



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Μελέτη και Προσομοίωση Οπτικών Ασύρματων Μεταδόσεων  
για Ευρυζωνικά Δίκτυα 5G/6G**

*ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ*

Της

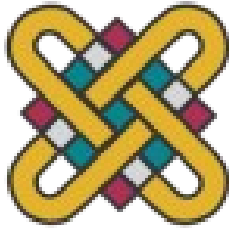
**ΠΑΝΤΑΖΟΠΟΥΛΟΥ ΙΣΙΔΩΡΑΣ**

**ΑΕΜ 4143**

**Επιβλέπων : Βαγιωνάς Χρήστος**  
**Επιστημονικός Συνεργάτης**

Καστοριά Οκτώβριος - 2023





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Μελέτη και Προσομοίωση Οπτικών Ασύρματων Μεταδόσεων  
για Ευρυζωνικά Δίκτυα 5G/6G**

*ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ*

της

**ΠΑΝΤΑΖΟΠΟΥΛΟΥ ΙΣΙΔΩΡΑ**

(ΑΕΜ: 4143 )

**Επιβλέπων : Βαγιωνάς Χρήστος**  
**Επιστημονικός Συνεργάτης**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 4 / 10 /2023

.....  
Βέργαδος Δημήτριος  
Αναπλ. Καθηγητής

.....  
Βαρδάκας Ιωάννης  
Αναπλ. Καθηγητής

.....  
Δημόκας Νικόλαος  
Επικ. Καθηγητής

Καστοριά **Οκτώβριος - 2023**

Copyright © 2023 – ΠΑΝΤΑΖΟΠΟΥΛΟΥ ΙΣΙΔΩΡΑ

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν αποκλειστικά τον συγγραφέα και δεν αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Ως συγγραφέας της παρούσας εργασίας δηλώνω πως η παρούσα εργασία δεν αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και δεν περιέχει υλικό από μη αναφερόμενες πηγές.



Η παρούσα μελέτη εστιάζεται στην ανάλυση, τη μοντελοποίηση καθώς και τη προσομοίωση αναλογικών οπτικών ασύρματων μεταδόσεων για τα ευρυζωνικά δίκτυα 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> γενιάς. Οι εξελισσόμενες τεχνολογίες των επικοινωνιών απαιτούν πλέον αποτελεσματικές λύσεις για την αύξηση της φασματικής απόδοσης των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων με στόχο την επίτευξη ευρυζωνικών μεταδόσεων σε οπτικά ασύρματα συστήματα χαμηλού κόστους για τη βελτίωση των δικτύων. Στα πρώτα κεφάλαια δίνεται μια σύντομη περιγραφή των δικτύων της 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> γενιάς, το όραμα, τις εφαρμογές και τις ταχύτητες μετάδοσης που στοχεύουν να επιτύχουν. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση όλων των εννοιών που αφορούν την πειραματική υλοποίηση της πτυχιακής με χρήση υπολογιστικής προσομοίωσης για την αξιολόγηση των οπτικών ασύρματων μεταδόσεων μέσω οπτικής ίνας, τη μελέτη διαφορετικών συστημάτων διαμόρφωσης σημάτων καθώς και την ανάλυση της ποιότητας των τελικών λαμβανόμενων σημάτων με βάση τα μετρικά Signal to Noise Ratio (SNR), Error Vector Magnitude (EVM), Symbol Error Rate (SER), καθώς και την αναπαράσταση των διαγραμμάτων αστερισμού και του φάσματος για κάθε επιμέρους σύστημα. Επίσης, σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεωρία της διαμόρφωσης διπλής πλευρικής ζώνης με παρουσία φέροντος και κάποια στοιχεία οπτικών πομποδεκτών και οπτικών ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, όπως η διαμόρφωση QPSK και QAM. Στα τελευταία κεφάλαια παρουσιάζονται οι πειραματικές υλοποιήσεις της πτυχιακής μέσω του VPI με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των μελετών, καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν για οπτικές ασύρματες μεταδόσεις ραδιοσημάτων για τις συχνότητες 3.5GHz και 28GHz που κεντρίζουν το ενδιαφέρον των δικτύων 5G/6G

**Λέξεις Κλειδιά:** Ασύρματη–Οπτική μετάδοση, Δίκτυα 5<sup>ης</sup>/6<sup>ης</sup> γενιάς, Τηλεπικοινωνιακά συστήματα, Ανώτερα Συστήματα Διαμόρφωσης

## Abstract

---

This study focuses on the analysis, modelling and simulation of fiber wireless transmissions using analog Radio over Fiber transmission schemes for the fifth (5G) and sixth generation (6G) broadband networks. The evolving communication technologies now require more spectrally efficient solutions to increase broadband capacity transmission when operated on cost-effective fiber wireless telecommunication systems. The first chapters aim to provide an overview of the 5<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> generation networks and their envisioned applications and data-rates and Key Performance Indicators (KPIs) to be deployed. In the next chapter, the concepts and metrics investigated and studied within the experimental implementation of the thesis using numerical simulations are described, such as transmission through fiber, signal modulation schemes and quality analysis Signal to Noise Ratio (SNR), Error Vector Magnitude (EVM), Symbol Error Rate (SER), as well as the optical spectrum and constellation diagrams. Moreover, in this chapter the theoretical analysis of the double sideband carrier modulation is presented, followed by the description of the modulation systems used in the fiber wireless telecommunication systems, including QPSK and QAM. In the last chapter, the experimental implementations of the thesis through numerical simulations at VPI, along with the results of the studies carried out, including analog Radio over Fiber transmissions across single mode fiber lengths up to 80km and at the frequencies of 3.5 GHz and 28GHz that are of interest to 5G/6G, while the last chapter addresses the main conclusions of this thesis.

**Key Words:** Fiber Wireless Transmission, 5G/6G networks, Telecommunication Systems, Advanced Modulation formats.

# Πίνακας Περιεχομένων

---

1. Εισαγωγή.....	11
2. Δίκτυα 5 <sup>ης</sup> και 6 <sup>ης</sup> γενιάς.....	15
2.1 Δίκτυα 5 <sup>ης</sup> γενιάς (5G).....	15
2.2 Δίκτυο 6G.....	16
3. Ανάλυση βασικών εννοιών των δικτύων 5G/6G.....	21
3.1 Νέες συχνότητες που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα 5 <sup>ης</sup> γενιάς.....	21
3.2 Χιλιοστομετρικό κύμα (mmWave).....	22
3.2.1 Χαρακτηριστικά των επικοινωνιών mmWave.....	23
3.3 Αναλογικές οπτικές ασύρματες μεταδόσεις Radio over Fiber (RoF).....	24
4. Τηλεπικοινωνιακά συστήματα διαμόρφωση και μετρικά απόδοσης.....	26
4.1 QPSK.....	26
4.2 QAM.....	28
4.3 Διάγραμμα αστερισμού.....	30
4.4 Optical spectrum.....	31
4.5 Signal to noise Ratio (SNR).....	31
4.6 Error Vector Magnitude (EVM).....	33
4.7 Symbol Error Rate (SER).....	34
4.8 Διαμόρφωση διπλής πλευρικής ζώνης με παρουσία φέροντος.....	36
5. Πειραματικές υλοποιήσεις προσομοίωσης.....	38
5.1 Υλοποίηση της θεωρητικής συνάρτησης του power fading.....	38
5.2 Υλοποίηση διασποράς ίνας μέσω του Matlab.....	40
4.2.1 Γραφήματα θεωρίας με βάση τον κώδικα του Matlab.....	40
5.3 Υλοποίηση πειραματικών μετρήσεων οπτικής ασύρματης μετάδοσης στο VPI.....	44
5. Αποτελέσματα μελετών της πτυχιακής.....	49
5.1 Πείραμα 1.....	49
5.2 Πείραμα 2.....	51
5.3 Πείραμα 3.....	56
5.4 Πείραμα 4.....	59
6. Μετάδοση πολλαπλών (8) πομποδεκτών και φιλτράρισμα της μίας ροής.....	61
7. Συμπεράσματα πτυχιακής.....	62
Βιβλιογραφία.....	63

## Λίστα Εικόνων

---



<a href="#">Εικόνα 1 εξέλιξη των 5G κεραιές, τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης και υπηρεσίες.....</a>	<a href="#">13</a>
<a href="#">Εικόνα 2 Τρείς εφαρμογές των 5G δικτύων.....</a>	<a href="#">16</a>
<a href="#">Εικόνα 3 Οι διαφορές των εφαρμογών ανάμεσα στο 5G και 6G.....</a>	<a href="#">19</a>
<a href="#">Εικόνα 4 Η εξέλιξη από το 5G στο 6G (<a href="https://telecoms.com/">https://telecoms.com/</a>).....</a>	<a href="#">20</a>
<a href="#">Εικόνα 5 Οι καινούριες συχνότητες των 5G/6G.....</a>	<a href="#">22</a>
<a href="#">Εικόνα 6 Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος RoF.....</a>	<a href="#">25</a>
<a href="#">Εικόνα 7 QPSK.....</a>	<a href="#">27</a>
<a href="#">Εικόνα 8 16-QAM.....</a>	<a href="#">29</a>
<a href="#">Εικόνα 9 16Bit QAM.....</a>	<a href="#">31</a>
<a href="#">Εικόνα 10 Αναπαράσταση του SNR και ο τύπος.....</a>	<a href="#">33</a>
<a href="#">Εικόνα 11 EVM.....</a>	<a href="#">34</a>
<a href="#">Εικόνα 12 Αναπαράσταση του SER.....</a>	<a href="#">35</a>
<a href="#">Εικόνα 13 Διαμόρφωση διπλής πλευρικής ζώνης.....</a>	<a href="#">36</a>
<a href="#">Εικόνα 14 Σύστημα οπτικής ασύρματης μετάδοσης.....</a>	<a href="#">37</a>
<a href="#">Εικόνα 15 Συνάρτηση της διασποράς ίνας.....</a>	<a href="#">38</a>
<a href="#">Εικόνα 16 διάγραμμα αναπαράστασης διασποράς ίνας.....</a>	<a href="#">39</a>
<a href="#">Εικόνα 17 Κώδικας Matlab.....</a>	<a href="#">40</a>
<a href="#">Εικόνα 18 Πείραμα 1.....</a>	<a href="#">41</a>
<a href="#">Εικόνα 19 Πείραμα 2.....</a>	<a href="#">42</a>
<a href="#">Εικόνα 20 Πείραμα 3.....</a>	<a href="#">43</a>
<a href="#">Εικόνα 21 Πείραμα 4.....</a>	<a href="#">43</a>
<a href="#">Εικόνα 22 Σύστημα στο VPI.....</a>	<a href="#">44</a>
<a href="#">Εικόνα 23 Laser.....</a>	<a href="#">45</a>
<a href="#">Εικόνα 24 transmitter.....</a>	<a href="#">45</a>
<a href="#">Εικόνα 25 Modulator.....</a>	<a href="#">45</a>
<a href="#">Εικόνα 26 fiber.....</a>	<a href="#">46</a>
<a href="#">Εικόνα 27 Photodiode.....</a>	<a href="#">46</a>
<a href="#">Εικόνα 28 Analyzer.....</a>	<a href="#">46</a>
<a href="#">Εικόνα 29 Phaseshift.....</a>	<a href="#">47</a>
<a href="#">Εικόνα 30 radio receiver.....</a>	<a href="#">47</a>
<a href="#">Εικόνα 31 Analyzer 2D.....</a>	<a href="#">47</a>
<a href="#">Εικόνα 32 VPI.....</a>	<a href="#">48</a>
<a href="#">Εικόνα 33 Διάγραμμα αστερισμού.....</a>	<a href="#">49</a>
<a href="#">Εικόνα 34 Οπτικό φάσμα.....</a>	<a href="#">50</a>
<a href="#">Εικόνα 35 IF5G - EVM.....</a>	<a href="#">51</a>
<a href="#">Εικόνα 36 IF5G- SER.....</a>	<a href="#">51</a>
<a href="#">Εικόνα 37 Διάγραμμα αστερισμού.....</a>	<a href="#">53</a>
<a href="#">Εικόνα 38 Οπτικό φάσμα (Πείραμα 2).....</a>	<a href="#">54</a>
<a href="#">Εικόνα 39 fiberlength - SER( Πείραμα 2).....</a>	<a href="#">54</a>
<a href="#">Εικόνα 40 Fiberlength - EVM (Πείραμα 2).....</a>	<a href="#">55</a>
<a href="#">Εικόνα 41 Διάγραμμα αστερισμού(Πείραμα 3).....</a>	<a href="#">56</a>
<a href="#">Εικόνα 42 Οπτικό Φάσμα (Πείραμα 3).....</a>	<a href="#">57</a>
<a href="#">Εικόνα 43 fiberlength- SER (Πείραμα 3).....</a>	<a href="#">58</a>
<a href="#">Εικόνα 44 Fiberlentgh - EVM (Πείραμα 3).....</a>	<a href="#">59</a>
<a href="#">Εικόνα 45 Διάγραμμα αστερισμού(Πείραμα 4).....</a>	<a href="#">59</a>
<a href="#">Εικόνα 46 Οπτικό Φάσμα(Πείραμα 4).....</a>	<a href="#">59</a>
<a href="#">Εικόνα 47 Fiberlength -SER(Πείραμα 4).....</a>	<a href="#">60</a>
<a href="#">Εικόνα 48 Fiberlength- EVM (Πείραμα 4).....</a>	<a href="#">60</a>
<a href="#">Εικόνα 49 Μετάδοση 8 χρηστών.....</a>	<a href="#">61</a>

# 1. Εισαγωγή

Οι ασύρματες επικοινωνίες είναι ένα ταχύτατα αναπτυσσόμενο τμήμα του κλάδου των επικοινωνιών, ιδιαίτερος εν όψει της προοπτικής ανάπτυξης των δικτύων 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> γενιάς. Ως εκ τούτου, έχει τραβήξει την προσοχή των μέσων ενημέρωσης και τη φαντασία του κοινού. Τα κινητά τηλέφωνα και οι έξυπνες φορητές συσκευές έχουν γνωρίσει εκθετική ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία και η ανάπτυξη αυτή συνεχίζεται αμείωτη με περισσότερους από ένα δισεκατομμύριο χρήστες κινητών τηλεφώνων παγκοσμίως. Πράγματι, τα κινητά τηλέφωνα έχουν γίνει ένα κρίσιμο επιχειρηματικό εργαλείο και μέρος της καθημερινής ζωής στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες και αντικαθιστούν γρήγορα τα απαρχαιωμένα ενσύρματα συστήματα σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες. Επιπλέον, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι σήμερα έτοιμα να συμπληρώσουν ή να αντικαταστήσουν τα ενσύρματα δίκτυα σε πολλές επιχειρήσεις και πανεπιστημιούπολεις. Error: Reference source not found

Στόχος της εξέλιξης της οργάνωσης και της επικοινωνίας είναι η υλοποίηση σε πραγματικό χρόνο, οι υψηλές ταχύτητες και τα αξιόπιστα δεδομένα σε όλο τον κόσμο και ανά πάσα στιγμή. Για να πραγματοποιηθεί αυτός ο στόχος, οι ασύρματες ευρυζωνικές επικοινωνίες όσο και οι επικοινωνίες των οπτικών ινών συμπληρώνουν η μία την άλλη, στοχεύοντας να συνδυάσουν την ευρυζωνική μετάδοση με την πανταχού παρούσα κάλυψη, για την καλύτερη παροχή υπηρεσιών. Η επικοινωνία με οπτικές ίνες έχει εξαιρετικά μεγάλη ικανότητα μετάδοσης σε τεράστιες αποστάσεις λόγω των χαμηλών απωλειών και της χωρητικότητας, αλλά έχει λιγότερη ευελιξία καθώς είναι ενσύρματο και κυματοδηγούμενο μέσο διάδοσης και δεν μπορεί να πραγματοποιήσει πανταχού παρούσα κάλυψη. Η απομακρυσμένη ασύρματη επικοινωνία από την άλλη μπορεί να παρέχει ευρυζωνική πανταχού παρούσα κάλυψη καθώς και τη συνύπαρξη πολλαπλών χρηστών (ιδιότητα πολλαπλής πρόσβασης) στο ασύρματο μέσο, αλλά περιορίζεται από τις απώλειες διάδοσης του ασύρματου περιβάλλοντος, απαιτώντας επαναλήπτες και αναμεταδότες για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις, γεγονός που οδηγεί σε πιο περιορισμένη ταχύτητα μεταφοράς επικοινωνίας και μετάδοση σε μεγάλη απόσταση Andrea Goldsmith , “Overview of Wireless Communications,” WIRELESS COMMUNICATIONS , 2004 .

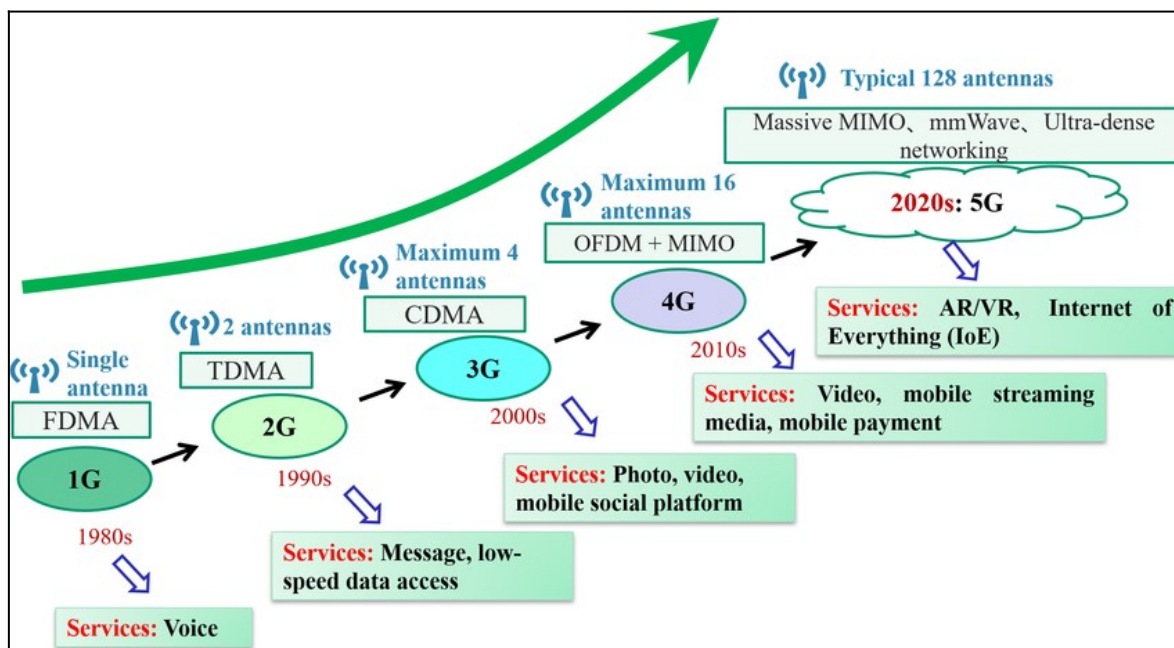
Με την πάροδο του χρόνου, παρατηρούνται διαρκώς αυξανόμενες και μεγαλύτερες απαιτήσεις των χρηστών για ευρύτερες ταχύτητες διασύνδεσης των ασύρματων δικτύων με παροχή υπηρεσιών σε μικρό χρόνο απόκρισης. Για να ικανοποιηθεί αυτή η απαίτηση, οι οπτικές επικοινωνίες και η φωτονική τεχνολογία ολοένα και ενσωματώνονται περισσότερο στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα

των δικτύων 5<sup>ης</sup>/6<sup>ης</sup> γενιάς, αναζητώντας αποδοτικότερους τρόπους μετάδοσης των ασύρματων ραδιο-σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ της κεραίας του Σταθμού Βάσης και των κεντρικών εγκαταστάσεων/υποδομών του παρόχου, καθώς η δειγματοληψία, ψηφιοποίηση και επεξεργασία πολλαπλών ευρυζωνικών ασύρματων σημάτων από ηλεκτρονικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα αποτελούν διαδικασίες που απαιτούν αξιόλογη κατανάλωση ενέργειας και είναι συχνά περιορισμένες σε ό,τι αφορά το εύρος ζώνης.

Παρότι έχουμε αξιοσημείωτη βελτίωση στα ευρυζωνικά συστήματα πρόσβασης, η ενσωμάτωση των οπτικών ινών και ασύρματων δικτύων μπορεί να αξιοποιηθεί πλήρως με την καινοτομία των χιλιοστομετρικών συχνοτήτων (mmWave) και με την βοήθεια της φωτονικής τεχνολογίας, καθώς επιτρέπουν την υλοποίηση ευρυζωνικών οπτικών ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων χαμηλού κόστους, επιτρέποντας να ξεπεράσει τη συμφόρηση της χωρητικότητας μετάδοσης ηλεκτρονικών διατάξεων και να παράγει μεταδόσεις υπερ-υψηλής ταχύτητας σε απομακρυσμένες κεραίες χιλιοστομέτρων συχνοτήτων mm-wave Cheng-Xiang Wang, Fellow, IEEE, Xiaohu You, Fellow, IEEE, Xiqi Gao, Fellow, IEEE, Xiuming Zhu, Zixin Li, Chuan Zhang, Senior Member, IEEE, “On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies and Testbeds” , IEEE Communications Surveys & Tutorials, VOL. XX, NO. XX , February 2023 .

Είναι γνωστή και η ταχεία εξέλιξη των εφαρμογών επικοινωνίας καθώς οι επικοινωνιακές εξελίξεις βιώνουν προοδευτικές αλλαγές από εποχή σε εποχή. Η Εικόνα 1 προσπαθεί να απεικονίσει την εξέλιξη των τεχνολογιών πολλαπλής πρόσβασης, το πλήθος των κεραιών και τις παρεχόμενες υπηρεσίες των δικτύων από γενιά σε γενιά. Μέχρι σήμερα η διαρκής εξέλιξη των κυβελωτών συστημάτων κινητών επικοινωνιών από γενιά σε γενιά ενσωματώνει διαρκώς υψηλότερες συχνότητες, μεγαλύτερες ταχύτητες μεταφοράς και πιο γρήγορους ρυθμούς μετάδοσης πληροφορίας. Από το 2019, έχουν επισήμως αρχίσει να εγκαθίστανται και εμπορευματοποιούνται τα δίκτυα 5G, χρησιμοποιώντας αρχικά νέες συχνότητες γύρω από τα 3,5 GHz ή κάτω των 6GHz, ενώ απαιτούν μέγιστο ρυθμό μετάδοσης στο Σταθμό Βάσης έως 20 Gbps. Από την άλλη πλευρά, λαμβάνοντας υπόψη την αρχιτεκτονική τη δικτύωση των συστημάτων των Σταθμών Βάσης κινητής τηλεφωνίας, τα δίκτυα απαιτούν ολοένα και πιο πυκνές εγκαταστάσεις των Σημείων Πρόσβασης και Σταθμών Βάσης με περισσότερες κεραίες, καθώς και σε διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης και σε επιπλέον υπηρεσίες. Συγκεκριμένα, λόγω της εγκατάστασης ολοένα και περισσότερων στοιχείων κεραιών, υπάρχουν σταθμοί βάσης 5G που βασίζονται και σε συστήματα πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (MIMO), χιλιοστομετρικές συχνότητες mmWave και καινοτομίες υπερπυκνής οργάνωσης (UDN), με έως και 64-γραμμές διαμόρφωσης σημάτων (RF chain). Μέχρι και σήμερα, στο σταθμό βάσης των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς , αναπτύσσονται εμπορικά συστήματα πρόσβασης που χρησιμοποιούν

έως και 128 στοιχεία κεραιών, ενώ η εταιρία HUAWEI είναι η πρώτη που παρουσίασε ένα μεγάλο αριθμό σταθμών βάσεων MIMO με 384 κεραιές. Έπειτα σχετικά με τις παρεχόμενες υπηρεσίες, το 5G δίκτυο είναι ικανό στο να υποστηρίζει την επαυξημένη πραγματικότητα (AR), την εικονική πραγματικότητα (VR), και το Internet of Everything (IoE), που δεν υποστηρίζονταν από τα προηγούμενα δίκτυα Cheng-Xiang Wang, Fellow, IEEE, Xiaohu You, Fellow, IEEE, Xiqi Gao, Fellow, IEEE, Xiuming Zhu, Zixin Li, Chuan Zhang, Senior Member, IEEE, “On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies and Testbeds” , IEEE Communications Surveys & Tutorials, VOL. XX, NO. XX , February 2023.



Εικόνα 1 εξέλιξη των 5G κεραιές, τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης και υπηρεσίες Cheng-Xiang Wang, Fellow, IEEE, Xiaohu You, Fellow, IEEE, Xiqi Gao, Fellow, IEEE, Xiuming Zhu, Zixin Li, Chuan Zhang, Senior Member, IEEE, “On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies and Testbeds” , IEEE Communications Surveys & Tutorials, VOL. XX, NO. XX , February 2023

Το 5G δίκτυο δεν είναι μια απλή προσέγγιση της διασύνδεσης, αλλά μία συλλογή πολλαπλών εξελίξεων. Το δίκτυο αυτό αποτελεί τη πέμπτη γενιά των τεχνολογιών ασύρματων δικτύων, ενσωματώνοντας διάφορες καινοτομίες όπως είναι διάφορες ομάδες χιλιοστομετρικών συχνοτήτων που μπορούν και προσφέρουν έως 20Gb/s και η τεχνολογία MIMO (Multiple Inputs-Multiple Outputs ) Πολλαπλών (σημάτων) Εισόδων και Πολλαπλών Εξόδων, που μπορεί να είναι έως και 10 φορές γρηγορότερη από τα δίκτυα της προηγούμενης γενιάς.

## 2. Δίκτυα 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> γενιάς

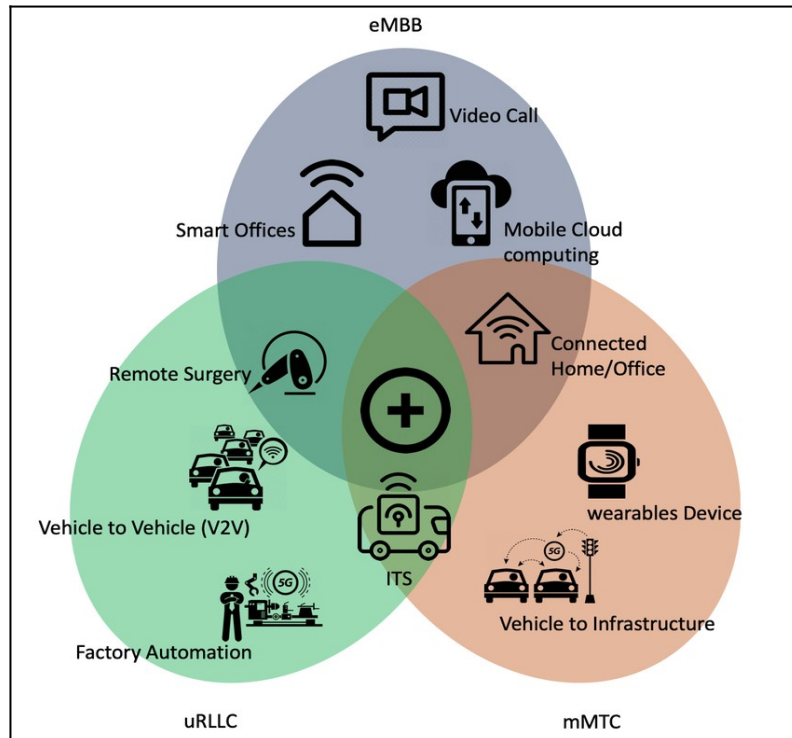
Σε αυτό το κεφάλαιο θα επικεντρωθούμε στα δίκτυα της 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> γενιάς καθώς και θα μιλήσουμε για το τι οραματίζονται τα νέα δίκτυα, σε ποιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται και με τι ταχύτητες λειτουργούν. Όσο περνάνε τα χρόνια τόσο εξελίσσεται και η τεχνολογία στον κόσμο. Οι αλλαγές των γενεών αυτών στο κόσμο της καινοτομίας αιχμαλωτίζουν τη δημιουργική ενέργεια και υπόσχονται να κάνουν πράγματα με τελείως διαφορετικό τρόπο Qualcomm Technologies , “5G - Vision for the next generation of connectivity”, Qualcomm Technologies , March 2015.

### 2.1 Δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς (5G)

Η ανάπτυξη των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη νέων υπηρεσιών, με στόχο να διασυνδέσει πολλαπλές συσκευές και να εξυπηρετήσει τις επικοινωνιακές ανάγκες καινούριων βιομηχανικών εφαρμογών, καθώς και να δώσει τη δυνατότητα νέων εμπειριών στους χρήστες, που δεν παρείχαν έως τώρα τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Σε γενικές γραμμές το 5G δίκτυο χρησιμοποιείται σε τρεις βασικές κατηγορίες εφαρμογών:

1. **Ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα (eMBB):** Οι ταχύτητες πληροφορίας τη σημερινή εποχή μπορούν να φτάσουν ταχύτητες μετάδοσης έως και τα 20 Gb/s στο Σταθμό Βάσης και την κεραία του σημείου πρόσβασης στο δίκτυο, με επίκεντρο ο χρήστης να έχει μια ομοιόμορφη και σταθερή εμπειρία. Πλέον ένα δίκτυο έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα με βάση τις προηγούμενες γενιές των δικτύων και η καθυστέρηση που έχει είναι αρκετά χαμηλή, μικρότερη από 1 ms.
2. **Μαζικές επικοινωνίες μεταξύ μηχανών (massive Machine-Type Communications -mMTC):** Οι massive Machine Type Communications χαρακτηρίζονται από απαίτηση για μεγάλη εμβέλεια, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας καθώς και χαμηλή πολυπλοκότητα. Ωστόσο σχεδιάζονται συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν και να χρησιμοποιούνται χωρίς την ανθρώπινη βοήθεια , μπορούν να καταναλώνουν χαμηλή ισχύ και να εγγυηθούν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους.
3. **Εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες με χαμηλή καθυστέρηση (Ultra Reliable & Low Latency Communications–URLLC):** Η κατηγορία αυτή απαιτεί αξιόπιστες επικοινωνιακές διασυνδέσεις, εξασφάλιση σταθερότητας σύνδεσης ακόμη και με μεγάλες ταχύτητες που μπορεί

να χρησιμοποιήσει ένας χρήστης. Reply white paper , “ 5G: The Network Technology Of Tomorrow “ , Reply



Εικόνα. 2 Τρεις εφαρμογές των 5G δικτύων

## 2.2 Δίκτυο 6G

Με βάση την άποψη των αναγκών των διάφορων εφαρμογών που έχει, το δίκτυο 5G έκανε επέκταση στο “κινητό διαδίκτυο” (συγκριτικά με τις παρεχόμενες υπηρεσίες και διασύνδεση του προηγούμενου δικτύου 4G) και ως προς τη διάδοση του Internet of Everything. Με βάση το 5G, τα επόμενα χρόνια το 6G έχει στόχο να προσφέρει περισσότερη κάλυψη, μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης, πιο πυκνές συνδέσεις οι οποίες θα είναι περισσότερες, λιγότερη καθυστέρηση στην παροχή υπηρεσιών, καθώς το δίκτυο αυτό θα προσφέρει μεγαλύτερη ασφάλεια και επίσης τη δυνατότητα της αντικατάστασης. Λόγω των αναγκών και το όραμα που έχουν οι ασύρματες επικοινωνίες για τα επόμενα χρόνια, υπάρχει περίπτωση να μη μπορεί να καλύψει τις ανάγκες που θα προκύψουν, τα δίκτυα της 5<sup>ης</sup> γενιάς για αυτό η επιστημονική κοινότητα έχει ήδη στρέψει το ενδιαφέρον της προς την επόμενη γενιά, τα δίκτυα 6<sup>ης</sup> γενιάς Cheng-Xiang Wang, Fellow, IEEE, Xiaohu You, Fellow, IEEE, Xiqi Gao, Fellow, IEEE, Xiuming Zhu, Zixin Li, Chuan Zhang, Senior Member, IEEE, “On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies and Testbeds” , IEEE Communications Surveys & Tutorials, VOL. XX, NO. XX , February 2023.

Η 6<sup>η</sup> γενιά δικτύων έχει σκοπό να επιτεύξει μέγιστες ταχύτητες διασύνδεσης έως και 1 Tb/s στο Σταθμό Βάσης/Κεραία του δικτύου και το διαθέσιμο εύρος φάσματος που θα χρησιμοποιεί στοχεύεται να εκτείνεται από 12 GHz έως 20 GHz. Ακόμη και η καθυστέρηση (latency) θα είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές και θα φτάσει μέχρι τα 100 microsecond. Όσον αφορά τις εφαρμογές που θα χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα 6<sup>ης</sup> γενιάς, θα χρειαστεί αρκετός χρόνος και μεγάλο διάστημα ώστε να μπορούν να σχεδιαστούν οι εφαρμογές αυτές. Έπειτα, έχουν στόχο να αυξήσουν την αξιοπιστία του δικτύου, παρέχοντας μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε καινούριες εφαρμογές. Ενώ το 5G επικεντρώνεται κυρίως στις τρεις βασικές κατηγορίες υπηρεσιών (eMBB, mMTC και uRLLC), στο 6G οι ερευνητές θέλουν να επεκταθούν όσο περισσότερο μπορούν στις εφαρμογές τους.

Οι eMBB (Enhanced Mobile Broadband) επικοινωνίες: Αναφέρονται σε υπηρεσίες που παρέχουν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων σε κινητές συσκευές, όπως smartphones και tablets. Ο στόχος του eMBB είναι να παρέχει ακόμα υψηλότερες ταχύτητες και απόδοση σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές της τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας.

Το mMTC (Massive Machine Type Communications): Πρόκειται για τον τομέα της 5G που εστιάζει στη σύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών Internet of Things (IoT). Ο στόχος του mMTC είναι να υποστηρίξει εφαρμογές όπως έξυπνες πόλεις, έξυπνες κατοικίες και άλλες συσκευές IoT που χρειάζονται χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και υψηλή αξιοπιστία στην επικοινωνία.

Το uRLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications): Αυτό το όρο αναφέρεται σε υπηρεσίες που απαιτούν ακριβή χρονικό συγχρονισμό και χαμηλή καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων. Ο στόχος του uRLLC είναι να υποστηρίξει εφαρμογές όπως αυτόνομα οχήματα, τηλεχειρισμός ρομπότ και κρίσιμες εφαρμογές στην υγειονομική περίθαλψη, όπου η αξιοπιστία και η χαμηλή καθυστέρηση είναι κρίσιμες.

Υπάρχουν ήδη κάποιες εφαρμογές που έχουν αρχίσει να μελετώνται για τα δίκτυα 6G και έχουν κατανομαστεί όπως feMBB, umMTC, και enhanced-uRLLC (euRLLC), όμως υπάρχουν κι άλλα σενάρια όπως LDHMC και το ELPC, που σύντομα αναμένονται να αρχίσουν να εξελίσσονται και να μελετώνται με την περαιτέρω εξέλιξη των δικτύων.

Το feMBB (Enhanced Mobile Broadband): Αναφέρεται στη βελτιωμένη κινητή ευρυζωνική επικοινωνία. Το feMBB έχει ως στόχο την παροχή υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων προς και από κινητές συσκευές.

To umMTC (Ultra-Reliable and Low-Latency Communications for Massive Machine Type Communications): Το umMTC εστιάζει στην υποστήριξη μαζικής συνδεσιμότητας για μεγάλο αριθμό συσκευών IoT, παρέχοντας υψηλή αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων. Χρησιμοποιείται συνήθως για εφαρμογές που απαιτούν αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση.

To enhanced-uRLLC (Enhanced Ultra-Reliable Low Latency Communications): Ορίζει ακόμη υψηλότερα πρότυπα αξιοπιστίας και χαμηλής καθυστέρησης στη μετάδοση δεδομένων από το uRLLC.

To LDHMC (Low Data Rate and High Mobility Communications): Αυτό το σενάριο αφορά την υποστήριξη συσκευών με χαμηλή απαίτηση σε ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων που είναι σε συνεχή κίνηση.

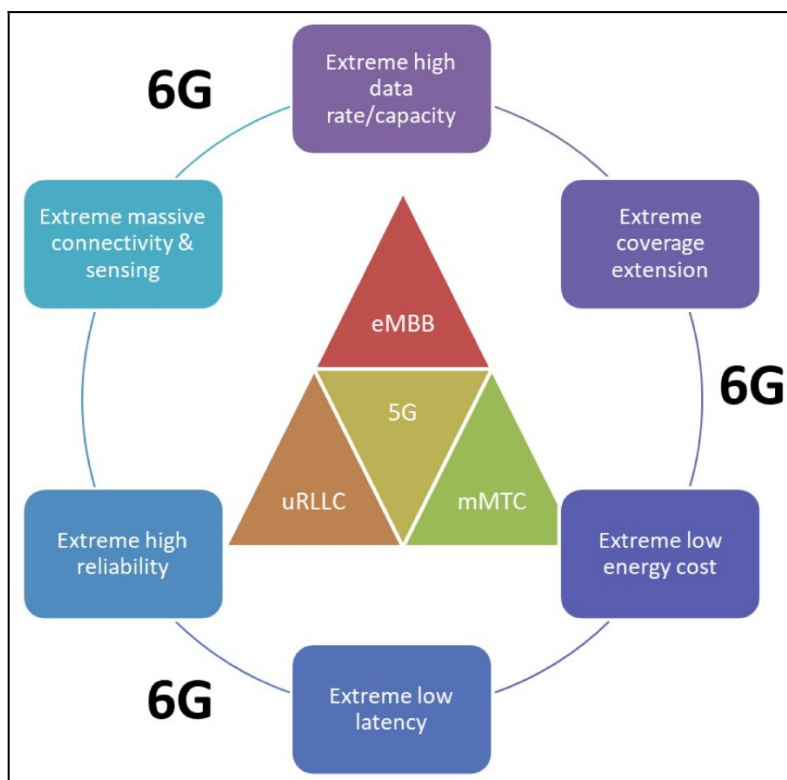
To ELPC (Extreme Low Power Communications): Το ELPC αναφέρεται σε υπηρεσίες που απαιτούν πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για τη μετάδοση δεδομένων. Αυτό είναι κρίσιμο για συσκευές IoT που χρειάζονται μακροχρόνια αυτονομία, όπως αισθητήρες που τροφοδοτούνται από μπαταρίες.

Επίσης, εκτός από αυτές τις εφαρμογές κάποιιοι ερευνητές ανέφεραν ότι θα υπάρξουν κι άλλες όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η υπερ-ευρυζωνικότητα και το IoT.

Η έρευνα των νέων εφαρμογών και γενικά οι επερχόμενες εξελίξεις των δικτύων 6<sup>ης</sup> γενιάς έχουν αρχίσει ήδη να μελετώνται από το 2020 και θα συνεχιστεί μέχρι το 2030, όπου αναμένεται η εφαρμογή και εμπορευματοποίησή τους, με την προοπτική ότι θα επεκταθεί και θα βοηθήσει στην επικοινωνία φορητών συσκευών, στην άμεση επικοινωνία ανθρώπων σε έξυπνα αυτοκίνητα, έξυπνες συσκευές στην ρομποτική, αλλά και σε άλλες εφαρμογές που θα φανούν χρήσιμες σε πολλές βιομηχανίες, πέρα από τον κόσμο των τηλεπικοινωνιών Mohammed Banafaa , Ibraheem Shayea , Jafri Din , Marwan Hadri Azmi , Abdulaziz Alashbi , Yousef Ibrahim Daradkeh , Abduraqeb Alhammadi, “ 6G Mobile Communication Technology: Requirements, Targets, Applications, Challenges, Advantages, and Opportunities” , Alexandria Engineering Journal 64 245-274 , September 2022.

Στη παρακάτω εικόνα βλέπουμε το πως θέλουν να εξελιχθούν τα δίκτυα 6G σε σχέση με τη προηγούμενη γενιά τους , δηλαδή τα 5G δίκτυα. Τα 6G έχουν ως σκοπό να ξεπεράσουν τις ταχύτητες της προηγούμενης γενιάς, να έχουν υψηλό data rate και χαμηλή καθυστέρηση.



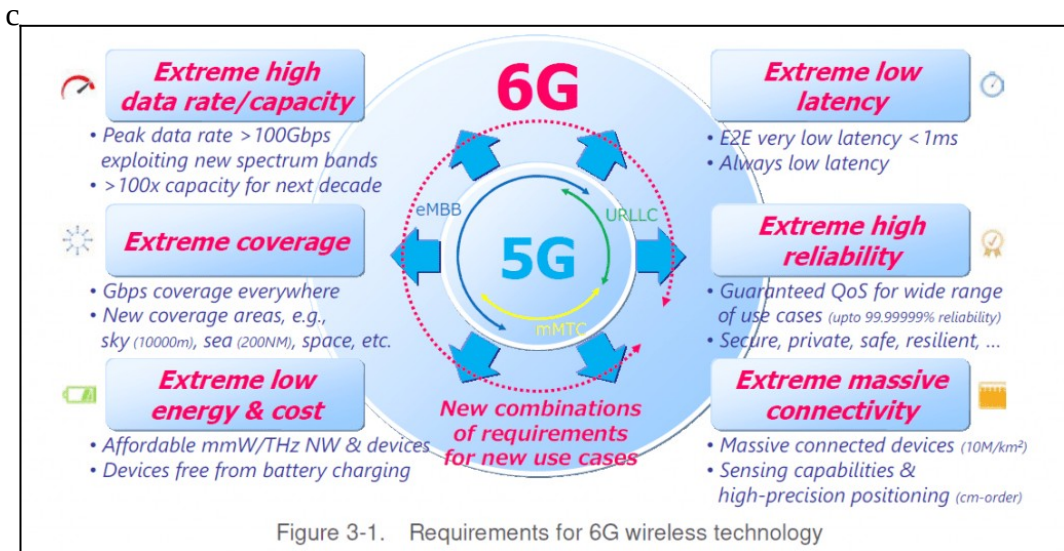


*Εικόνα 3 Οι διαφορές των εφαρμογών ανάμεσα στο 5G και 6G Muhammad Zeeshan Asghar , Shafique Ahmed Memon , and Jyri Hämmäläinen , “ Evolution of Wireless Communication to 6G: Potential Applications and Research Directions ” , Sustainability 14 6356 , May 2022*

Το 6G έχει ως στόχο να κατασκευάσει έναν σύγχρονο κόσμο, με αποτέλεσμα να δίνει τη δυνατότητα της σύνδεσης μεταξύ του φυσικού κόσμου με τον ψηφιακό κόσμο το 2030 και ύστερα να καταφέρει να συνδυάσει αυτούς τους δύο κόσμους. Θα δώσει σε διάφορες επιχειρήσεις εφαρμογές για την ευκολότερη χρήση του ψηφιακού κόσμου καθώς θα είναι ικανό ώστε να προωθήσει την οικονομική βελτίωση της κοινωνίας. Το όραμα αυτό έχει ως στόχο την ένωση των δύο κόσμων.

Είναι γνωστό ότι το δίκτυο της 6<sup>ης</sup> γενιάς θα διαφέρει με τα δίκτυα των προηγούμενων γενιών και πιο συγκεκριμένα της 5<sup>ης</sup> γενιάς. Σημαντικές διαφορές όπως ότι θα είναι εφικτό να καλύπτουν περισσότερο φυσικό χώρο, θα δώσουν τη δυνατότητα ισχυρότερης επικοινωνίας, αποθήκευσης και δεδομένων υποστηρίζοντας περισσότερες υπηρεσίες. Οι αισθητήρες, η ψηφιακή αλληλεπίδραση μεταξύ των ανθρώπων από τη μία άκρη του κόσμου στην άλλη για να πετύχουν όλα αυτά θα χρειαστεί ο απαραίτητος χρόνος αλλά ακόμη και οι κατάλληλες επενδύσεις Regius Professor Rahim Tafazolli FREng “6G wireless: a new strategic vision”, 5GIC Strategy Advisory Board.

Στη παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η εξέλιξη του 5G στο 6G, για τις ενέργειες που θα ακολουθήσουν τα επόμενα χρόνια για την εξέλιξή του ώστε να ξεπεράσουν τις ταχύτητες, να έχει μικρότερη καθυστέρηση που έχουν ήδη τα 5G δίκτυα.



Εικόνα 4 Η εξέλιξη από το 5G στο 6G

### 3. Ανάλυση βασικών εννοιών των δικτύων 5G/6G

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές έννοιες των δικτύων 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> γενιάς, για τις νέες συχνότητες ασύρματων επικοινωνιών που μελετάμε στα 5G, και συγκεκριμένα τις χιλιοστομετρικές συχνότητες, ενώ επίσης θα γίνει η ανάλυση όλων των εννοιών που αναφέρθηκαν στο πειραματικό κομμάτι κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας.

#### 3.1 Νέες συχνότητες που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς

Όπως είναι γνωστό η κινητή επικοινωνία εξαρτάται από την ανταλλαγή ηλεκτρομαγνητικών σημάτων μεταξύ ενός τηλεφώνου και ενός πύργου κινητής τηλεφωνίας. Αυτή η επικοινωνία μπορεί και χρησιμοποιεί ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από μερικά kHz έως αρκετές εκατοντάδες GHz. Ένα απλό τηλέφωνο χρησιμοποιεί μόνο ένα μικρό εύρος συχνοτήτων κάθε φορά, που στην περίπτωση αυτή ονομάζεται "κανάλι". Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης, τόσο καλύτερη είναι η απόδοση του και έτσι επειδή χρησιμοποιούνται συγχρόνως πολλά κινητά τηλέφωνα, άρα και πολλές συχνότητες μαζί, κάτι που ακολούθως απαιτεί οι φορείς κινητής τηλεφωνίας να καταφέρουν να ρυθμίζουν ορθά και αποδοτικά τη χρήση και ανάθεση διαφορετικών συχνοτήτων.

Το δίκτυο 5G μπορεί να λειτουργήσει σε 3 διαφορετικές συχνότητες όπως :

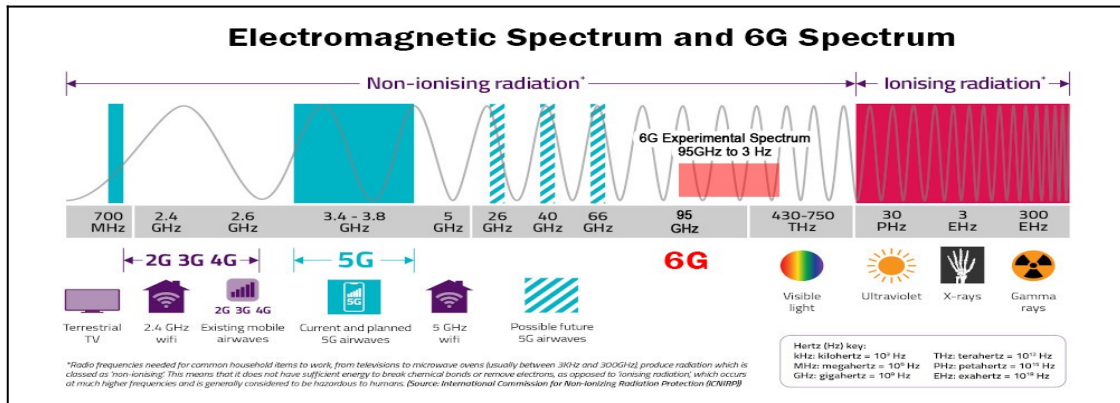
- *Κάτω από 1 GHz*: Οι συχνότητες και τα κανάλια γύρω από τα 600 MHz, 700 MHz και 800 MHz είναι προσβάσιμα για το 5G. Η συνήθης ταχύτητα μεταφοράς καναλιού που είναι προσβάσιμη για το 5G σε αυτές τις ομάδες συχνοτήτων είναι 10 MHz.

- *Περίπου 3,5 GHz*: Οι ομάδες συχνοτήτων γύρω από τα 3,5 GHz είναι περισσότερο γνωστές και διαδεδομένες στην Ευρώπη για επαναχρησιμοποίηση των καναλιών σε πυκνά δίκτυα. το συνηθισμένο εύρος ζώνης αυτών των καναλιών σε αυτό το μήκος είναι 100 MHz, 10 φορές δηλαδή μεγαλύτερο από αυτό που είναι διαθέσιμο στα κανάλια κάτω από το 1 GHz.

- *Χιλιοστομετρικά κύματα (mmWave)*: Το mmWave αναφέρεται σε ομάδες συχνοτήτων/καναλιών γύρω ή πάνω από τα 24 GHz,. Το διαθέσιμο εύρος φάσματος σε αυτές τις ομάδες καναλιών τείνει να είναι το πιο μεγάλο, φτάνοντας έως τα 800 MHz, δηλαδή 80 φορές περισσότερο από ό,τι είναι διαθέσιμο κάτω από το 1 GHz και έως 8 φορές μεγαλύτερο από τις συχνότητες των 3,5GHz.

Η Εικόνα 5 παρακάτω απεικονίζει το νέο φάσμα συχνοτήτων που μελετώνται για τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, καθώς και κάποιες νέες συχνότητες που έχουν αρχίσει μελετώνται στα επερχόμενα δίκτυα 6<sup>ης</sup>

γενιάς, όπως τα 95GHz έως 1 THz Qualcomm , “What is 5G? Everything you need to know” , Qualcomm .



Εικόνα 5 Οι καινούριες συχνότητες των 5G/6G Victor Pavon Villamayor, “Telecommunications Regulation for the Digital Economy” , Telecommunications Regulation Seminar , July 2020

### 3.2 Χιλιοστομετρικά κύματα (mmWave)

Τι είναι όμως τα χιλιοστομετρικά κύματα; Τα χιλιοστομετρικά ραδιοκύματα είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα με μήκος κύματος μεταξύ 1 και 10 χιλιοστών και έχει εύρος φάσματος των 24 GHz και 300 GHz .

Η τεχνολογία mmWave αυτή τη στιγμή είναι το πιο κεντρικό σημείο και καινοτομία που εισάγεται στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Η μεγάλη ζήτηση για ικανότητα απομακρυσμένης μετάδοσης πληροφοριών δεν φαίνεται να υποχωρεί στο προβλέσιμο μέλλον. Ταυτόχρονα, η παρουσία πολλαπλών χρηστών και η ανάγκη για περισσότερα κανάλια και πιο πυκνή χωρική επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων συνεχίζει να απαιτεί καλύτερη οργάνωση της χρήσης του διαθέσιμου φάσματος και των τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης, με στόχο να αποφύγει φαινόμενα κορεσμού των σημείων πρόσβασης και των δικτύων. Με αυτή την εξέλιξη, η βιομηχανία εξέτασε άλλες ομάδες/μπάντες συχνοτήτων που θα μπορούσαν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της βελτίωσης των νέων απομακρυσμένων καινοτομιών των δικτύων 5G. Οι ομάδες υψηλών συχνοτήτων στην περιοχή άνω των 24 GHz κέντρισαν το ενδιαφέρον, καθώς έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίξουν τεράστιες ταχύτητες μετάδοσης πληροφοριών, ιδανικές για την επέκταση της χωρητικότητας των απαιτητικών ασύρματων συστημάτων και νέων εφαρμογών. Αυτές οι ομάδες υψηλών ταχυτήτων αποκαλούνται και μπάντες χιλιοστομετρικών συχνοτήτων "millimeter wave - mmWave" λόγω των μικρών μηκών κύματος που έχουν και μετριοούνται σε χιλιοστά. Οι συχνότητες των mmWave που επεκτείνονται έως τα 300 GHz , ενώ πρωταρχικώς οι ομάδες από 24 GHz έως 100 GHz θα χρησιμοποιηθούν στα

επερχόμενα δίκτυα 5G/6G. Οι mmWave συχνότητες έως 100 GHz είναι ικανές να υποστηρίξουν

εύρος ζώνης 2 GHz Accton , “ The Emergency of 5G mmWave”, Accton .

### 3.2.1 Χαρακτηριστικά των επικοινωνιών mmWave

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφονται μερικά χαρακτηριστικά των χιλιοστομετρικών συχνοτήτων:

#### *i. Απώλειες διάδοσης ασύρματου καναλιού*

Οι επικοινωνίες χιλιοστομετρικών κυμάτων υφίστανται μεγάλες απώλειες διάδοσης και κατά συνέπεια σχετικά χαμηλή και μικρή απόσταση διάδοσης σε σύγκριση με τις έως τώρα χρησιμοποιούμενες χαμηλότερες συχνότητες των sub-6GHz δικτύων. Το φαινόμενο της εξασθένησης είναι πιο έντονο σε αυτήν την περιοχή συχνοτήτων, σε σχέση με αυτές που χρησιμοποιούνται ευρέως για ασύρματες μεταδόσεις. Όπως και να έχει, οι μεγάλες αποστάσεις, η ύπαρξη σκίασης λόγω αντικειμένων και εμποδίων μεταξύ πομπού και δέκτη, αλλά ακόμη και τα καιρικά φαινόμενα όπως η βροχή και το χιόνι επηρεάζουν τη σωστή μετάδοση των σημάτων. Με αυτόν τον τρόπο, οι επικοινωνίες mmWave χρησιμοποιούνται κυρίως για εσωτερικές καταστάσεις, κυρίως για να παρέχουν τις ανάγκες της backhaul διασύνδεσης μικρών κυψελωτών συστημάτων με ακτίνα ραδιο-κάλυψης έως 200 m.

#### *ii. Κατευθυντικότητα*

Οι mmWave διασυνδέσεις είναι ουσιαστικά κατευθυντικές, για να αντιμετωπίσουν τις υψηλές απώλειες διάδοσης. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι τα συστήματα πολλαπλών κεραιών στοχεύουν να ελέγξουν τη διαμόρφωση και τη στροφή της δέσμης ακτινοβολίας προς οποιαδήποτε κατεύθυνση ηλεκτρονικά και να επιτύχουν μεγάλο κέρδος σε αυτή τη διεύθυνση, ενώ προσφέρουν επίσης και πολύ χαμηλό κέρδος σε όλες τις άλλες ανεπιθύμητες κατευθύνσεις. Για να μπορεί ο πομπός και ο δέκτης να κατευθύνουν τις δέσμες τους ο ένας προς τον άλλον, απαιτείται φυσικά και η ανάπτυξη σωστών συστημάτων διαχείρισης της δέσμης, καθώς και διάφοροι αλγόριθμοι αναζήτησης της θέσης του χρήστη γύρω από το Σταθμό Βάσης για τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου βελτιστοποίησης της ζεύξης.

### *iii. Ευαισθησία στη διασπορά και τη σκίαση της ζεύξης*

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υψηλών συχνοτήτων και μικρότερου μήκους κύματος είναι πλέον πιο εύαλωτα σε φαινόμενα διασποράς του ασύρματου καναλιού, πολλαπλών οδεύσεων και σκίασης από εμπόδια. Λόγω του μικρού μήκους κύματος, οι ζεύξεις π.χ. εντός της ζώνης των 60 GHz είναι ευαίσθητες στην παρεμπόδιση από εμπόδια (π.χ. ανθρώπους και έπιπλα) εντός εσωτερικού χώρου. Κατά συνέπεια, η διατήρηση μιας αξιόπιστης ασύρματης ζεύξης για εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση, όπως η HDTV, μπορεί να αποτελέσει τεράστια πρόκληση για τις επικοινωνίες mmWave Yong Niu, Yong Li, Member, IEEE, Depeng Jin, Member, IEEE, Li Su, and Athanasios V. Vasilakos, Senior Member, IEEE, “ A Survey of Millimeter Wave (mmWave) Communications for 5G: Opportunities and Challenges”, February 2015 .

### **3.3 Αναλογικές οπτικές ασύρματες μεταδόσεις Radio over Fiber (RoF)**

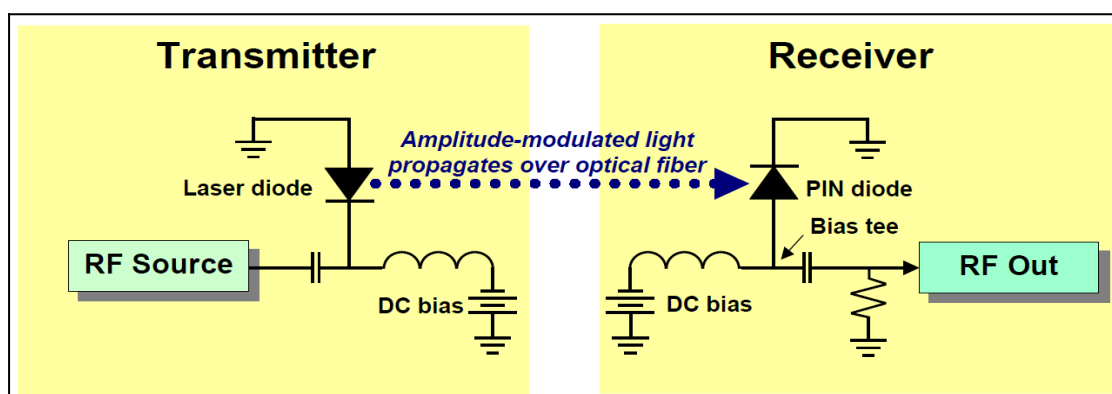
Τι είναι η τεχνολογία radio-over-fiber; Η τεχνολογία radio-over-fiber ουσιαστικά συνδυάζει τη χρήση συνδέσεων οπτικών ινών για τη μεταφορά σημάτων RF από μια περιοχή σε απομακρυσμένες μονάδες και τοποθεσίες οι οποίες έχουν μεγάλη απόσταση. Η μετάδοση των ραδιοσημάτων μέσω οπτικών ινών συνήθως αφορά το backhaul τμήμα του δικτύου, και η ασύρματη μετάδοση αφορά τα σημεία πρόσβασης. Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, μέσω της radio-over-fiber τεχνολογίας ουσιαστικά προσφέρουν αποτελεσματική μετάδοση ασύρματων κινητών σημάτων δεδομένων μέσω της οπτικής ίνας από και προς την κεντρική μονάδα επεξεργασίας σημάτων (π.χ. στις εγκαταστάσεις του παρόχου κινητής τηλεφωνίας), η οποία με τη σειρά της παρέχει πρόσβαση στις υπηρεσίες δεδομένων και αποθήκευσης. Η τεχνολογία radio-over-fiber καθιστά εφικτή τη συγκέντρωση της επεξεργασίας των σημάτων RF σε μια κεντρική κοινόχρηστη περιοχή μέσω του δικτύου οπτικών ινών, που μπορούν να προσφέρουν χαμηλή απώλεια σήματος (0,3 dB/km για 1550 nm και 0,5dB/km για τα μήκη κύματος 1310 nm) για τη μεταφορά των σημάτων RF.

Με την αναλογική «ραδιοεπικοινωνία μέσω οπτικών ινών» (RoF), τα ασύρματα σήματα μετατρέπονται μέσω των φωτονικών διατάξεων laser (laser) και ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή (electro-absorption modulator) σε οπτικά σήματα που μπορούν να μεταδοθούν μέσω καλωδίων οπτικών ινών και, στη συνέχεια, μετατρέπονται ξανά σε ασύρματα ηλεκτρονικά ραδιο-σήματα από μία διάταξη φωτοδιόδου/φωτο-ανιχνευτή. Αυτή η τεχνολογία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα τόσο των ραδιοκυμάτων όσο και των οπτικών ινών για την παροχή υψηλής ταχύτητας, υψηλής χωρητικότητας στις απομακρυσμένες επικοινωνίες. Η χρήση αυτής της τεχνολογίας αντιμετωπίζει τους περιορισμούς των παραδοσιακών συστημάτων ασύρματης και απομακρυσμένης επικοινωνίας,

όπως η εξασθένηση του σήματος, τα φαινόμενα σκίασης από εμπόδια και το περιορισμένο εύρος ζώνης.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της RoF τεχνολογίας είναι ότι έχει χαμηλή απώλεια εξασθένησης. Η εξάπλωση των μικροκυματικών σημάτων υψηλής συχνότητας είτε στον ελεύθερο χώρο είτε με οποιαδήποτε άλλο μέσο (π.χ. γραμμές μεταφοράς) είναι δαπανηρή και αρκετά μεγάλη, και αυτό γιατί με την μεγάλη επέκταση της επανάληψης στον ελεύθερο χώρο οδηγούμαστε αφενός σε αύξηση των απωλειών λόγω ανάκλασης και απορρόφησης και αφετέρου στις γραμμές διάδοσης αυξάνεται η εξασθένηση.

Ένα ακόμη σπουδαίο πλεονέκτημα της RoF τεχνολογίας είναι ότι έχει μεγάλο εύρος ζώνης. Είναι ένα από τα πιο μεγάλα πλεονεκτήματα αυτών των τεχνολογιών καθώς μέσω αυτού του πλεονεκτήματος επιτρέπει τη ταχύτατη επεξεργασία σήματος. Επιπρόσθετα, η επεξεργασία στον οπτικό τομέα καθιστά δυνατή τη χρήση φθηνότερων οπτικών συνιστωσών μικρού εύρους ζώνης, όπως είναι οι δίοδοι laser, εξακολουθώντας να παρέχουν τη δυνατότητα διαχείρισης σημάτων μεγάλου εύρους ζώνης. Τέλος, η ιδιότητα της ανοσίας σε παρεμβολές ραδιοσυχνότητας θα μπορούσε να είναι εξαιρετικά ζωτικής σημασίας, ιδίως στην περίπτωση της δημιουργίας και μετάδοσης ευρυζωνικών κυμάτων. Έπειτα ένα επιπλέον βοηθητικό χαρακτηριστικό που παρέχεται από τις οπτικές ίνες είναι η ανοσία και η επιπλέον ασφάλεια (π.χ. στην αντιγραφή/αποκλοπή του μεταδιδόμενου οπτικού σήματος), η οποία είναι εξαιρετικά μεγάλης σημασίας για τις επικοινωνίες οπτικών ινών, διότι παρέχει ατομική ασφάλεια και προστασία των πληροφοριών. Anthony Ng'oma , “Radio-over-fibre technology for broadband wireless communication systems” , 2005



Εικόνα 6 Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος RoFFosco , “ What is radio over fiber ?” , Fosco

## 4. Τηλεπικοινωνιακά συστήματα διαμόρφωση και μετρικά απόδοσης

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα ανώτερης διαμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκαν στην πτυχιακή εργασία καθώς και τα μετρικά μελέτης της απόδοσης αυτών για το χαρακτηρισμό της οπτικής ασύρματης ζεύξης, που μελετήθηκε.

### 4.1 QPSK

Το QPSK, που σημαίνει Quadrature Phase Shift Keying, είναι ένα σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται σε διάφορα συστήματα επικοινωνίας. Χρησιμοποιείται ευρέως σε τομείς όπως οι τηλεπικοινωνίες, οι δορυφορικές εκπομπές και τα ασύρματα δίκτυα. Η QPSK έχει πλούσια ιστορία που χρονολογείται από τις πρώτες ημέρες των προηγμένων επικοινωνιών. Παρουσιάστηκε αρχικά στη δεκαετία του 1960 και έκτοτε γνώρισε αξιοσημείωτες προόδους και βελτιώσεις. Με την πάροδο του χρόνου, η QPSK έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα αξιόπιστο σύστημα επικοινωνίας, συμβάλλοντας στην πρόοδο των πρωτοποριακών καινοτομιών επικοινωνίας.

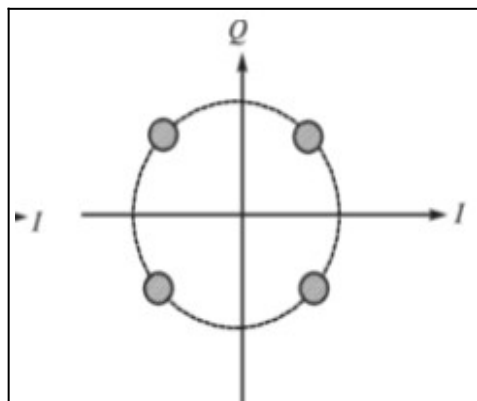
Κατά τις πρώτες ημέρες της ηλεκτρονικής επικοινωνίας, η προσβάσιμη ταχύτητα μεταφοράς ήταν περιορισμένη και έπρεπε να μεταδοθούν οι πληροφορίες όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά. Η QPSK προέκυψε ως λύση σε αυτό το ζήτημα, επιτρέποντας τη μετάδοση διαφορετικών bits δεδομένων ταυτόχρονα. Η διαμόρφωση QPSK είναι μια προηγμένη μέθοδος τεχνικής ψηφιακής διαμόρφωσης που έχει τη δυνατότητα να μπορεί να κωδικοποιεί δεδομένα που βρίσκονται στη φάση ενός φέροντος σήματος. Με τον χειρισμό της φάσης του φέροντος σήματος, η QPSK διαμόρφωση είναι σε θέση να μεταδίδει πολλά bits (συγκεκριμένα 2-bits) δεδομένων ταυτόχρονα σε ένα σύμβολο του φέροντος σήματος, όπου η φάση του φέροντος σήματος έχει τη δυνατότητα να αλλάζει με σκοπό την αναπαράσταση δυαδικών τιμών των δεδομένων. Από την αρχική παρουσίασή του συστήματος QPSK και έπειτα, έχουν προταθεί και αναπτυχθεί ήδη και διάφορες βελτιώσεις για την περαιτέρω εξέλιξη του συστήματος. Αυτές οι εξελίξεις οδήγησαν στην προώθηση πιο προηγμένων σχεδίων προσαρμογής, όπως το 8PSK, 16PSK κ.ο.κ. που ενσωματώνουμε μεγαλύτερο αριθμό ψηφίων πληροφορίας σε ένα σύμβολο, ωστόσο αυτά δεν αποτελούν μέρος της παρούσας πτυχιακής.

Η διαμόρφωση QPSK είναι ένα σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιεί τέσσερις διαφορετικές μετατοπίσεις φάσης για την αναπαράσταση των δυαδικών τιμών των δεδομένων. Ονομάζεται "τετραγωνικό" επειδή χρησιμοποιεί δύο φορείς που βρίσκονται 90 μοίρες εκτός φάσης μεταξύ τους. Έτσι στη QPSK διαμόρφωση, κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε δύο bit δεδομένων και οι τέσσερις



πιθανές μετατοπίσεις των συμβόλων μετρημένα σε μοίρες της στροφής φάσης μπορεί αν είναι οι 0 μοίρες, 90 μοίρες, 180 μοίρες και 270 μοίρες (ή όμοια μετατοπισμένες όλες κατά +45 μοίρες, δηλαδή 45°, 135°, 225°, και 315°). Αυτές οι μετατοπίσεις χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση των διπλών τιμών 00, 01, 10 και 11, ξεχωριστά. Αλλάζοντας τη φάση του φέροντος σήματος, η QPSK μπορεί να μεταδώσει αποτελεσματικά αυτές τις δυαδικές τιμές. Χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλοί ρυθμοί πληροφορίας για πιο αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου (περιορισμένου) εύρους ζώνης και βρίσκει εφαρμογή σε διάφορα συστήματα επικοινωνίας, όπως η επικοινωνία με τους Σταθμούς Βάσης των κυβελωτών δικτύων, η ηλεκτρονική τηλεοπτική μετάδοση κτλ.

Ας δούμε αναλυτικότερα πώς παράγονται οι συμφασικές και τετραγωνικές συνιστώσες. Στην QPSK, η διπλή πληροφορία χωρίζεται σε δύο διαφορετικές συνιστώσες, οι οποίες αναφέρονται τακτικά ως "συμφασική" και "τετραγωνική" συνιστώσα, που είναι κάθετε μεταξύ τους. Η συμφασική συνιστώσα αναφέρεται στο πραγματικό μέρος μιας μιγαδικής έκφρασης του σήματος, ενώ η τετραγωνική συνιστώσα περιγράφεται από το φανταστικό τμήμα. Αυτές οι δύο συνιστώσες προσδιορίζονται από την πρώτη παράλληλη πληροφορία μέσω μιας προετοιμασίας που ονομάζεται ισορροπία τετραγωνισμού.. Σε κάθε συνιστώσα διαμορφώνεται ένα σημείο με στροφή φάσης 0 ή  $\pi$ . Με τον έλεγχο της φάσης των σημάτων φέροντος, η διπλή πληροφορία μπορεί να κωδικοποιηθεί και να μεταδοθεί αποτελεσματικά. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το διάγραμμα αστερισμού της διαμόρφωσης QPSK. Collimator , "What is QPSK?" , Collimator , August 2023



Εικόνα 7 QPSK

## 4.2 QAM

Η τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους ή QAM είναι ένα ψηφιακό σχήμα διαμόρφωσης όπου τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω του καναλιού μεταβάλλοντας τόσο το πλάτος όσο και τη φάση του

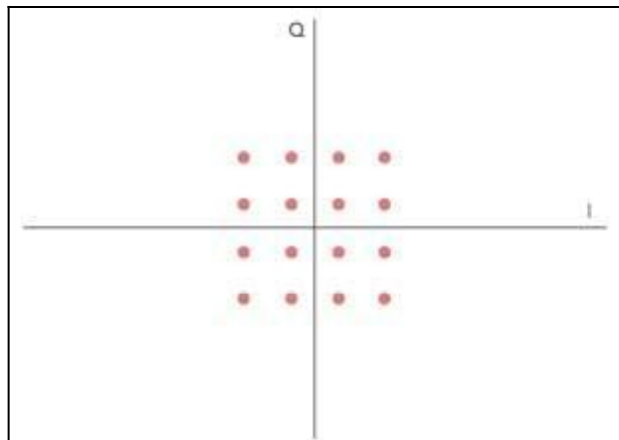
φέροντος σήματος υψηλής συχνότητας με υψηλή φασματική απόδοση στη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Η QAM, ως τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους έχει χρησιμοποιηθεί για αναλογικές μεταδόσεις, συμπεριλαμβανομένων των στερεοφωνικών μεταδόσεων AM, ενώ επίσης χρησιμοποιείται σε όλα τα κυψελοειδή δίκτυα ασύρματων κινητών επικοινωνιών, στα ασύρματα συστήματα μετάδοσης των δικτύων Wi-Fi και σχεδόν σε κάθε άλλο σύστημα ασύρματων επικοινωνιών πληροφοριών υψηλής ταχύτητας.

Η τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους, QAM, βασίζεται στη διαμόρφωση ενός σήματος στο οποίο δύο φορείς μετακινούνται κατά 90 μοίρες (δηλαδή ημίτονο και συνημίτονο), εξισορροπούνται και συνδυάζονται. Ως αποτέλεσμα της διαφοράς φάσης τους κατά 90°, οι συνιστώσες είναι κάθετες μεταξύ τους - τετραγωνικές και από αυτό προκύπτει ο τίτλος. Για το λόγο αυτό, η μία συνιστώσα του σήματος καλείται συμφασική συνιστώσα (σήμα εντός φάσης) και η άλλη συνιστώσα καλείται τετραγωνική. Το σύνθετο σήμα που προκύπτει σε γενικές γραμμές αποτελείται από το συνδυασμό των δύο φορέων και περιέχει διακυμάνσεις πλάτους όσο και φάσης και θεωρείται πιο σύνθετο σύστημα διαμόρφωσης από το QPSK.

Η τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους, QAM, μπορεί να υπάρχει είτε σε αναλογική είτε σε ψηφιακή μορφή. Οι απλές αναλογικές μορφές QAM χρησιμοποιούνται τακτικά για να επιτρέπουν τη μεταφορά διαφορετικών απλών σημάτων σε ένα μόνο φέρον. Για παράδειγμα, χρησιμοποιήθηκε στα τηλεοπτικά πλαίσια Buddy και NTSC, όπου τα διακριτά κανάλια που έδινε η QAM διαμόρφωση έδιναν τη δυνατότητα να μεταφέρει τα στοιχεία της χρωματολογίας ή των έγχρωμων δεδομένων. Στις ραδιοφωνικές εφαρμογές χρησιμοποιείται ένα σύστημα γνωστό ως C-QUAM για το στερεοφωνικό ραδιόφωνο AM. Εδώ τα διαφορετικά κανάλια επιτρέπουν τη μεταφορά των δύο καναλιών που απαιτούνται για το στερεοφωνικό σήμα στο ίδιο φέρον. Οι ψηφιακές μορφές QAM αναφέρονται συχνά ως "Quantised QAM" και χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο σε επικοινωνίες πληροφοριών ραδιοεπικοινωνιών, όπως στην περίπτωση του LTE, στα ασύρματα συστήματα, όπως το WiMAX και το Wi-Fi 802.11.

Η τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους, QAM, όταν χρησιμοποιείται για προηγμένη μετάδοση όπως για εφαρμογές ραδιοεπικοινωνιών, είναι σε θέση να μεταφέρει υψηλότερους ρυθμούς πληροφορίας από ότι το συμβατικό σύστημα ψηφιακής μετάδοσης του '0' και του '1' κατά On -Off Keying (OOK), που σήματα είναι απλά διαμορφωμένα κατά πλάτος με βάση την τιμή της πληροφορίας. Τα βασικά σήματα διαμόρφωσης OOK παρουσιάζουν μόνο δύο θέσεις που επιτρέπουν τη μεταφορά είτε ενός 0 είτε ενός 1. Με τη χρήση του QAM υπάρχουν πολλά διαφορετικά σημεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καθένα από τα οποία έχει καθορισμένες τιμές φάσης και πλάτους. Αυτό είναι

γνωστό ως διάγραμμα αστερισμού. Οι διακριτές θέσεις του διαγράμματος αστερισμού λαμβάνουν διακριτές τιμές και με αυτόν τον τρόπο ένα σήμα μπορεί να ανταλλάσσει πληροφορίες με πολύ υψηλότερο ρυθμό, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8 παρακάτω για το σύστημα 16QAM.



*Εικόνα 8 16-QAM Electronics notes, “What is QAM: quadrature amplitude modulation” ,  
Electronics notes*

Όπως φαίνεται και πιο πάνω, τα σημεία αστερισμού είναι τοποθετημένα σε ένα τετράγωνο πλέγμα με ίσες οριζόντιες και κάθετες αποστάσεις. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ένα σύστημα διαμόρφωσης 16QAM, ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ανώτερα συστήματα διαμόρφωσης, με χρήση περισσότερων σημείων από 16, αρκεί να ανήκει σε μία δύναμη του 2, δηλαδή 4 ( $2^2$ ), 16 ( $2^4$ ), 64 ( $2^8$ ), δηλαδή 4QAM (που συμπίπτει με το QPSK), 16QAM, 64QAM. Με τη χρήση ανώτερων συστημάτων διαμόρφωσης (με δύναμη το 2), μπορούν να δημιουργηθούν ακόμα περισσότερα σημεία στο διάγραμμα αστερισμού, ώστε να καταστεί εφικτή η μετάδοση περισσότερων bits ανά σύμβολο. Αυτό αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα της μετάβασης σε μορφές υψηλότερης τάξης, δηλαδή ότι έχουν περισσότερα σημεία στον αστερισμό και επομένως είναι πιο δυνατή η μετάδοση περισσότερων bits ανά σύμβολο. Ωστόσο, σε αυτήν την περίπτωση τα σημεία βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους και είναι έτσι πιο ευάλωτα στον θόρυβο και στα λάθη πληροφοριών. Αυτό το μειονέκτημα προκύπτει καθώς τα σημεία του αστερισμού είναι πιο κοντά μεταξύ τους και επομένως η ζεύξη είναι πιο ευαίσθητη στο θόρυβο Electronics notes, “What is QAM: quadrature amplitude modulation” , Electronics notes .

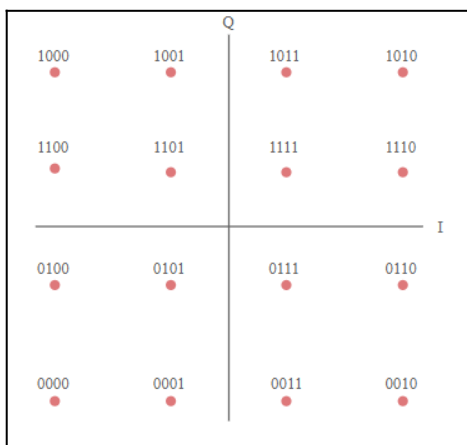
### **4.3 Διάγραμμα αστερισμού**

Το διάγραμμα αστερισμού χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάλυση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Ουσιαστικά αποτελεί μια αναπαράσταση ενός διαμορφωμένου σήματος με ένα ψηφιακό σχήμα διαμόρφωσης, όπως η τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους QAM, πάνω σε ένα ορθογωνικό σύστημα αξόνων, δηλαδή μια ορθοκανονική βάση των συνιστωσών-σημάτων

διαμόρφωσης. Εμφανίζει το σήμα ως ένα δισδιάστατο διάγραμμα διασποράς xy-επιπέδου στο μιγαδικό επίπεδο σε στιγμές δειγματοληψίας συμβόλου. Κατά τρόπο παρόμοιο με αυτόν ενός διαγράμματος φάσης, η γωνία ενός σημείου, μετρούμενη αριστερόστροφα από τον οριζόντιο άξονα, αντιπροσωπεύει τη μετατόπιση φάσης του φέροντος κύματος από μια φάση αναφοράς- η απόσταση ενός σημείου από την αρχή αντιπροσωπεύει ένα μέτρο του πλάτους ή της ισχύος του σήματος.

Σε ένα σύστημα ψηφιακής διαμόρφωσης, η πληροφορία μεταδίδεται ως σειρά δειγμάτων. Κατά τη διάρκεια κάθε δείγματος, το φέρον κύμα έχει σταθερό πλάτος και φάση, οπότε περιορίζεται σε έναν πεπερασμένο αριθμό τιμών. Έτσι, κάθε δείγμα κωδικοποιεί ένα σημείο από το διαθέσιμο πλήθος "συμβόλων", τα οποία με τη σειρά τους αντιπροσωπεύουν ένα ή περισσότερα δυαδικά ψηφία (bits) πληροφορίας. Κάθε σύμβολο κωδικοποιείται ως διαφορετικός συνδυασμός πλάτους και φάσης του φέροντος, οπότε κάθε σύμβολο αντιπροσωπεύεται από ένα σημείο στο διάγραμμα αστερισμού, που ονομάζεται σημείο αστερισμού. Το διάγραμμα αστερισμού παρουσιάζει όλα τα πιθανά σύμβολα που μπορούν να μεταδοθούν από το σύστημα ως μια συλλογή σημείων. Σε ένα διαμορφωμένο κατά συχνότητα ή φάση σήμα, το πλάτος του σήματος είναι σταθερό, οπότε τα σημεία βρίσκονται σε έναν κύκλο γύρω από την αρχή.

Παρακάτω απεικονίζεται ένα παράδειγμα από το σύστημα διαμόρφωσης 16QAM, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, όπου απεικονίζεται και η κωδικοποίηση της πληροφορίας (κατά Hamming) σε κάθε σύμβολο του διαγράμματος αστερισμού Huawei , “What is QAM?” , Huawei .



Εικόνα 9 16Bit QAM

## 4.4 Optical spectrum

Για την ανάλυση των οπτικών ασύρματων μεταδόσεων της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε επίσης η μελέτη του φάσματος με χρήση ενός εργαλείου οπτικού φασματικού αναλυτή. Με τον όρο φάσμα περιγράφεται ουσιαστικά η κατανομή της ενέργειας ενός σήματος ως προς την συχνότητα ή το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στην περίπτωση των οπτικών επικοινωνιών, ο όρος οπτικό φάσμα χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ανάλυση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στις συχνότητες των οπτικών επικοινωνιών (γύρω από τα 193 THz), δηλαδή δεν περιλαμβάνει μόνο το ορατό φάσμα (αυτό που ανιχνεύεται από το ανθρώπινο μάτι) αλλά και τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται από τα οπτοηλεκτρονικά συστήματα του υπεριώδους και του υπέρυθρου φάσματος. Dr Rudiger Paschotta, “Optical Spectrum”, RP PHOTONICS, 2021

## 4.5 Signal to noise Ratio (SNR)

Στις αναλογικές και ψηφιακές επικοινωνίες, η αναλογία σήματος προς θόρυβο, η οποία περιγράφεται από το Signal to Noise Ratio (S/N ή SNR), μπορεί να είναι ένας βαθμός της ποιότητας ενός συγκεκριμένου σήματος σε σχέση με τον θόρυβο του σήματος (ανεπιθύμητο σήμα). Το S/N μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση μιας σταθερής εξίσωσης που συγκρίνει τα δύο επίπεδα ισχύος (σήματος προς θόρυβο) και επιστρέφει το λόγο αυτών, ο οποίος χαρακτηρίζει κατά πόσο το επίπεδο θορύβου επηρεάζει το σήμα πληροφορίας. Ως λόγος σημάτων αποτελεί ουσιαστικά μια απλή τιμή. Ωστόσο συνήθως εκφράζεται σε λογαριθμική κλίμακα, δηλαδή ως μια απλή αριθμητική τιμή σε ντεσιμπέλ (dB). Ο λόγος μπορεί να είναι μηδέν, θετικός ή αρνητικός αριθμός. Ένας λόγος σήματος προς θόρυβο πάνω από 0 dB δείχνει ότι το επίπεδο σήματος είναι μεγαλύτερο από το επίπεδο θορύβου. Όσο υψηλότερος είναι ο λόγος, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα του σήματος. Ο θόρυβος ενσωματώνει κάθε ανεπιθύμητο σήμα (πλην του σήματος πληροφορίας) και επιδρά στο σήμα της πληροφορίας, υποβαθμίζοντας την ποιότητα του και κατά συνέπεια το πιθανά λάθη κατά την ανίχνευση και αποδιαμόρφωση. Μπορεί να ενσωματώσει θερμό, κβαντικό, ηλεκτρονικό θόρυβο ή θόρυβο από ανεπιθύμητα σήματα ενδοδιαμόρφωσης, καθώς και άλλες μορφές θορύβου. Εάν ο θόρυβος είναι αρκετά σημαντικός σε σύγκριση με το επιθυμητό σήμα - δηλαδή το SNR είναι χαμηλό - μπορεί να επηρεάσει την αποδιαμόρφωση του τελικού λαμβανόμενου σήματος, προκαλώντας λάθη. Ένα παράδειγμα που εξηγεί την επίδραση του θορύβου είναι η ανίχνευση ανεπιθύμητης ισχύος θορύβου κατά τη λήψη του συμβόλου ‘0’, που κανονικά θα ήταν επιθυμητό να μην εμφανίζεται ισχύς σε αυτό το σύμβολο, με αποτέλεσμα να ερμηνεύεται εσφαλμένα η παρουσία ισχύος ως ‘1’ αντί για ‘0’. Ο θόρυβος και το χαμηλό SNR επιδρούν σε όλες τις επικοινωνίες και κάθε μορφή μεταφοράς δεδομένων, π.χ. αρχεία κειμένου, γραφικών, τηλεμετρίας, εφαρμογών και ροών ήχου και βίντεο.

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο μετριέται συνήθως σε ντεσιμπέλ και μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση λογαρίθμου βάσης 10. Ωστόσο, ο ακριβής τύπος εξαρτάται από τον τρόπο μέτρησης των επιπέδων σήματος και θορύβου. Η αναλυτική έκφραση του SNR ορίζεται ως

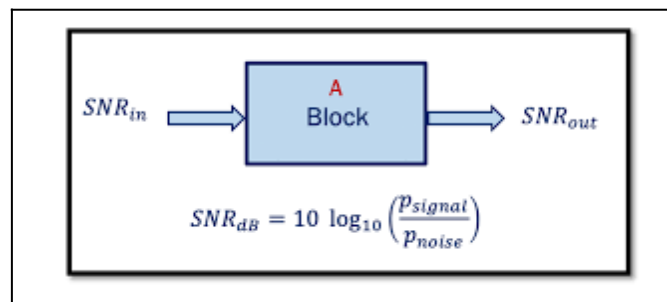
$$S/N = 20 \log_{10}(V_s/V_n)$$

όπου  $V_s$  είναι η τάση του σήματος μετρημένο σε μικροβόλτ και  $V_n$  είναι ο θόρυβος σε μικροβόλτ. Ωστόσο, εάν το σήμα και ο θόρυβος μετρώνται σε Watt, ο τύπος είναι ελαφρώς διαφορετικός:

$$S/N = 10 \log_{10}(P_s/P_n)$$

όπου το γράμμα P χρησιμοποιείται συχνά σε αυτούς τους τύπους για να δηλώσει την ισχύ.

Όταν το  $P_s$  ισούται με το  $P_n$ , το snr θα είναι 0. Ένας λόγος 0 dB δηλώνει ότι το σήμα ανταγωνίζεται άμεσα το επίπεδο θορύβου, με αποτέλεσμα ένα σήμα που αγγίζει τα όρια του μη αναγνώσιμου. Στις ψηφιακές επικοινωνίες, αυτό μπορεί να προκαλέσει μείωση της ταχύτητας των δεδομένων λόγω συχνών σφαλμάτων που απαιτούν από το σύστημα μετάδοσης να στέλνει νέα πακέτα δεδομένων. Όταν το  $P_s$  είναι μεγαλύτερο από το  $P_n$ , το snr θα είναι θετικό. Ιδανικά, το  $P_s$  πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο από το  $P_n$  για να ελαχιστοποιηθεί η παρεμβολή θορύβου .



Εικόνα 10 Αναπαράσταση του SNR και ο τύπος

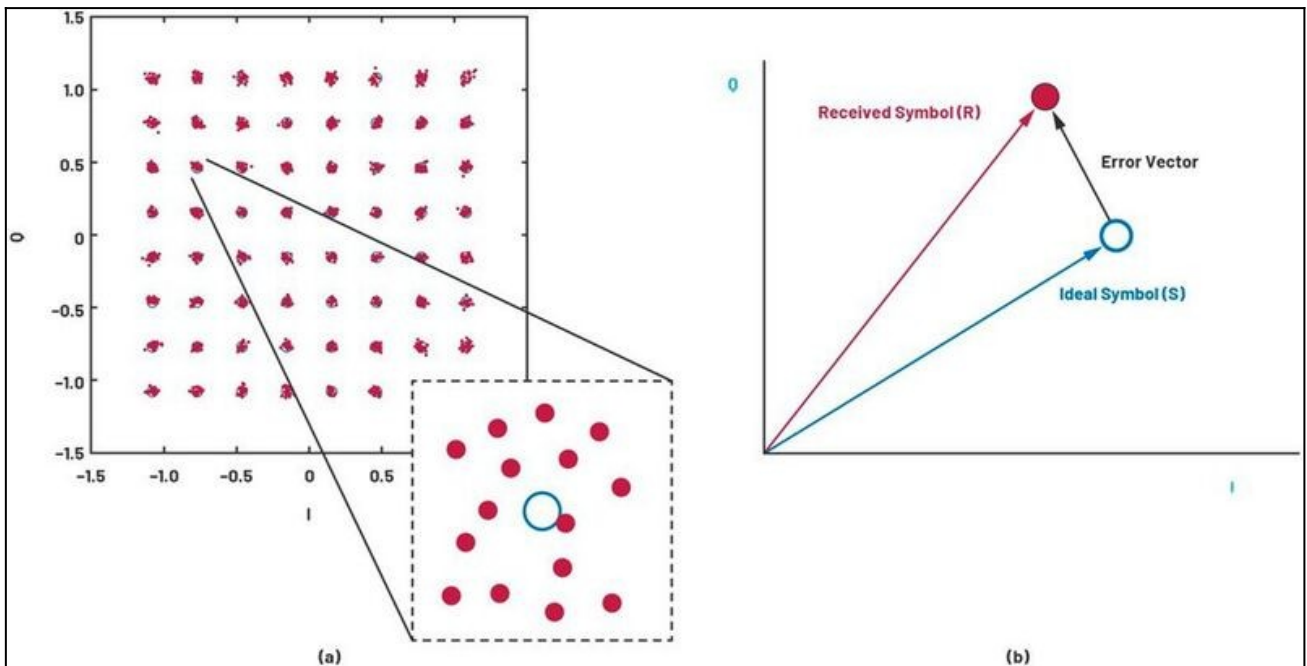
## 4.6 Error Vector Magnitude (EVM)

Το μετρικό Error Vector Magnitude EVM μπορεί να είναι μια απλή μετρική για την αξιολόγηση του συνδυασμού όλων των αλλοιώσεων του σήματος ενός συστήματος. Χρησιμοποιείται συχνά για να αξιολογήσει τις επιδόσεις των συστημάτων μετάδοσης πληροφορίας που χρησιμοποιούν κάποιο ανώτερο σύστημα ψηφιακής διαμόρφωσης, η οποία μπορεί να αναπαρασταθεί μέσω του διαγράμματος των διανυσμάτων της συμφασικής συνιστώσας (I) και της κάθετης συνιστώσας (Q) στο διάγραμμα αστερισμού. Γενικά, το μετρικό EVM υπολογίζει τη σύγκριση του πραγματικού

σήματος και την απόκλιση αυτού ως προς την ιδανική θέση του συμβόλου του αστερισμού για κάθε σήμα που λαμβάνει. Το EVM συνδέεται στενά με το ρυθμό σφάλματος bit (BER) μιας συγκεκριμένης παλμοσειράς ή ροής δεδομένων. Καθώς τα σύμβολα που λαμβάνει απομακρύνονται από το σημείο αστερισμού, αυξάνεται η πιθανότητα να εμπίπτουν στο άλλο σημείο του αστερισμού, και λόγω αυτής της μετατόπισης να ανιχνευτούν εσφαλμένα ως το διπλανό σύμβολο, κάτι που μεταφράζεται ως επιπλέον επιβάρυνση του ρυθμού σφαλμάτων BER.

Μια σημαντική διάκριση μεταξύ του BER και του EVM είναι ότι το BER ενός μεταδιδόμενου σήματος υπολογίζεται με βάση το μεταδιδόμενο bit, ενώ το EVM υπολογίζεται με βάση την απόσταση του πλησιέστερου σημείου αστερισμού του συμβόλου από τη θέση του συμβόλου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα σύμβολα μπορεί να διασχίζουν το κατώφλι απόφασης κατά την αποδιαμόρφωση, κάτι που συνεπάγεται λάθος στη συνολική αποδιαμόρφωση του συμβόλου. Εάν το σύμβολο πέσει πιο κοντά στο άλλο δηλαδή στην ιδανική θέση συμβόλου, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερο EVM. Επομένως, ενώ το EVM και το BER συνδέονται μεταξύ τους, η σχέση αυτή μπορεί να μην ισχύει για πολύ υψηλά επίπεδα παραμόρφωσης σήματος. Οι σημερινές γραμμές επικοινωνίας απαιτείται να υποστηρίζουν ένα τουλάχιστον ικανοποιητικό επίπεδο EVM με βάση τα μεταδιδόμενα ή λαμβανόμενα χαρακτηριστικά της σημαίας, όπως ο ρυθμός πληροφορίας και η ταχύτητα μεταφοράς.

Μια άλλη μορφή θορύβου που επηρεάζει το EVM είναι ο θόρυβος φάσης, ο οποίος έχει τυχαίες διακυμάνσεις της φάσης και της συχνότητας μιας κυματομορφής και επίσης όλα τα μη γραμμικά κυκλώματα έχουν θόρυβο φάσης. Οι κύριες πηγές θορύβου φάσης σε ένα σύστημα μπορούν να εντοπιστούν στους ταλαντωτές του, το ρολόι αναφοράς, και την διαφωνία μεταξύ του τοπικού ταλαντωτή και του ρολογιού δειγματοληψίας Erkan Acar, “ How Error Vector Magnitude (EVM) Measurement Improves Your System-Level Performance” , Analog devices , 2021 .



Εικόνα 11 EVM Erkan Acar, “ How Error Vector Magnitude (EVM) Measurement Improves Your System-Level Performance” , Analog devices , 2021

#### 4.7 Symbol Error Rate (SER)

Ο ρυθμός λήψης σφαλμάτων στα σύμβολα – symbol error rate είναι μία παράμετρος που χρησιμοποιείται ευρέως στην αξιολόγηση συστημάτων τα οποία μεταδίδουν ψηφιακά δεδομένα τύπου QAM-QPSK. Ένα σύμβολο μεταφράζεται σε μία αλληλουχία ψηφίων ανάλογα με το σύστημα διαμόρφωσης και την κωδικοποίηση, όπως απεικονίζεται για παράδειγμα στην Εικόνα 9, όπου ένα σύμβολο 16QAM μεταφράζεται σε μια ακολουθία δεδομένων. Για παράδειγμα το επάνω δεξιά σύμβολο του διαγράμματος αστερισμού περιγράφεται από τη σειρά ψηφίων ‘1010’. Σε αυτά τα συστήματα έχουμε αποστολή συμβόλων τα οποία στους δέκτες μεταφράζονται σε Bits. Αν λόγω του θορύβου, υπάρξει μετατόπιση του λαμβανόμενου σήματος, τότε τα πλησιέστερα γειτονικά σύμβολα του διαγράμματος αστερισμού είναι το ‘1011’ στα αριστερά ή το ‘1110’ από κάτω. Η αναλυτική έκφραση και τύπος υπολογισμού του Symbol Error Rate είναι:

$$SER = \text{Πλήθος λανθασμένων συμβόλων} / \text{Συνολικό πλήθος σταλμένων συμβόλων}$$

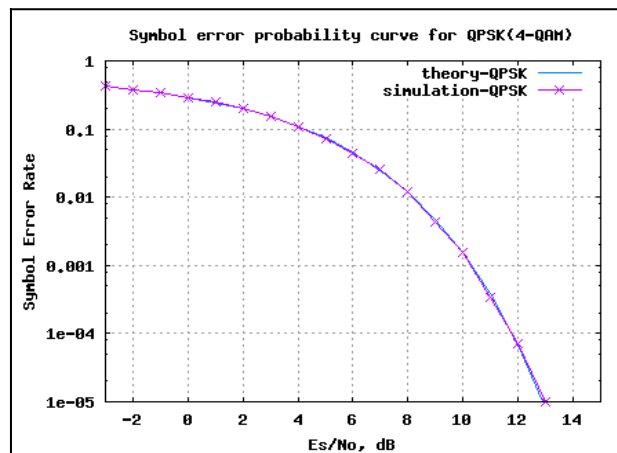
Οι παράγοντες που επηρεάζουν το SER είναι

- *Παρεμβολές*: Τα επίπεδα παρεμβολών που υπάρχουν σε ένα σύστημα καθορίζονται γενικά από εξωτερικούς παράγοντες και δεν μπορούν να αλλάξουν από το σχεδιασμό του συστήματος. Ωστόσο, είναι δυνατό να ρυθμιστεί το εύρος ζώνης του συστήματος. Η μείωση του εύρους ζώνης μειώνει τις παρεμβολές αλλά και την διακίνηση των δεδομένων.



- *Αύξηση της ισχύος μετάδοσης:* Είναι επίσης δυνατό να αυξηθεί το επίπεδο ισχύος του συστήματος έτσι ώστε να αυξηθεί η ισχύς ανά symbol.
- *Χαμηλότερη τάξη διαμόρφωσης :* Με την χαμηλότερη τάξη διαμόρφωσης μπορεί να επιτευχθεί μείωση του SER , αλλά εις βάρος της απόδοσης δεδομένων.
- *Μείωση του εύρους ζώνης :* Μια άλλη προσέγγιση που μπορεί να υιοθετηθεί για τη μείωση του SER είναι η μείωση του εύρους ζώνης. Θα ληφθούν χαμηλότερα επίπεδα θορύβου και συνεπώς ο λόγος σήματος προς θόρυβο θα βελτιωθεί. Και πάλι όμως αυτό οδηγεί σε μείωση της δυναμικότητας των δεδομένων.

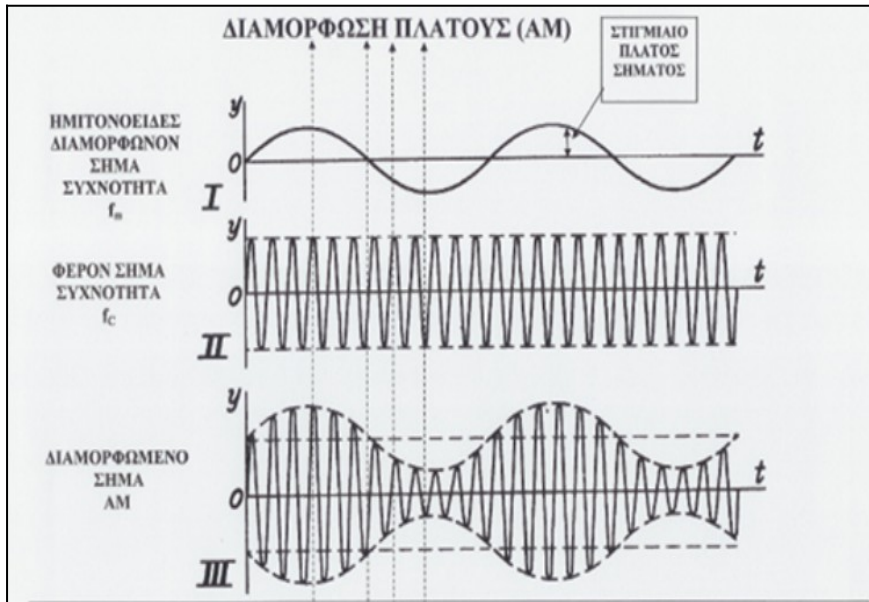
Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται πως επηρεάζεται ο ρυθμός (πιθανότητα) λήψης σφάλματος κατά την αποδιαμόρφωση ενός QPSK σήματος καθώς αυξάνεται ο λόγος της ενέργειας (Es) του συμβόλου ως προς το θόρυβο (No), ακολουθώντας μια σημαντική μείωση για αυξανόμενες τιμές του Es/No. Error: Reference source not found



Εικόνα 12 Αναπαράσταση του SER

## 4.8 Διαμόρφωση διπλής πλευρικής ζώνης με παρουσία φέροντος

Στην παρούσα εργασία έχει χρησιμοποιηθεί η διαμόρφωση πλάτους (Amplitude modulation – AM) διπλής πλευρικής ζώνης παρουσία φέροντος σήματος. Η διαμόρφωση κατά AM ορίζεται σαν μία διαδικασία που το πλάτος του φέροντος  $c(t)$  μεταβάλλεται γύρω από μια μέση τιμή γραμμικά σε σχέση με το σήμα βασικής ζώνης  $m(t)$ . Η λειτουργία της διαμόρφωσης πλάτους απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 13 Διαμόρφωση διπλής πλευρικής ζώνης

Παρακάτω παρουσιάζεται και η αναλυτική-μαθηματική συνάρτηση της θεωρίας διαμόρφωση διπλής πλευρικής ζώνης με παρουσία φέροντος :

**Σήμα πληροφορίας:**  $m(t) = 1 \cdot \cos(2\pi f_m(t))$

**Φέρον σήμα:**  $c(t) = 1 \cdot \cos(2\pi f_c(t))$

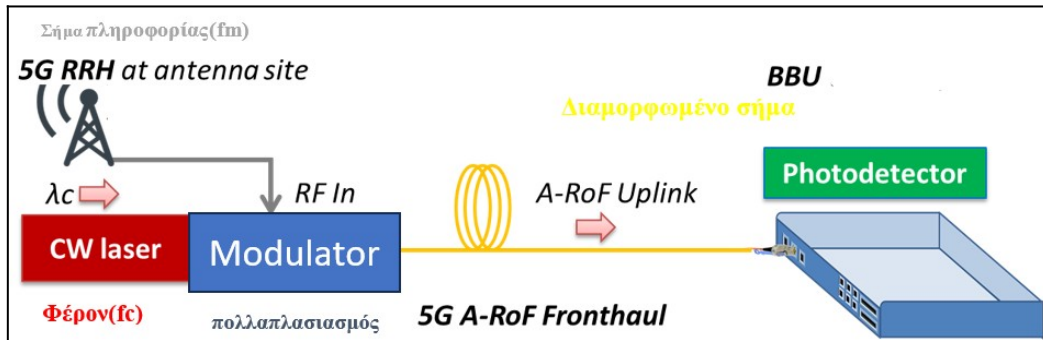
Η διαμόρφωση κατά πλάτος διπλής πλευρικής ζώνης παρουσία φέροντος προκύπτει ως πολλαπλασιασμός του σήματος πληροφορίας με το φέρον, ως εξής

**Διαμορφωμένο σήμα :**

$$\begin{aligned} & \text{Φέρον Σήμα} \cdot \text{Σήμα πληροφορίας} \\ &= c(t) \cdot (1 + m(t)) \\ &= c(t) + c(t)m(t) \\ &= 1 \cdot \cos(2\pi f_c(t)) + \cos(2\pi f_c(t)) \cdot \cos(2\pi f_m(t)) \\ &= \cos(2\pi f_c(t)) + \frac{1}{2} \cos(2\pi f_c(t) - 2\pi f_m(t)) + \frac{1}{2} \cos(2\pi f_c(t) + 2\pi f_m(t)) \end{aligned}$$

Στη παρακάτω εικόνα έχουμε την απεικόνιση ενός συστήματος μιας οπτικής μετάδοσης 5G/6G και στην αρχή απεικονίζεται το σήμα πληροφορίας μιας κεραίας, το φέρον σήμα όπου στον οπτικό

διαμορφωτή όπου γίνεται ο πολλαπλασιασμός του σήματος πληροφορίας με το φέρον για να κατασκευαστεί το οπτικό ασύρματο σήμα, διαμορφωμένο κατά πλάτος AM διπλής πλευρικής ζώνης παρουσία φέροντος. Έπειτα το οπτικό ασύρματο σήμα περνάει μέσα από μία οπτική ίνα και στο τέλος φτάνει σε μία φωτοδίοδο, όπου γίνεται η τελική οπτο-ηλεκτρονική μετατροπή και ανίχνευση. Και εμφανίζεται το τελικό αποδιαμορφωμένο σήμα στο δέκτη.



Εικόνα 14 Σύστημα οπτικής ασύρματης μετάδοσης

## 5. Πειραματικές υλοποιήσεις προσομοίωσης

### 5.1 Υλοποίηση της θεωρητικής συνάρτησης του power fading

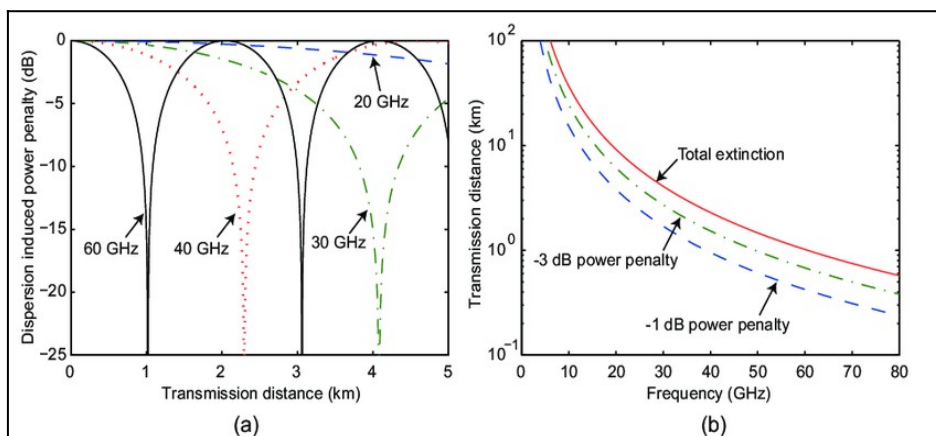
Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται πως μελετήθηκε η ανάλυση των διαλείψεων ισχύος (power fading) που προκύπτει από την διαμόρφωση διπλής πλευρικής ζώνης παρουσία φέροντος των ραδιοσημάτων για φασματικά αποδοτική αναλογική μετάδοση των ασύρματων σημάτων πάνω σε οπτικά φέροντα. Όταν τα ραδιοσήματα οποιασδήποτε συχνότητας (π.χ. και των χιλιοστομετρικών συχνοτήτων mmWave) διαμορφώνουν ένα οπτικό φέρον, το διαμορφωμένο σήμα θα έχει μορφή διπλής πλευρικής ζώνης με παρουσία φέροντος, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, όπου οι πλευρικές ζώνες βρίσκονται εκατέρωθεν του οπτικού φέροντος. Όταν το οπτικό σήμα έχει διαμορφωθεί από υψηλές χιλιοστομετρικές συχνότητες mmWave διαδίδεται κατά μήκος μιας ίνας που έχει κάποια διασπορά (π.χ. με παράμετρο  $D=17$  ps/nm\*km για τις μονότροπες οπτικές ίνες), οι δύο πλευρικές ζώνες θα παρουσιάζουν διαφορετικά ποσά μετατόπισης φάσης σε σχέση με το οπτικό φέρον. Κατά την ανίχνευση στον φωτοανιχνευτή, η διαδικασία της ανίχνευσης της ισχύος, η οποία ακολουθεί τετραγωνικό μαθηματικό τύπο, παράγει δύο συνιστώσες παλμού στην επιθυμητή συχνότητα των χιλιοστομετρικών συχνοτήτων. Η λαμβανόμενη ισχύς ταλάντωσης του RF σήματος του χιλιοστομετρικού σήματος στην έξοδο της φωτοδιόδου θα μεταβάλλεται ανάλογα με τη σχετική διαφορά φάσης. Christina Lim, Ampalavanapillai Nirmalathas, Masduzzaman Bakaul, Ka-Lun Lee, I Dalma Novak, and Rod Waterhouse, “ Mitigation strategy for transmission impairments in millimeter wave radio-over-fiber networks” , Journal Of Optical Networking Vol. 8, No. 2 , February 2009

Η μεταβολή της ισχύος RF εξαρτάται από την ένα παράμετρο διασποράς, την απόσταση μετάδοσης και τη συχνότητα των κυμάτων mm, όπως διέπεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{RF} \propto \cos^2 \left[ \pi c L D \left( \frac{f_{mm}}{f_0} \right)^2 \right]$$

*Εικόνα 15 Συνάρτηση της διασποράς ίνας Christina Lim, Ampalavanapillai Nirmalathas, Masduzzaman Bakaul, Ka-Lun Lee, I Dalma Novak, and Rod Waterhouse, “ Mitigation strategy for transmission impairments in millimeter wave radio-over-fiber networks” , Journal Of Optical Networking Vol. 8, No. 2 , February 2009*

Το  $D$  αντιπροσωπεύει την παράμετρο διασποράς της ίνας σε ps/nm/km,  $c$  είναι η ταχύτητα της του φωτός στο κενό,  $L$  το μήκος μετάδοσης της ίνας,  $f_{\text{nm}}$  ή αλλιώς  $f_m$  αντιπροσωπεύει το σήμα πληροφορίας, και  $f_0$  ή αλλιώς  $f_c$  είναι το φέρον σήμα του οπτικού φορέα.



Εικόνα 16 διάγραμμα αναπαράστασης διασποράς ίνας Andreas O. J. Wiberg, “ Generation, Modulation, and Detection of Signals in Microwave Photonic Systems”, Research gate, January 2008

Στη παραπάνω εικόνα έχουμε την αναπαράσταση της διασποράς ίνας όπως αναφερθήκαμε και πιο πάνω με βάση τη συνάρτηση και για την υλοποίηση της θεωρίας.

## 4.2 Υλοποίηση διασποράς ίνας μέσω του Matlab

Ο παρακάτω κώδικας δημιουργήθηκε μέσω του Matlab με βάση τη συνάρτηση της διασποράς ίνας.

Ορίζεται το σήμα πληροφορίας με παράμετρο συχνότητας  $f$ , που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι στα 28GHz το μήκος ίνας σε αποστάσεις  $L = 1$  έως 3Km, η παράμετρος της διασποράς της ίνας είναι στα  $D = 16$  ps/nm/km, και το φέρον σήμα όπως βλέπουμε παρακάτω είναι στα 191.7 Hz.

Στο τέλος ο κώδικας αυτός του Matlab με την εντολή plot κατασκευάζει τα γραφήματα που θα δούμε και στη συνέχεια.

```
clear all
clc

f = [28]*1e9 ; # sixnotita se Hz
L = [1:0.1:3]*1e3 ; # mhkos inas se m
D = 16*(1e-12)*(1/1e-9)*(1/1e3) ; # dispersion parameter
f0 = 191.7*1e12 ; # suxnotita laser
c = 2.99792*10^8 ; # speed of light

P = cos(pi*c*L*D*(f-f0));
Prf = P.^2;
Prfdb = 10*log10(Prf);

plot(L , Prfdb)

grid on;
legend('normalize Rfpower , receiver ');
xlabel('fiber length');
ylabel('Rfpower in db');
title('Dispersion fading 28 GHz up to 3Km');
set(gca, 'FontSize', 16);
```

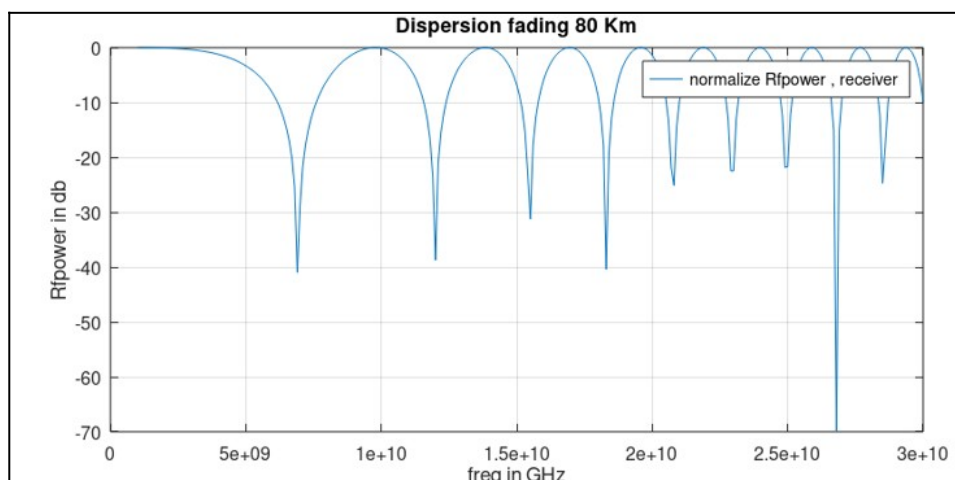
Εικόνα 17 Κώδικας Matlab

### 4.2.1 Γραφήματα θεωρίας με βάση των κώδικα του Matlab

- Πείραμα 1: Μήκος ίνας 80Km για Συχνότητα σήματος (IF5G) από 1GHz έως 12GHz

Ο στόχος ήταν να μελετηθεί η απώλεια ισχύος λόγω της διασποράς ίνας σε μεγάλες αποστάσεις. Για το σκοπό αυτό, προσομοιώθηκε η διασπορά της ίνας μήκους 80 χιλιομέτρων μέσω Matlab με βάση τον κώδικα προσομοίωσης της παραγράφου 4.2, για διαφορετικές τιμές της συχνότητας, που κυμαίνονταν από  $f = 1$  GHz έως  $f = 30$  GHz στον οριζόντιο άξονα, ενώ ο κάθετος άξονας υπολογίζει την ισχύ που φτάνει στο δέκτη.

Στο παρακάτω γράφημα που προέκυψε για το Πείραμα 1 απεικονίζεται στην Εικόνα 18, όπου εμφανίζονται πολλοί διαδοχικοί μηδενισμοί-απώλειες του σήματος, με τον πρώτο μηδενισμό να εμφανίζεται στη συχνότητα των  $f=7\text{GHz}$ , το δεύτερο μηδενισμό στη συχνότητα  $f = 12 \text{ GHz}$ , τον τρίτο μηδενισμό στη συχνότητα  $f= 16 \text{ GHz}$ .

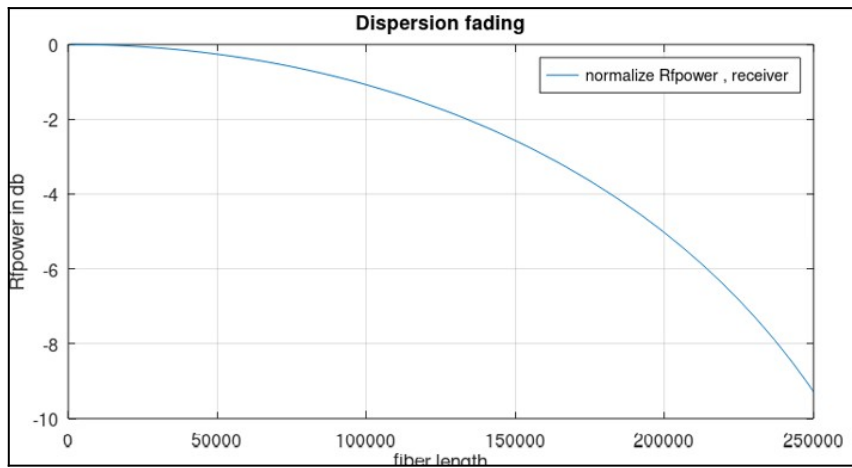


Εικόνα 18 Πείραμα 1

- **Πείραμα 2: Μήκος ίνας 10Km έως 70Km Συχνότητα σήματος 3.5GHz**

Ο στόχος ήταν να μελετηθεί η διασπορά της ίνας σε μεγάλες αποστάσεις. Για το σκοπό αυτό, προσομοιώθηκε η διασπορά της ίνας μήκους έως 70 χιλιομέτρων μέσω Matlab με βάση τον κώδικα προσομοίωσης της παραγράφου 4.2, για σταθερή τιμή της συχνότητας, που κυμαίνονταν στα 3.5GHz στον οριζόντιο άξονα, ενώ ο κάθετος άξονας εμφανίζει το μήκος ίνας.

Στο παρακάτω γράφημα που προέκυψε για το Πείραμα 2 απεικονίζεται στην Εικόνα 19, όπου εμφανίζεται η απώλεια του σήματος όπου είναι εμφανές η επίδραση διασποράς ίνας και αρχίζει να είναι πιο εμφανές έως τα 70Km με σταθερή συχνότητας σήματος στα 3,5GHz.



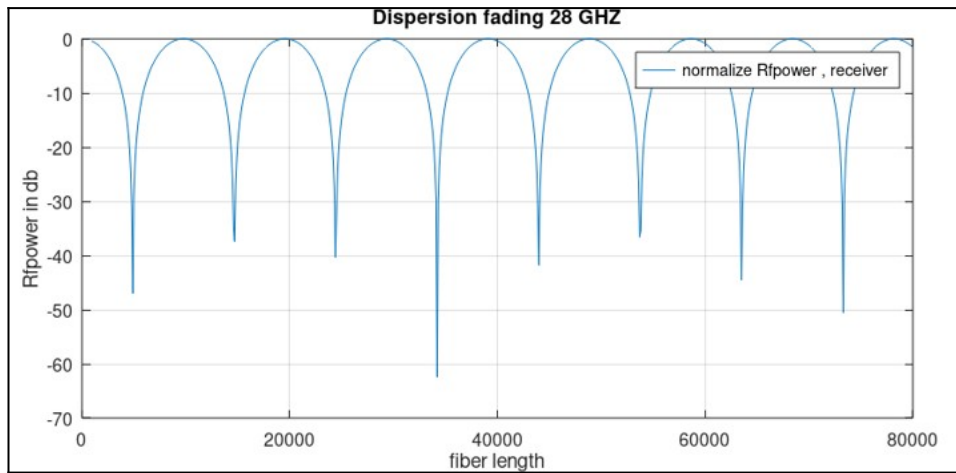
*Εικόνα 19 Πείραμα 2*

- **Πείραμα 3 : Μήκος ίνας 1Km έως 6Km Συχνότητα σήματος 28GHz**

Ο στόχος ήταν να μελετηθεί η διασπορά της ίνας σε απόσταση έως 6 Km. Για το σκοπό αυτό, προσομοιώθηκε η διασπορά της ίνας μήκους από 1Km έως 6Km μέσω Matlab με βάση τον κώδικα προσομοίωσης της παραγράφου 4.2, για σταθερή τιμή της συχνότητας στα 28 GHz, στον οριζόντιο άξονα, ενώ ο κάθετος άξονας εμφανίζει το μήκος ίνας και τους μηδενισμούς- απώλεια του σήματος που εμφανίζεται στη παρακάτω εικόνα.

Στο παρακάτω γράφημα που προέκυψε για το Πείραμα 3 απεικονίζεται στην Εικόνα 20, όπου εμφανίζεται η απώλεια του σήματος όπου είναι εμφανές η επίδραση διασποράς ίνας, καθώς το μήκος της ίνα ξεκινάει από τα 1Km και καταλήγει στα 6 Km με σταθερή συχνότητα σήματος στα 28 GHz



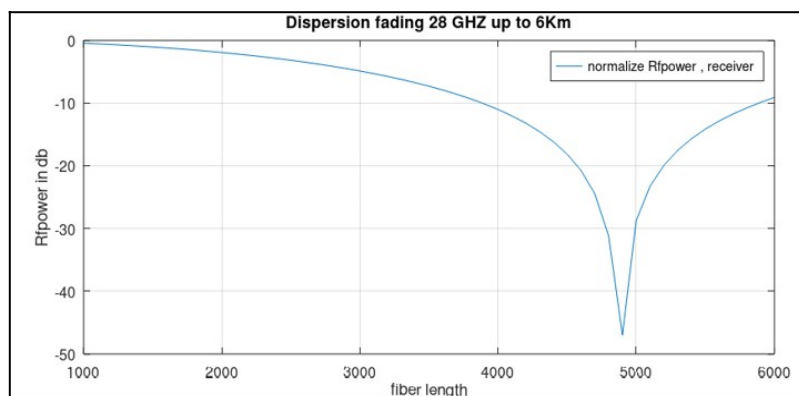


Εικόνα 20 Πείραμα 3

- **Πείραμα 4: Μήκος ίνας 3km Συχνότητα σήματος 28GHz 1000Mbd**

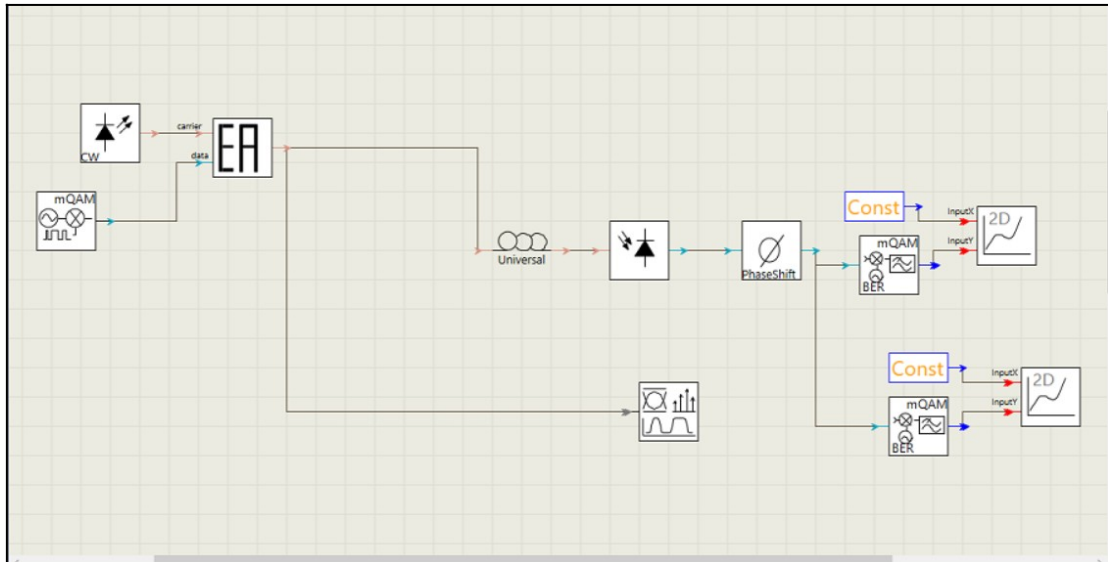
Ο στόχος ήταν να μελετηθεί η διασπορά της ίνας σε απόσταση έως 3Km . Για το σκοπό αυτό, προσομοιώθηκε η διασπορά της ίνας μήκους έως 3Km μέσω Matlab με βάση τον κώδικα προσομοίωσης της παραγράφου 4.2, για σταθερή τιμή της συχνότητας στα 28 GHz , στον οριζόντιο άξονα, ενώ ο κάθετος άξονας εμφανίζει το μήκος ίνας και τον μηδενισμό- απώλεια του σήματος που εμφανίζεται στη παρακάτω εικόνα.

Στο παρακάτω γράφημα που προέκυψε για το Πείραμα 4 απεικονίζεται στην Εικόνα 21, όπου εμφανίζεται η απώλεια του σήματος όπου είναι εμφανές η επίδραση διασποράς ίνας, καθώς το μήκος της ίνα καταλήγει στα 3 Km με σταθερή συχνότητα σήματος στα 28 GHz



Εικόνα 21 Πείραμα 4

### 4.3 Υλοποίηση πειραματικών μετρήσεων οπτικής ασύρματης μετάδοσης στο VPI

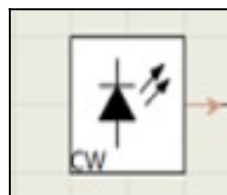


Εικόνα 22 Σύστημα στο VPI

Για την υλοποίηση και προσομοίωση των 5G/6G δικτύων θα χρησιμοποιήσουμε το VPItransmissionMaker. Το VPI είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης και μελέτης οπτικών συστημάτων. Το πρόγραμμα αυτό μας δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε μοντέλα οπτικών διατάξεων που παραμετροποιούνται και συνδέονται μεταξύ τους με εύκολο τρόπο, δίνοντας μια πιστή προσέγγιση του συστήματος που θέλουμε να προσομοιώσουμε. Στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε τη προσομοίωση μιας οπτικής μετάδοσης ενός συστήματος 5G/6G δικτύου. Πιο κάτω θα αναλύσουμε τα μοντέλα που περιέχονται σε ένα τέτοιο σύστημα προσομοίωσης.

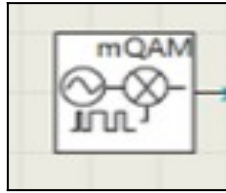
Όπως βλέπουμε τη προσομοίωση στην αρχή έχουμε:

**Laser (Φέρον σήμα)** : Παράγει ένα οπτικό σήμα συνεχούς κύματος



Εικόνα 23 Laser

**Tx radio- transmitter**: Είναι η κεραία δηλαδή το σήμα πληροφορίας ενός συστήματος



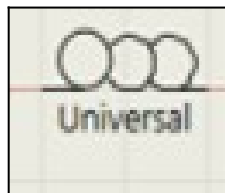
*Εικόνα 24 transmitter*

**Modulator:** Είναι ο διαμορφωτής όπου εκεί πέρα περνάει το σήμα και γίνεται ο πολλαπλασιασμός του σήματος



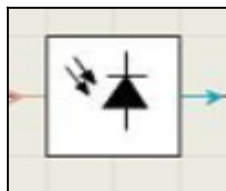
*Εικόνα 25 Modulator*

**Οπτική ίνα:** Μέσα από την οπτική ίνα περνάει το σήμα



*Εικόνα 26 fiber*

**Photodiode:** Χειρίζεται τα οπτικά σήματα που περνάνε μέσα από μία φωτοδίοδο και μετατρέπει το σήμα σε ηλεκτρικό



*Εικόνα 27 Photodiode*

**Analyzer:** Ο αναλυτής κάνει την ανάλυση των οπτικών σημάτων



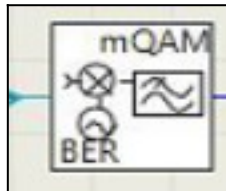
*Εικόνα 28 Analyzer*

**Phaseshift:** Εφαρμόζει μια σταθερή μετατόπιση φάσης σε ένα οπτικό σήμα



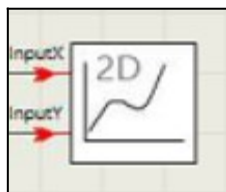
*Εικόνα 29 Phaseshift*

**Rx radio receiver:** Μέσω του receiver εμφανίζεται το enm και το ser του σήματος.



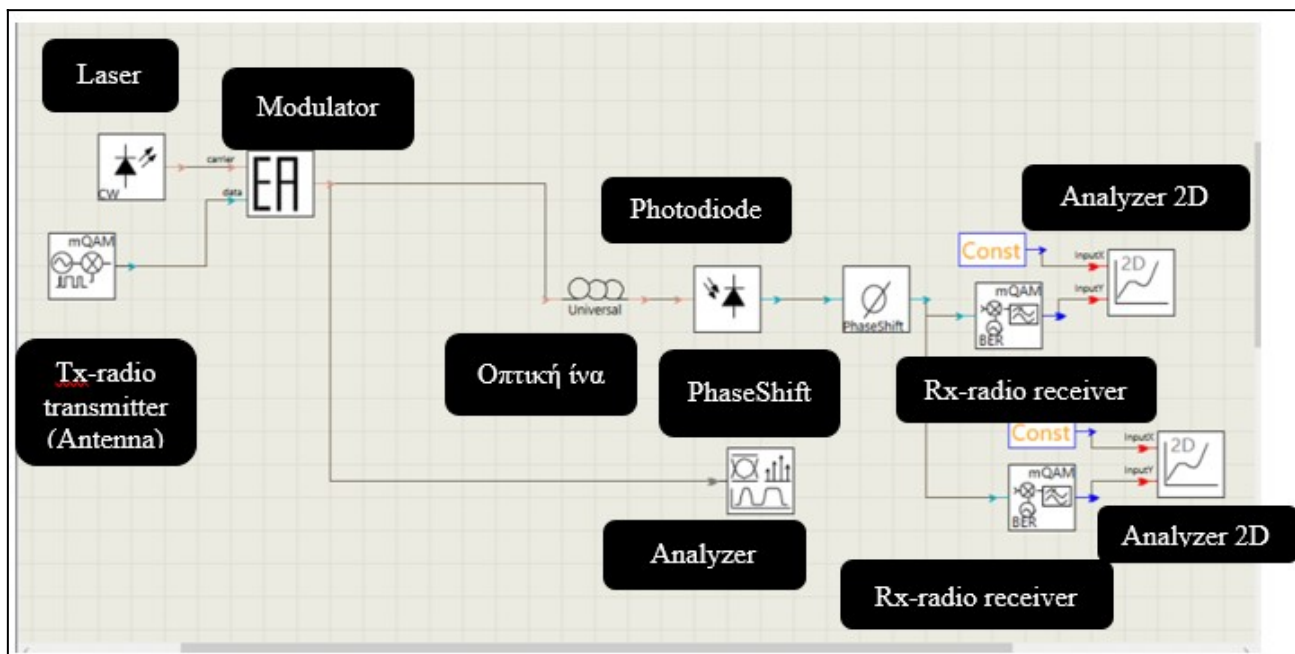
*Εικόνα 30 radio receiver*

**Analyzer 2D:** Λειτουργεί σαν διασύνδεση για τα δισδιάστατα αριθμητικά δεδομένα



*Εικόνα 31 Analyzer 2D*

Η συνολική απεικόνιση της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε, μαζί με τις υποδείξεις των αντίστοιχων μοντέλων για κάθε στοιχείο, εμφανίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 32 VPI

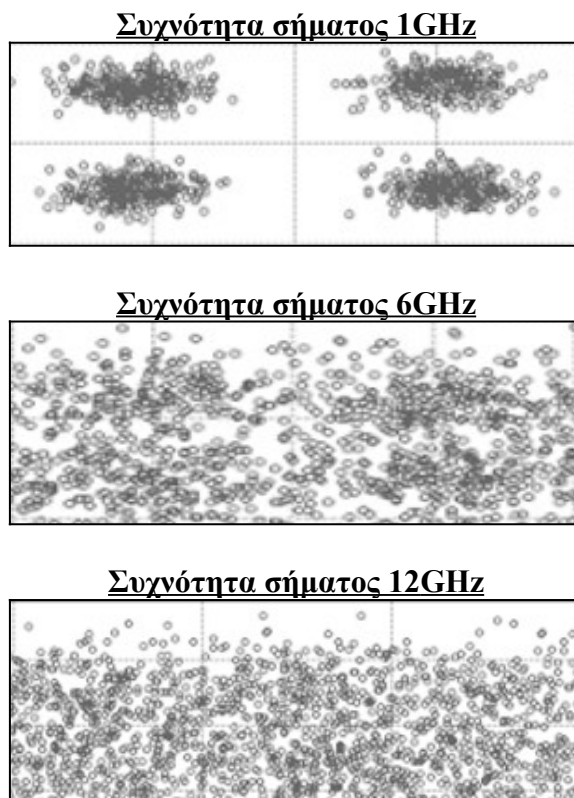
## 5.Αποτελέσματα μελετών της πτυχιακής

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα βασικά αποτελέσματα της πτυχιακής.

### 5.1 Πείραμα 1

Στο πρώτο πείραμα που υλοποιήθηκε με βάση του VPI χρησιμοποιήθηκε το μήκος ίνας που είναι στα 80Km και η συχνότητα του σήματος είναι από 1GHz έως 12GHz. Παρακάτω εμφανίζεται το διάγραμμα αστερισμού.

Στη πρώτη εικόνα όπως βλέπουμε παρακάτω είναι καθαρά διαχωρισμένα τα σύμβολα ,δηλαδή ακόμη το σήμα είναι καθαρό χωρίς κάποιο θόρυβο. Στη δεύτερη και τρίτη εικόνα τα σύμβολα δεν είναι διαχωρισμένα μεταξύ τους, λόγω της επίδρασης της διασποράς ίνας.

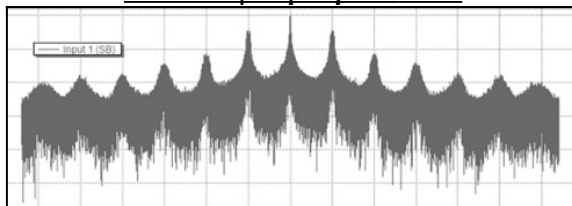


*Εικόνα 33 Διάγραμμα αστερισμού*

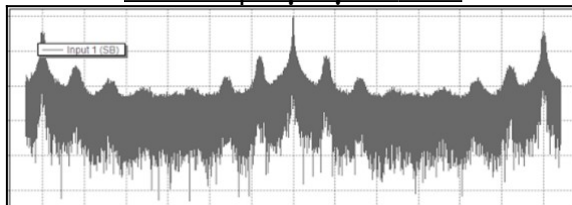
Παρακάτω έχουμε το οπτικό φάσμα που είναι εμφανές η διαμόρφωση της διπλής πλευρικής ζώνης με παρουσία φέροντος. Απεικονίζεται η διαμόρφωση της διπλής πλευρικής ζώνης με συχνότητα

σήματος από 1GHz έως 12GHz και λόγω αλλαγής της συχνότητας του σήματος έχουμε και αλλαγή στη διαμόρφωση της διπλής πλευρικής ζώνης.

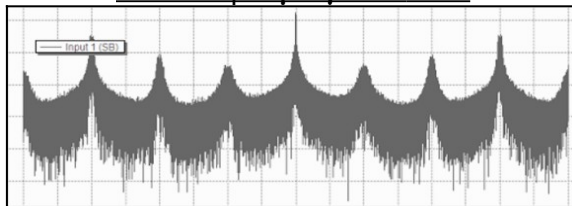
**Οπτικό φάσμα για 1GHz**



**Οπτικό φάσμα για 6GHz**

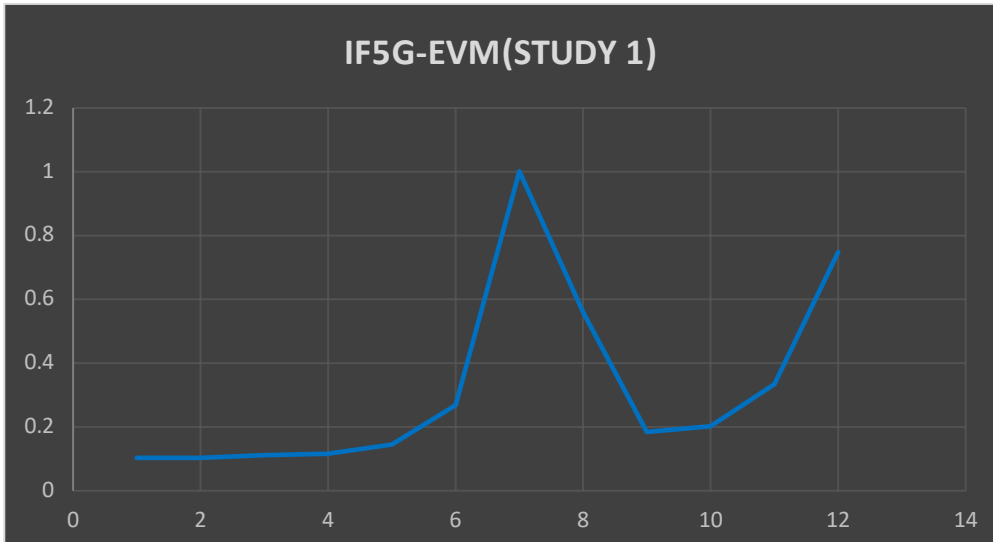


**Οπτικό φάσμα για 12GHz**



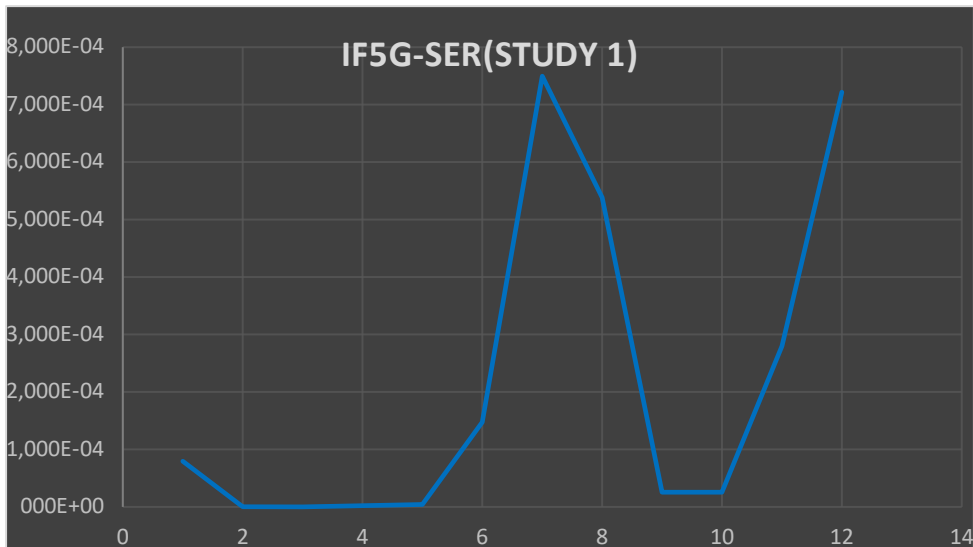
*Εικόνα 34 Οπτικό φάσμα*

Στο παρακάτω διάγραμμα έχουμε την αναπαράσταση του όπου μας δείχνει πόσα bit στάλθηκαν λάθος λόγω του θορύβου



Εικόνα 35 IF5G - EVM

Στο παρακάτω διάγραμμα έχουμε την αναπαράσταση της συχνότητας σήματος και το SER όπου μας δείχνει πόσο ακριβής είναι μια μετάδοση σήματος με βάση το διάγραμμα αστερισμού και εκφράζεται ως συνάρτηση θορύβου όπως βλέπουμε και παρακάτω



Εικόνα 36 IF5G- SER

## 5.2 Πείραμα 2



Στο παρακάτω πείραμα που υλοποιήθηκε μέσω του VPI χρησιμοποιήθηκε το μήκος ίνας που είναι από 10Km μέχρι 70Km και η συχνότητα του σήματος είναι σταθερή στα 3.5GHz. Παρακάτω εμφανίζεται το διάγραμμα αστερισμού.

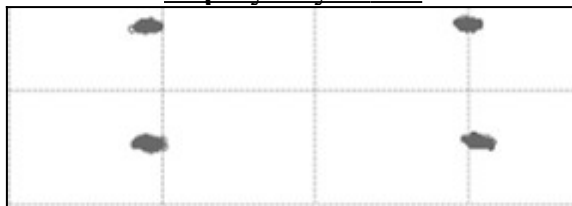
Στη παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το διάγραμμα αστερισμού του Πειράματος 2 και έχουμε τα εξής αποτελέσματα με το σήμα να είναι καθαρά διαχωρισμένα τα σύμβολα, δηλαδή το σήμα είναι καθαρό με μήκος ίνας στα 10 Km.

#### Μήκος ίνας 10Km



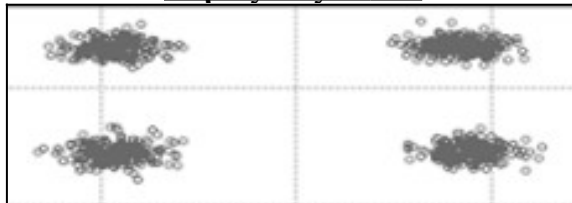
Στη παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το διάγραμμα αστερισμού του Πειράματος 2 και έχουμε τα εξής αποτελέσματα με το σήμα να είναι καθαρά διαχωρισμένα τα σύμβολα, δηλαδή το σήμα παραμένει καθαρό με μήκος ίνας στα 40 Km.

#### Μήκος ίνας 40 Km



Στη παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το διάγραμμα αστερισμού του Πειράματος 2 και έχουμε τα εξής αποτελέσματα με το σήμα να είναι ελάχιστα λιγότερο καθαρά διαχωρισμένα τα σύμβολα, δηλαδή το σήμα αρχίζει να έχει θόρυβο με μήκος ίνας στα 70 Km.

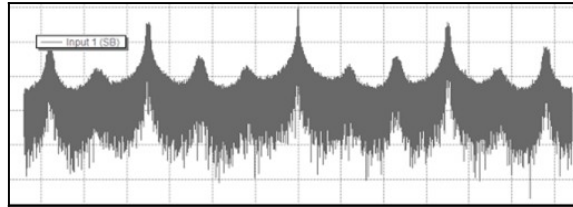
#### Μήκος ίνας 70 Km



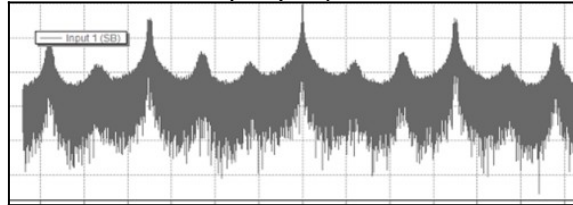
*Εικόνα 37 Διάγραμμα αστερισμού*

Παρακάτω έχουμε το οπτικό φάσμα που είναι εμφανές η διαμόρφωση της διπλής πλευρικής ζώνης με παρουσία φέροντος. Η συχνότητα του σήματος παραμένει σταθερή στα 3.5GHz από τα 10Km έως τα 70Km μήκος σήματος, έτσι και το οπτικό φάσμα παραμένει σταθερό μέχρι τα 70Km.

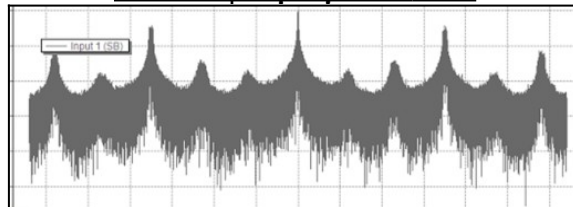
#### Οπτικό φάσμα για 3.5GHz



**Οπτικό φάσμα για 3.5GHz**

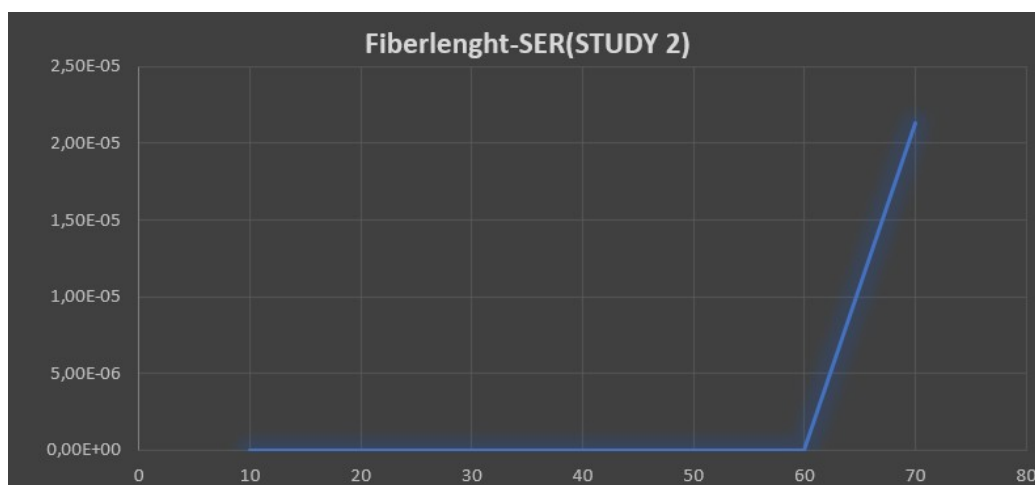


**Οπτικό φάσμα για 3.5GHz**



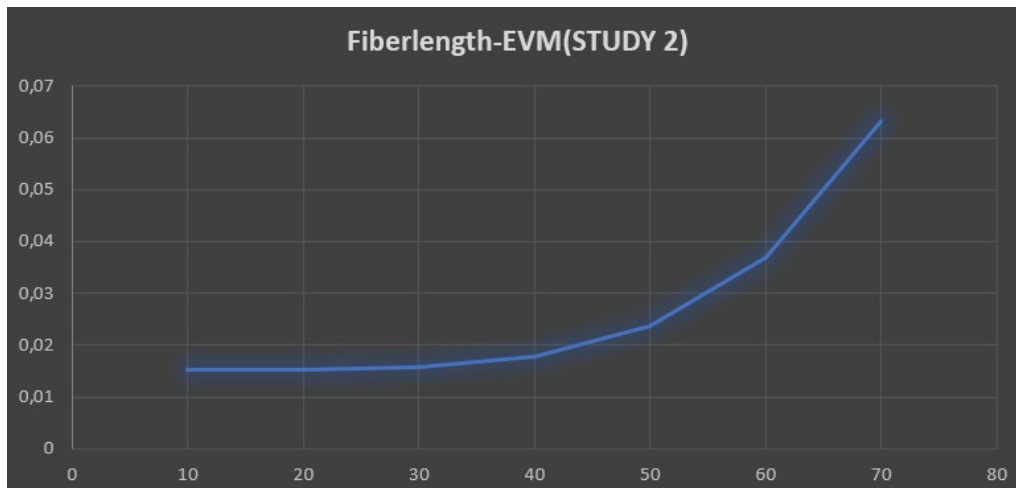
*Εικόνα 38 Οπτικό φάσμα (Πείραμα 2)*

Στο παρακάτω διάγραμμα έχουμε την αναπαράσταση του μήκους της ίνας και το SER όπου μας δείχνει πόσα bit στάλθηκαν λάθος λόγω του θορύβου , από τα 10Km μέχρι τα 60Km το σήμα παραμένει σταθερό χωρίς θόρυβο και έπειτα από τα 60Km αρχίζει να στέλνονται τα λάθος bit λόγω του θορύβου που έχει το σήμα.



*Εικόνα 39 fiberlength - SER( Πείραμα 2)*

Στο παρακάτω διάγραμμα έχουμε την αναπαράσταση του μήκους της ίνας και το EVM όπου μας δείχνει πόσο ακριβής είναι μια μετάδοση σήματος με βάση το διάγραμμα αστερισμού και εκφράζεται ως συνάρτηση θορύβου όπως βλέπουμε και παρακάτω.

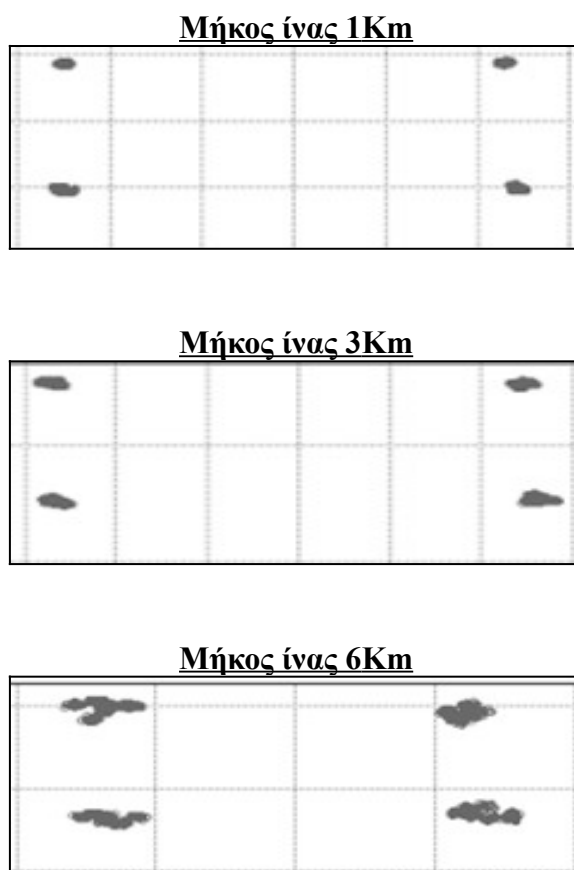


*Εικόνα 40 Fiberlength - EVM (Πείραμα 2)*

### 5.3 Πείραμα 3

Στο παρακάτω πείραμα που υλοποιήθηκε μέσω του VPI χρησιμοποιήθηκε το μήκος ίνας που είναι από 1Km μέχρι 6Km και η συχνότητα του σήματος είναι σταθερή στα 28GHz. Παρακάτω εμφανίζεται το διάγραμμα αστερισμού.

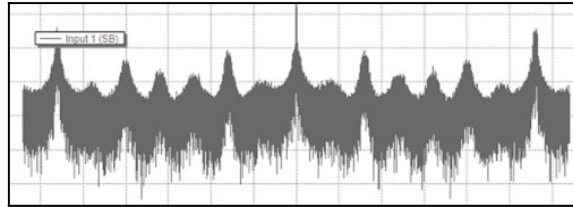
Στα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούμε ότι το σήμα παραμένει καθαρό με διαχωρισμένα τα σύμβολα από το 1Km έως τα 6Km μήκος ίνας. Το σήμα δεν έχει θόρυβο και παραμένει καθαρό.



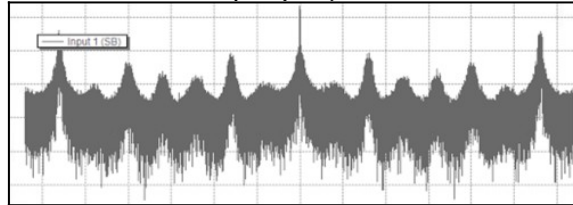
Εικόνα 41 Διάγραμμα αστερισμού(Πείραμα 3)

Στα παρακάτω διαγράμματα έχουμε το οπτικό φάσμα που εμφανίζεται η διπλή πλευρική ζώνη με παρουσία φέροντος και με σταθερή συχνότητα σήματος στα 28GHz. Η διπλή πλευρική ζώνη παραμένει σταθερή λόγω της συχνότητας του σήματος παραμένει σταθερή στα 28GHz.

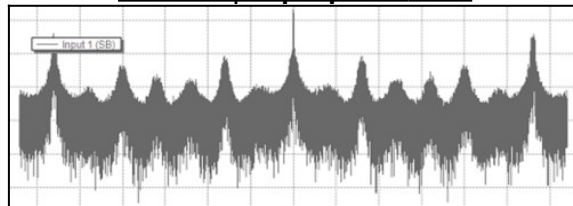
### **Οπτικό φάσμα για 28GHz**



**Οπτικό φάσμα για 28GHz**

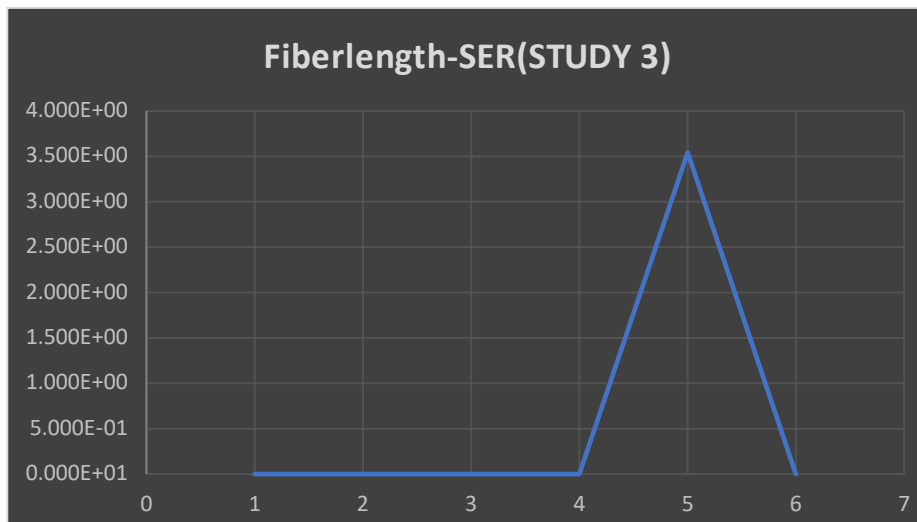


**Οπτικό φάσμα για 28GHz**



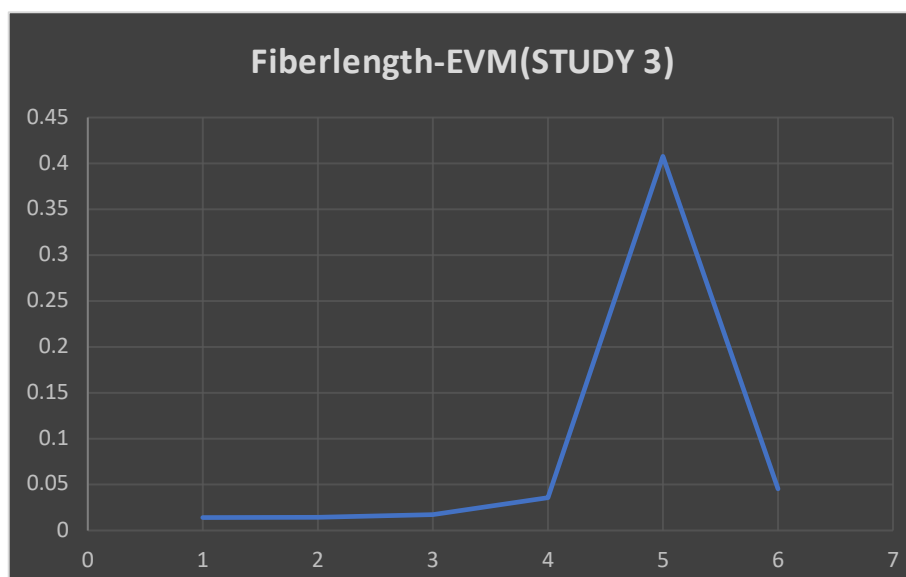
*Εικόνα 42 Οπτικό Φάσμα (Πείραμα 3)*

Στο παρακάτω διάγραμμα έχουμε την αναπαράσταση του μήκους της ίνας στα 6 Km και το SER όπου μας δείχνει πόσα bit στάλθηκαν λάθος λόγω του θορύβου που ξεκινάει από τα 4Km μέχρι τα 6Km.



*Εικόνα 43 fiberlength- SER (Πείραμα 3)*

Στο παρακάτω διάγραμμα έχουμε την αναπαράσταση του μήκους της ίνας και το EVM όπου μας δείχνει πόσο ακριβής είναι μια μετάδοση σήματος με βάση το διάγραμμα αστερισμού και εκφράζεται ως συνάρτηση θορύβου όπως βλέπουμε και παρακάτω.



Εικόνα 44 Fiberlength - EVM (Πείραμα 3)

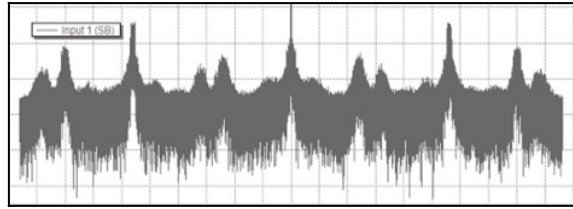
#### 5.4 Πείραμα 4

Στο παρακάτω πείραμα που υλοποιήθηκε μέσω του VPI χρησιμοποιήθηκε το μήκος ίνας που είναι στα 6Km και η συχνότητα του σήματος είναι σταθερή στα 28GHz. Παρακάτω εμφανίζεται το διάγραμμα αστερισμού. Όπως παρατηρούμε το σήμα στα 6Km παραμένει καθαρό με διαχωρισμένα τα σύμβολα.



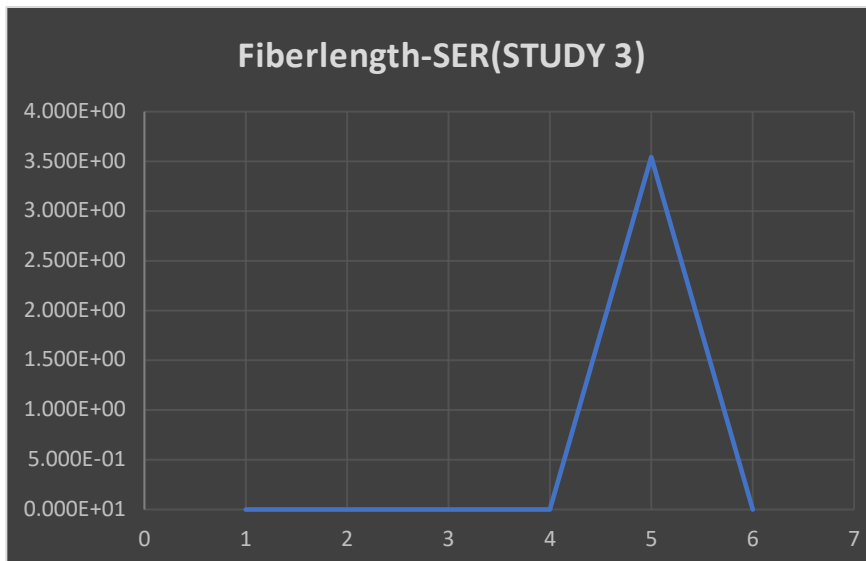
Εικόνα 45 Διάγραμμα αστερισμού(Πείραμα 4)

Στα παρακάτω διαγράμματα έχουμε το οπτικό φάσμα που εμφανίζεται η διπλή πλευρική ζώνη με παρουσία φέροντος και με σταθερή συχνότητα σήματος στα 28GHz.



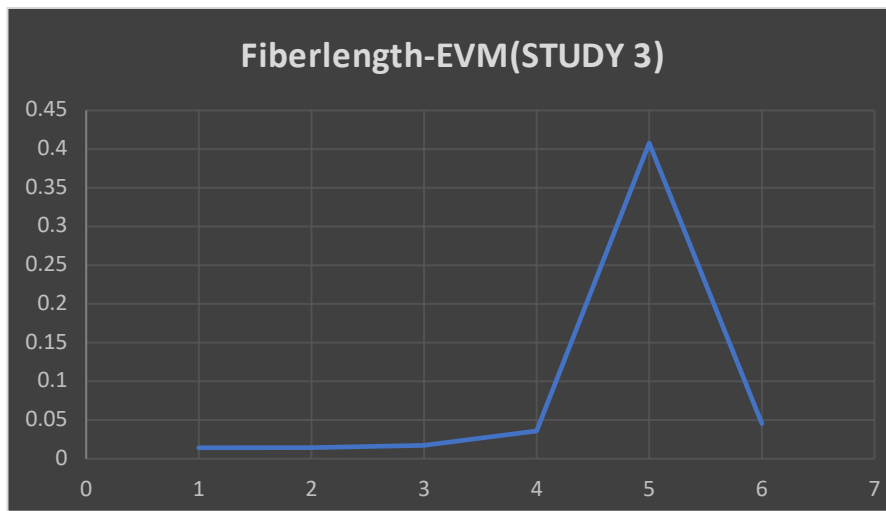
Εικόνα 46 Οπτικό Φάσμα(Πείραμα 4)

Στο παρακάτω διάγραμμα έχουμε την αναπαράσταση του μήκους της ίνας στα 6 Km και το SER όπου μας δείχνει πόσα bit στάλθηκαν λάθος λόγω του θορύβου που ξεκινάει από τα 4Km μέχρι τα 6Km.



Εικόνα 47 Fiberlength -SER(Πείραμα 4)

Στο παρακάτω διάγραμμα έχουμε την αναπαράσταση του μήκους της ίνας και το EVM όπου μας δείχνει πόσο ακριβής είναι μια μετάδοση σήματος με βάση το διάγραμμα αστερισμού και εκφράζεται ως συνάρτηση θορύβου όπως βλέπουμε και παρακάτω.

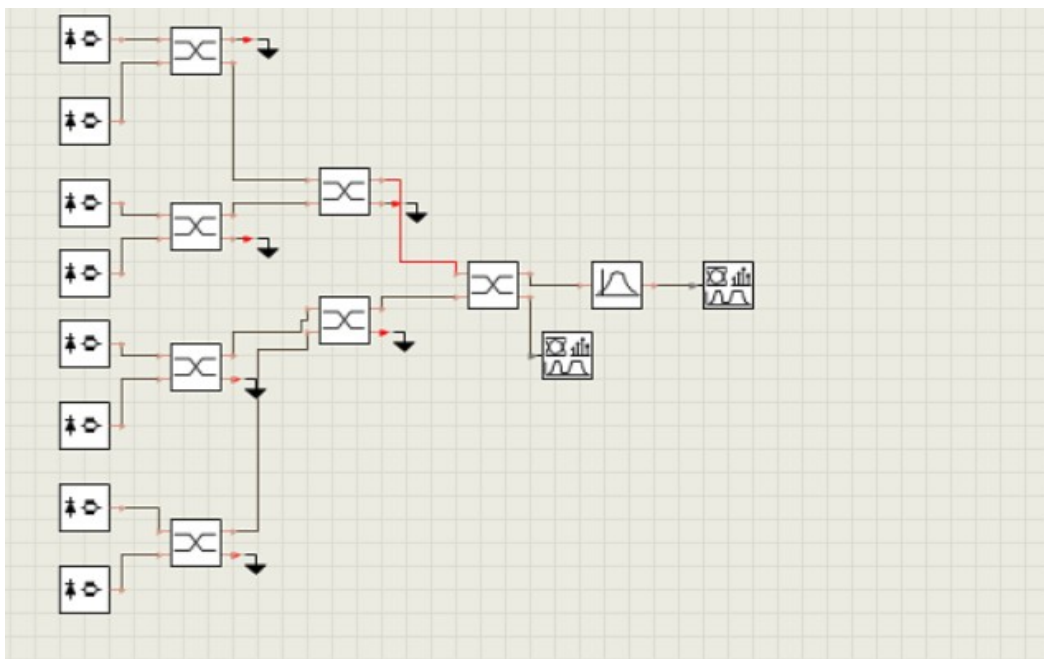


*Εικόνα 48 Fiberlength- EVM (Πείραμα 4)*



## 6. Μετάδοση πολλαπλών (8) πομποδεκτών και φιλτράρισμα της μίας ροής

Στα πλαίσια της επέκτασης της παρούσας εργασίας προς πιο σύνθετα οπτικά δίκτυα, άρχισε να σχεδιάζεται και να μελετάται η ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών τερματικών. Στην εικόνα παρακάτω απεικονίζεται η πολυπλεξία των σημάτων οκτώ οπτικών καναλιών κατά μήκος κύματος, για ταυτόχρονη οπτική μετάδοση έως και οκτώ οπτικών τερματικών μέσα από μια οπτική ίνα. Έπειτα χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη ενός οπτικού φίλτρου, για να επιτευχθεί το φιλτράρισμα ενός χρήστη από τους οκτώ χρήστες για μια συγκεκριμένη συχνότητα (οπτικό φέρον), π.χ. για τον έβδομο χρήστη στη συχνότητα των 191.7 THz.



Εικόνα 49 Μετάδοση 8 χρηστών

## 7.Συμπεράσματα πτυχιακής

Τα συμπεράσματα της πτυχιακής εργασίας είναι τα εξής παρακάτω:

Μελετήθηκε η θεωρία διπλής πλευρικής ζώνης με παρουσία φέροντος και η διασπορά ίνας και επίσης έγινε η πλήρης επαλήθευση θεωρίας και πειραμάτων καταλήγοντας στα εξής:

1. Η συχνότητα σήματος των 3,5GHz δεν περιορίζεται από τη διασπορά ίνας έως τα 10.000Km ενώ μετά τα 10.000Km είναι εμφανής η επιρροή της διασποράς ίνας όπως φαίνεται και στο διάγραμμα (Πείραμα 2)
2. Τα 28GHz μπορούν να διαδοθούν έως 4 Km ενώ στα 5 Km είναι εμφανής η επίδραση της διασποράς ίνας (Πείραμα 3 και 4)
3. Το μήκος ίνας στα 80 Km μπορούν να διαδοθούν τα σήματα έως 6GHz και η διασπορά ίνας επιδρά από τα 7Km μέχρι τα 80 Km(Πείραμα 1).

## Βιβλιογραφία

- [1] Andrea Goldsmith , “*Overview of Wireless Communications,*” WIRELESS COMMUNICATIONS , 2004
- [2] Jianjun Yu; Xinying Li; Wen Zhou , “ *Tutorial: Broadband fiber-wireless integration for 5G+ communication* “ ,Research Article APL PHOTONICS , September 2018
- [3] Cheng-Xiang Wang, Fellow, IEEE, Xiaohu You, Fellow, IEEE, Xiqi Gao, Fellow, IEEE, Xiuming Zhu, Zixin Li, Chuan Zhang, Senior Member, IEEE, “*On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies and Testbeds*” , IEEE Communications Surveys & Tutorials, VOL. XX, NO. XX , February 2023
- [4] Qualcomm Technologies , “*5G - Vision for the next generation of connectivity*”, Qualcomm Technologies , March 2015
- [5] Reply white paper , “ *5G: The Network Technology Of Tomorrow* “ , Reply
- [6] Hamid R. Barzegar, Nabil El Ioini, Van Thanh Le, Claus Pahl , “*Wireless Network Evolution Towards Service Continuity in 5G enabled Mobile Edge Computing*” , Conference Paper , April 2020
- [7] Mohammed Banafaa , Ibraheem Shayea , Jafri Din , Marwan Hadri Azmi , Abdulaziz Alashbi , Yousef Ibrahim Daradkeh , Abduraqeb Alhammadi, “ *6G Mobile Communication Technology: Requirements, Targets, Applications, Challenges, Advantages, and Opportunities*” , Alexandria Engineering Journal 64 245-274 , September 2022
- [8] Muhammad Zeeshan Asghar , Shafique Ahmed Memon , and Jyri Hämäläinen , “ *Evolution of Wireless Communication to 6G: Potential Applications and Research Directions*” , Sustainability 14 6356 , May 2022
- [9] Regius Professor Rahim Tafazolli FREng “*6G wireless: a new strategic vision*”, 5GIC Strategy Advisory Board
- [10] Wei Shi , “*NTT DoCoMo declares what 6G should be all about*”, Telecoms.com ,January 2020
- [11] Qualcomm , “*What is 5G? Everything you need to know*” , Qualcomm
- [12] Victor Pavon Villamayor, “*Telecommunications Regulation for the Digital Economy*” , Telecommunications Regulation Seminar , July 2020
- [13] T.E. Bogale , X. Wang, L.B. Le , “ *Chapter 9 - mmWave communication enabling techniques for 5G wireless systems: A link level perspective*” , mmWave Massive mimo , November 2016
- [14] Accton , “ *The Emergency of 5G mmWave*”, Accton
- [15] Yong Niu, Yong Li, Member, IEEE, Depeng Jin, Member, IEEE, Li Su, and Athanasios V. Vasilakos, Senior Member, IEEE, “ *A Survey of Millimeter Wave (mmWave) Communications for 5G: Opportunities and Challenges*”, February 2015

- [16]Anthony Ng'oma , “ *Radio-over-fibre technology for broadband wireless communication systems*” , 2005
- [17]Fosco , “ *What is radio over fiber ?*” , Fosco
- [18]Collimator , “*What is QPSK?*” , Collimator , August 2023
- [19]Arunprasanth Sakthivel , J. Pradeeban , K.K.B. Sarma, “ *Modelling of an Optical Coherent QPSK Transmission System PART-I*” , Research gate , May 2020
- [20]Electronics notes, “*What is QAM: quadrature amplitude modulation*” , Electronics notes
- [21]Huawei , “*What is QAM?*” , Huawei
- [22]Electronics notes , *QAM Formats: 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM, 256-QAM* , Electronics notes
- [23]Dr Rudiger Paschotta , “*Optical Spectrum*” , RP PHOTONICS, 2021
- [24]Robert Sheldon , “ *Signal-to-noise ratio (S/N or SNR)*”, TechTarget, August 2021
- [25]Sanchita Sarkar , Ata Sarrafnazhad , Ahsan Ghoncheh , “*What is SNR and Noise Figure*”, Rahsoft , May 2021
- [26]Erkan Acar, “ *How Error Vector Magnitude (EVM) Measurement Improves Your System-Level Performance*” , Analog devices , 2021
- [27]Christos Thrampoulidis , Weiyu Xu , Babak Hassibi , “*Symbol Error Rate Performance of Box-relaxation Decoders in Massive MIMO*” , Research Gate , November 2017
- [28]Krishna Sankar , “*Symbol Error Rate (SER) for 16-QAM*” , Dsplog , 2012
- [29]Christina Lim, Ampalavanapillai Nirmalathas, Masduzzaman Bakaul, Ka-Lun Lee,1 Dalma Novak, and Rod Waterhouse , “ *Mitigation strategy for transmission impairments in millimeter wave radio-over-fiber networks*” , Journal Of Optical Networking Vol. 8, No. 2 , February 2009
- [30]Andreas O. J. Wiberg , “ *Generation, Modulation,and Detection of Signals in Microwave Photonic Systems*” , Research gate , January 2008