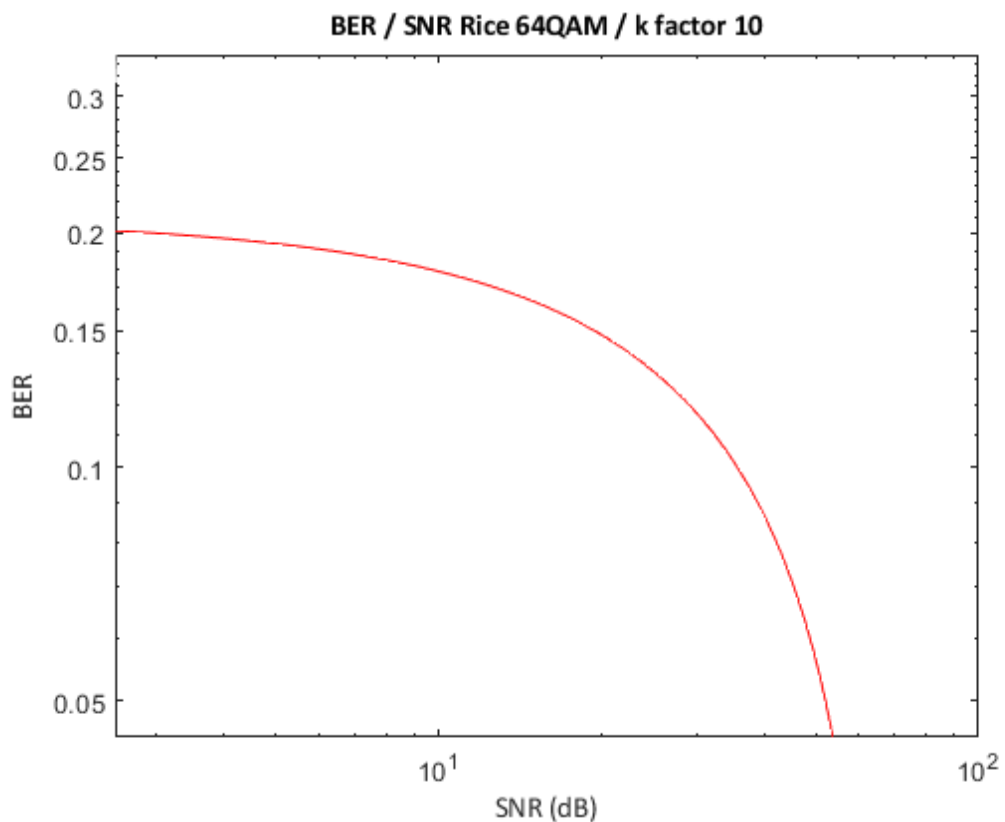
Για διαμόρφωση 16 QAM παρατηρείται μείωση στην μέση και απόλυτη τιμή του EVM στα διαγράμματα αστερισμού. Η διαφορά προκύπτει από τον παράγοντα k . Σε σχέση με την αντίστοιχη προσομοίωση του καναλιού Rayleigh δεν παρατηρείται διασπορά των συμβόλων. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στον χαμηλό ρυθμό μετάδοσης και στο γεγονός ότι η κύρια συνιστώσα του σήματος προκύπτει από οπτική επαφή που έχει ευεργετικά αποτελέσματα ως προς τον ρυθμό σφαλμάτων και την γενικότερη απόδοση του συστήματος.

Το ποσοστό σφαλμάτων είναι χαμηλότερο για τιμή του παράγοντα k ίση με 20 dB στο διάγραμμα 51 σε σχέση με το διάγραμμα 48 για τιμή 10 dB. Επιπλέον οι τιμές του SNR στις οποίες το ποσοστό τείνει σε μηδενικές τιμές είναι χαμηλότερες. Η διαφοροποίηση προκύπτει από το γεγονός ότι στην προσομοίωση για παράγοντα k ίσο με 20 dB η συνιστώσα από οπτική επαφή είναι ισχυρότερη. Η διαφοροποίηση αντικατοπτρίζεται και στην μέγιστη τιμή του ρυθμού σφαλμάτων που είναι χαμηλότερη στην δεύτερη περίπτωση.

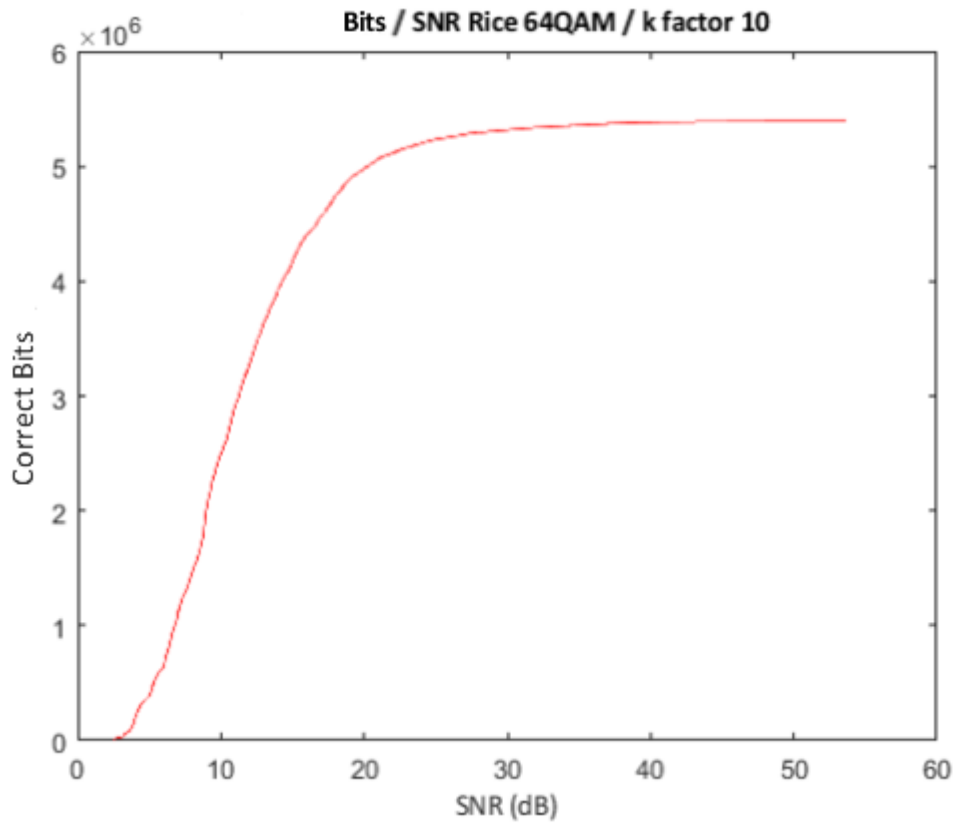
Η αύξηση του παράγοντα k επιφέρει αύξηση του αριθμού μεταδιδόμενων bits όπως φαίνεται από τις μέγιστες τιμές στα διαγράμματα 49 και 52. Μια διαφορά μεταξύ των δύο προσομοιώσεων είναι ότι για την τιμή των 10 dB του παράγοντα k υπάρχει μεγαλύτερη περιοχή των τιμών του SNR όπου στην ουσία δεν γίνεται μετάδοση δεδομένων. Η μετάδοση δεδομένων μεγιστοποιείται για τιμή του SNR περίπου στα 40dB. Αυτή είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη προσομοίωση για το κανάλι Rayleigh.



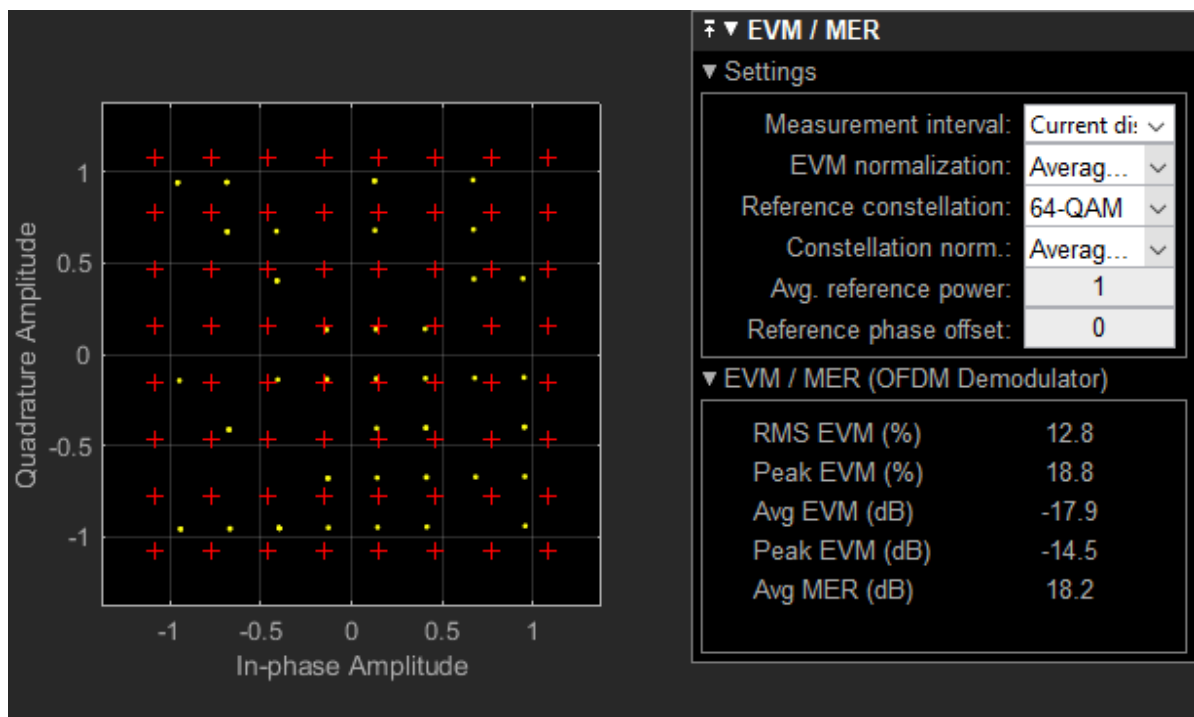
Διάγραμμα 53. Διάγραμμα αστερισμού Rice / 64QAM / k factor 10



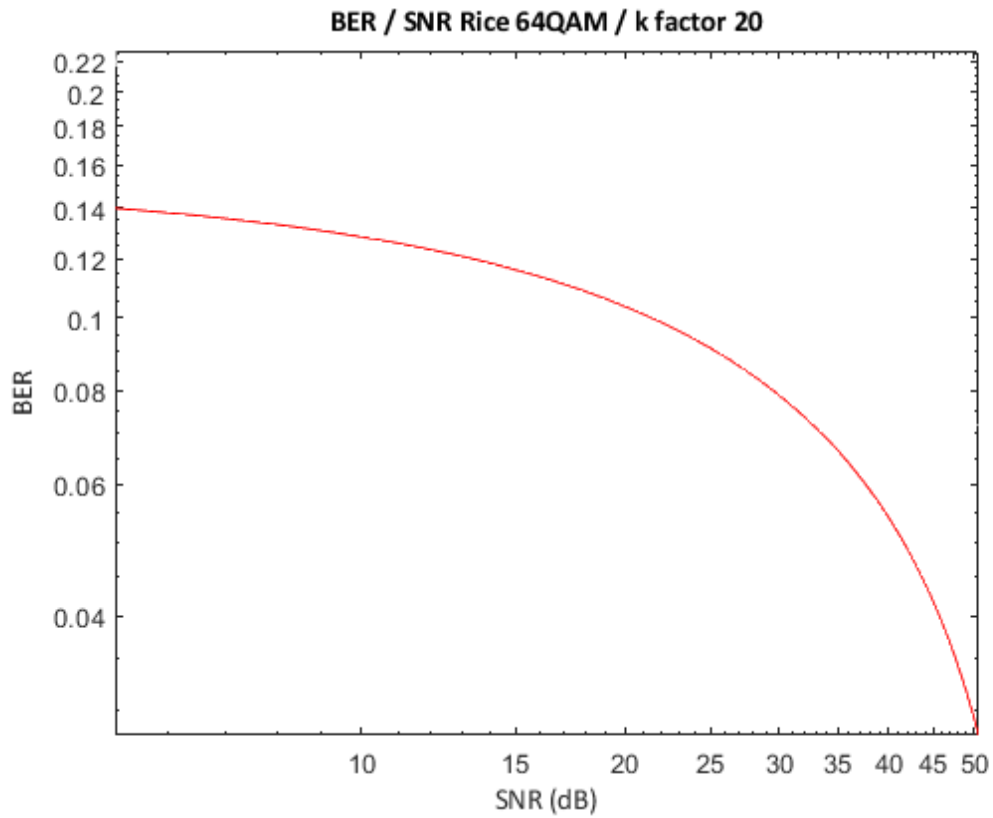
Διάγραμμα 54. Διάγραμμα BER/SNR Rice / 64QAM / k factor 10



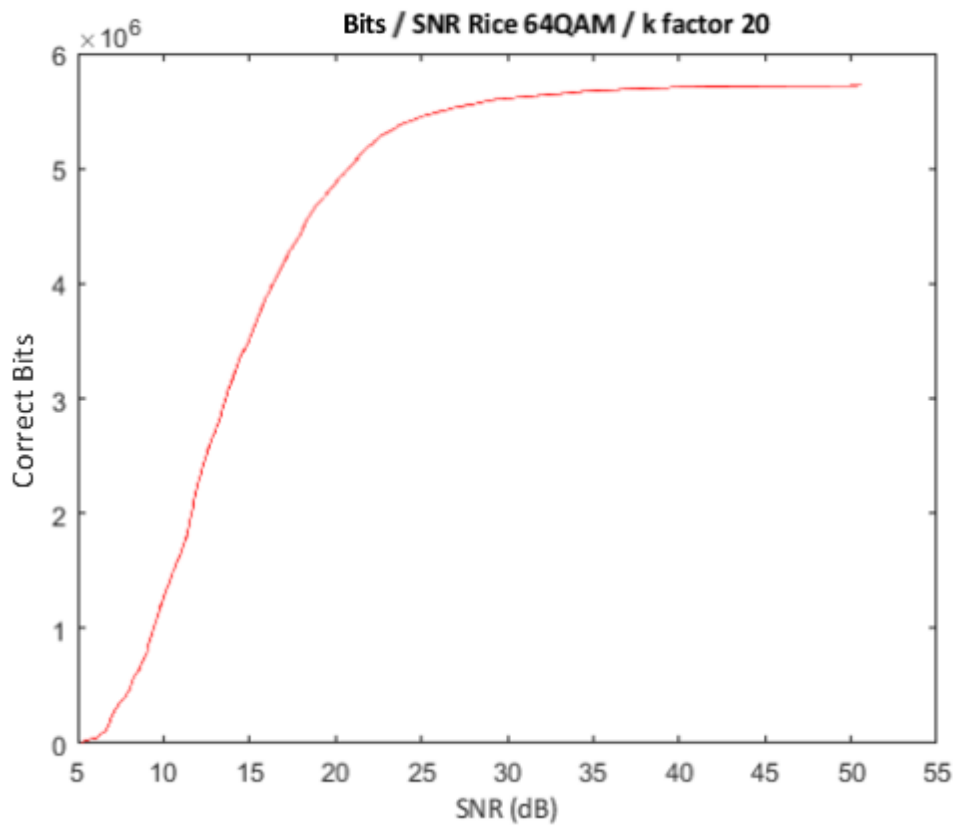
Διάγραμμα 55. Διάγραμμα Bits/SNR Rice / 64QAM / k factor 10



Διάγραμμα 56. Διάγραμμα αστερισμού Rice / 64QAM / k factor 20



Διάγραμμα 57. Διάγραμμα BER/SNR Rice / 64QAM / k factor 20

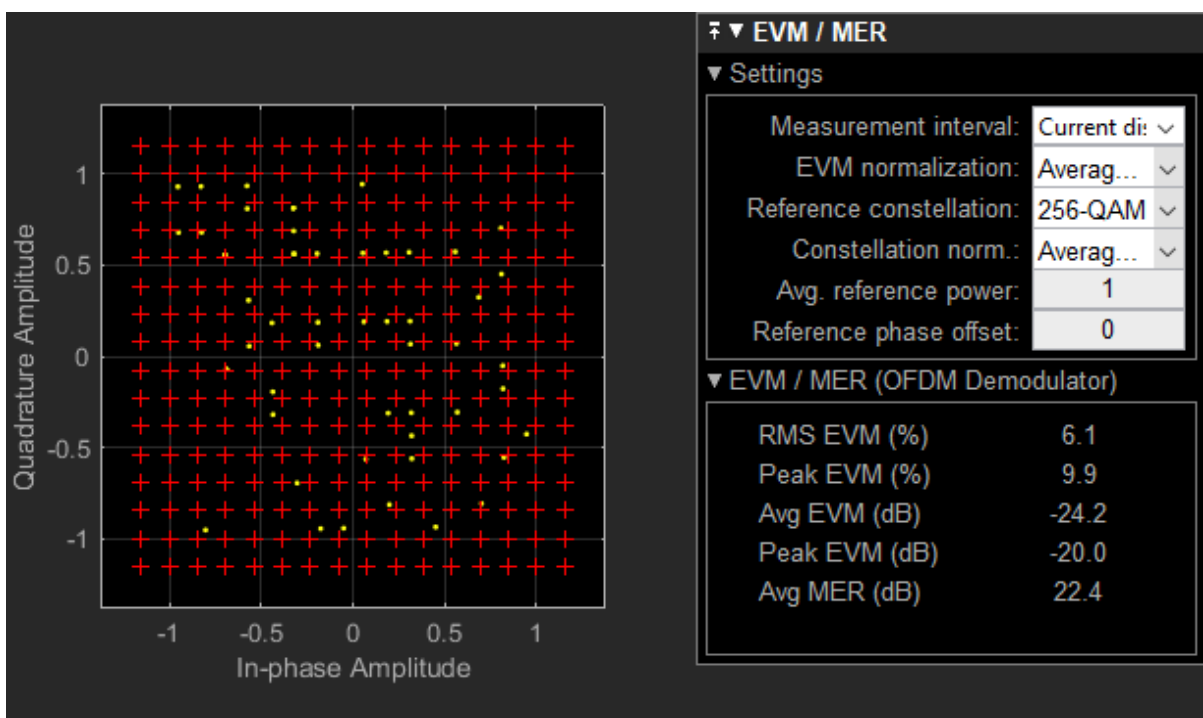


Διάγραμμα 58. Διάγραμμα Bits/SNR Rice / 64QAM / k factor 20

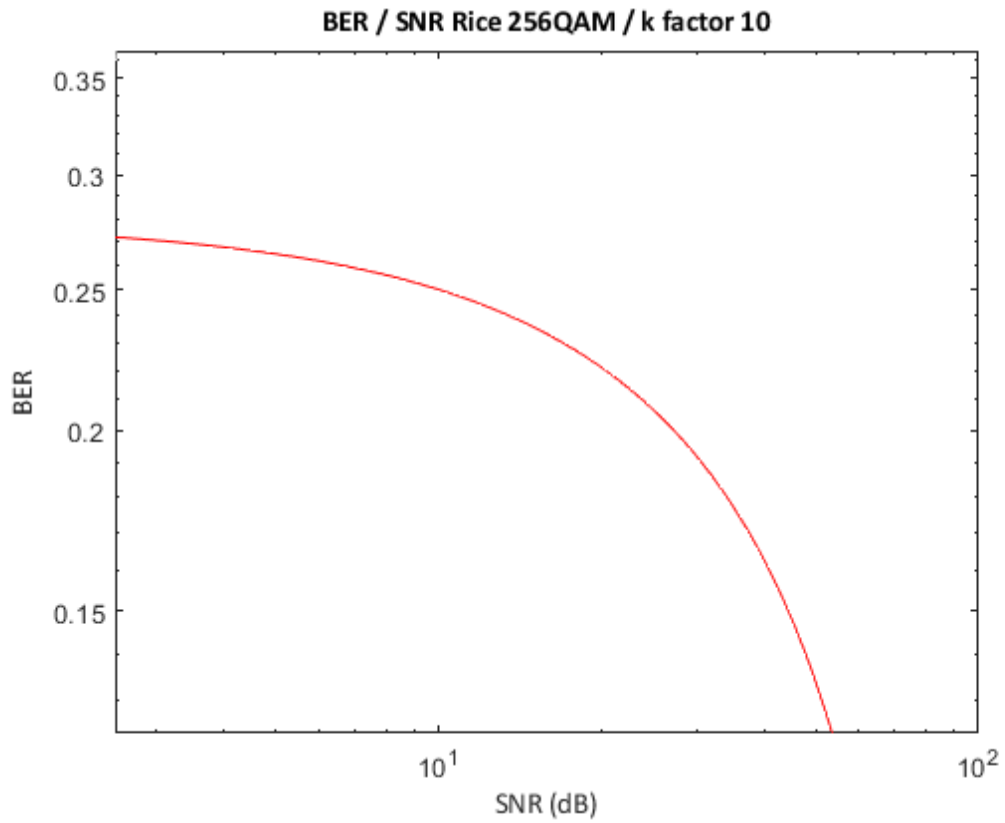
Στα διαγράμματα 53 και 56 παρατηρείται αυξημένη διασπορά για την διαμόρφωση 64 QAM σε σχέση με τις χαμηλότερες τάξεις διαμόρφωσης. Στο διάγραμμα 40 για τιμή του παράγοντα k ίση με 20 dB παρατηρείται μείωση των μετρήσεων που αφορούν το EVM.

Το ποσοστό σφαλμάτων είναι χαμηλότερος για τιμή του παράγοντα k ίση με 20 dB στο διάγραμμα 44 σε σχέση με το διάγραμμα 57 για τιμή 10 dB. Επιπλέον οι τιμές του SNR στις οποίες ο ρυθμός τείνει σε μηδενικές τιμές είναι χαμηλότερες. Σε σύγκριση με τα αντίστοιχα διαγράμματα για την διαμόρφωση 16 QAM η μέγιστη τιμή του ποσοστού σφαλμάτων είναι μεγαλύτερη και για τις δύο προσομοιώσεις. Επιπλέον οι μέγιστες τιμές είναι μεγαλύτερες.

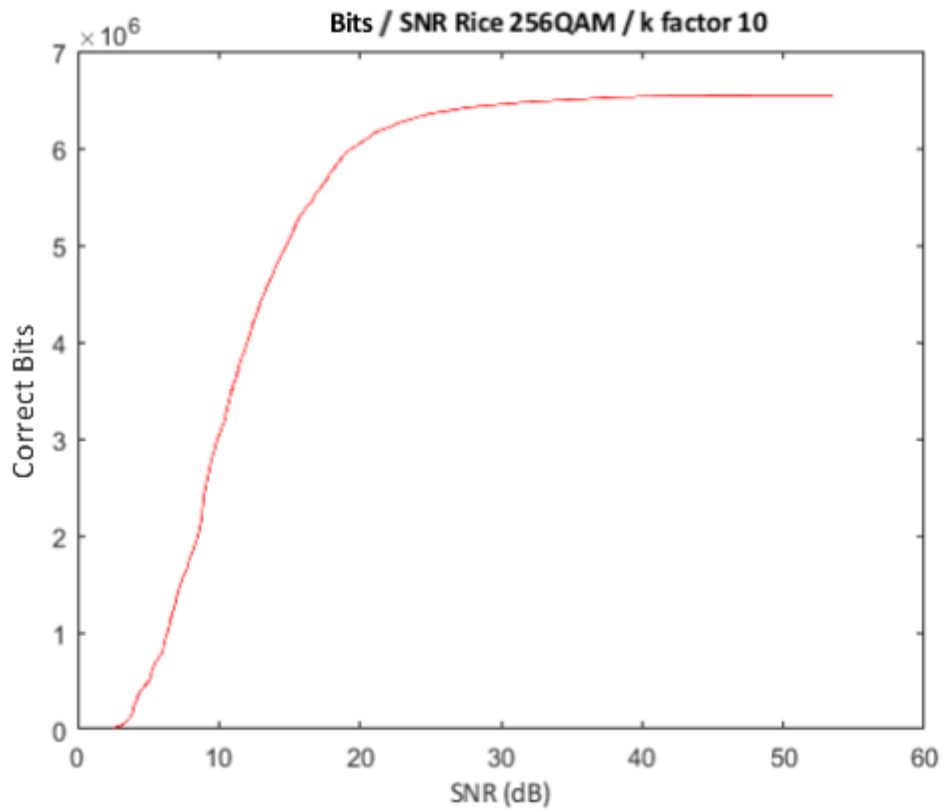
Η αύξηση του παράγοντα k επιφέρει αύξηση του αριθμού bits όπως φαίνεται από τις μέγιστες τιμές στα διαγράμματα 55 και 48 με μεγαλύτερες μέγιστες τιμές. Μια διαφορά σε σύγκριση με τα διαγράμματα για την προσομοίωση για 16 QAM είναι ότι η μέγιστη τιμή επιτυγχάνεται για τιμές του SNR κοντά στα 50 dB. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι απαιτείται μεγαλύτερο SNR στην λήψη για την μετάδοση με μεγαλύτερους ρυθμούς.



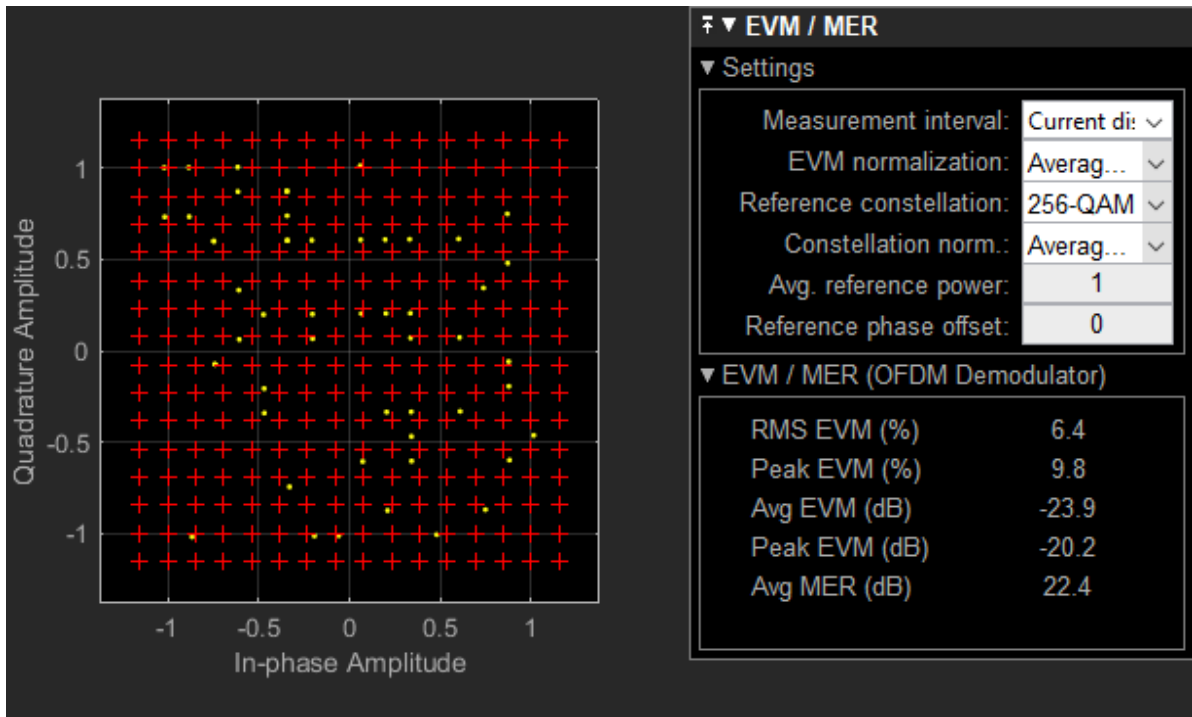
Διάγραμμα 59. Διάγραμμα αστερισμού Rice / 256QAM / k factor 10



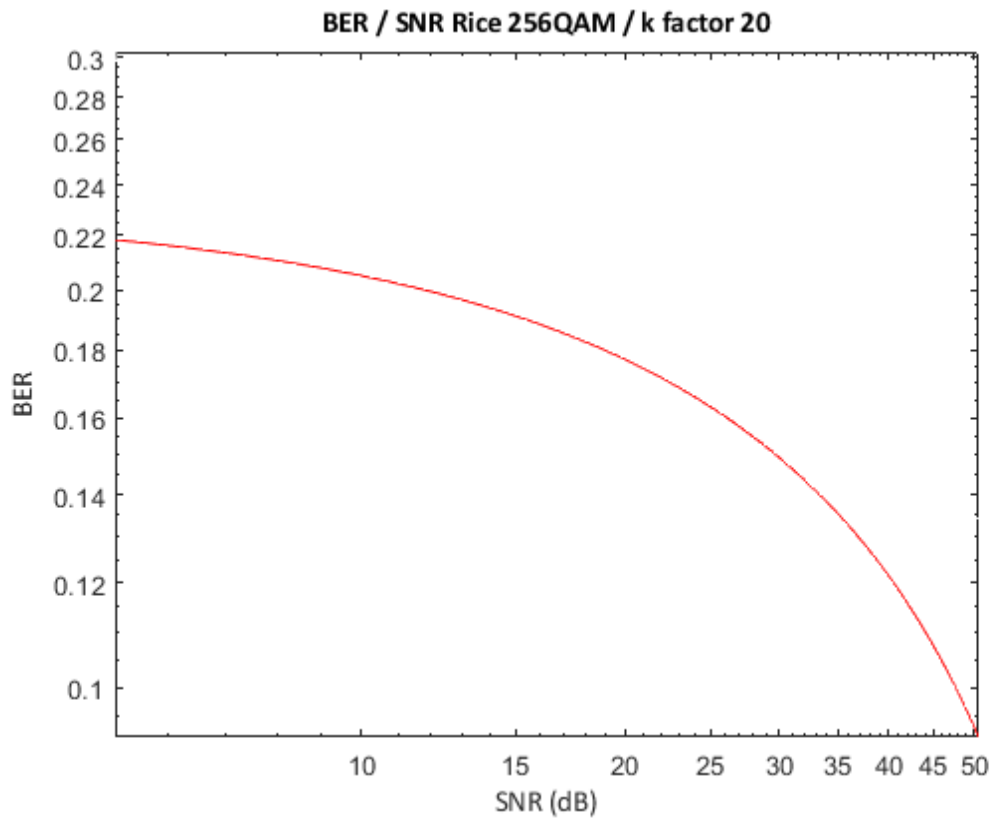
Διάγραμμα 60. Διάγραμμα BER/SNR Rice / 256QAM / k factor 10



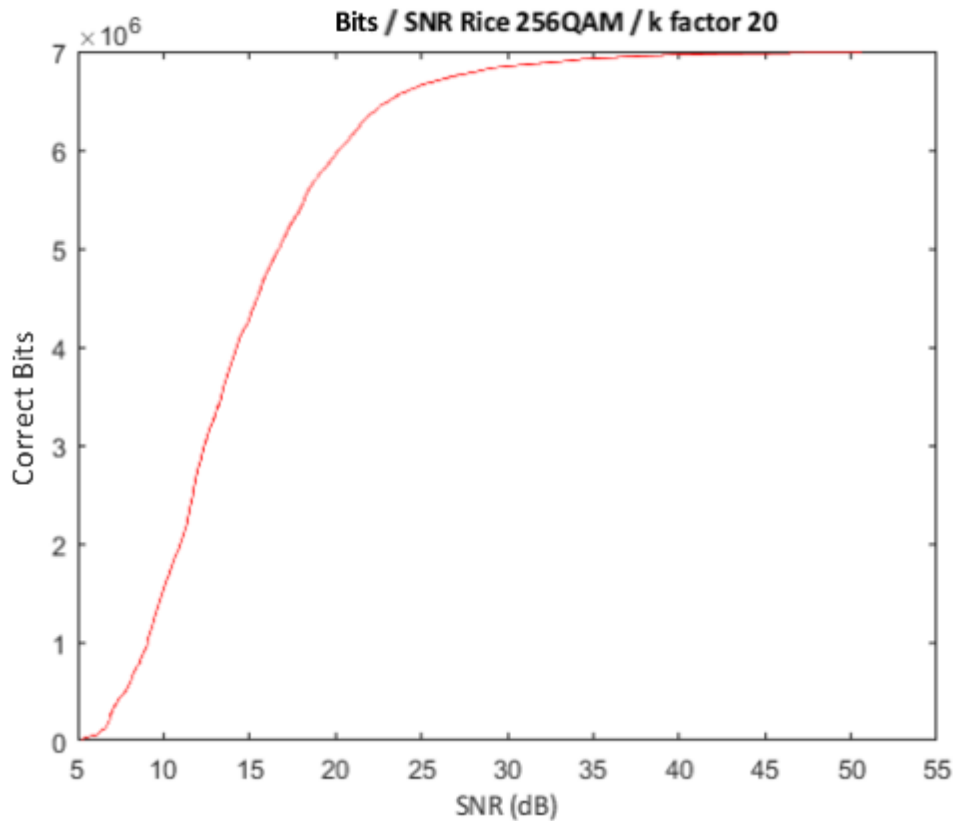
Διάγραμμα 61. Διάγραμμα Bits/SNR Rice / 256QAM / k factor 10



Διάγραμμα 62. Διάγραμμα αστερισμού Rice / 256QAM / k factor 20



Διάγραμμα 63. Διάγραμμα BER/SNR Rice / 256QAM / k factor 20



Διάγραμμα 64. Διάγραμμα Bits/SNR Rice / 256QAM / k factor 20

Στα διαγράμματα 59 και 62 παρατηρείται αυξημένη διασπορά για την διαμόρφωση 256 QAM σε σχέση με τις χαμηλότερες τάξεις διαμόρφωσης. Σε αντίθεση όμως με τις προηγούμενες προσομοιώσεις η διαφοράς στις τιμές είναι μικρότερες για τις δύο τιμές του παράγοντα k.

Στα διαγράμματα 60 και 63 για το ποσοστό σφαλμάτων παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά. Αυτό είναι χαμηλότερο για τιμή του παράγοντα k ίση με 20 dB στο διάγραμμα για τιμή 10 dB. Λόγω του αυξημένου ρυθμού μετάδοσης οι μέγιστες τιμές είναι αυξημένες. Σε σύγκριση με τα αντίστοιχα διαγράμματα για την διαμόρφωση 64 QAM οι τιμές για τις οποίες το ποσοστό σφαλμάτων τείνει στο μηδέν είναι παρόμοιες. Η αύξηση του παράγοντα k επιφέρει αύξηση και του αριθμού μεταδιδόμενων bits όπως φαίνεται από τις μέγιστες τιμές στα διαγράμματα 61 και 64 με μεγαλύτερες μέγιστες τιμές. Παρόμοια συμπεριφορά σε σύγκριση με την προσομοίωση για 64 QAM παρατηρείται στις μέγιστες τιμές. Αυτές επιτυγχάνονται για μεγαλύτερες τιμές SNR κοντά στα 50 dB.

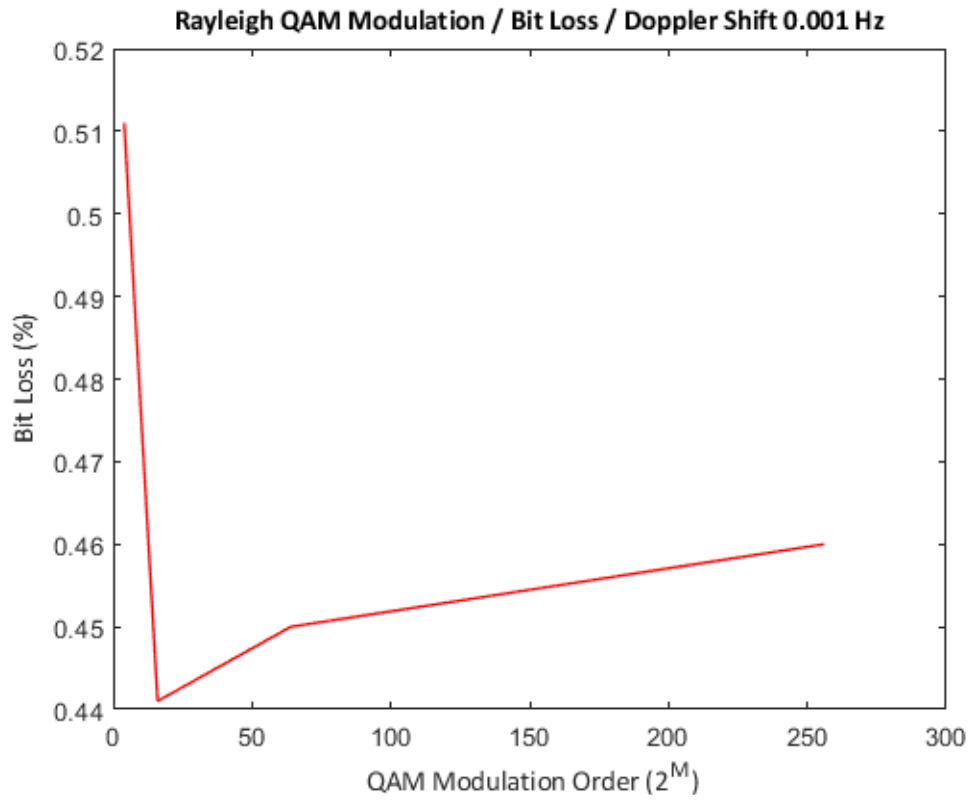
Το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι αύξηση της τάξης διαμόρφωσης επιφέρει υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος ως προς τα σφάλματα ανεξαρτήτως συνθηκών ασύρματου καναλιού. Επιπλέον υπάρχει μια αυξανόμενη

διασπορά συμβόλων στα γραφήματα αστερισμού του δέκτη η οποία όμως εμφανίζεται σε υψηλότερες τάξεις διαμόρφωσης. Η διασπορά έχει τις ίδιες αρνητικές επιπτώσεις στην φώραση όπως και στην περίπτωση του καναλιού τύπου Rayleigh. Στα διαγράμματα 48, 51, 54 για παράγοντα k ίσο με 10 dB και 57, 60, 63 για παράγοντα k ίσο με 20 dB υπάρχει αύξηση του ρυθμού σφαλμάτων για αυξανόμενη τάξη διαμόρφωσης. Τα αποτελέσματα σε αυτό τον τομέα είναι καλύτερα για την μεγαλύτερη τιμή του παράγοντα k . Η διαφοροποίηση προέρχεται από την αύξηση της ισχύος της συνιστώσας που προέρχεται από οπτική επαφή σε σχέση με τις υπόλοιπες.

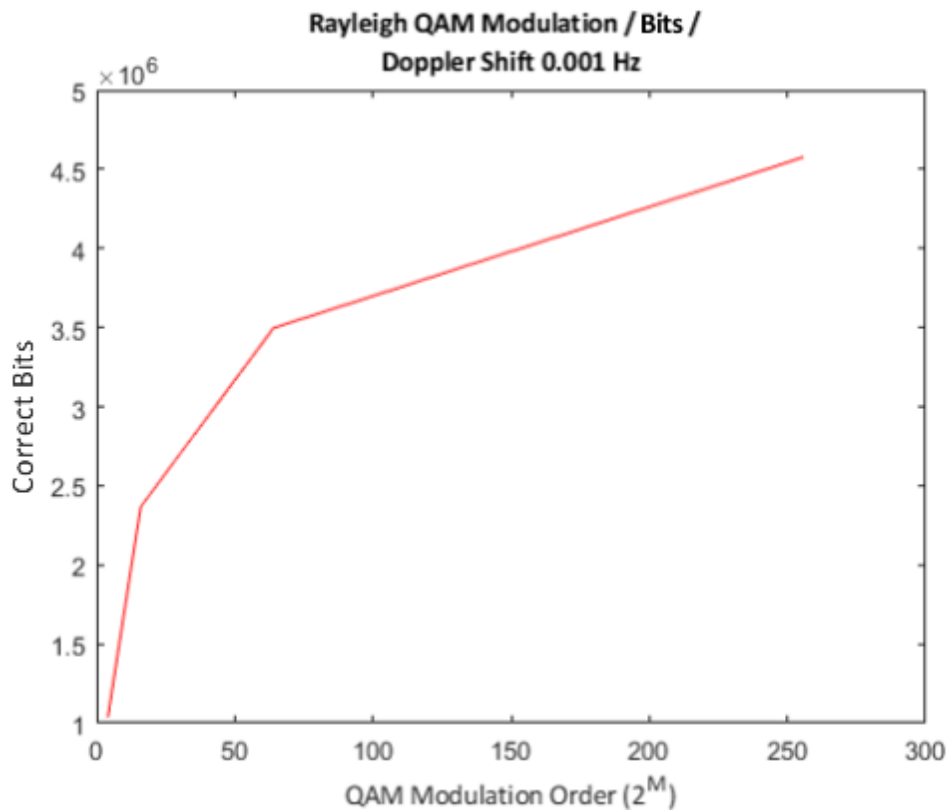
Ο αριθμός μετάδιδόμενων bits αυξάνεται παράλληλα με τον ρυθμό σφαλμάτων για μεγαλύτερες τάξεις διαμόρφωσης. Η διαφοροποίηση που προκύπτει σε σχέση με τις προσομοιώσεις για το κανάλι τύπου Rayleigh αφορά τις μεγαλύτερες μέγιστες τιμές, απόρροια του μικρότερου ρυθμού σφαλμάτων. Για τις διαμορφώσεις 64 και 256 QAM πάντως ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης επιτυγχάνεται για μεγαλύτερες τιμές SNR.

4.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων καναλιού Rayleigh

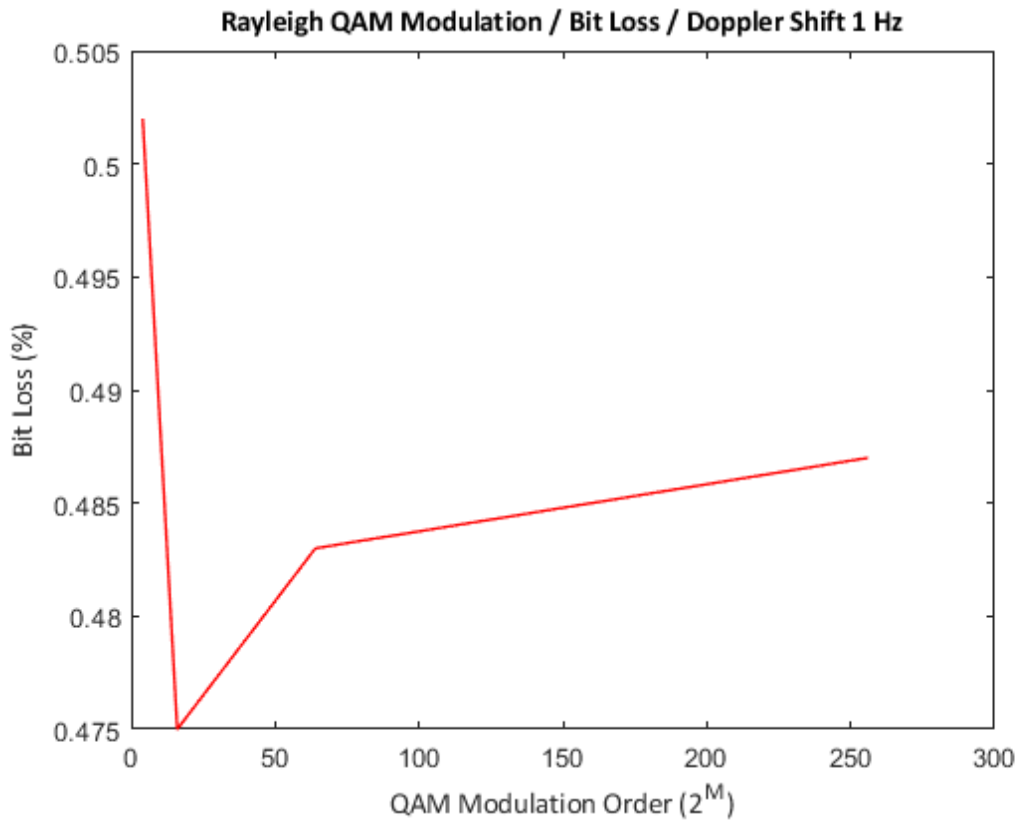
Τα διαγράμματα της συνολικής απόδοσης των συστημάτων όπου εξετάζεται το κανάλι Rayleigh βάσει των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων δίνονται παρακάτω. Εξετάζεται η απόδοση του καναλιού για διαφορετικές συνθήκες με γνώμονα την διαμόρφωση QAM.



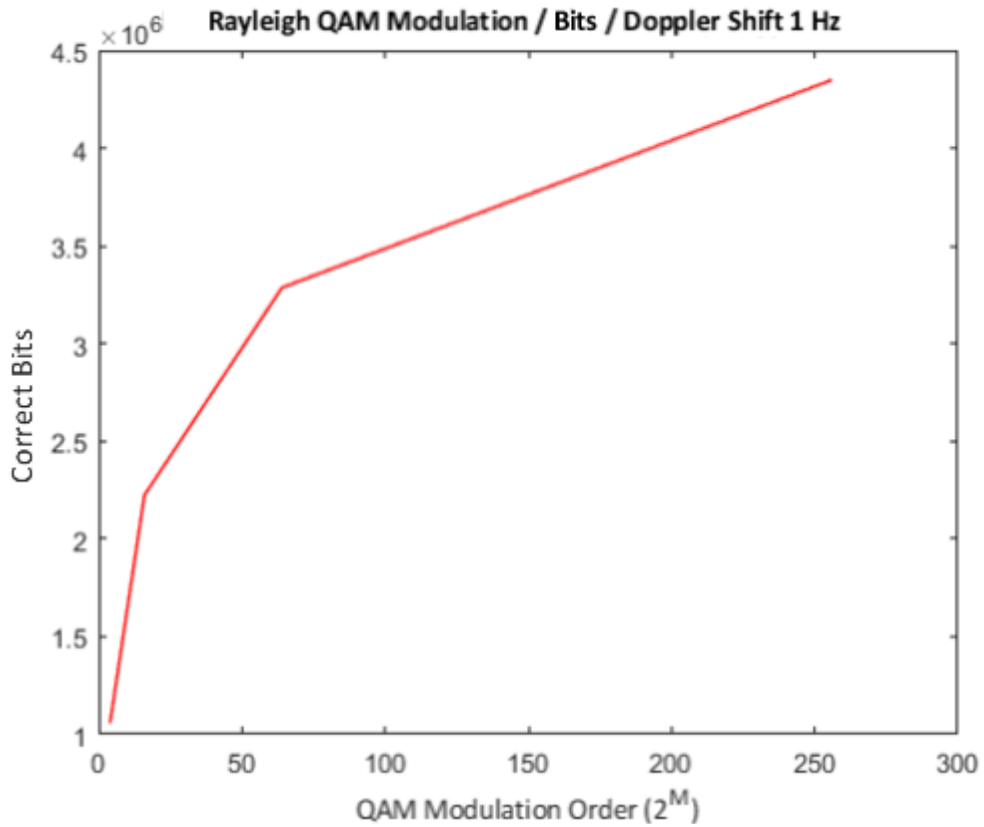
Διάγραμμα 65. Διάγραμμα Bit Loss / Modulation / Rayleigh / Doppler Shift 0.001Hz



Διάγραμμα 66. Διάγραμμα Bits / Modulation / Rayleigh / Doppler Shift 0.001Hz



Διάγραμμα 67. Διάγραμμα Bit Loss / Modulation / Rayleigh / Doppler Shift 1Hz



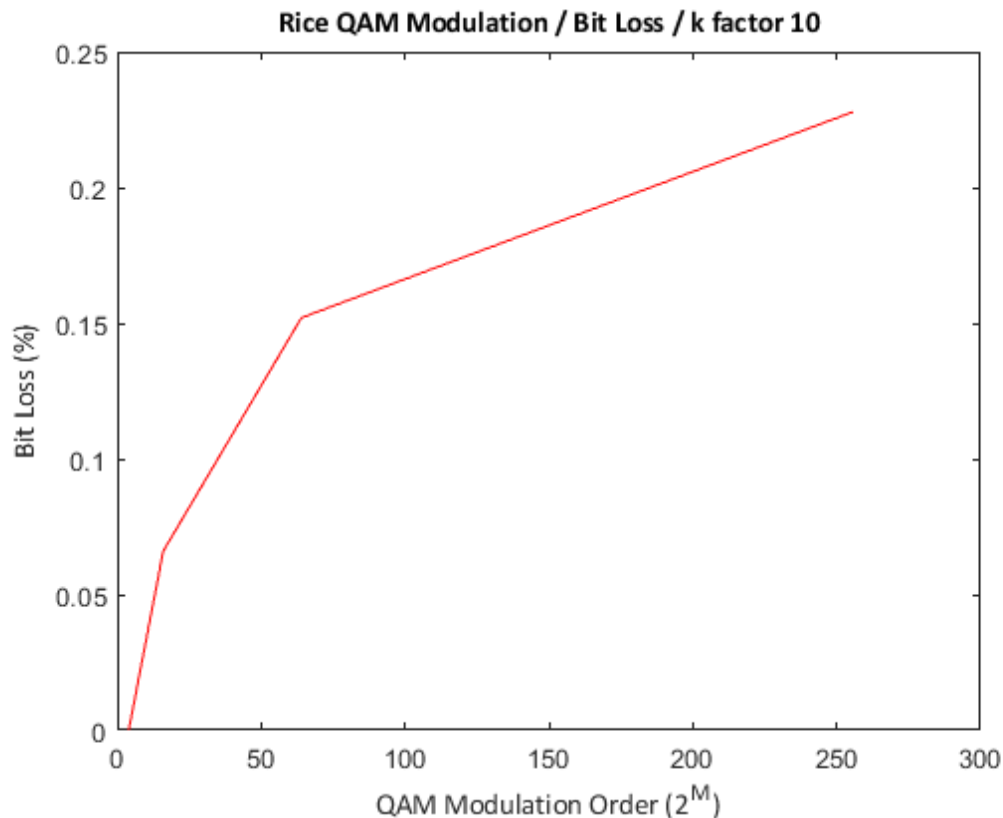
Διάγραμμα 68. Διάγραμμα Bits / Modulation / Rayleigh / Doppler Shift 1Hz

Από τα διαγράμματα 65 και 67 φαίνεται γραφική η καλύτερη επίδοση του συστήματος για μικρότερη τιμή της μετατόπισης Doppler ως προς τον μέγιστο αριθμό σφαλμάτων. Επιπλέον παρατηρείται μεγαλύτερος αριθμός μετάδοσης δεδομένων στο διάγραμμα 66 σε σχέση με το διάγραμμα 68. Η βελτίωση υπάρχει τόσο ανά τάξη διαμόρφωσης όσο και για την μέγιστη τιμή για 256 QAM.

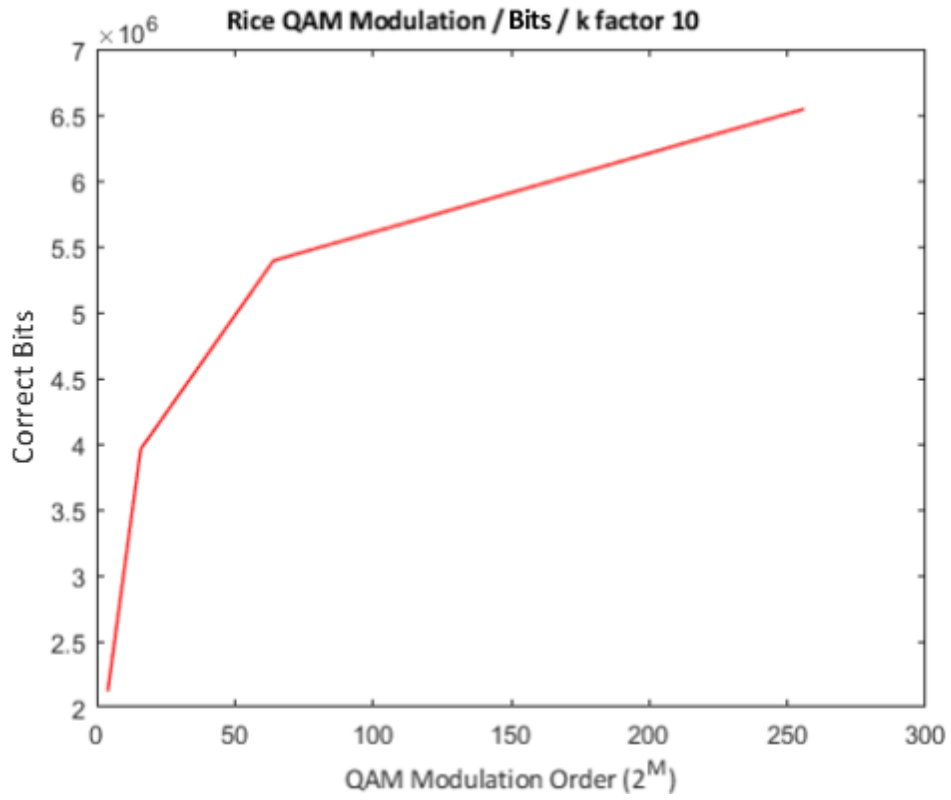
Η διαφορά των δύο προσομοιώσεων βρίσκεται στην τιμή της μετατόπισης Doppler. Για την μετατόπιση του 1 Hz παρατηρείται υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος. Το πρακτικό αποτέλεσμα αυτού είναι ότι οι συνθήκες του ασύρματου καναλιού όταν δεν υπάρχει οπτική επαφή επηρεάζονται από την κίνηση του δέκτη στο χώρο.

4.5 Ανάλυση αποτελεσμάτων καναλιού Rice

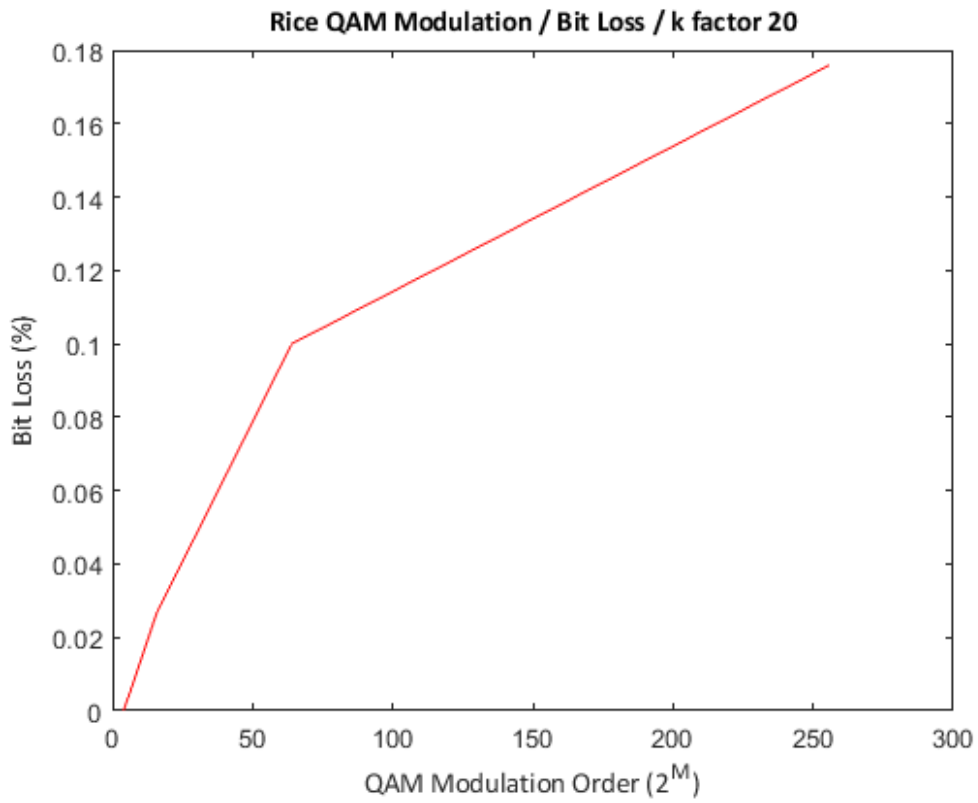
Τα διαγράμματα της συνολικής απόδοσης των συστημάτων όπου εξετάζεται το κανάλι Rice βάσει των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων δίνονται παρακάτω. Εξετάζεται η απόδοση του καναλιού για διαφορετικές συνθήκες με γνώμονα την διαμόρφωση QAM.



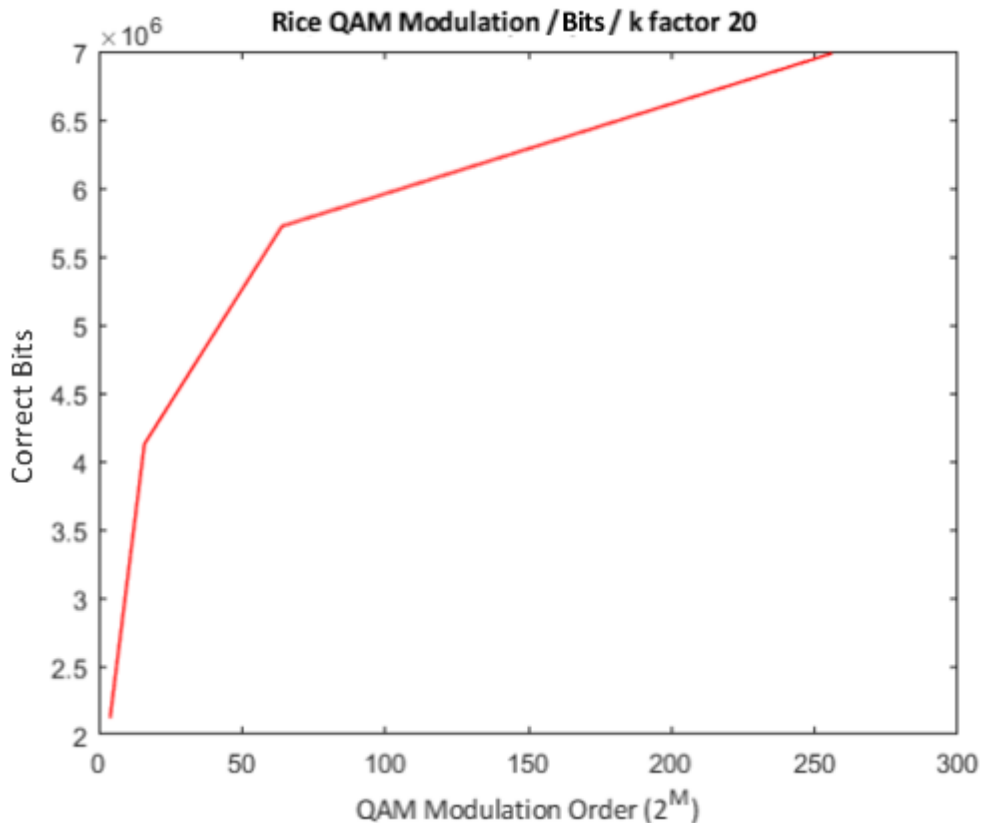
Διάγραμμα 69. Διάγραμμα Bit Loss/Modulation / Rice / k factor 10



Διάγραμμα 70. Διάγραμμα Bits/Modulation / Rice / k factor 10



Διάγραμμα 71. Διάγραμμα Bit Loss / Modulation / Rice / k factor 20



Διάγραμμα 72. Διάγραμμα Bits/Modulation / Rice / k factor 20

Από τα διαγράμματα 69 και 71 φαίνεται γραφική η καλύτερη επίδοση του συστήματος ως προς τον μέγιστο αριθμό σφαλμάτων για μεγαλύτερη τιμή του παράγοντα k . Επιπλέον παρατηρείται μεγαλύτερος αριθμός μετάδοσης δεδομένων στο διάγραμμα 72 σε σχέση με το διάγραμμα 70. Η βελτίωση υπάρχει τόσο ανά τάξη διαμόρφωσης όσο και για την μέγιστη τιμή για 256 QAM.

Η διαφορά των δύο προσομοιώσεων βρίσκεται στην τιμή του παράγοντα k . Διπλασιάζοντας την τιμή από 10 σε 20 dB παρατηρείται βελτίωση στην απόδοση και στις μέγιστες τιμές.

4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων καναλιών Rice και Rayleigh

Για την προσομοίωση των δύο καναλιών ακολουθήθηκε η λογική της σύγκρισης αποτελεσμάτων υπό διαφορετικές συνθήκες και για διαφορετικές ψηφιακές διαμορφώσεις. Στην περίπτωση του καναλιού Rayleigh το ζητούμενο είναι να αναδειχθεί η αλλαγή της συμπεριφοράς μεταξύ στατικού και κινούμενου δέκτη. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιήθηκαν δύο τιμές της μετατόπισης Doppler. Η επίδραση του παράγοντα πρακτικά σημαίνει ότι ένας κινούμενος δέκτης λαμβάνει σήμα από

τον πομπό υπό χειρότερες συνθήκες από όταν είναι ακίνητος όταν δεν υπάρχει οπτική επαφή, Το φαινόμενο παρατηρείται και στην καθημερινότητα ειδικά σε περιοχές με πολλά εμπόδια, όπως μια αστική περιοχή. Σε ακραίες περιπτώσεις κίνηση στον αυτό τον χώρο μπορεί να επιφέρει μεγάλη υποβάθμιση ή ακόμη και διακοπή του σήματος.

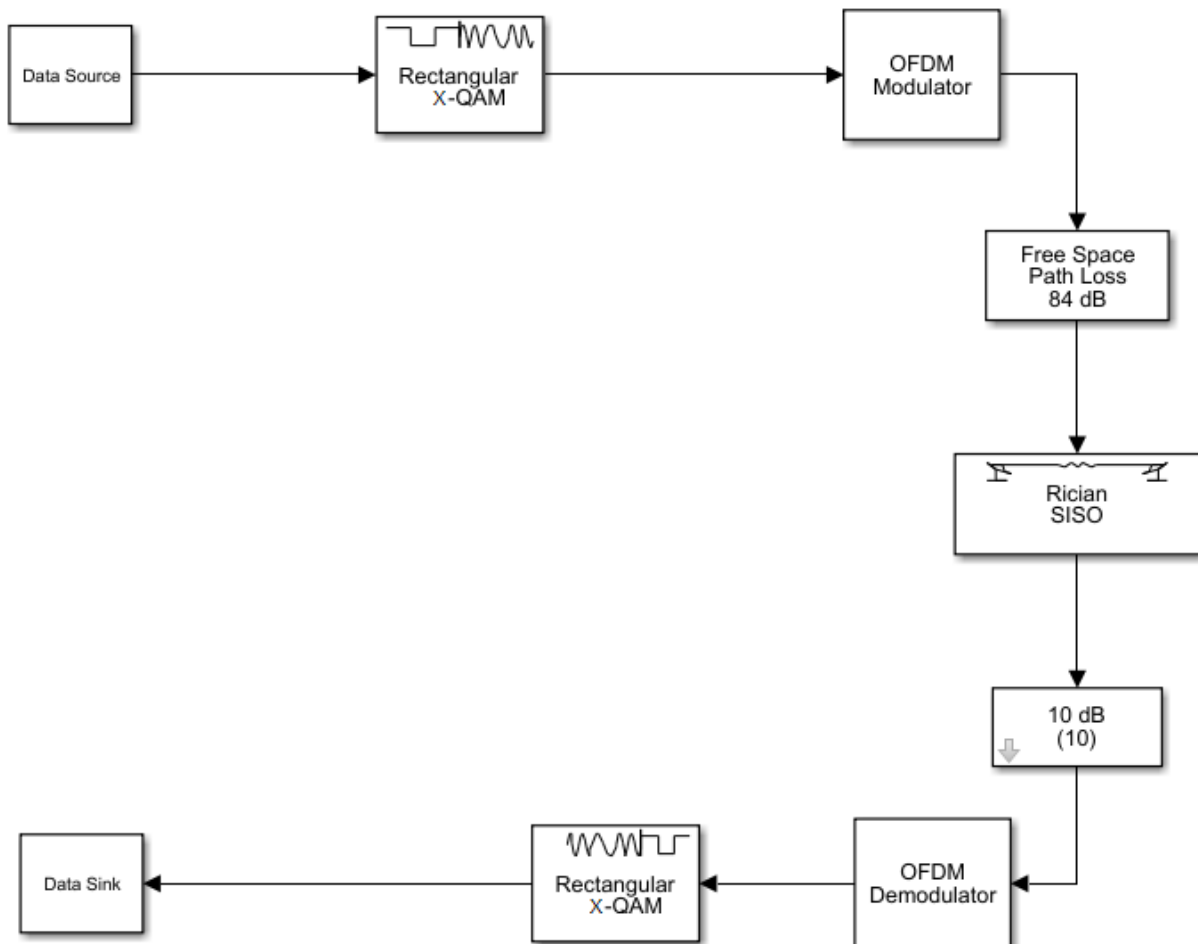
Στην περίπτωση του καναλιού Rice η κίνηση του δέκτη έχει μικρότερη επίδραση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πάντοτε υπάρχει μια κυρίαρχη συνιστώσα του σήματος που προέρχεται από οπτική επαφή. Αλλάζοντας τον λόγο της ισχύος της κύριας συνιστώσας προς την μέση ισχύ των συνιστωσών που προκύπτουν από μηχανισμούς διάδοσης μεταβάλλονται οι συνθήκες του καναλιού. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ότι για αύξηση αυτού του λόγου επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση του συστήματος.

Συγκρίνοντας την συνολική συμπεριφορά των δυο συστημάτων παρατηρείται ότι υπάρχει διαφορά στην απόδοση. Σε συνθήκες οπτικής επαφής παρατηρούνται χαμηλότερος αριθμός σφαλμάτων και υψηλότερος αριθμός μετάδοσης bits. Οι τιμές του SNR για τις οποίες ελαχιστοποιείται το ποσοστό σφαλμάτων είναι χαμηλότερες. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στα διαγράμματα της μετάδοσης δεδομένων. Εξαιρέση υπάρχει μόνο στα διαγράμματα για την διαμόρφωση του 256 QAM όπου το απαιτούμενο SNR για μεγιστοποίηση της κίνησης είναι υψηλότερο. Πρακτικά αυτή η διαφορά σημαίνει ότι η μετάδοση υπό συνθήκες οπτικής επαφής μπορεί να γίνει με χαμηλότερες τιμές SNR. Η εμφάνιση διαλείψεων ή σκιάσεων θα επιφέρουν μικρότερη υποβάθμιση του σήματος στον δέκτη. Παράλληλα θα υπάρχει μεγαλύτερο περιθώριο για μείωση του SNR μέχρι να υπάρχει αντιληπτή υποβάθμιση της ποιότητα των υπηρεσιών στον δέκτη. Το εύρημα που προκύπτει είναι επομένως ότι η οποιαδήποτε οπτική επαφή μεταξύ μεταξύ ενός σταθμού βάσης και μίας συσκευής κινητής τηλεφωνίας σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας επιφέρει καλύτερη απόδοση. Επιπλέον επιδεικνύει μεγαλύτερη ανοχή στην επίδραση παραγόντων που επιφέρουν αλλαγές στις συνθήκες του ασύρματου καναλιού.

Κεφάλαιο 5

Προσομοιώσεις σύνθετου καναλιού

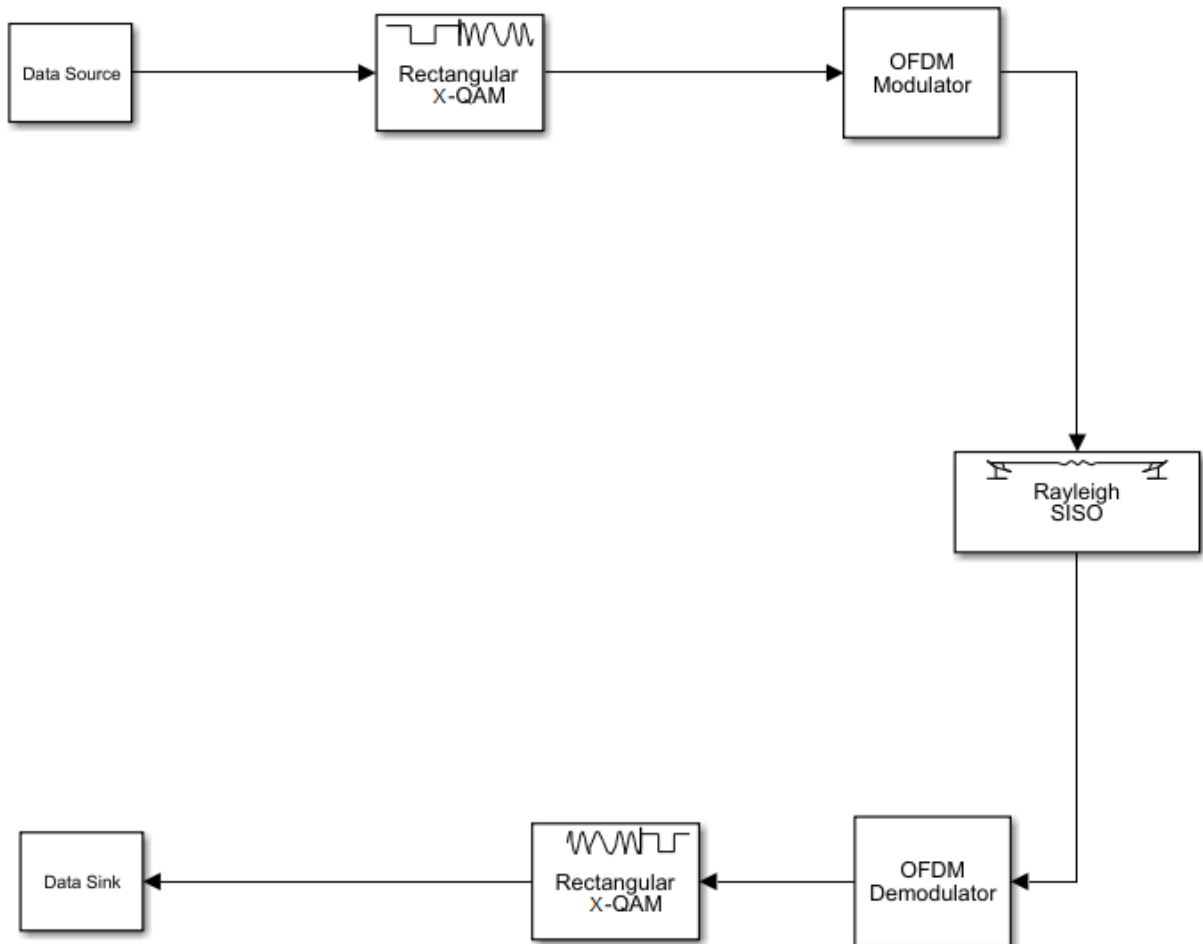
Τα μοντέλα που εξετάζονται στο κεφάλαιο 4 χρησιμοποιούν ένα βασικό μοντέλο ενός ψηφιακού ασύρματου συστήματος τηλεπικοινωνιών. Είναι χρήσιμα στο να υπάρξει μια βασική εκτίμηση της απόδοσης των συστημάτων υπό διαφορετικές συνθήκες. Ο βασικό συμπέρασμα το οποίο προκύπτει είναι ότι η κύρια παράμετρος που επηρεάζει ένα σύστημα είναι η οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Το επόμενο στάδιο στην προσομοίωση είναι η μοντελοποίηση συγκεκριμένων παραμέτρων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα μοντέλα των διαγραμμάτων 73 και 74.



Διάγραμμα 73. Βασικό block διάγραμμα μοντέλου Free Space Loss-Rice

Το παραπάνω μοντέλο προσομοιώνει την περίπτωση όπου ένα στατικό μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα χρησιμοποιείται ως relay μεταξύ ενός σταθμού βάσης και μίας κινητής συσκευής. Η εξασθένιση των 84dB προέρχεται από τον υπολογισμό του Free space loss για απόσταση 100 μέτρων και κεντρική συχνότητα εκπομπής 3,7 GHz στην ζώνη C [66]. Η συχνότητα επιλέγεται με γνώμονα ότι είναι η πρώτη στο φάσμα που επιτρέπει κανάλια από 20 ως 100 MHz στο διαδρομή προς το έδαφος (downlink). Θεωρείται για σκοπούς της προσομοίωσης ότι σε όλη την διαδρομή χρησιμοποιείται η ίδια συχνότητα. Η βαθμίδα κέρδους των 10dB αντιπροσωπεύει την ενίσχυση στην εκπομπή του οχήματος προς την συσκευή κινητής τηλεφωνίας. Θεωρείται ότι το UAV λειτουργεί ως σταθμός βάσης τύπου Macrocell. Για πομπούς αυτού του τύπου σύμφωνα με ETSI δεν ορίζεται μέγιστη ισχύ εκπομπής [67], οπότε ορίζεται μια τυπική ενίσχυση.

Θεωρείται ότι η θέση του μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος σε σχέση με τον τελικό χρήστη θα είναι τέτοια ώστε να μεταδίδεται το μεγαλύτερο ποσοστό ισχύος μέσω της κυρίαρχης συνιστώσας του σήματος. Αυτή θα προέρχεται πάντα από οπτική επαφή μεταξύ τους. Για αυτό το λόγο θεωρείται ότι το κανάλι θα είναι τύπου Rice. Σε αυτό το κανάλι ο παράγοντας k έχει επιλεγεί με γνώμονα ότι η συνιστώσα που προέρχεται από οπτική επαφή θα μεταφέρει το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος του σήματος. Η κινητή συσκευή θεωρείται επίσης στατική. Ως αποτέλεσμα η μετατόπιση Doppler θεωρείται μηδενική. Δοκιμάζονται οι ψηφιακές διαμορφώσεις από 4 ως και 256QAM. Λόγω της εγγύτητας που αναμένεται να υπάρχει μεταξύ μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος και κινητής συσκευής αναμένεται να επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες καναλιού που θα ευνοούν τις υψηλότερες τάξεις διαμόρφωσης. Οι υπόλοιπες βαθμίδες του μοντέλου που αφορούν την δημιουργία δεδομένων, τις διαμορφώσεις QAM και την μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης χρησιμοποιούνται με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4. Το δεύτερο μοντέλο το οποίο εξετάζεται έχει ως εξής



Διάγραμμα 74. Βασικό block διάγραμμα μοντέλου Rayleigh

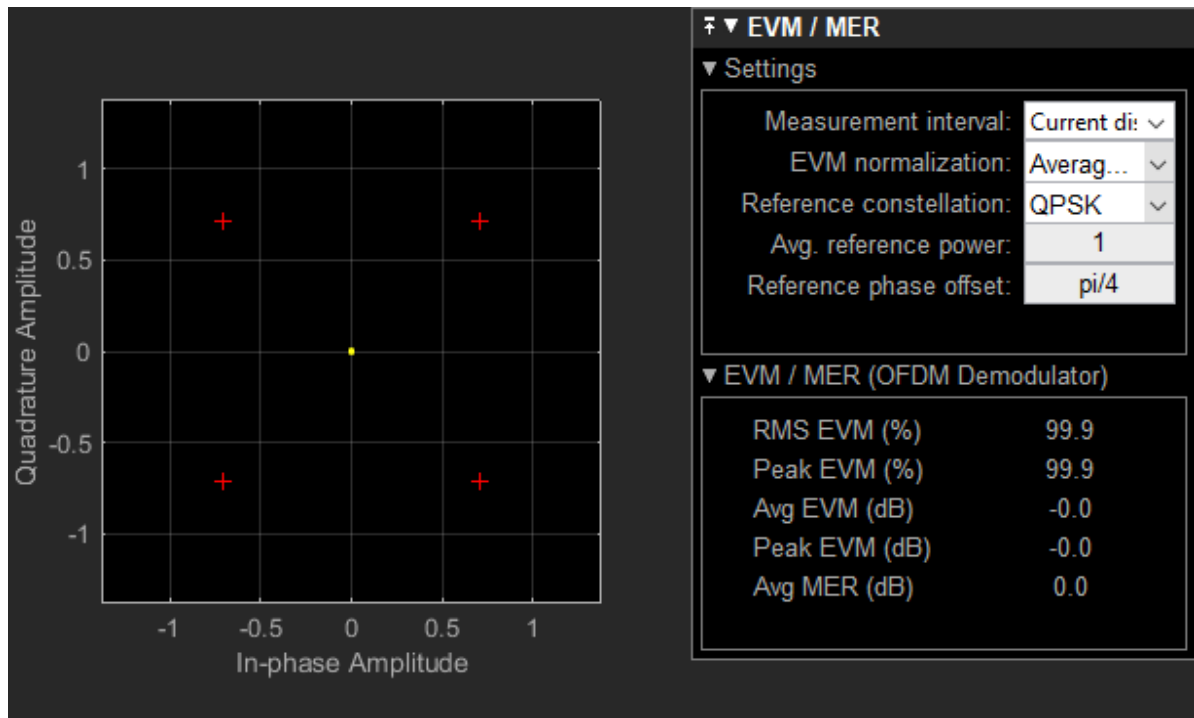
Σε αυτό υπάρχει μόνο ένα κανάλι τύπου Rayleigh μεταξύ σταθμού βάσης και συσκευής κινητής τηλεφωνίας. Σε αυτό θεωρείται η πλειοψηφία των περιπτώσεων όπου η κυρίαρχη συνιστώσα του σήματος προκύπτει από μη οπτική επαφή. Αποτελεί προσομοίωση της περίπτωσης κάλυψης σε αστική περιοχή με πυκνή δόμηση όπου δεν υπάρχει απευθείας οπτική επαφή μεταξύ. Η κινητή συσκευή θεωρείται επίσης στατική και σε αυτή την περίπτωση οπότε η μετατόπιση Doppler θεωρείται μηδενική. Για λόγους απευθείας σύγκρισης δοκιμάζονται οι ίδιες ψηφιακές διαμορφώσεις για επίτευξη του μεγαλύτερου δυνατού ρυθμού μετάδοσης. Όπως και στο προηγούμενο μοντέλο οι υπόλοιπες βαθμίδες χρησιμοποιούνται με τον ίδιο τρόπο.

5.1 Προσομοίωση καναλιού Free Space Loss-Rice

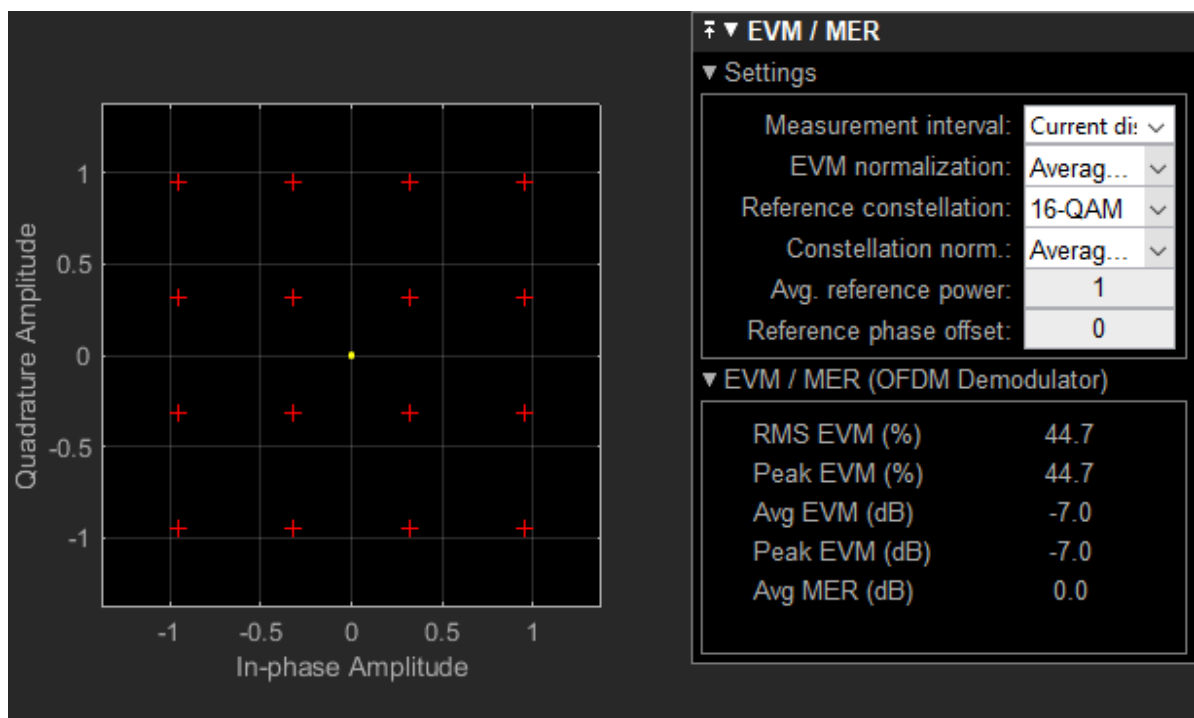
Εξετάζονται οι περιπτώσεις για διαμορφώσεις από 4 ως και 256 QAM για τις παραμέτρους που έχουν αναφερθεί. Στον πίνακα 7 καταγράφονται οι τιμές των παραμέτρων προσομοίωσης και τα αποτελέσματα για ποσοστό απωλειών, εσφαλμένα bits και τα συνολικά bits που μεταδόθηκαν ανά προσομοίωση. Τα διαγράμματα δημιουργούνται από τις τιμές στην λήψη του σήματος.

Παράμετροι προσομοίωσης				
Runtime	20000			
Random Integer Generator	M-ary Number	Sample Time	Samples/ Frame	
	4/16/64/256	01/53	53	
Integer/Bit Converter	Bits/Integer			
	2/4/6/8			
QAM Modulation	M-ary Number	Constellation Ordering	Decision Type	Normalization
	4/16/64/256	Gray	Hard	Avg Power
OFDM Modulation	FFT Length	Guard Bands	OFDM Symbols	
	64	6;5	1	
Rice Channel	Max Doppler Shift	K Factor	Avg Path Gain	
	0.001 Hz	100	0 dB	
Αποτελέσματα προσομοίωσης				
Ψηφιακή διαμόρφωση QAM	4 QAM	16 QAM	64 QAM	256 QAM
Bit Loss (%)	0	0.25	0.334	0.377
Εσφαλμένα Bits	0	106089	2126059	3199459
Συνολικά Bits	2120106	4240212	6360318	8480424

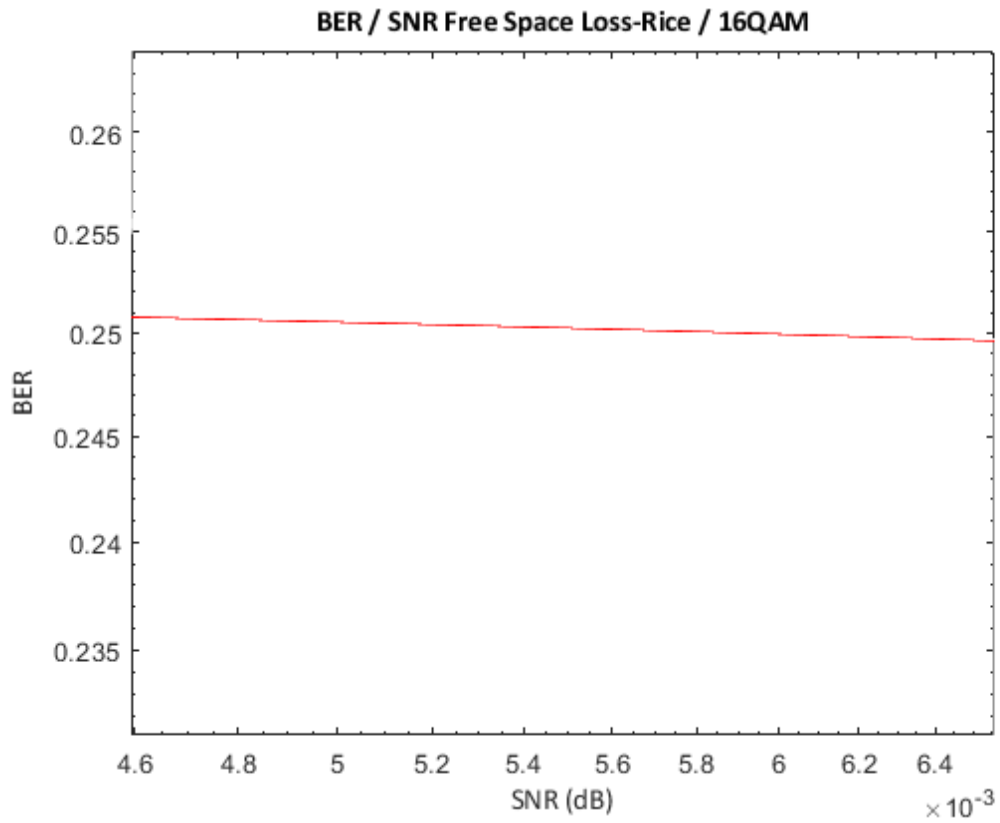
Πίνακας 9. Παράμετροι και αποτελέσματα προσομοίωσης καναλιού Free Space Loss-Rice



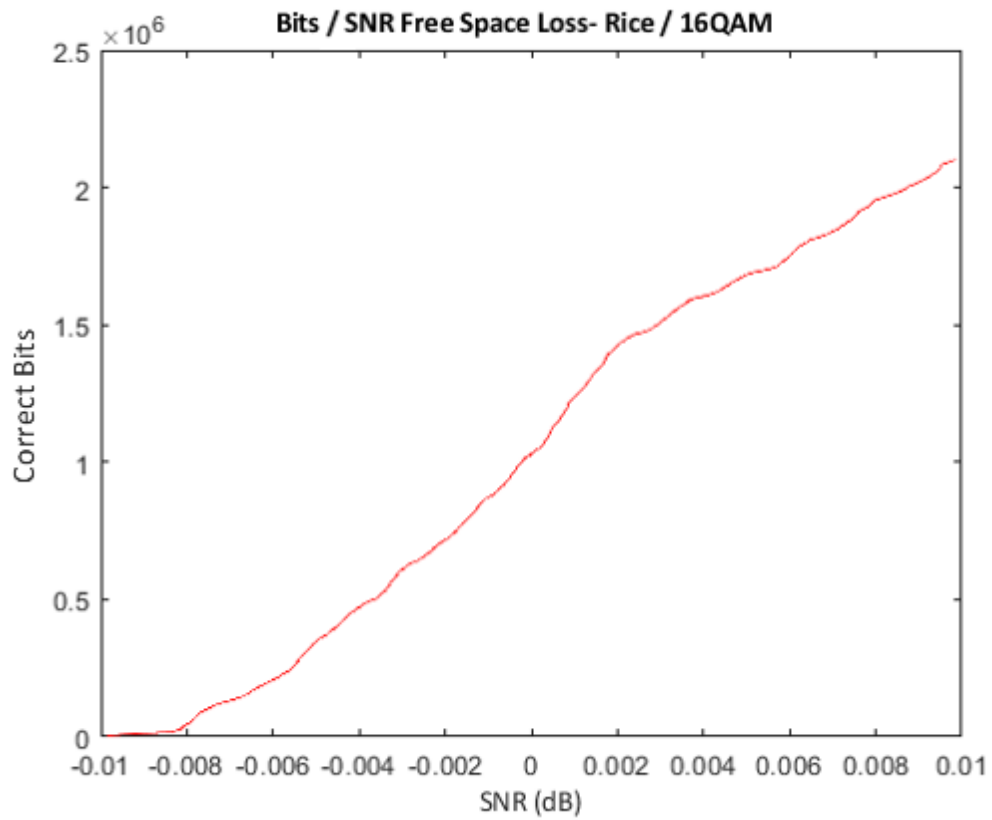
Διάγραμμα 75. Διάγραμμα αστερισμού Free Space Loss-Rice / 4 QAM



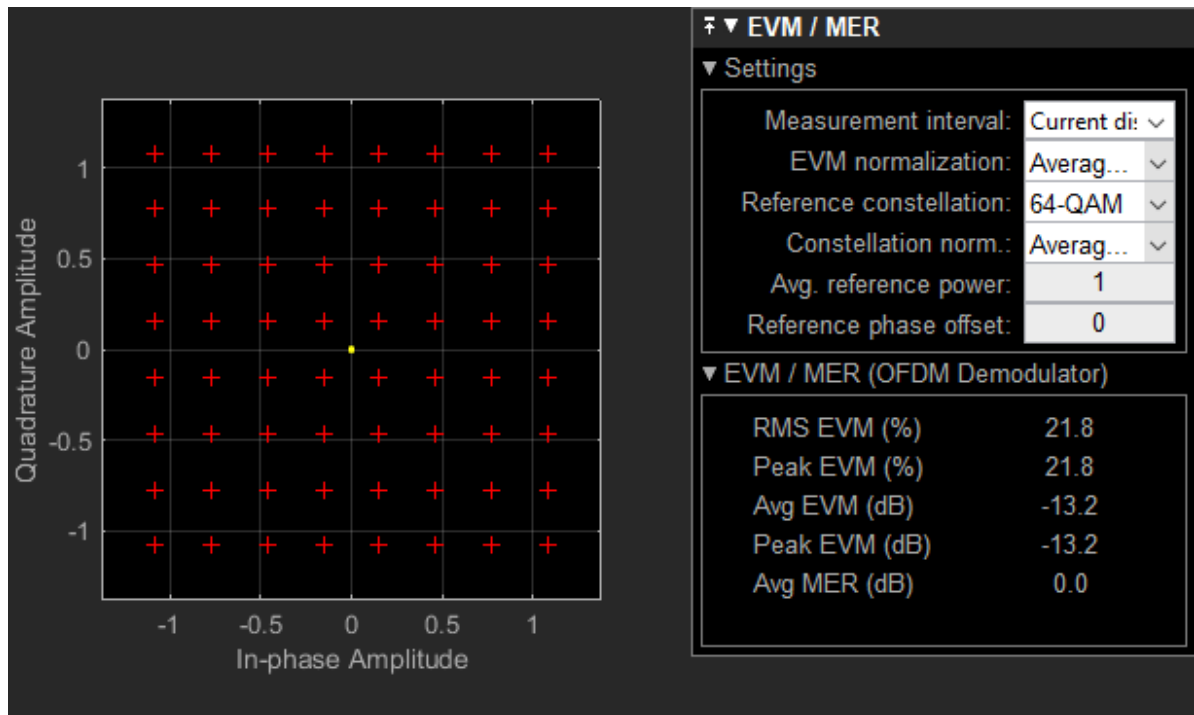
Διάγραμμα 76. Διάγραμμα αστερισμού Free Space Loss-Rice / 16 QAM



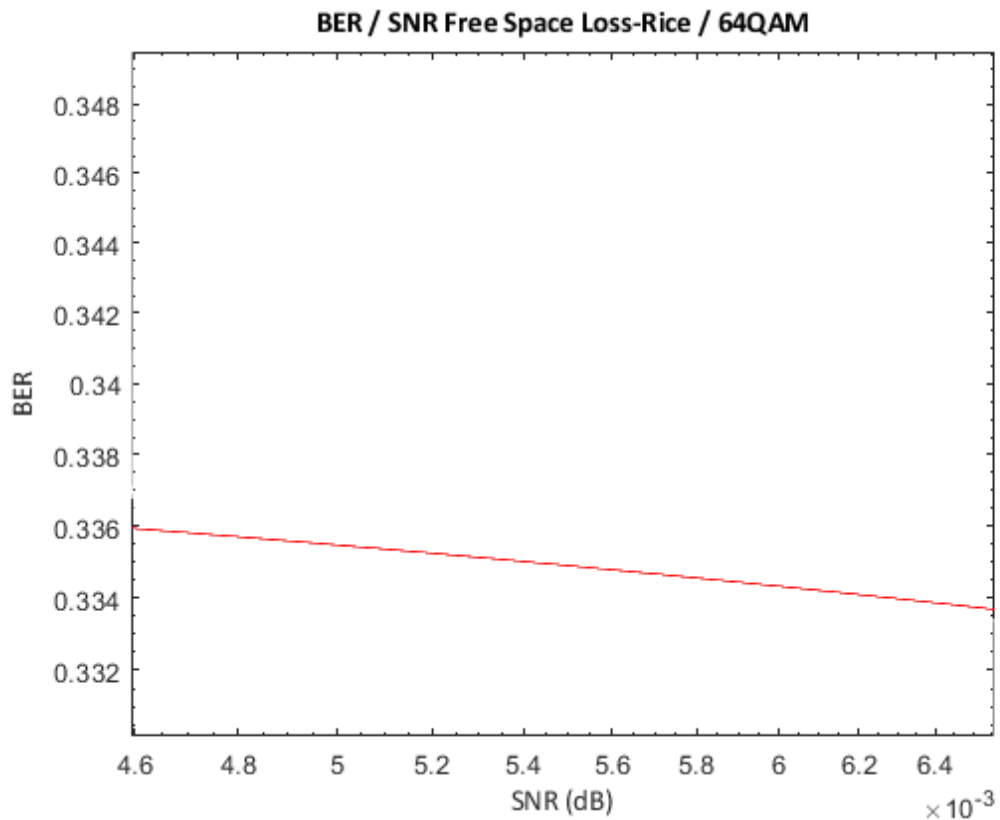
Διάγραμμα 77. Διάγραμμα BER/SNR Free Space Loss-Rice / 16 QAM



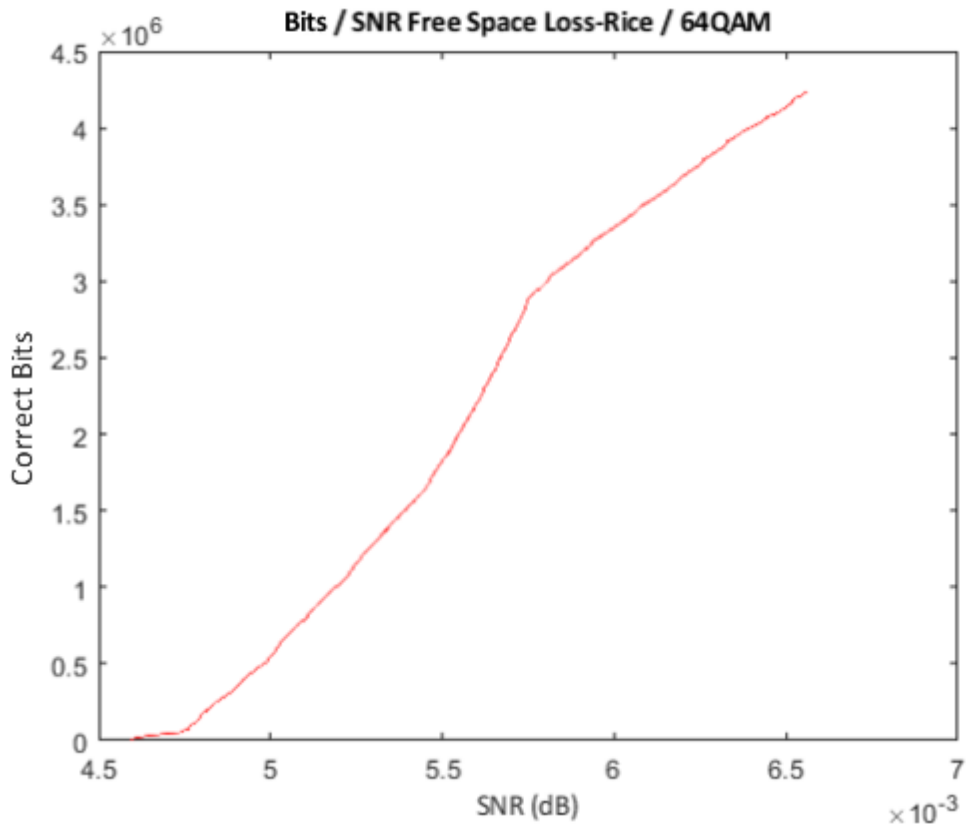
Διάγραμμα 78. Διάγραμμα Bits/SNR Free Space Loss-Rice / 16 QAM



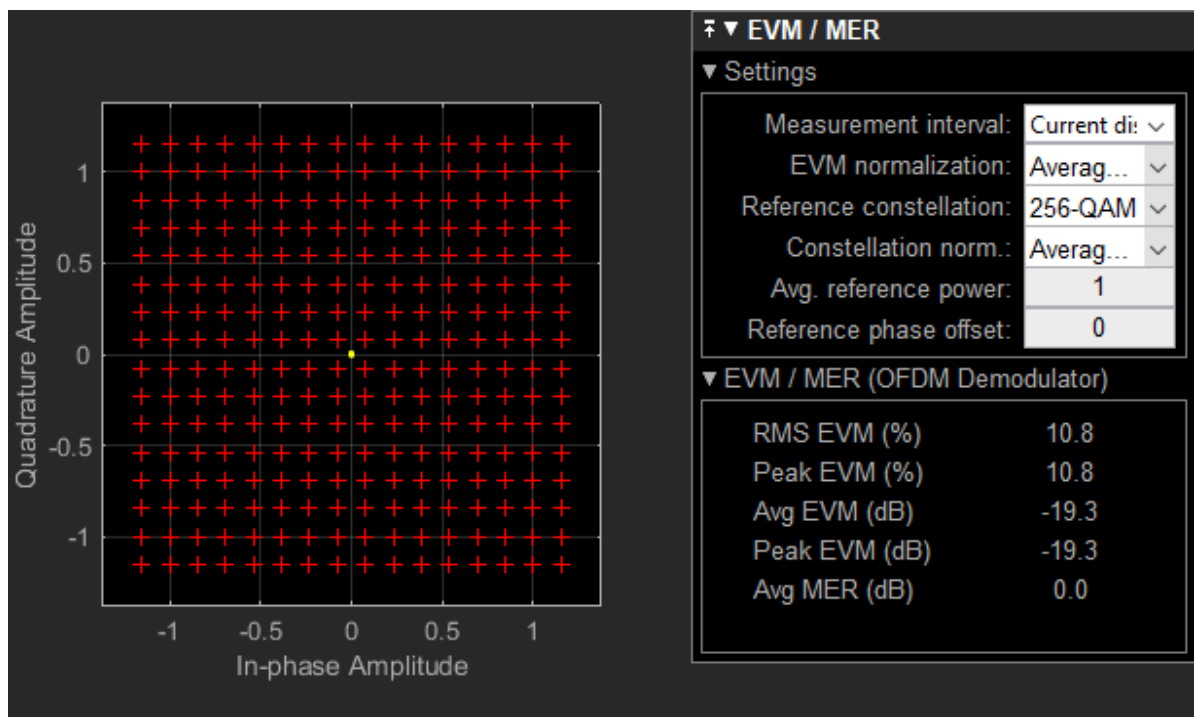
Διάγραμμα 79. Διάγραμμα αστερισμού Free Space Loss-Rice / 64 QAM



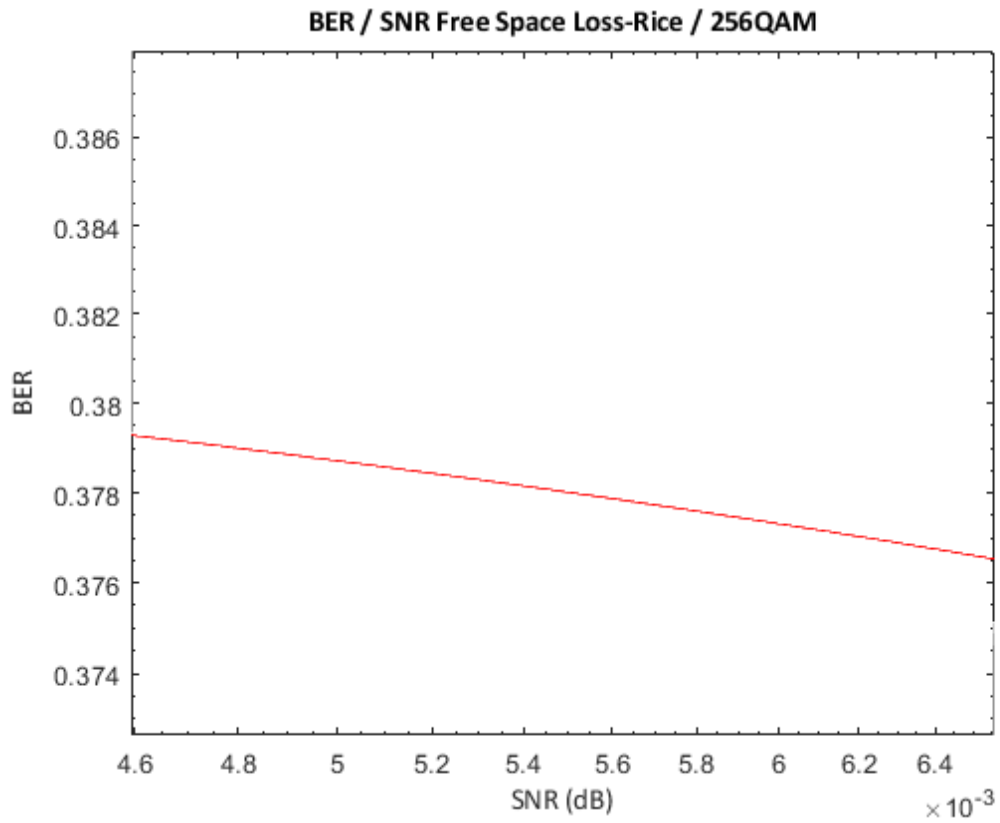
Διάγραμμα 80. Διάγραμμα BER/SNR Free Space Loss-Rice / 64 QAM



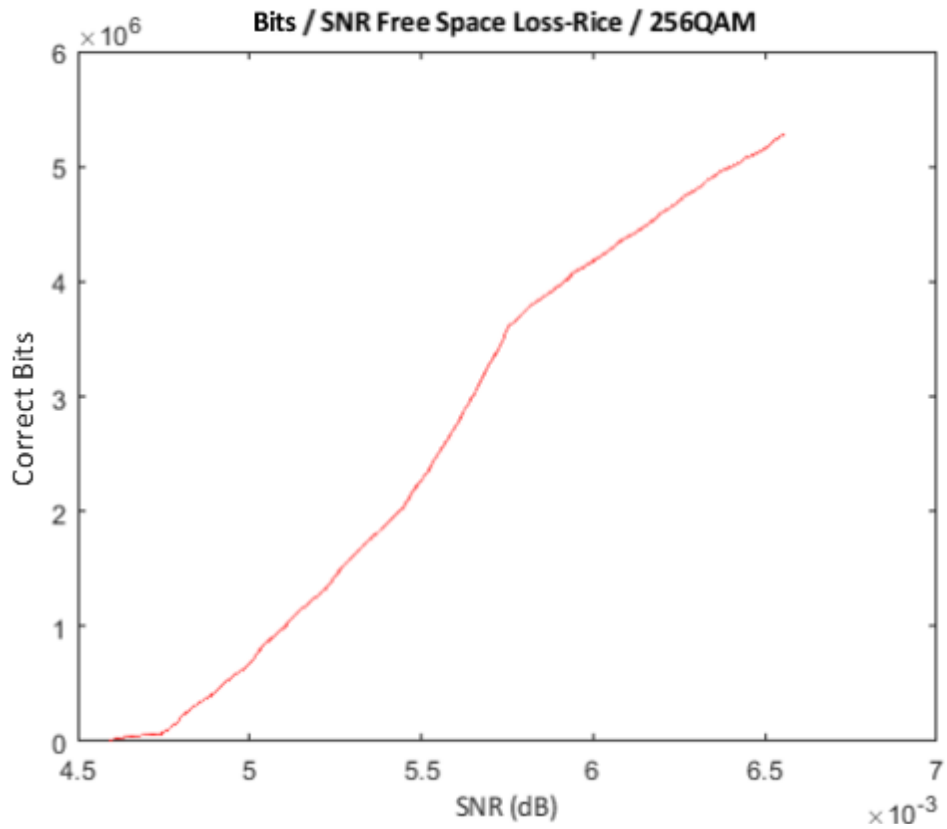
Διάγραμμα 81. Διάγραμμα Bits/SNR Free Space Loss-Rice / 64 QAM



Διάγραμμα 82. Διάγραμμα αστερισμού Free Space Loss-Rice / 256 QAM



Διάγραμμα 83. Διάγραμμα BER/SNR Free Space Loss-Rice / 256 QAM



Διάγραμμα 84. Διάγραμμα Bits/SNR Free Space Loss-Rice / 256 QAM

Στα διαγράμματα αστερισμού 75, 76, 79 και 82 παρατηρείται μείωση των απόλυτων και μέσων τιμών EVM καθώς αυξάνει η τάξη της διαμόρφωσης. Σε αντίθεση με προηγούμενες προσομοιώσεις δεν υπάρχει διασπορά στα OFDM σύμβολα.

Υπάρχει αύξηση του μέγιστου αριθμού σφαλμάτων καθώς αυξάνει η τάξη της διαμόρφωσης στα διαγράμματα 76, 80 και 83. Η διαφοροποίηση με τις προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4 είναι ότι ο ρυθμός σφαλμάτων δεν μηδενίζεται για καμία τιμή SNR.

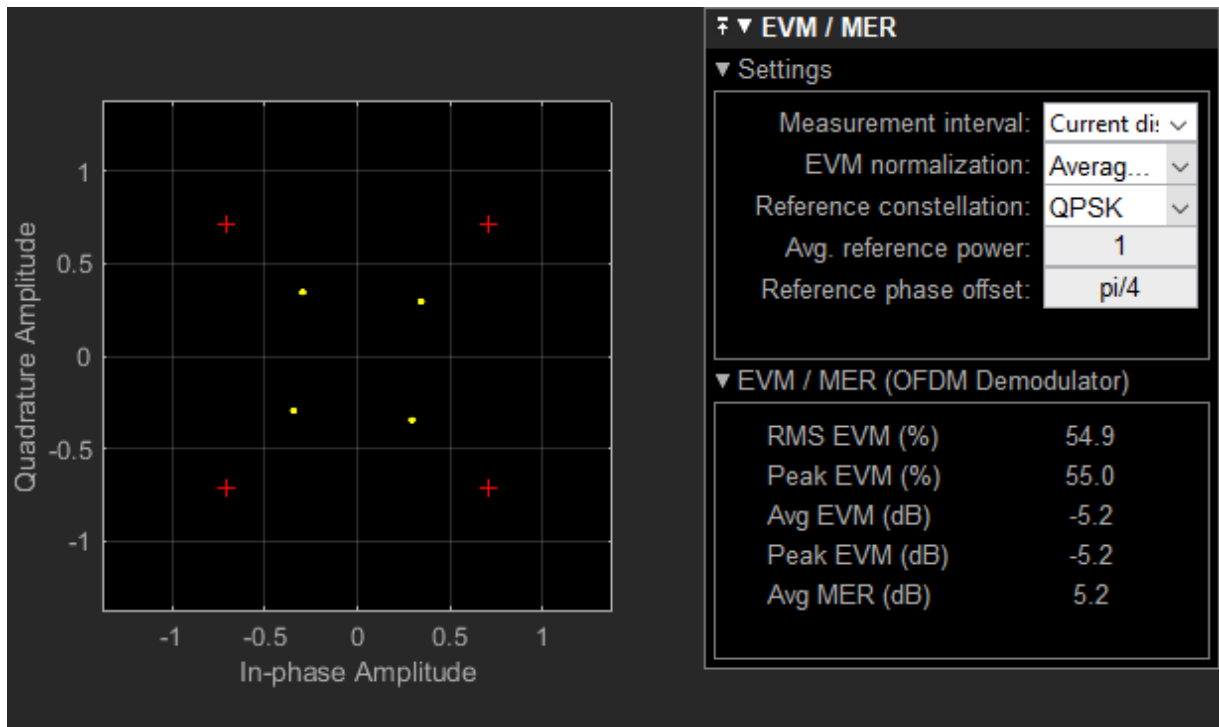
Στα διαγράμματα 78, 81 και 84 εμφανίζεται αύξηση του αριθμού μεταδιδόμενων bits για αύξηση του SNR. Οι μέγιστες τιμές αυξάνονται με την αύξηση της τάξης της διαμόρφωσης.

5.2 Προσομοίωση καναλιού Rayleigh

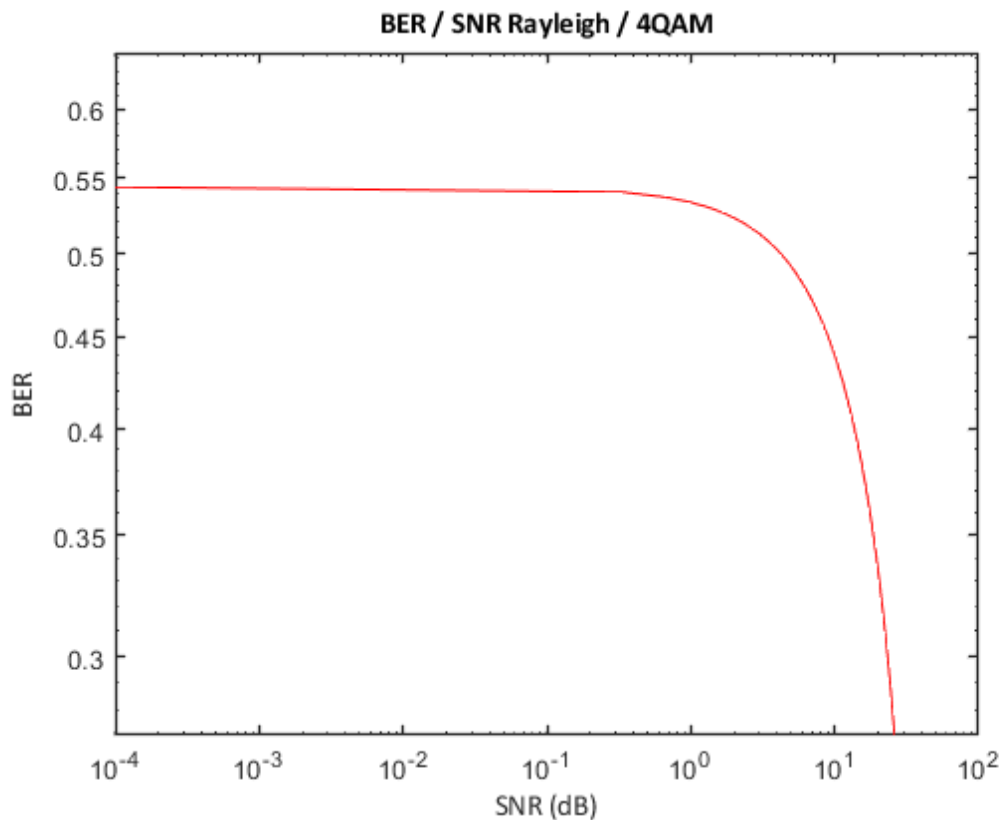
Εξετάζονται οι περιπτώσεις για διαμορφώσεις από 4 ως και 256 QAM για τις παραμέτρους που έχουν αναφερθεί. Στον πίνακα 8 καταγράφονται οι τιμές των παραμέτρων προσομοίωσης και τα αποτελέσματα για ποσοστό απωλειών, εσφαλμένα bits και τα συνολικά bits που μεταδόθηκαν ανά προσομοίωση. Τα διαγράμματα δημιουργούνται από τις τιμές στην λήψη του σήματος.

Παράμετροι προσομοίωσης				
Runtime	20000			
Random Integer Generator	M-ary Number	Sample Time	Samples/Frame	
	4/16/64/256	01/53	53	
Integer/Bit Converter	Bits/Integer			
	2/4/6/8			
QPSK Modulation	M-ary Number	Constellation Ordering	Decision Type	Normalization
	64	Gray	Hard	Avg Power
OFDM Modulation	FFT Length	Guard Bands	OFDM Symbols	
	64	6;5	1	
Rayleigh Channel	Max Doppler Shift			
	0.001 Hz			
Αποτελέσματα προσομοίωσης				
Ψηφιακή διαμόρφωση QAM	4 QAM	16 QAM	64 QAM	256 QAM
Bit Loss (%)	0.511	0.441	0.45	0.46
Εσφαλμένα Bits	1085379	1872868	2863663	3902861
Συνολικά Bits	2120106	4240212	6360318	8480424

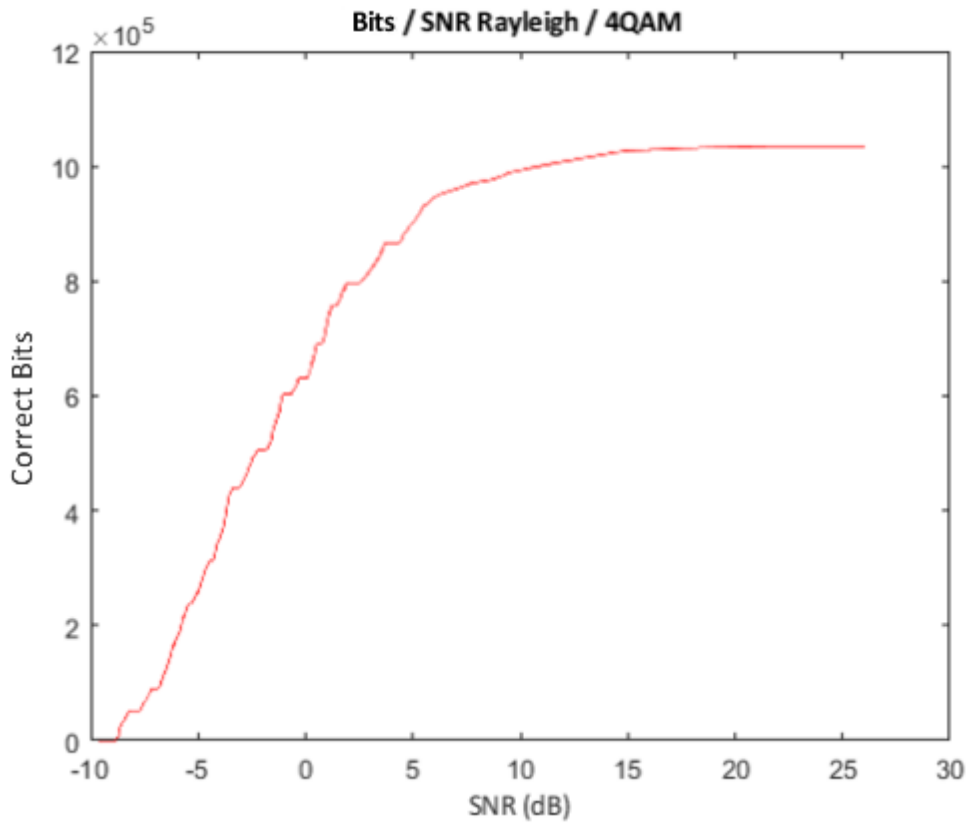
Πίνακας 10. Παράμετροι και αποτελέσματα προσομοίωσης καναλιού Rayleigh



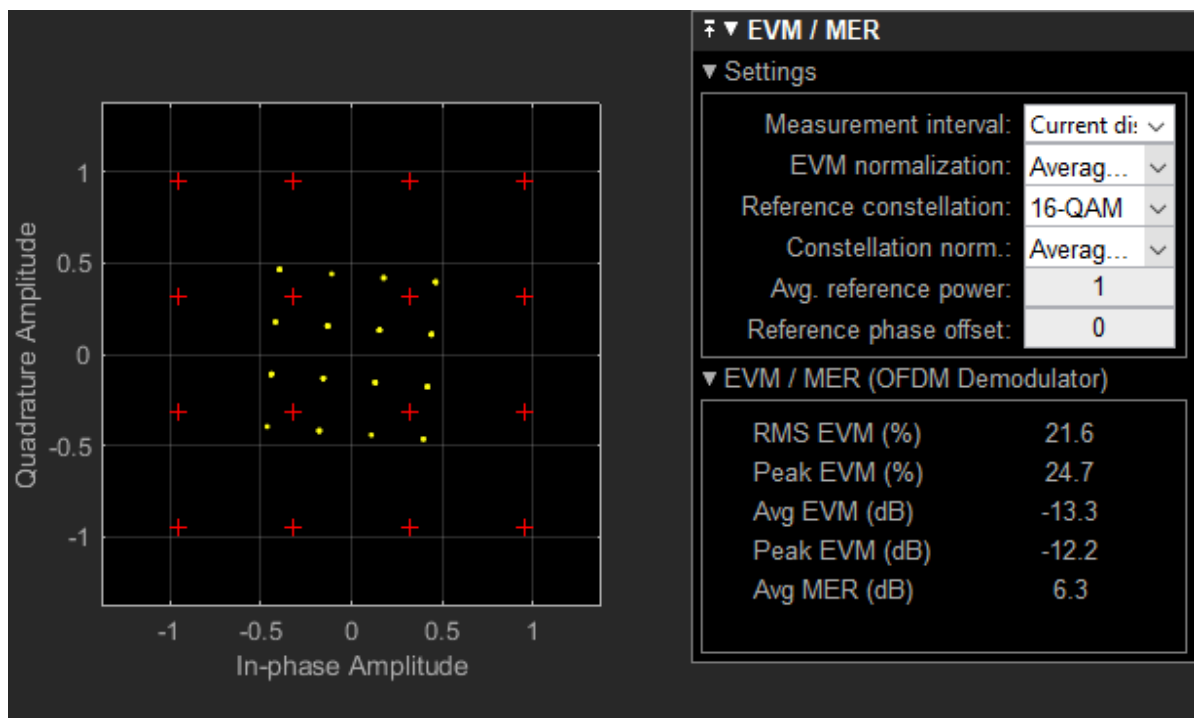
Διάγραμμα 85. Διάγραμμα αστερισμού Rayleigh / 4 QAM



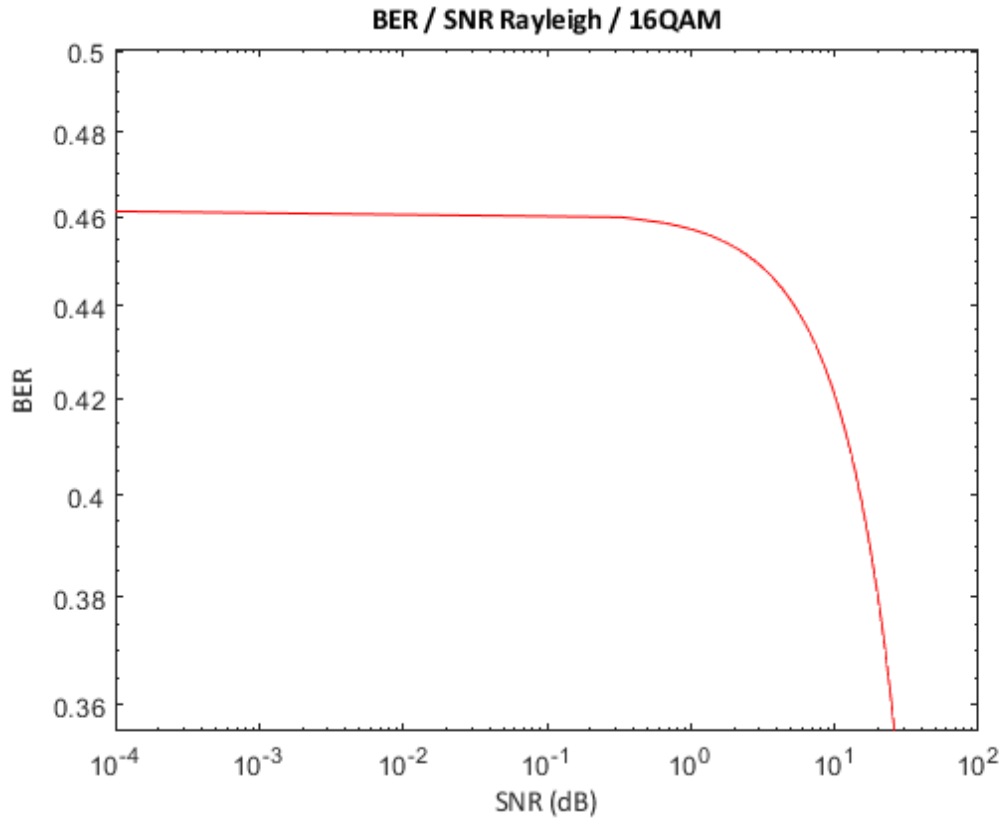
Διάγραμμα 86. Διάγραμμα BER/SNR Rayleigh / 4 QAM



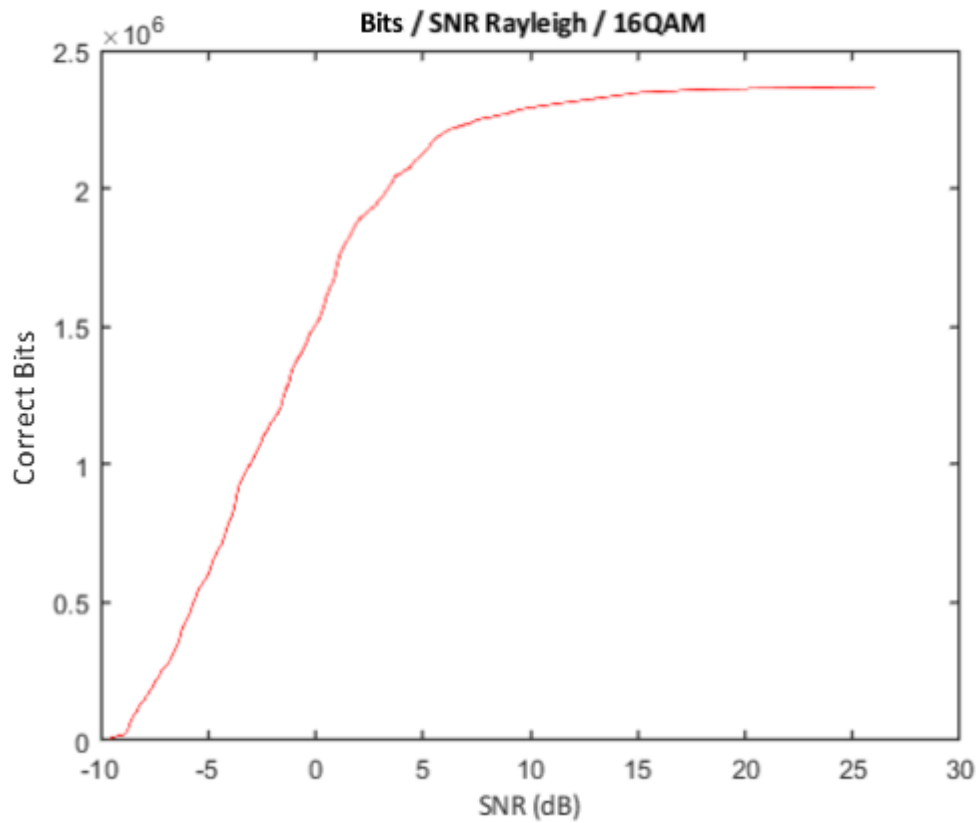
Διάγραμμα 87. Διάγραμμα Bits/SNR Rayleigh / 4 QAM



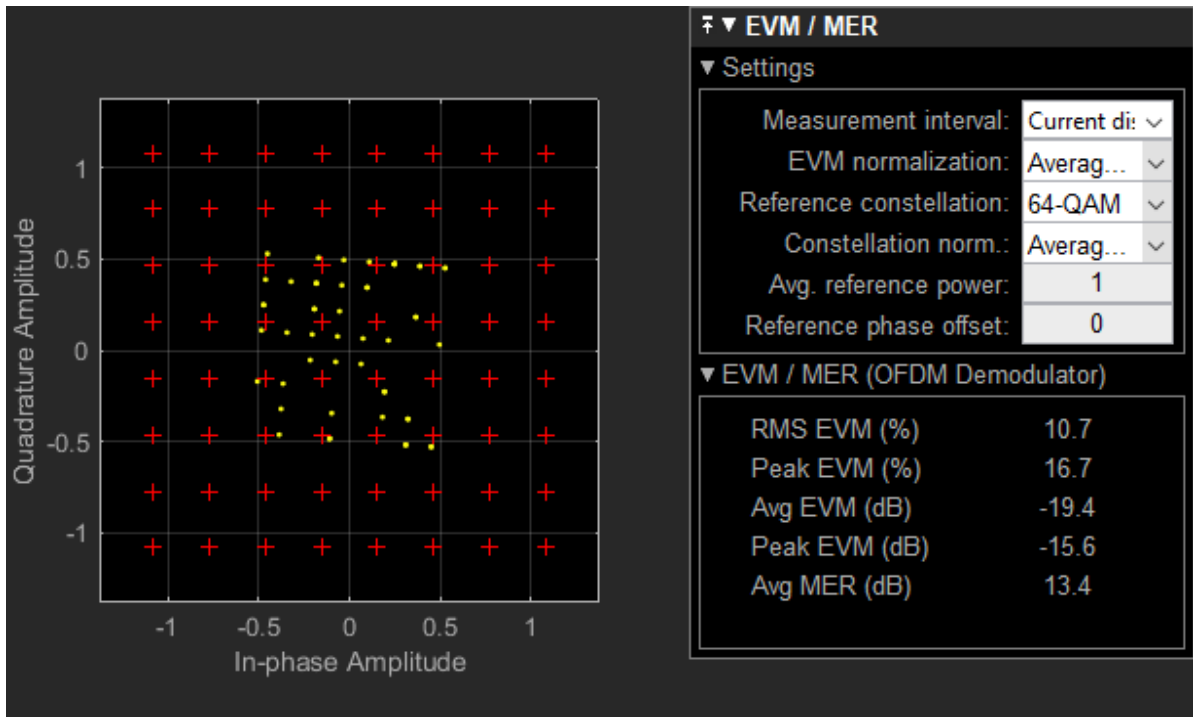
Διάγραμμα 88. Διάγραμμα αστερισμού Rayleigh / 16 QAM



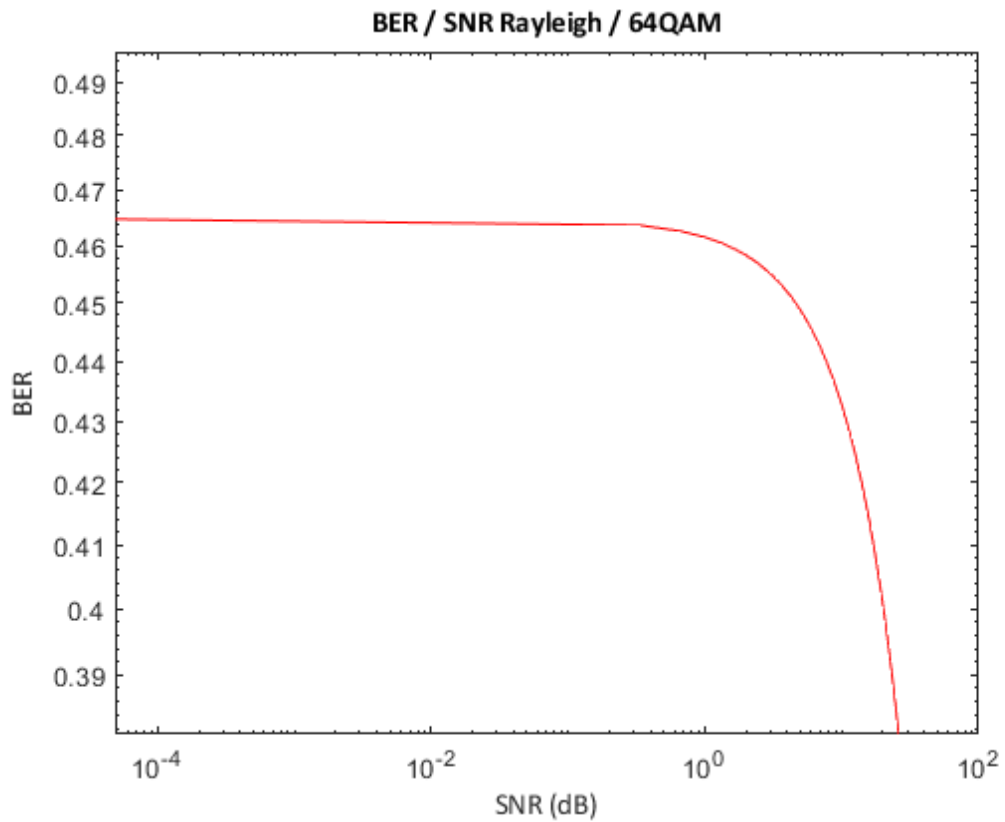
Διάγραμμα 89. Διάγραμμα BER/SNR Rayleigh / 16 QAM



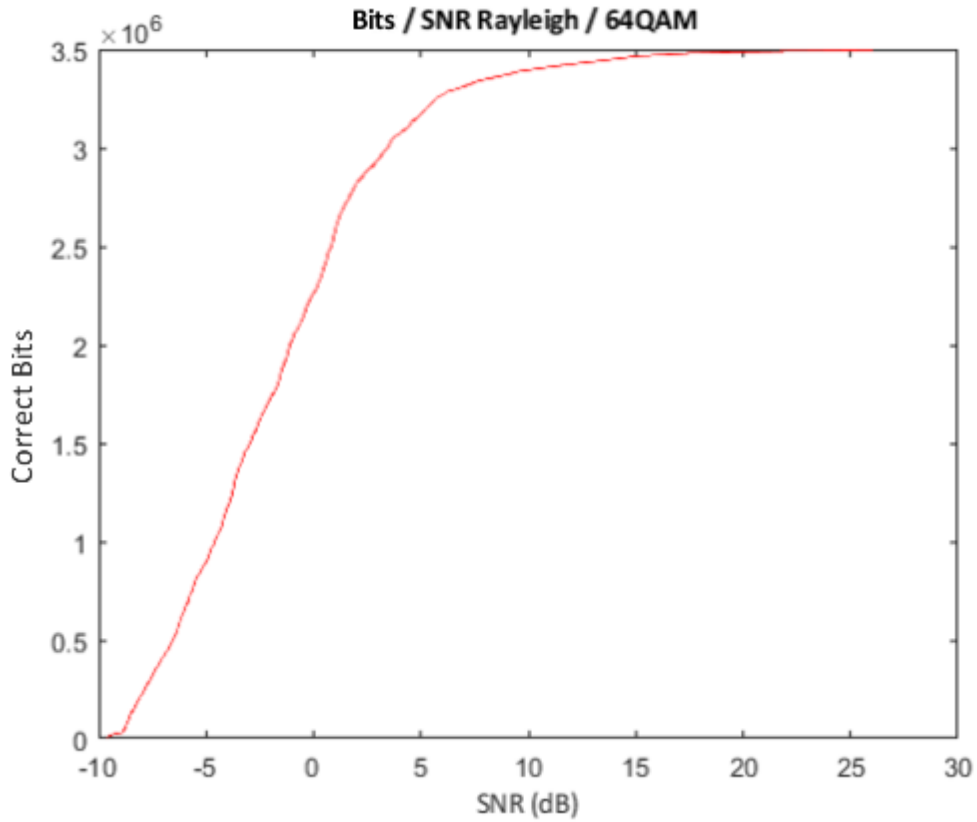
Διάγραμμα 90. Διάγραμμα Bits/SNR Rayleigh / 16 QAM



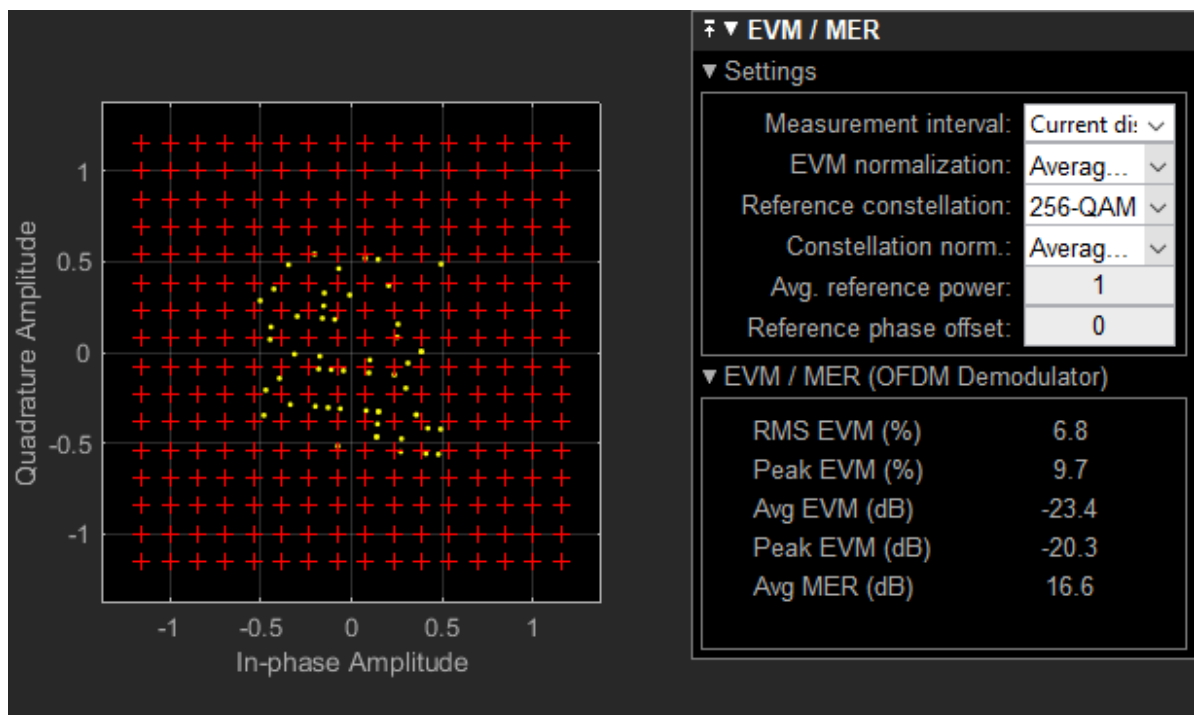
Διάγραμμα 91. Διάγραμμα αστερισμού Rayleigh / 64 QAM



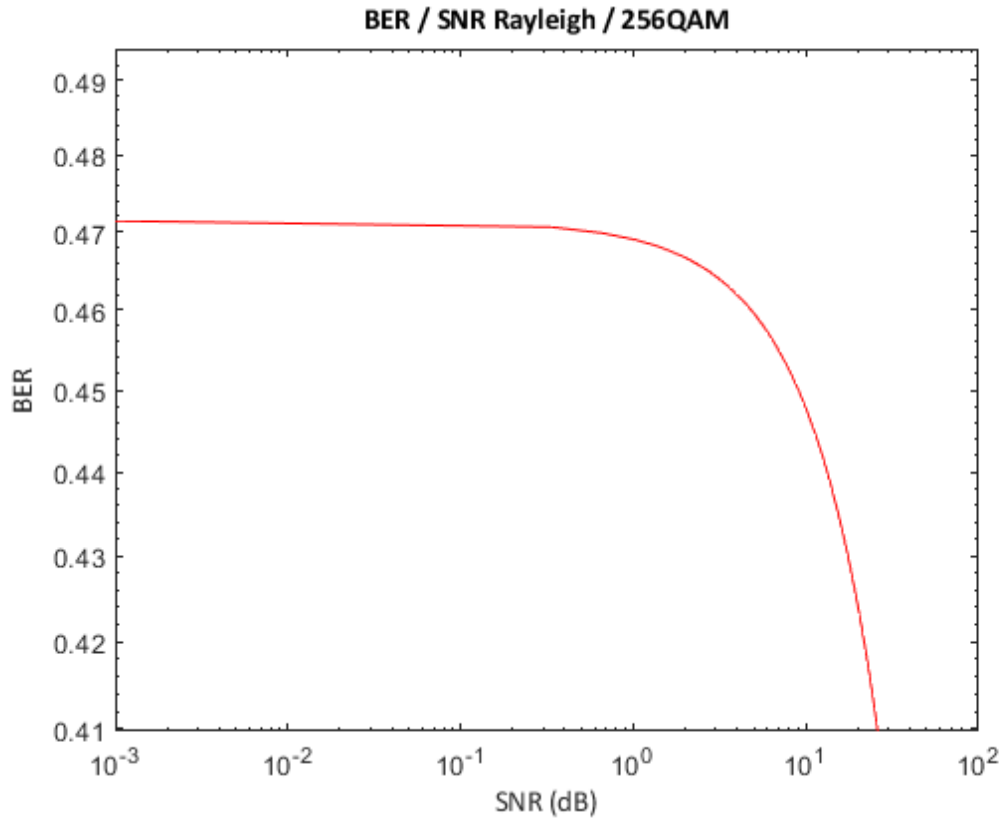
Διάγραμμα 92. Διάγραμμα BER/SNR Rayleigh / 64 QAM



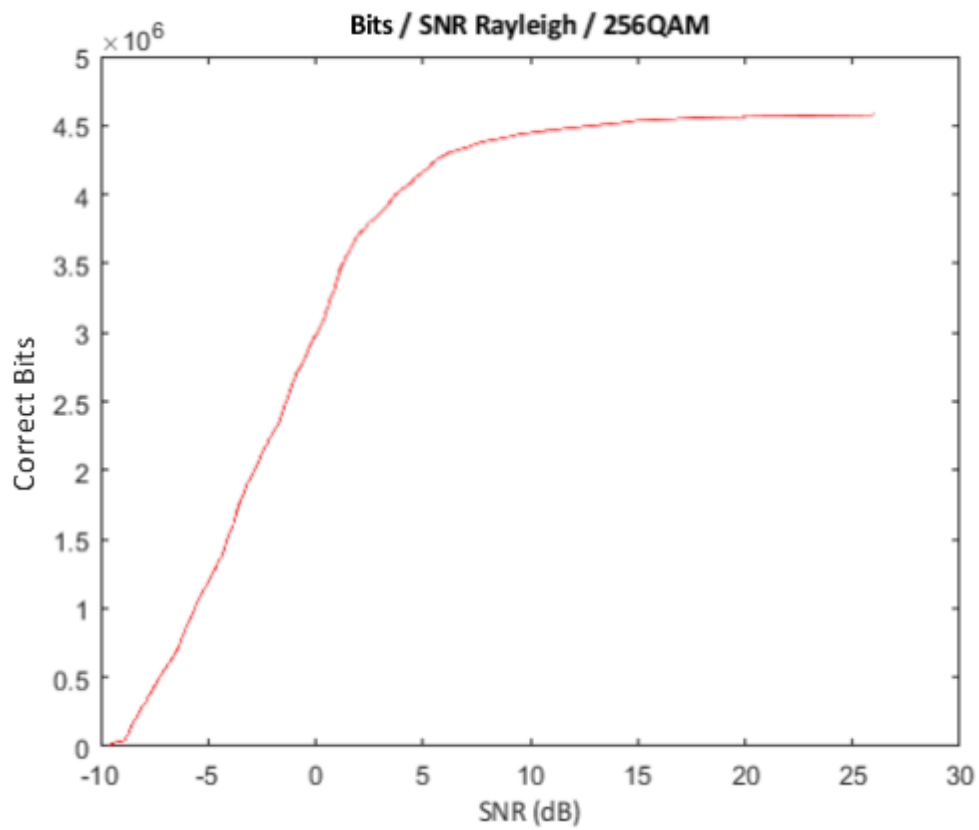
Διάγραμμα 93. Διάγραμμα Bits/SNR Rayleigh / 64 QAM



Διάγραμμα 94. Διάγραμμα αστερισμού Rayleigh / 256 QAM



Διάγραμμα 95. Διάγραμμα BER/SNR Rayleigh / 256 QAM

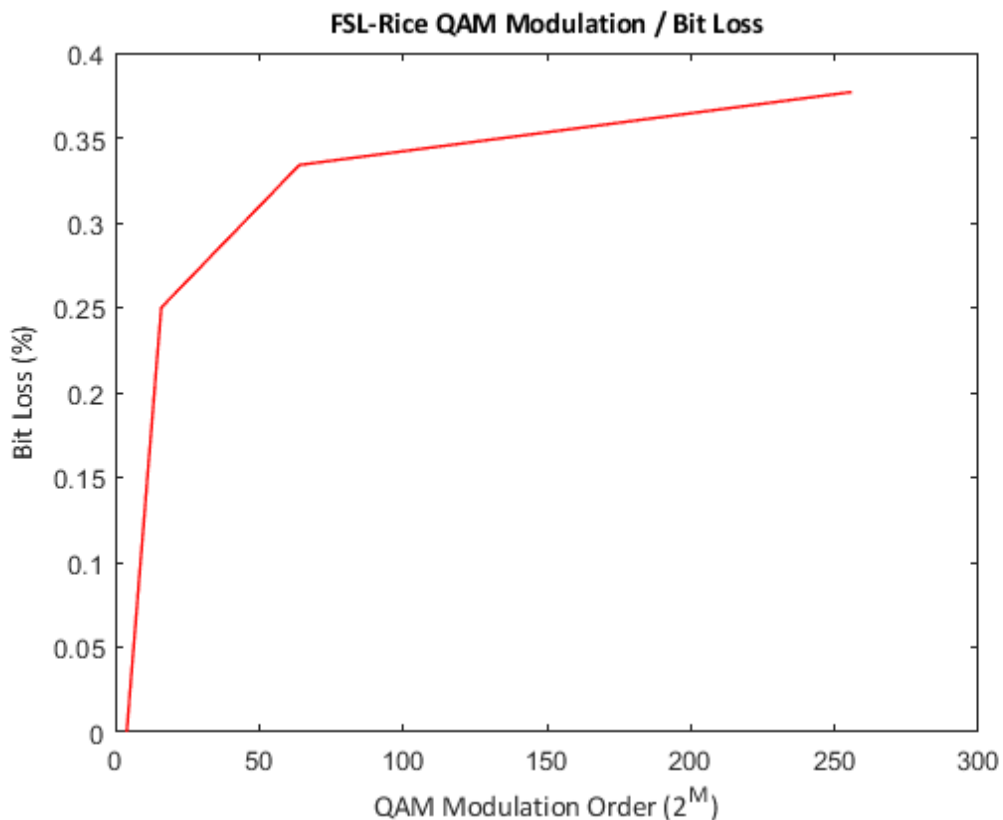


Διάγραμμα 96. Διάγραμμα Bits/SNR Rayleigh / 256 QAM

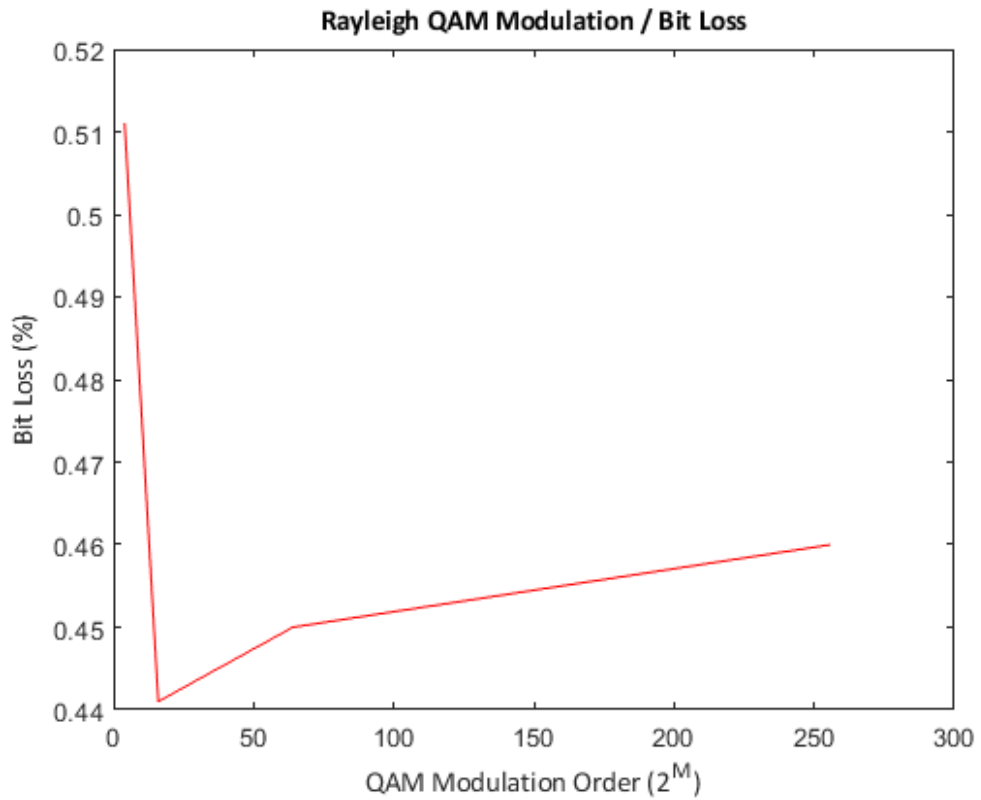
Στα διαγράμματα αστερισμού 85, 88, 91 και 94 η διασπορά των συμβόλων αυξάνεται. Η αυξανόμενη τάξη διαμόρφωσης οδηγεί σε αύξηση του αριθμού σφαλμάτων στα διαγράμματα 86, 89, 91 και 95. Για κάθε διαμόρφωση ο μέγιστος αριθμός σφαλμάτων είναι υψηλότερος σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση. Οι αριθμοί μεταδιδόμενων bits αυξάνονται στα διαγράμματα 87, 90, 93 και 96.

5.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων καναλιών Free Space Loss-Rice και Rayleigh

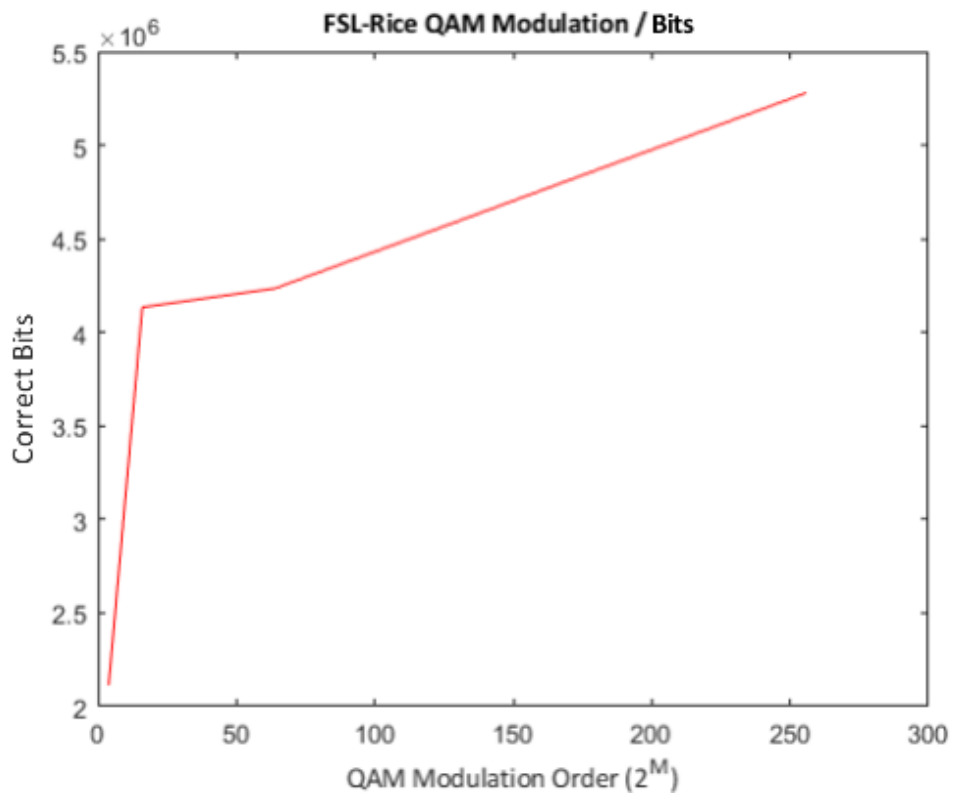
Τα διαγράμματα της συνολικής απόδοσης των συστημάτων όπου εξετάζονται παραπάνω το κανάλι Rice βάσει των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων δίνονται παρακάτω. Εξετάζεται η απόδοση των δύο συστημάτων ως προς τον αριθμό σφαλμάτων και τον ρυθμό μετάδοσης με γνώμονα την διαμόρφωση QAM. Επιπλέον συγκρίνονται τα γραφήματα των προσομοιώσεων.



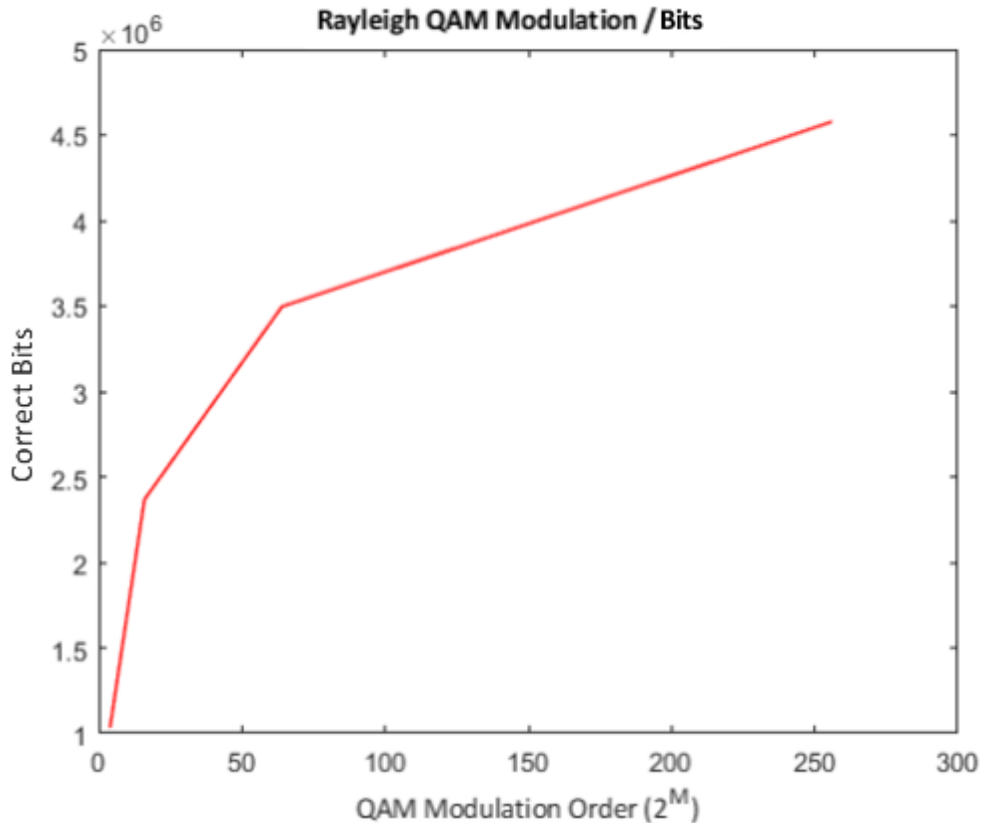
Διάγραμμα 97. Διάγραμμα Bit Loss/Modulation / Free Space Loss-Rice



Διάγραμμα 98. Διάγραμμα Bit Loss/Modulation / Rayleigh



Διάγραμμα 99. Διάγραμμα Bits/Modulation / Free Space Loss-Rice



Διάγραμμα 100. Διάγραμμα Bits/Modulation / Rayleigh

Παρατηρείται μεταξύ των διαγραμμάτων 77, 80 και 83 καθώς και 89, 92 και 95 για όλες τις ψηφιακές διαμορφώσεις υψηλότερο ποσοστό σφαλμάτων για την προσομοίωση του καναλιού Rayleigh. Για την προσομοίωση του ίδιου τύπου καναλιού απαιτείται βάσει των γραφημάτων υψηλότερο SNR για να υπάρχει μείωση του αριθμού σφαλμάτων. Για όλες τις ψηφιακές διαμορφώσεις οι μέγιστες τιμές είναι χαμηλότερες στην περίπτωση του καναλιού Free space loss / Rice.

Οι τιμές του ποσοστού απωλειών ειδικά για τις υψηλότερες διαμορφώσεις είναι μεγαλύτερες για το κανάλι τύπου Rayleigh όπως φαίνεται στα διαγράμματα 96 και 97. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ειδικά για την περίπτωση του καναλιού Rayleigh δεν υπάρχει η γραμμική αύξηση του ποσοστού όπως παρατηρείται στην προσομοίωση του σύνθετου καναλιού. Για την χαμηλής τάξης διαμόρφωση 4 QAM παρατηρείται ποσοστό απωλειών της τάξης του 50% για το κανάλι Rayleigh.

Οι αριθμοί μεταδιδόμενων bits είναι υψηλότεροι στην προσομοίωση του καναλιού Free space loss / Rice. Η διαφορά είναι πιο εμφανής στις διαμορφώσεις 64 και 256 QAM. Επιπλέον παρατηρείται διαφορά στις τιμές του SNR για τις οποίες παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές του αριθμού μετάδοσης ανά τάξη διαμόρφωσης.

Στην περίπτωση του καναλιού Rayleigh απαιτείται μεγαλύτερο SNR για την επίτευξη των τιμών.

Το πρώτο μοντέλο χρησιμοποιεί στην ουσία δύο τύπους καναλιών. Σε αυτή την περίπτωση έμφαση δίνεται στην διατήρηση οπτικής επαφής σε όλη την διαδρομή μεταξύ του σταθμού βάσης, του οχήματος και του τελικού χρήστη. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται εκμετάλλευση μια ισχυρής συνιστώσας που προκύπτει από οπτική επαφή. Ως αποτέλεσμα μηχανισμοί διάδοσης που προκύπτουν από εμπόδια θα έχουν μικρή επίδραση.

Το δεύτερο μοντέλο εισάγει τον παράγοντα της μη οπτικής επαφής. Επομένως σε ένα πραγματικό δίκτυο εμφανίζονται μηχανισμοί διάδοσης όπως ανάκλαση, διάθλαση και περίθλαση. Στις συχνότητες λειτουργίας των δικτύων 4G και 5G οι παραπάνω μηχανισμοί επιφέρουν μεγαλύτερες απώλειες από αυτές που εισάγει η απώλεια στον ελεύθερο χώρο λόγω απόστασης. Θα πρέπει επίσης να συνυπολογιστεί ότι στο δεύτερο μοντέλο παρεμποδίζεται η πρώτη ζώνη Fresnel που μεταφέρει το μεγαλύτερο ποσοστό ισχύος του σήματος. Ως αποτέλεσμα ακόμη και με σημαντική εξασθένηση που παρατηρείται μεταξύ σταθμού βάσης-μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος στο πρώτο μοντέλο παρατηρείται καλύτερη επίδοση ως προς τον ρυθμό σφαλμάτων και τον ρυθμό μετάδοσης.

Επιπλέον πρέπει να συνυπολογιστεί ότι έχουν θεωρηθεί ιδανικές συνθήκες για τις παραπάνω προσομοιώσεις. Ο δέκτης θεωρείται στατικός, γεγονός που δεν εισάγει τον παράγοντα διαλείψεων ή και σκιάσεων. Σε αντίθετη περίπτωση εκτός από το φαινόμενο του multipath fading ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης είναι δυνατό να εμφανιστούν και φαινόμενα όπως σκίαση που επιφέρουν επιπλέον μείωση της απόδοσης. Ως αποτέλεσμα της μη μοντελοποίησης των παραπάνω αστάθμητων παραγόντων είναι εφικτό να προσομοιωθεί η συμπεριφορά για οπτική ή μη επαφή.

Κύριο στοιχείο έρευνας ως προς την πορεία πτήσης ή την θέση ενός μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος είναι διατήρηση οπτικής επαφής τόσο με σταθμούς βάσης του επίγειο δικτύου, όσο και με χρήστες στο έδαφος. Ως αποτέλεσμα το μοντέλο που εξετάζεται μπορεί να δώσει μια ένδειξη για την βελτίωση της απόδοσης ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος με την ένταξη οχημάτων για χρήση ως ενδιάμεσοι σταθμοί βάσης προς τους τελικούς χρήστες.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα-Μελλοντικές κατευθύνσεις

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση των επόμενων γενεών δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει από τις παραπάνω προσομοιώσεις σχετίζεται με την ύπαρξη οπτικής επαφής στην μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η σύγκριση των καναλιών Rice και Rayleigh δείχνει ότι όταν η μετάδοση γίνεται με την ύπαρξη συνιστώσας που προέρχεται από οπτική επαφή του σήματος επιτυγχάνεται καλύτερη επίδοση από πλευράς σφαλμάτων και μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης. Η βελτίωση παρατηρείται ανεξαρτήτως της τάξης ψηφιακής διαμόρφωσης. Συνυπολογίζοντας και τον παράγοντα του SNR οι απαιτήσεις ως προς αυτό το μέγεθος για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης είναι χαμηλότερες. Η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης προς τον τελικό χρήστη σε ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς από αυτούς της τρέχουσας γενιάς δικτύων είναι βασικό στόχος των δικτύων 5G.

Το ζήτημα περιπλέκεται όμως από αντικρουόμενους παράγοντες. Ο πρώτος είναι η σχεδόν αποκλειστική χρήση μεγάλου αριθμού συσκευών όπου η χρήση υπηρεσιών δεδομένων είναι ζητούμενο. Ο δεύτερος είναι η προβλεπόμενη χρήση δικτύων 5G για μια ευρεία γκάμα λειτουργιών σε χώρους και εφαρμογές όπου μέχρι τώρα δεν υπήρχε δυνατότητα ή ανάγκη δικτύωσης. Ο τρίτος είναι η μεγαλύτερες συχνότητες λειτουργίας των δικτύων 5G που παρουσιάζει μεγαλύτερες προκλήσεις σε ζητήματα όπως εξασθένιση ή συμπεριφορά και απόδοση του συστήματος υπό δυσμενείς συνθήκες μετάδοσης.

Η αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προκλήσεων δεν είναι ένα απλό ζήτημα. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η διαρρύθμιση του περιβάλλοντος έχει αρνητικές επιπτώσεις ως προς την λειτουργία των δικτύων. Ανάλογα με την περίπτωση προκύπτουν νομικοί περιορισμοί. Αυτοί δεν επιτρέπουν την εγκατάσταση σταθμών βάσης, ή επιβάλλουν την τοποθέτησή τους σε σημεία όπου η κάλυψη που

προσφέρουν μειώνεται. Η ανάπτυξη ενός δικτύου στο οποίο η κάλυψη και η χωρητικότητα θα βασίζονται σε διευρυμένη δικτυακή υποδομή είναι χρονοβόρα και απαιτεί σημαντικά κεφάλαια. Ως αποτέλεσμα πέραν από κάποιο σημείο καθίσταται οικονομικά ασύμφορη. Το πρόβλημα επιπλέον επεκτείνεται στους τομείς της διαχείρισης του δικτύου και της επίλυσης βλαβών.

Ως αποτέλεσμα κρίνεται σκόπιμο να γίνει εκμετάλλευση στον μεγαλύτερο εφικτό βαθμό των δυνατοτήτων που προσφέρει η μετάδοση υπό συνθήκες οπτικής επαφής με έναν πιο αποδοτικό τρόπο από την εγκατάσταση υπεράριθμων σταθμών βάσης. Επιπλέον κρίνεται επιθυμητό να καταπολεμηθούν οι αρνητικές συνέπειες φαινομένων που δυσχεραίνουν την μετάδοση σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Παράδειγμα αποτελούν οι σκιάσεις και διαλείψεις σε αστικό περιβάλλον. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων ως ενδιάμεσων με την χρήση διαδρομών που χαρακτηρίζονται από οπτική επαφή μπορεί να έχει ευεργετικά αποτελέσματα ως προς την βελτίωση της κάλυψης των δικτύων. Η χρήση τους δε δείχνει πιο ελκυστική καθώς είναι εφικτή η προσωρινή τους χρήση ανάλογα με την περίπτωση ή η χρήση τους για υποκατάσταση υποδομής που έχει υποστεί βλάβη.

Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις για την ενσωμάτωση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων επεκτείνονται σε διάφορους τομείς. Ένας τομέας είναι αυτός της ασφάλειας των επικοινωνιών. Η έρευνα σε αυτόν τον τομέα περιλαμβάνει μεθόδους αποφυγής υποκλοπών [68]. Ένας άλλος τομέας που ερευνάται είναι η δημιουργία μιας πλατφόρμας κρυφής μνήμης (cache). Το ενδιαφέρον σε αυτή την κατεύθυνση συνάδει με την μεγάλη ζήτηση που υπάρχει για υπηρεσίες κατ'απαίτηση προβολής πολυμέσων (on-demand multimedia streaming). Ερευνάται η δυνατότητα αποθήκευσης περιεχομένου και μετάδοσής του. Μια τέτοια υπηρεσία αναμένεται να διευκολύνει χρήστες που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα, όπως για παράδειγμα οχήματα [69].

Ίσως η πιο σημαντική μελλοντική κατεύθυνση σχετίζεται με την εκμετάλλευση του φάσματος μεταξύ 30 και 300 GHz. Η χρήση χιλιοστομετρικού μήκους κύματος εκτιμάται ότι μπορεί να ωθήσει τους ρυθμούς μετάδοσης σε ρυθμούς πολύ μεγαλύτερους από το 1 Gbps. Η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης σε μια τέτοια τάξη μεγέθους θα επιτρέψει υπηρεσίες όπως προβολής πολυμέσων πολύ υψηλής ανάλυσης και εφαρμογές εικονικής ή αυξημένης πραγματικότητας. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι μια τέτοια υλοποίηση έχει πολύ σημαντικές προκλήσεις λόγω

υψηλότερης εξασθένισης και μεγαλύτερης πιθανότητας διακοπής. Ωστόσο οι μικρότερες κεραιές που απαιτούνται επιτρέπουν την τοποθέτηση συστοιχιών κεραιών και την υιοθέτηση τεχνικών beamforming [70]. Επίσης αξία αναφοράς είναι η έρευνα στην προσθήκη δορυφόρων. Αναφερόμενη με τον όρο B5G (Beyond 5G), είναι η έρευνα στην υιοθέτηση ενός μοντέλου δικτύου όπου δορυφόροι σε διάφορες τροχιές επικοινωνούν μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα ή και απευθείας με δέκτες στην επιφάνεια της γης. Τελικός στόχος είναι η επέκταση της κάλυψης στα δίκτυα 5G χωρίς να υπάρχουν οι γεωγραφικοί περιορισμοί [71]. Εκτιμάται ότι τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα θα χρησιμοποιούνται για την εγκαθίδρυση ζεύξεων προς το έδαφος με σκοπό την αντιμετώπιση των προβλημάτων που παρουσιάζουν οι δορυφορικές ζεύξεις.

Μια επιπλέον μελλοντική κατεύθυνση που ερευνάται είναι η χρήση μηχανικής μάθησης. Αποτελεί ένα ξεχωριστό μέρος στο ευρύτερο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης. Με την χρήση αλγόριθμων συσχετίζονται δεδομένα για μια τρέχουσα κατάσταση με δεδομένα που σχετίζονται με προηγούμενες ενέργειες. Το αποτέλεσμα είναι ότι μια μηχανή μπορεί να προσαρμοστεί στις τρέχουσες συνθήκες χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να είναι χρήσιμη για ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών όπου ένας μεγάλος αριθμός συσκευών προσπαθεί να χρησιμοποιήσει τους πόρους του δικτύου με ένα δυναμικό τρόπο. Η χρήση της θα επιτρέψει την παρακολούθηση, ανάλυση και πρόβλεψη παραμέτρων λειτουργίας, όπως συμπεριφορά ασύρματων καναλιών, μοτίβα κίνησης δεδομένων, θέσης και αριθμού ενεργών χρηστών [72]. Οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες [73]. Η επιτηρούμενη μάθηση χρησιμοποιεί δύο ομάδες δεδομένων όπου τα δεδομένα εισόδου και τα επιθυμητά δεδομένα εξόδου είναι διαθέσιμα. Η μη επιτηρούμενη μάθηση χρησιμοποιεί δεδομένα μόνο για εκπαίδευση. Σε αυτά εφαρμόζει τεχνικές ανακάλυψης μοτίβων. Η ημιεπιτηρούμενη μάθηση χρησιμοποιεί αλγόριθμους στο σύνολο των ειδών δεδομένων. Η ενισχυτική μάθηση χρησιμοποιεί την μέθοδο δοκιμών και αποτελεσμάτων (trial and error). Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται αλλάζουν βασιζόμενοι σε λύσεις που εφαρμόστηκαν σε προηγούμενες περιπτώσεις.

Βιβλιογραφία

- [1] https://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2015/27.aspx.
- [2] <https://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/3gpp-release-15-overview>
- [3] <https://www.ericsson.com/493cdb/assets/local/reports-papers/ericsson-technology-review/docs/2020/5g-nr-evolution.pdf>
- [4] https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1901-imt2020_news.
- [5] https://www.itu.int/en/ITU-T/gsc/19/Documents/201507/GSC-19_023_6_4_Summary_of_IMT-2020_5G_session.pptx.
- [6] Itu.int. (2018). Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges. [online] Available at: https://www.itu.int/en/ITU-D/Documents/ITU_5G_REPORT-2018.pdf [Accessed 8 Jul. 2019].
- [7] 3GPP TS 38.104 V15.5.0 (2019-03). (2019). [PDF] Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.104/38104-f50.zip.
- [8] W. Guan, X. Wen, L. Wang, Z. Lu and Y. Shen, "A Service-Oriented Deployment Policy of End-to-End Network Slicing Based on Complex Network Theory," in IEEE Access, vol. 6, pp. 19691-19701, 2018.
- [9] A. Hakiri (LAAS), P. Berthou (UPS, LAAS), "Leveraging SDN for The 5G Networks: Trends, Prospects and Challenges", <https://arxiv.org/abs/1506.02876>.
- [10] Wang, Gang & Feng, Gang & Qin, Shuang & Wen, Ruihan. (2016). Efficient Traffic Engineering for 5G Core and Backhaul Networks. Journal of Communications and Networks. 19. 10.1109/JCN.2017.000010.
- [11] <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>.
- [12] Y. Zeng, R. Zhang and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges," in IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, May 2016.
- [13] V. Sharma, M. Bennis and R. Kumar, "UAV-Assisted Heterogeneous Networks for Capacity Enhancement," in IEEE Communications Letters, vol. 20, no. 6, pp. 1207-1210, June 2016.

- [14] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis and M. Debbah, "Unmanned Aerial Vehicle With Underlaid Device-to-Device Communications: Performance and Tradeoffs," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 6, pp. 3949-3963, June 2016.
- [15] M. Dikshtein, R. Duan, Y. Liang and S. Shamai, "MIMO Gaussian State-Dependent Channels with a State-Cognitive Helper" *Entropy* 2019, 21(3), 273; <https://doi.org/10.3390/e21030273>.
- [16] A. Benjebbour, Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Li, A. Harada, T. Nakamura, "Concept and Practical Considerations of Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) for Future Radio Access", *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2013)*, November 2013.
- [17] M. Aldababsa, M. Toka, S. Gökçeli, G. K. Kurt, O. Kucur, "A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, Article ID 9713450, 24 pages, 2018.
- [18] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan and V. K. Bhargava, "A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2181-2195, Oct. 2017.
- [19] Y. Wang, B. Ren, S. Sun, S. Kang and X. Yue, "Analysis of non-orthogonal multiple access for 5G," in *China Communications*, vol. 13, no. Supplement2, pp. 52-66, N/A 2016.
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Machine_to_machine.
- [21] https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/102690/01.02.01_60/ts_102690v010201p.pdf.
- [22] E. Lukau, "5G Cellular Network for Machine to Machine Communication" 10.13140/RG.2.1.4193.3520, February 2014.
- [23] C. Xu, L. Song and Z. Han, "Resource Management for Device-to-Device Underlay Communication" *arXiv.org*, Computer Science, Cornell University.
- [24] U. N. Kar and D. KumarSanyal, "An overview of device-to-device communication in cellular networks" in *ICT Express Magazine*, vol. 4, no. 4, pp. 203-208, December 2018.
- [25] V. Sharma, M. Bennis and R. Kumar, "UAV-Assisted Heterogeneous Networks for Capacity Enhancement," in *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 6, pp. 1207-1210, June 2016.

- [26] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Drone small cells in the clouds: Design, deployment and performance analysis," in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), Dec. 2015, pp. 1–6.
- [27] L. Tongxin, S. Min, L. Ruiling, L. Junyu, and L. Jiandong, "UAV Assisted Heterogeneous Wireless Networks: Potentials and Challenges" [Online]. Available: https://res-www.zte.com.cn/mediare/magazine/publication/com_en/article/201802/LITongxin.pdf
- [28] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Drone small cells in the clouds: Design, deployment and performance analysis," in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), Dec. 2015, pp. 1–6.
- [29] A. Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, "Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments," in Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference, Austin, Tx, USA, Dec.2014.
- [30] F. Jiang and A. L. Swindlehurst, "Optimization of UAV heading for the ground-to-air uplink," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 30, no. 5, pp. 993–1005, June 2012.
- [31] C. D. Franco and G. Buttazzo, "Energy-Aware Coverage Path Planning of UAVs," 2015 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, Vila Real, 2015, pp. 111-117.
- [32] T. M. Cabreira, L. B. Brisolará, and J. P. Ferreira, "Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles." Drones 3, no. 1: 4, 2019.
- [33] E. Galceran, and M. Carreras, "A survey on coverage path planning for robotics", Robot. Auton. Syst. 2013, 61, 1258–1276.
- [34] G. Öst, G. "Search Path Generation with UAV Applications Using Approximate Convex Decomposition", Master's Thesis, Linköpings Universitet, Linköpings, Sweden, 2012.
- [35] I. Maza and A. Ollero, "Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms", In Distributed Autonomous Robotic Systems 6; Springer: Berlin, Germany, 2007; pp. 221–230.
- [36] P. Vincent and I. Rubin, I. "A Framework and Analysis for Cooperative Search Using UAV Swarms", In Proceedings of the A Framework and Analysis for Cooperative Search Using UAV Swarms, Nicosia, Cyprus, 14–17 March 2004; pp. 79–86.

- [37] B. Uragun, "Energy Efficiency for Unmanned Aerial Vehicles," 2011 10th International Conference on Machine Learning and Applications and Workshops, Honolulu, HI, 2011, pp. 316-320.
- [38] L. J. Dorr and A. Duquette, "Unmanned Aircraft Systems," in Unmanned Aircraft Systems Regulations & Policies Title 14 Code of Federal Regulations, F. A. A. N.-F. sheets, Ed., ed. Washington, DC 20591 USA: FAA, 2010.
- [39] K. Dalamagkidis, K. P. Valavanis, and L. A. Piegl, "On unmanned aircraft systems issues, challenges and operational restrictions preventing integration into the National Airspace System," Progress in Aerospace Sciences, vol. 44, pp. 503-519, 2008.
- [40] K. Li, W. Ni, X. Wang, R. P. Liu, S. S. Kanhere, and S. Jha, "Energy-efficient cooperative relaying for unmanned aerial vehicles," IEEE Trans. Mobile Comput., vol. 15, no. 6, pp. 1377–1386, Jun. 2016.
- [41] L. Ruan et al., "Energy-efficient multi-UAV coverage deployment in UAV networks: A game-theoretic framework," in China Communications, vol. 15, no. 10, pp. 194-209, Oct. 2018.
- [42] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage," IEEE Commun. Lett., vol. 20, no. 8, pp. 1647–1650, Aug. 2016.
- [43]https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/133400_133499/133401/15.04.00_60/ts_133401v150400p.pdf
- [44] O. Zouhri, Oumhany, S. Benhadou and H. Medromi, "A New Adaptive Security Protocol for UAV Network", May 2016.
- [45] X. Sun, Xiaofang, D. W. K. Ng, D. Zhiguo and Y. Xu "Physical Layer Security in UAV Systems: Challenges and Opportunities"(2019). [PDF] Available at: <https://arxiv.org/pdf/1909.06785.pdf>.
- [46] X. Sun, C. Shen, T.-H. Chang, and Z. Zhong, "Joint resource allocation and trajectory design for UAV-aided wireless physical layer security," in Proc. IEEE Globecom workshops, Abu Dhabi, Dec. 2018.
- [47] N. Zhang, S. Zhang, P. Yang, O. Alhussein, W. Zhuang and X. S. Shen, "Software Defined Space-Air-Ground Integrated Vehicular Networks: Challenges and Solutions," in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 7, pp. 101-109, July 2017.

- [48] M. F. Sohail, C. Y. Leow and S. Won, "Non-Orthogonal Multiple Access for Unmanned Aerial Vehicle Assisted Communication," in IEEE Access, vol. 6, pp. 22716-22727, 2018.
- [49] T. Hou, Y. Liu, X. Sun, Z. Song and Y. Chen, "Multiple antenna aided NOMA in UAV networks: A stochastic geometry approach", <https://arxiv.org/abs/1805.04985> .
- [50] F. Cui, Y. Cai, Z. Qin, M. Zhao and G. Y. Li, "Joint Trajectory Design and Power Allocation for UAV-Enabled Non-Orthogonal Multiple Access Systems," 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, pp. 1-6.
- [51] Alsharoa, Ahmad & Yuksel, Murat. (2018). UAV-Direct: Facilitating D2D Communications for Dynamic and Infrastructure-less Networking. 57-62. 10.1145/3213526.3213537.
- [52] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis and M. Debbah, "Unmanned Aerial Vehicle With Underlaid Device-to-Device Communications: Performance and Tradeoffs," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, no. 6, pp. 3949-3963, June 2016.
- [53] X. Liu and N. Ansari, "Resource Allocation in UAV-Assisted M2M Communications for Disaster Rescue," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 8, no. 2, pp. 580-583, April 2019.
- [54] Seybold John S.(2005) "Introduction to RF Propagation", John Wiley and Sons, 2005 pp. 3–10.
- [55] <https://www.slideshare.net/ShreeKrupa1/multichannel-fading>
- [56] Saunders, Simon R. ,Aragón-Zavala A. "Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems", 2nd ed., John Wiley and Sons, 2007 pp. 187-205.
- [57]https://www.researchgate.net/figure/Combined-effects-of-distance-loss-shadowing-and-multipath-fading_fig1_220201457
- [58] https://en.wikipedia.org/wiki/Free-space_path_loss
- [59] <http://risorse.dei.polimi.it/dsp/tlc/position.htm>
- [60] <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr03/rayleigh.htm>
- [61]<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14237-rice-rician-distribution>
- [62] <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr03/ricepdf/rice.htm>
- [63]<https://www.electronics-notes.com/articles/radio/modulation/quadrature-amplitude-modulation-types-8qam-16qam-32qam-64qam-128qam-256qam.php>
- [64] <https://uk.mathworks.com/help/comm/ug/constellation-visualization.html>

- [65] <https://arimas.com/140-lte-radio-interface-overview/>
- [66] https://en.wikipedia.org/wiki/5G_NR_frequency_bands#Frequency_bands_and_channel_bandwidths.
- [67] https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136104/09.04.00_60/ts_136104v090400p.pdf.
- [68] G. Zhang, Q. Wu, M. Cui, and R. Zhang, "Securing UAV communications via joint trajectory and power control," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 2, pp. 1376–1389, Feb. 2019
- [69] M. Chen, M. Mozaffari, W. Saad, C. Yin, M. Debbah, and C. S. Hong, "Caching in the sky: Proactive deployment of cache-enabled unmanned aerial vehicles for optimized quality-of-experience," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no.5, pp. 1046–1061, May 2017.
- [70] Z. Xiao, P. Xia, and X.-G. Xia, "Enabling UAV cellular with millimeter-wave communication: Potentials and approaches," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 66–73, May 2016.
- [71] Satellite and Terrestrial Network for 5G. [(accessed on 29 July 2019)];2017 Available online: <https://www.sat5g-project.eu/>
- [72] P.S. Bithas, E. T. Michailidis, N. Nomikos, D. Vouyioukas and A.G. & Kanatas, "A Survey on Machine-Learning Techniques for UAV-Based Communications." *Sensors* (Basel, Switzerland) vol. 19,23 5170. 26 Nov. 2019
- [73] Alpaydin, E. *Introduction to Machine Learning*; MIT Press: Cambridge, MA, USA,