



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Μελέτη και προσομοίωση της μεταγωγικής
λειτουργίας οπτικών συμβολομετρικών μεταγωγέων
ΜΖΙ για τη δρομολόγηση ψηφιακών και αναλογικών
κυματομορφών**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

(ΑΕΜ: 2101)

Επιβλέπων : Χρήστος Βαγιωνάς
Επιστημονικός Συνεργάτης

Καστοριά 16 Μαΐου 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Μελέτη και προσομοίωση της μεταγωγικής
λειτουργίας οπτικών συμβολομετρικών μεταγωγέων
ΜΖΙ για τη δρομολόγηση ψηφιακών και αναλογικών
κυματομορφών**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

(ΑΕΜ: 2101)

Επιβλέπων : Χρήστος Βαγιωνάς
Επιστημονικός Συνεργάτης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16/05/23

Χρήστος Βαγιωνάς

Δημήτρης Ι.Βέργαδος

Ιωάννης Βαρδάκας

Καστοριά 16 Μαΐου 2023

Copyright © 2022 – ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ ΕΠΙΣΤΗΜΗ

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.

Περίληψη

Με την έλευση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς και την ανάπτυξη σύγχρονων απαιτητικών εφαρμογών τηλεφωνίας (π.χ. μετάδοση βίντεο, εικόνας, εικονική πραγματικότητα, τηλεδιασκέψεις κτλ.), παρατηρείται διαρκής αύξηση του φόρτου κίνησης στις τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις και τα δίκτυα μεταξύ του Σταθμού Βάσης και των ασύρματων κεραιών πρόσβασης, γνωστά ως δίκτυα fronthaul. Οι εφαρμογές αυτές απαιτούν τη μετάδοση ευρυζωνικών δεδομένων με χαμηλή χρονοκαθυστέρηση, ενώ παράλληλα λόγω της κινητικότητας των τελικών χρηστών, παρατηρείται και μια αυξανόμενη ανάγκη αναδρομολόγησης των δεδομένων προς πολλαπλές διαφορετικές κεραιές με στόχο τη διασύνδεση των τελικών χρηστών (όπως π.χ. την παρουσία πολλών χρηστών κατά τη διάρκεια συναυλιών). Οι τεχνολογίες οπτικής μεταγωγής αρχίζουν να εισάγονται στα επερχόμενα οπτικά ασύρματα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, με στόχο να παρέχουν ευελιξία στη διασυνδεσιμότητα των ασύρματων σημείων πρόσβασης (access points) και των χρηστών με το Σταθμό Βάσης, που αποτελεί βασικό κομμάτι μελέτης της παρούσας εργασίας. Διαφορετικές τεχνολογίες οπτικής μεταγωγής είναι επί του παρόντος διαθέσιμες ή υπό ανάπτυξη. Στη συγκεκριμένη εργασία, παρουσιάζονται κάποιες τεχνολογίες οπτικής μεταγωγής, η αρχή λειτουργίας τους και μελετώνται συγκριτικά κάποιες από τις βασικές επιδόσεις, τις απαιτήσεις δικτύου και τις απαιτήσεις συστήματος με βάση μια βιβλιογραφική έρευνα. Οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν μεταγωγή με βάση οπτικά μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS), θερμική οπτική μεταγωγή, ηλεκτροοπτική μεταγωγή και ακουστικο-οπτική μεταγωγή. Έπειτα από τη βιβλιογραφική έρευνα, μελετάται η συνάρτηση μεταφοράς ενός συμβολομέτρου Mach Zehnder Interferometer (MZI) βασισμένο σε τεχνολογία πυριτίου (Si_3N_4) με στόχο να επιτευχθεί μια αποδοτική λύση για την οπτική μεταγωγή, που να υποστηρίζει ευρυζωνικά σήματα και μικρή κατανάλωση ενέργειας, καθώς και η μετάδοση ψηφιακών σημάτων μέσα από τον οπτικό μεταγωγό. Το πρακτικό κομμάτι της εργασίας περιλαμβάνει την προσομοίωση σε φυσικό επίπεδο της μεταγωγικής λειτουργίας συμβολομετρικών μεταγωγέων MZI για τη δρομολόγηση ψηφιακών κυματομορφών με τη χρήση του λογισμικού Matlab, καθώς και η υποβάθμιση της ποιότητας μετάδοσης ενός ψηφιακού σήματος κυματομορφής Non

Return to Zero (NRZ) – On Off Keying (OOK). Για το σκοπό αυτό έχει υλοποιηθεί κώδικας που μετατρέπει μια εικόνα σε παλμοσειρά δεδομένων, με βάση την οποία μεταδίδεται ένα σήμα NRZ-OOK και μελετάται η επίδραση λευκού Γκαουσιανού θορύβου τόσο στο μεταδιδόμενο σήμα, όσο και στην τελικά λαμβανόμενη εικόνα.

Abstract

With the advent of 5th generation mobile networks and the development of modern demanding mobile applications (e.g. video, image transmission, virtual reality, teleconferences, etc.), there is a continuous increase in the traffic load on the telecommunication links and networks between the Base Station and the wireless access antennas, known as fronthaul. These applications require the transmission of broadband data with low time delay, while at the same time due to the mobility of the end users, there is also an increasing need to reroute the data to multiple different antennas in order to interconnect the end users (such as the presence of many users during concerts). Optical switching technologies are beginning to be introduced in the upcoming 5th generation optical wireless networks, with the aim of providing flexibility in the connectivity of wireless access points and users to the Base Station, which is a key part of the study of this thesis. Many different optical switching technologies are currently available or under development. In this work, performance comparisons in optical switching technologies are performed in terms of basic performance, network requirements, and system requirements based on a literature review. The technologies include switching based on optical microelectromechanical systems (MEMS), thermal optical switching, electro-optical switching and audio-optical switching. After the literature survey, the transfer function of a Mach Zehnder Interferometer (MZI) based on silicon technology (Si_3N_4) is studied in order to achieve an efficient solution for optical switching, supporting broadband signals and low power consumption, as well as the digital signal transmission through the optical switch. Finally, the practical part of the work involves the physical simulation of the switching function of symbolic switches MZI for routing digital waveforms using Matlab software, as well as the degradation of the transmission quality of a Non Return to Zero (NRZ) – On Off Keying (OOK) digital waveform signal. For this purpose, a code has been implemented that converts an image into a data pulse, based on which an NRZ – OOK signal is transmitted and the effect of white Gaussian noise on both the transmitted signal and the finally received image, is studied.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βαγιωνά Χρήστο για την καθοδήγηση που μου προσέφερε και το χρόνο που διέθεσε δίνοντάς μου χρήσιμες συμβουλές και οδηγίες για την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας.

Contents

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Εισαγωγή | 12 |
| 2. Σύγχρονες επικοινωνίες και δίκτυα 5G | 14 |
| Από το 1G στο 4G..... | 14 |
| Το 5G | 17 |
| Περιπτώσεις χρήσης δικτύου 5G | 24 |
| 3. Επαναδιαμορφώσιμα (Reconfigurable) 5G δίκτυα | 27 |
| Ανάγκη για προσαρμοσζώμενα δίκτυα fronthaul | 27 |
| Αρχιτεκτονική δικτύου | 29 |
| 4. Τεχνολογίες Οπτικής μεταγωγής | 322 |
| Φωτονική τεχνολογία και ολοκληρωμένοι μεταγωγείς πυριτίου | 333 |
| Οπτικοί μεταγωγείς πυριτίου | 366 |
| Συμβολόμετρο Mach-Zehnder | 39 |
| Συνάρτηση μεταφοράς συμβολόμετρου MZI | 400 |
| Χαρακτηριστικά συμβολόμετρου MZI | 422 |
| Διαφάνεια στην κυματομορφή μετάδοσης | 433 |
| Τεχνολογίες Οπτικής Μεταγωγής | 444 |
| Οπτικός Μεταγωγέας με Καθρέπτες | 444 |
| Θερμο-Οπτικός Μεταγωγέας..... | 455 |
| Ηλεκτρο-Οπτικός Μεταγωγέας..... | 466 |
| Αμιγώς Οπτικός Μεταγωγέας | 477 |
| Ακουστο-Οπτικός Μεταγωγέας | 488 |
| Σύγκριση με τα ηλεκτρονικά και Μετρικά Απόδοσης | 49 |
| Απαιτήσεις Δικτύου και Συστήματος Μεταγωγού..... | 522 |
| 5. Υλοποίηση προσομοίωσης στο περιβάλλον Matlab και ανάλυση αποτελεσμάτων..... | 55 |
| Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα Μετάδοσης Εικόνας NRZ-OOK | 555 |
| Σύστημα Οπτικής Μεταγωγής Si_3N_4 -MZI | 691 |
| Συμπεράσματα | 88 |
| Βιβλιογραφία..... | 89 |
| Παράρτημα Α: Κώδικας Matlab μελέτης τηλεπικοινωνιακού συστήματος μετάδοσης εικόνας κατά NRZ-OOK | 95 |
| Παράρτημα Β: Κώδικας Matlab υλοποίησης συστήματος οπτικής μεταγωγής συμβολομέτρου Si_3N_4 -MZI | 100 |

Λίστα Εικόνων Εργασίας

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Εικόνα 1 Η εξέλιξη των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών | 14 |
| Εικόνα 2 Η εξέλιξη των κινητών τηλεπικοινωνιών..... | 166 |
| Εικόνα 3 Το δίκτυο 5G..... | 18 |
| Εικόνα 4 Τύποι κομματιών που υποστηρίζονται από 5G | 2121 |
| Εικόνα 5 Επαναδιαμορφώσιμο οπτικό δίκτυο μεταφοράς, με fronthauling mmWave PAAς για την εξυπηρέτηση πυκνών και hotspot περιοχών, μέσω κλιμακωτών ROADMs.BBU: Baseband Unit, ROADM: Reconfigurable Add/Drop Multiplexer, mmWave: millimeter Wave, PAA: eMBB: ενισχυμένη κινητή ευρυζωνική ζώνη..... | 30 |
| Εικόνα 6 Παγόσμια ανάπτυξη συσκευών και συνδέσεων. Η πηγή δεδομένων είναι αναφορά της Cisco Annual Internet Report,2018-2023..... | 33 |
| Εικόνα 7 Ένας 2x2 μεταγωγέας (2 είσοδοι-2 έξοδοι)..... | 355 |
| Εικόνα 8 Σχήματική αναπαράσταση ενός οπτικού μεταγωγέα με αρχιτεκτονική i) Mach-Zehnder και ενός ii) Ring resonator και αντίστοιχες φωτογραφίες από μικροσκόπιο για i) Mach-Zehnder και ενός ii) Ring resonator οπτικό μεταγωγέα. | 377 |
| Εικόνα 9 Γραφική παράσταση της ισχύς εξόδου | 388 |
| Εικόνα 10 Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder | 399 |
| Εικόνα 11 Ο λόγος σβέσης | 432 |
| Εικόνα 12 Παράδειγμα διακόπτη 2D MEMS..... | 454 |
| Εικόνα 13 Ψηφιακός θερμοοπτικός διακόπτης κυματοδηγού..... | 46 |
| Εικόνα 14 Διακόπτης ΕΟ χρησιμοποιώντας κρύσταλλο LiNbO3 | 477 |
| Εικόνα 15 Η δομή ενός διακόπτη τύπου Mach-Zehnder με ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή(SOA)..... | 488 |
| Εικόνα 16 Δημιουργία πλέγματος περίθλασης από υπερηχητικά κύματα | 499 |

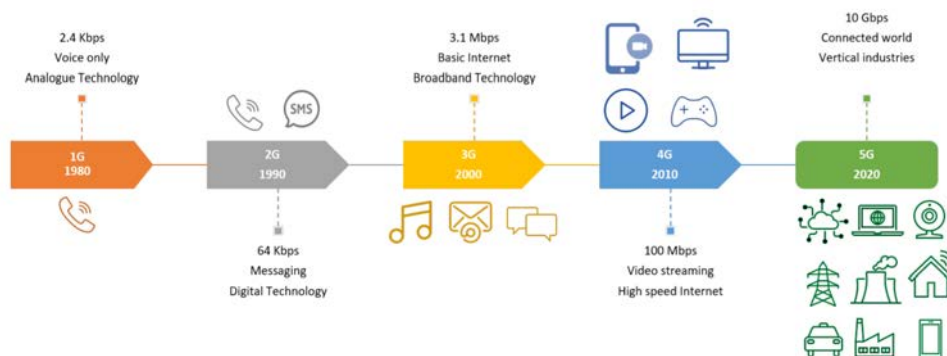
1. Εισαγωγή

Το κινητό τηλέφωνο έχει εξελιχθεί γρήγορα την τελευταία δεκαετία από μια μονόχρωμη συσκευή με μικροσκοπική οθόνη και μικρή επεξεργαστική ισχύ σε μια με υψηλή ανάλυση, οθόνη μεγέθους παλάμης και επεξεργαστική ισχύ που συναγωνίζεται έναν φορητό υπολογιστή. Αυτός ο μετασχηματισμός έχει οδηγήσει στη γένεση μιας σειράς νέων εφαρμογών που απαιτούν εύρος ζώνης για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Σήμερα, η προσοχή στρέφεται προς τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς και τις μελλοντικές επερχόμενες τεχνολογίες 6G, που στόχο έχουν να υλοποιήσουν επαναπρογραμματιζόμενα δίκτυα διασύνδεσης μεταξύ Σταθμού Βάσης και πολλαπλών κεραιών και επικοινωνίας του χρήστη σε χαμηλή χρονοκαθυστέρηση για υψηλή ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών. Βασικός στόχος των δικτύων 5G είναι να υποστηρίξουν υψηλό ρυθμό δεδομένων (έως 1 Gbit/s) στην κατερχόμενη ζεύξη του χρήστη και έως 10 Gb/s για στην κεραία του Access Point του δικτύου. Ωστόσο, ενώ το 5G/6G αναμφίβολα θα συνεχίσει να ανεβάζει τον ρυθμό δεδομένων, ο στόχος θα είναι η επίτευξη καλύτερης κάλυψης και εμπειρίας στο χρήστη. Υπάρχουν ήδη ενδιαφέροντα για να αναπτυχθούν τεχνολογίες και πέρα από τα 5G και η βιομηχανία αρχίζει να χρηματοδοτεί έργα που εξετάζουν τέτοιες τεχνολογίες. Ωστόσο, η άποψη της βιομηχανίας για το μελλοντικό ασύρματο πρότυπο επικεντρώνεται κυρίως στους ρυθμούς δεδομένων και την αποδοτικότητα, με μεγάλες εταιρείες όπως η Qualcomm και η Nokia Siemens Networks να εξετάζουν τεχνολογίες που θα αντιμετωπίσουν την αύξηση της κυκλοφορίας κατά 1000 φορές. Εκτός από τον συνηθισμένο υψηλότερο ρυθμό δεδομένων και την ενεργειακή απόδοση, υπάρχουν κάποιες αναδυόμενες ενδείξεις για τα πράγματα που θα ακολουθήσουν. Για παράδειγμα, στη νέα ομάδα μελέτης IEEE 802.11 High Efficiency Wireless (HEW), υπάρχει μια έντονη αύξηση στην παρουσία φορέων κινητής τηλεφωνίας, κάτι που δεν είχε παρατηρηθεί προηγουμένως. Αυτό υποδηλώνει αυξανόμενα ενδιαφέροντα για τη συγχώνευση διαφορετικών τεχνολογιών για την υποστήριξη μελλοντικών ρυθμών συνδεσιμότητας και δεδομένων, καθώς και τη δυνατότητα επαναπρογραμματισμού των δικτύων ώστε να προσαρμόζονται στις ανάγκες των χρηστών και πολλαπλών

παρόχων. Επομένως, πιστεύετε ότι τα δίκτυα 5G/6G θα αποτελούνται από πολλαπλά διασυνδεδεμένα πρότυπα επικοινωνίας, που κυμαίνονται από ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα έως ασύρματα προσωπικά δίκτυα, παρέχοντας την απαιτούμενη απόδοση και συνδεσιμότητα.

2. Σύγχρονες επικοινωνίες και δίκτυα 5G

Τα συστήματα τηλεπικοινωνιών υλοποιούνται με διαφορετικές μεθόδους και υλικά μέσα, ανάλογα με τα κανάλια μετάδοσης, που μπορεί να είναι τόσο ασύρματα όσο και ενσύρματα, για την υποστήριξη της μετάδοσης των επιθυμητών πληροφοριών και δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ του πομπού και του δέκτη ή/ και μεταξύ πολλαπλών κόμβων ενός δικτύου. Η επανάσταση της ασύρματης κινητής επικοινωνίας και των τηλεπικοινωνιών γενικότερα έχει πετύχει άλματα προόδου καθώς έχει εξελιχθεί μέσα από πολλές γενιές, που χαρακτηρίζονται και διακρίνονται από την τεχνική εφαρμογή διαφορετικών προτύπων και απαιτήσεων από γενιά σε γενιά, συμπεριλαμβανομένων νέων τεχνικών και χαρακτηριστικών που τη διαφοροποιούν από της προηγούμενης γενιάς.



Εικόνα 1 Η εξέλιξη των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών

Από το 1G στο 4G

Η πρώτη γενιά κινητής επικοινωνίας (1G) εισήχθη στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και υποστήριζε μόνο φωνητικές κλήσεις και χρησιμοποιούσε αναλογικά ραδιοφωνικά σήματα. Στο 1G χρησιμοποιήθηκε το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης συχνότητας (FDMA), το οποίο διαιρεί τη συχνότητα σε κανάλια και εκχωρεί κάθε κανάλι σε έναν μόνο χρήστη κάθε φορά. Το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 1G είχε κακή ποιότητα φωνής, δεν υποστήριζε περιαγωγή και οι

κλήσεις δεν ήταν κρυπτογραφημένες. Σε ένα δίκτυο 1G, η μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων ήταν περίπου 2,4 Kbps.

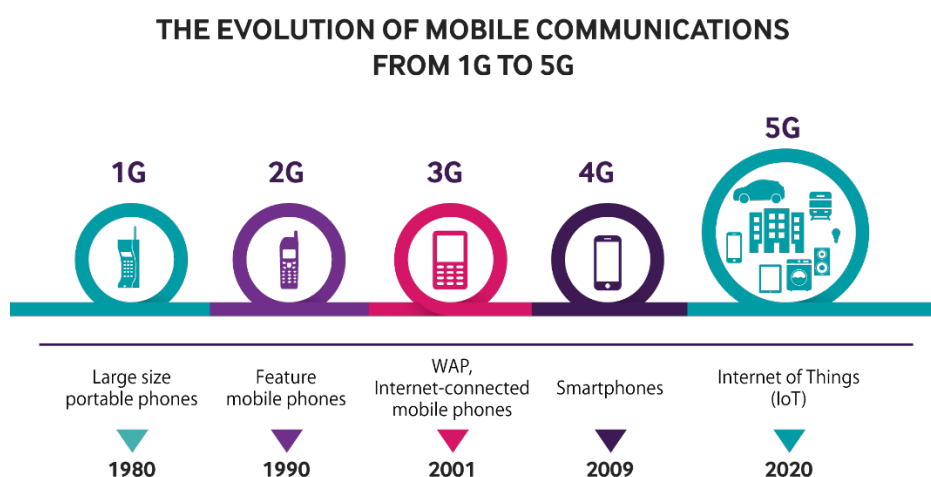
Η δεύτερη γενιά (2G) εισήχθη τη δεκαετία του 1990 και χρησιμοποιούσε ψηφιακά ραδιοφωνικά σήματα με βελτιωμένη ποιότητα φωνής και αυξημένη χωρητικότητα ρυθμού δεδομένων. Το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (GSM) ήταν ένα ψηφιακό πρότυπο για το 2G και υποστήριζε υπηρεσίες δεδομένων όπως η Υπηρεσία Σύντομων Μηνυμάτων (SMS) και η Υπηρεσία Μηνυμάτων Πολυμέσων (MMS). Time Division Multiple Access (TDMA) και Code Division Multiple Access (CDMA) ήταν τα δύο σχήματα που χρησιμοποιήθηκαν στο 2G. Το TDMA διαιρεί τα σήματα σε χρονοθυρίδες και εκχωρεί σε κάθε χρήστη έναν μοναδικό κωδικό που δημιουργείται από ένα CDMA. Το 2G είχε ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων που κυμαίνονταν από 30 έως 35 Kbps. Μια μεταγενέστερη έκδοση του 2G, γνωστή ως Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE), ήταν θεωρητικά ικανή για ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων έως και 1 Mbps.

Η τρίτη γενιά (3G) εμφανίστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 2000. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) όρισε τις απαιτήσεις 3G ως μέρος του έργου International Mobile Telephone 2000 (IMT-2000), γνωστό και ως Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), επειδή επιτρέπει την παγκόσμια περιαγωγή. Η κύρια διάκριση μεταξύ 2G και 3G ήταν ότι το 3G χρησιμοποιούσε μεταγωγή πακέτων αντί για μεταγωγή κυκλώματος, κάτι που επέτρεπε την πρόσβαση σε εφαρμογές Διαδικτύου και βασική ροή πολυμέσων. Το 3G αρχικά υποστηρίζει ρυθμό μεταφοράς δεδομένων 200 Kbps, αλλά οι επόμενες επαναλήψεις υποστηρίζουν έως και 3,1 Mbps.

Η ITU δημοσίευσε τις απαιτήσεις για την IMT-Advanced, γνωστή και ως κινητή επικοινωνία τέταρτης γενιάς (4G), το 2008. Η μακροπρόθεσμη εξέλιξη (LTE) έγινε το βιομηχανικό πρότυπο μετά την εισαγωγή του 4G στις αρχές της δεκαετίας του 2010. Οι βασικές τεχνολογίες του 4G ήταν η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) και η πολλαπλή είσοδος πολλαπλής εξόδου (MIMO). Το OFDM διαιρεί ένα ψηφιακό σήμα σε πολλά κανάλια στενής ζώνης με ποικίλες συχνότητες. Επιπλέον, η κύρια διαφορά μεταξύ 3G και 4G ήταν ότι το 4G βασίστηκε εξ ολοκλήρου στο

Πρωτόκολλο Διαδικτύου (IP). Ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD) με δυνατότητα 4G και πρόσβαση στο Διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας με ταχύτητες δεδομένων έως και 100 Mbps. Με περισσότερες από 7,95 δισεκατομμύρια συνδέσεις, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έχουν γίνει η κύρια και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία επικοινωνιών.

Ωστόσο, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούνται περισσότερο από ανθρώπους, χρησιμοποιούνται επίσης από μια ποικιλία άλλων συσκευών γνωστών συλλογικά ως Internet of Things (IoT). Δισεκατομμύρια IoTs αναμένεται να συνδεθούν παγκοσμίως την επόμενη δεκαετία, δημιουργώντας ένα νέο καταναμημένο οικοσύστημα που ονομάζεται Internet of Everything (IoE). Με τη μεγάλη κλίμακα διασύνδεση ανθρώπων και πραγμάτων, θα υπάρξει τεράστια αύξηση της κίνησης δεδομένων, γεγονός που επιβαρύνει την τρέχουσα γενιά ασύρματης κινητής επικοινωνίας. Ως εκ τούτου, τροφοδοτούμενη από την άνευ προηγουμένου αύξηση του αριθμού των κινητών και των διασυνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο, την κίνηση των δεδομένων της κινητής τηλεφωνίας και τους περιορισμούς και προδιαγραφές των τεχνολογιών τέταρτης γενιάς 4G, η βιομηχανία και η ακαδημαϊκή κοινότητα εστιάζουν τις προσπάθειές τους στον καθορισμό των προδιαγραφών για την πέμπτη γενιά (5G) ασύρματης κινητής επικοινωνίας.



Εικόνα 2 Η εξέλιξη των κινητών τηλεπικοινωνιών

Περισσότερες από 1000 πόλεις στον κόσμο έχουν πληθυσμό άνω των 500.000 ανθρώπων και σχεδόν το 55 τοις εκατό του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε πόλεις,

με το ποσοστό αυτό να αναμένεται να ανέλθει στο 68 τοις εκατό μέχρι το 2050 . Με την αύξηση της μετεγκατάστασης των ανθρώπων στον αστικό χώρο, προκύπτουν νέες προκλήσεις και απαιτούν από τις πόλεις να διαχειριστούν αυτές τις προκλήσεις. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα παγκόσμιες πρωτοβουλίες για να γίνουν οι πόλεις πιο βιώσιμες με τη βοήθεια της τεχνολογικής προόδου. Στόχος αυτών των πρωτοβουλιών είναι να γίνουν οι πόλεις πιο έξυπνες, κάτι που οδήγησε στην ιδέα της Έξυπνης Πόλης. Οι έξυπνες πόλεις στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών με τη διαχείριση των δημόσιων πόρων, δίνοντας έμφαση στην άνεση, τη συντήρηση και τη βιωσιμότητα. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) είναι ένα παράδειγμα επικοινωνίας που επιτρέπει σε καθημερινά αντικείμενα να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω του Διαδικτύου.

Το παράδειγμα IoT βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, όπως η κατασκευή, η υγειονομική περίθαλψη, η διαχείριση ενέργειας και υπηρεσιών κοινής ωφέλειας, η αυτοκινητοβιομηχανία και οι δημόσιες συγκοινωνίες και πολλοί άλλοι. Το IoT θα προωθήσει πολλές εφαρμογές για την παροχή νέων υπηρεσιών σε πολίτες, εταιρείες και δημόσιες διοικήσεις. Επιπλέον, η εφαρμογή του παραδείγματος του IoT σε ένα αστικό πλαίσιο έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή αντιμετωπίζει την ανάγκη πολλών εθνικών κυβερνήσεων να υιοθετήσουν λύσεις που βασίζονται στις Τεχνολογίες Πληροφοριών και Επικοινωνιών (ΤΠΕ) στη διαχείριση των δημοσίων υποθέσεων, υλοποιώντας έτσι τη λεγόμενη έννοια της Έξυπνης Πόλης. Σύμφωνα με το IoT Analytics, τα τρία κορυφαία έργα IoT το 2018 ήταν έξυπνες πόλεις, συνδεδεμένη βιομηχανία και συνδεδεμένα κτίρια . Επιπλέον, η παγκόσμια αγορά έξυπνων πόλεων προβλέπεται να αυξηθεί από 410,8 δισεκατομμύρια δολάρια το 2020 σε 820,7 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2025, με σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 14,8 τοις εκατό.

To 5G

Το δίκτυο 5G υποστηρίζεται από τεχνολογικές εξελίξεις που θα μεταμορφώσουν τον πυρήνα των δικτύων κινητής επικοινωνίας. Το 5G θα επιτρέψει ένα ευρύ φάσμα σεναρίων εφαρμογών εισάγοντας μια εντελώς νέα αρχιτεκτονική δικτύου. Για να

γίνουν εφικτές και πανταχού παρόντες καθηλωτικές λύσεις, νέες τεχνολογίες όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) και ο Υπολογισμός άκρων πολλαπλής πρόσβασης (MEC), καθώς και η έννοια του τεμαχισμού δικτύου και των τεχνολογιών λογισμικού, όπως το Software-Defined Networking (SDN) και η Λειτουργία Δικτύου, η εικονικοποίηση (NFV), θα παίξει κρίσιμο ρόλο. Το MEC είναι ένα βασικό εργαλείο για εφαρμογές που απαιτούν απόδοση και λήψη αποφάσεων σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Το MEC επιτρέπει την επεξεργασία δεδομένων κοντά στο σημείο προέλευσής τους, μειώνοντας την καθυστέρηση του δικτύου. Το SDN είναι ένα παράδειγμα δικτύωσης που επιτρέπει στα δίκτυα να προγραμματίζονται, ενώ το NFV χρησιμοποιεί τεχνολογία εικονικοποίησης για την εφαρμογή διαφορετικών τύπων εξοπλισμού δικτύου που βασίζεται σε υλικό ως παρουσίες λογισμικού.



Εικόνα 3 Το δίκτυο 5G

Σε σύγκριση με το 4G, το 5G θα υποστηρίζει 10 έως 100 φορές υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών. Επιπλέον, το 5G θα παρέχει σχεδόν 100 τοις εκατό διαθεσιμότητα και γεωγραφική κάλυψη με βελτιωμένη ασφάλεια και απόρρητο. Επιπλέον, το 5G θα καταναλώνει δέκα φορές λιγότερη ενέργεια ενώ θα επεκτείνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας για συσκευές κατά δέκα φορές. Η εφαρμογή της τεχνολογίας 5G εστιάζει σε βασικές τεχνολογίες όπως η νέα ραδιοπρόσβαση, η μαζική πολλαπλή έξοδος πολλαπλής εισόδου (MIMO), η ετερογενής υπερπύκνωση, κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση καναλιών και Κύμα χιλιοστών (mmWave). Περαιτέρω λεπτομέρειες σχετικά με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται από το 5G δεν εμπίπτουν στο πεδίο της

εργασίας. Αναμένεται ότι το 5G θα προσφέρει 12,3 τρισεκατομμύρια δολάρια σε αγαθά και υπηρεσίες σε όλους τους κλάδους έως το 2035 και θα υποστηρίξει έως και 22 εκατομμύρια θέσεις εργασίας στην αλυσίδα αξίας του 5G.

Το 5G θέτει τα θεμέλια για την οικοδόμηση μιας παραγωγικής βιομηχανίας, έξυπνης τεχνολογίας και καινοτόμων τρόπων επικοινωνίας. Επιπλέον, το 5G θα λειτουργεί ως το δίκτυο επικοινωνίας για την υποστήριξη της υποδομής IoT που απαιτείται από διάφορες κάθετες βιομηχανίες έξυπνων πόλεων. Το 5G θα υποστηρίξει ένα ευρύ φάσμα απαιτήσεων περιπτώσεων χρήσης σε διαφορετικές κάθετες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας, της υγειονομικής περίθαλψης, της κατασκευής, των μέσων ενημέρωσης και της ψυχαγωγίας, της αυτοκινητοβιομηχανίας και των δημόσιων μεταφορών, για να αναφέρουμε μερικές. Η έννοια του τεμαχισμού δικτύου έχει αναπτυχθεί για να καλύψει τις διαφορετικές απαιτήσεις υπηρεσιών των κάθετων βιομηχανιών.

Το slice είναι μια συλλογή από λογικά προσαρμοσμένες λειτουργίες δικτύου που υποστηρίζουν τις απαιτήσεις υπηρεσιών επικοινωνίας συγκεκριμένων περιπτώσεων χρήσης ή επιχειρηματικών μοντέλων. Τα τμήματα δικτύου κατηγοριοποιούνται σε διαφορετικούς τύπους ανάλογα με την αφαίρεση των χαρακτηριστικών των υπηρεσιών που διευκολύνουν. Το Έργο Συνεργασίας 3ης Γενιάς (3GPP) έχει ορίσει τέσσερις τύπους τμημάτων δικτύου ως εξής:

- **Βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση κινητής τηλεφωνίας (eMBB):** Αυτός ο τύπος slice έχει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και καλύτερες απαιτήσεις κάλυψης.
- **Massive Internet of Things (mIoT):** Αυτός ο τύπος slice έχει γενικά μεγάλο αριθμό συσκευών σε μια μικρή περιοχή. Οι εφαρμογές mIoT περιλαμβάνουν συσκευές χαμηλού κόστους και χαμηλής ενέργειας που επικοινωνούν μικρά πακέτα δεδομένων όπως το IoT σε έξυπνες πόλεις. Άλλες βιομηχανικές ομάδες χρησιμοποιούν τον όρο Massive Machine Type Communications (mMTC) για να ταξινομήσουν αυτήν την ομάδα υπηρεσιών.
- **Εξαιρετικά αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία (uRLLC):** Αυτός ο τύπος τμημάτων είναι επίσης γνωστός ως κρίσιμες επικοινωνίες.

Αυτό γενικά υποστηρίζει συσκευές που έχουν αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης και αξιοπιστίας.

- **Επικοινωνία Vehicle-to-Everything (V2X):** Αυτός ο τύπος slice υποστηρίζει την επικοινωνία μεταξύ οχήματος και περιβάλλοντος.

Αυτοί οι τύποι τμημάτων δικτύου παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών προκλήσεων καθώς προσδιορίζουν απαιτήσεις απόδοσης, όπως απόδοση ισχύος, υψηλή αξιοπιστία, απόδοση φάσματος, ευρωστία καναλιού, χαμηλό λανθάνον χρόνο, χαμηλότερο κόστος, υψηλή ενεργειακή απόδοση, συνεργατική δικτύωση, συνύπαρξη κ.λπ.

eMBB

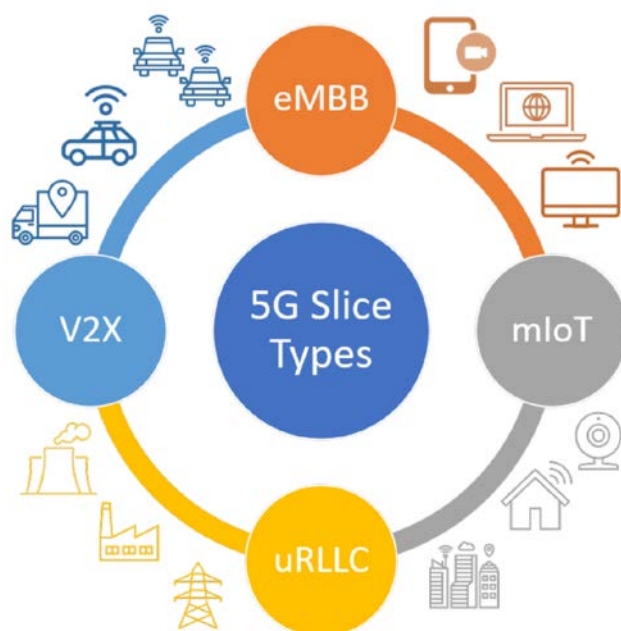
Αυτός ο τύπος τμήματος δικτύου είναι μια φυσική εξέλιξη στα υπάρχοντα δίκτυα 4G που θα παρέχει ταχύτερους ρυθμούς δεδομένων και καλύτερες εμπειρίες χρήστη σε πυκνοκατοικημένα μητροπολιτικά κέντρα. Οι περιπτώσεις χρήσης του eMBB αναμένεται να υποστηρίζουν πυκνότητα σύνδεσης έως και ενός εκατομμυρίου συνδέσεων ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο με υποστήριξη για ταχύτητες κατερχόμενης ζεύξης που πλησιάζουν το 1 Gbps σε εσωτερικούς χώρους και 300 Mbps σε εξωτερικούς χώρους και όγκο κίνησης δεδομένων τουλάχιστον 1 Tbps ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Επιπλέον, η υποστήριξη για υψηλή κινητικότητα έως 500 km/h σε τρένα υψηλής ταχύτητας και έως 1000 km/h σε αεροπλάνα, με βελτιωμένη εμπειρία χρήστη.

mIoT

Αυτός ο τύπος τμημάτων δικτύου επιτρέπει την ανίχνευση μάζας, την παρακολούθηση και τη μέτρηση που συνήθως απαιτούν μικρούς όγκους δεδομένων αλλά έχουν αυστηρούς περιορισμούς κόστους και ενέργειας. Οι περιπτώσεις χρήσης του mIoT αναμένεται να υποστηρίζουν 30.000 συσκευές ανά κυψέλη (τα περισσότερα κελιά θα περιέχουν μικρότερες συσκευές), χαμηλή πολυπλοκότητα συσκευής και διάρκεια ζωής μπαταρίας 10 ετών με μπαταρία AA.

uRLLC

Το uRLLC είναι αναμφισβήτητα το πιο καινοτόμο χαρακτηριστικό 5G. Μπορεί να ενεργοποιήσει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, μερικές από τις οποίες είναι προς το παρόν άγνωστες. Το uRLLC έχει σημαντικούς περιορισμούς στον χρόνο παράδοσης ενός πακέτου, ο οποίος είναι 1 ms, και στον λόγο απώλειας πακέτων. Η συμμόρφωση με αυτές τις απαιτήσεις είναι απαραίτητη για την αυτοματοποίηση της παραγωγής, τη δημιουργία έξυπνων συστημάτων μεταφοράς και την υποστήριξη της εικονικής ή επαυξημένης πραγματικότητας και του απλικού διαδικτύου.



Εικόνα 4 Τύποι κομματιών που υποστηρίζονται από 5G

Αυτοκίνητο προς τα πάντα (Vehicle to Everything – V2X)

Η επικοινωνία οχημάτων V2X είναι μια κρίσιμη τεχνολογία στο έξυπνο σύστημα μεταφορών για τη σύνδεση οχημάτων, οδικών μονάδων και πεζών. Οι περιπτώσεις χρήσης V2X αναμένεται να υποστηρίξουν μέγιστη καθυστέρηση επικοινωνίας μεταξύ 3 και 500 ms, ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μεταξύ 10 και 1000 Mbps με αξιοπιστία μεταξύ 90 και 99,999 τοις εκατό και εύρος επικοινωνίας μεταξύ 50 και 1000 m.

Τα πλαίσια ΤΠΕ υποστηρίζουν διάφορες λειτουργίες έξυπνων πόλεων συνδέοντας ένα ποικίλο σύνολο αποκλειστικών δικτύων αισθητήρων, κινητών συσκευών, πυλών επικοινωνίας και κέντρων δεδομένων, καθώς και σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, νοσοκομείων, σχολείων, βιβλιοθηκών, δικτύων ύδρευσης, διαχείρισης απορριμμάτων, συστημάτων μεταφορών, επιβολής του νόμου και άλλες κοινοτικές υπηρεσίες. Καθώς το IoT γίνεται πρωταρχικός τρόπος επικοινωνίας στις έξυπνες πόλεις, οι εφαρμογές του παρουσιάζουν ποικίλες προκλήσεις μηχανικής και έρευνας. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, απαιτούνται νέες αρχιτεκτονικές, πρωτόκολλα και υπηρεσίες. Το 5G θα αποτελέσει ένα βασικό σημείο καμπής στην εξέλιξη των έξυπνων πόλεων, επειδή θα επιτρέψει τη συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας, τη χαμηλή καθυστέρηση, τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και τη δυνατότητα χειρισμού ενός τεράστιου αριθμού συνδέσεων, οι οποίες θα δημιουργήσουν νέες πιθανές υπηρεσίες και θα τροποποιήσουν τα υπάρχοντα.

Η εργασία συζητά τον ρόλο της επικοινωνίας 5G και του IoT σε μια έξυπνη πόλη, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις μεταφορές. Ωστόσο, δεν καταδεικνύει τον οικονομικό αντίκτυπο της τεχνολογίας 5G σε διάφορες κάθετες βιομηχανίες και τις απαιτήσεις για τις μεταφορές με δυνατότητα 5G. Η εργασία επεξεργάζεται τις τεχνολογίες και παρουσιάζει μια περίληψη των κάθετων βιομηχανιών για τις έξυπνες πόλεις. Ωστόσο, λείπουν πολλές άλλες σημαντικές πτυχές που σχετίζονται με τον ρόλο της κινητής επικοινωνίας σε μια έξυπνη πόλη μαζί με τον οικονομικό αντίκτυπο κάθε κάθετης βιομηχανίας που ενεργοποιείται από την τεχνολογία 5G. Η εργασία συζητά εν συντομία τον αντίκτυπο του 5G στην εξέλιξη της ψηφιοποίησης της βιομηχανίας και του ευφυούς αυτοματισμού. Τονίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων 5G και τον ρόλο της τεχνολογίας 5G σε διάφορες κάθετες βιομηχανίες. Ωστόσο, δεν λαμβάνει υπόψη το πλαίσιο της έξυπνης πόλης και τον οικονομικό αντίκτυπο της τεχνολογίας 5G σε διάφορες κάθετες βιομηχανίες έξυπνων πόλεων. Η πιο σχετική μελέτη σε αυτήν την ανασκόπηση όσον αφορά την επικοινωνία οχημάτων 5G διεξάγεται από τους συγγραφείς του , οι οποίοι εξετάζουν εκτενώς την τεχνολογία επικοινωνίας 5G για δίκτυα οχημάτων με έμφαση στις επικοινωνίες 5G-V2X. Επεξεργάζονται την τυποποίηση 5G-V2X, την αρχιτεκτονική, τις

περιπτώσεις χρήσης και τους βασικούς κινητήριους παράγοντες του, όπως ο διαχωρισμός δικτύου και ο υπολογισμός άκρων. Ωστόσο, οι συγγραφείς δεν συζήτησαν τις διαφορετικές επιπτώσεις των μεταφορών με δυνατότητα 5G, ενώ άφησαν έξω το πλαίσιο της έξυπνης πόλης και τον οικονομικό αντίκτυπο.

Η εργασία συζητά τα στοιχεία που συνθέτουν την έξυπνη πόλη, τους τεχνολογικούς παράγοντες ενίσχυσης όσον αφορά τις αρχιτεκτονικές, τις τεχνολογίες δικτύωσης και τους αλγόριθμους που αναπτύσσονται σε συστήματα έξυπνων πόλεων. Επιπλέον, παρουσιάζει επίσης μια ανασκόπηση των διαφόρων εφαρμογών σε μια έξυπνη πόλη. Ωστόσο, δεν ασχολείται με την τελευταία λέξη της τεχνολογίας στην τεχνολογία 5G και τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να λειτουργήσει ως βοηθητικός και επιταχυντής στην ανάπτυξη της έξυπνης πόλης μαζί με τον οικονομικό αντίκτυπό της. Στο [27], οι συγγραφείς παρέχουν μια επισκόπηση του ρόλου του 5G Νέου Ραδιοφώνου (NR) για την επικοινωνία όχημα-προς-όλα, παρουσιάζοντας τα τεχνολογικά στοιχεία του 5G NR και πώς το 5G NR μπορεί να υποστηρίξει διάφορες περιπτώσεις χρήσης V2X για συνεργατική και αυτόνομη οδήγηση.

Η άνοδος της αυτοκινητοβιομηχανίας στα τέλη της δεκαετίας του 1920 διέκοψε σχεδόν κάθε κλάδο. Για περισσότερο από έναν αιώνα, η προσιτή τιμή των οχημάτων τροφοδότησε την οικονομική ανάπτυξη σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών. Ωστόσο, η τεχνολογική πρόοδος φέρνει επανάσταση στις μεταφορές με τη μορφή αυτόνομων οχημάτων. Η άνοδος των αυτόνομων οχημάτων θα οδηγήσει σε έναν από τους πιο γρήγορες, βαθιές και εκτεταμένες μεταμορφώσεις της ιστορίας. Το 5G είναι ένας ενεργοποιητής και ένας επιταχυντής των κοινωνικών οφελών των συνδεδεμένων, αυτοματοποιημένων, κοινόχρηστων και ηλεκτροκίνητων οχημάτων και θα γίνει πράγματι κεντρικός στον μετασχηματισμό της βιομηχανίας αυτόνομων οχημάτων. Σκοπός αυτής της έρευνας είναι η διεξαγωγή βιβλιογραφικής ανασκόπησης που κυριαρχείται από αφηγήσεις και υποσχέσεις συμβούλων και η διερεύνηση των επιπτώσεων του ευφυούς συστήματος μεταφορών με δυνατότητα 5G μέσω διαφόρων διαστάσεων.

Περιπτώσεις χρήσης δικτύου 5G

Αυτή η επανάσταση, όπως όλες οι άλλες, επιδοτείται. Το αρχικό κόστος αυτών των βελτιώσεων υποδομής 5G μπορεί να είναι τεράστιο και οι καταναλωτές έχουν ήδη δείξει τη δυσανεξία τους για τις αυξήσεις των επιτοκίων. Έτσι, για να ανακτήσουν αυτά τα κόστη, οι τηλεπικοινωνίες θα πρέπει να προσφέρουν νέες κατηγορίες υπηρεσιών σε νέα τμήματα πελατών, για τα οποία έχει προβλέψει το 5G. Οι πελάτες πρέπει να πιστεύουν ότι το ασύρματο 5G είναι ικανό να επιτύχει κατορθώματα που ήταν αδύνατα για το 4G.

- **Αυτοκίνητα χωρίς οδηγό.** Για έναν κόσμο που κινδυνεύει να κινηθεί προς τα κάτω προς την απώλεια ενός εκατομμυρίου ειδών από το 2030, μπορεί να σκεφτείτε ότι ο στόχος της εξάλειψης των οδηγών από τα κινούμενα οχήματα θα ήταν κάπως χαμηλότερος στη λίστα. Αλλά η περίπτωση χρήσης αυτόνομου οχήματος (AV) εκθέτει μια από τις κρίσιμες ανάγκες της σύγχρονης ασύρματης υποδομής: Πρέπει να συνδέει τους ανθρώπους σε κίνηση με τους υπολογιστές στους οποίους μπορεί να βασίζονται για να σώσουν ζωές, με σχεδόν μηδενική καθυστέρηση.
- **Εικονική πραγματικότητα (VR) και επαυξημένη πραγματικότητα (AR).** Προκειμένου ένας διακομιστής που βασίζεται σε σύννεφο να παρέχει ένα αξιόπιστο αισθητηριακό περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο σε έναν ασύρματο χρήστη, όπως υποστήριξε ο κατασκευαστής κινητών επεξεργαστών Qualcomm σε μια πρόσφατη παρουσίαση, η σύνδεση μεταξύ αυτού του διακομιστή και του χρήστη του μπορεί να χρειαστεί να παρέχει έως και 5 gigabit ανά δεύτερο του εύρους ζώνης. Επιπλέον, η εντατική υπολογιστική φύση ενός φόρτου εργασίας AR μπορεί στην πραγματικότητα να επιβάλλει να κατευθύνονται τέτοιοι φόρτοι εργασίας σε διακομιστές που βρίσκονται πιο κοντά στους χρήστες τους, σε συστήματα που είναι σχετικά μη επιβαρυσμένα από παρόμοιους φόρτους εργασίας που υποβάλλονται σε επεξεργασία για άλλους χρήστες. Με άλλα λόγια, το AR και το VR μπορεί να ταιριάζουν καλύτερα σε αναπτύξεις μικρών κυψελών ούτως ή άλλως.

- **Cloud computing.** Το Διαδίκτυο δεν είναι απλώς ο αγωγός περιεχομένου, αλλά ο διευκολυντής της συνδεσιμότητας σε δίκτυα ευρείας περιοχής (WAN). Το ασύρματο 5G προσφέρει τη δυνατότητα διανομής υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους πολύ πιο κοντά στους χρήστες από τα περισσότερα κέντρα δεδομένων υπερκλίμακας της Amazon, της Google ή της Microsoft. Με αυτόν τον τρόπο, το 5G θα μπορούσε να κάνει τις τηλεπικοινωνίες σε ανταγωνιστές με αυτούς τους παρόχους cloud, ιδιαίτερα για υψηλής έντασης, κρίσιμους φόρτους εργασίας. Αυτό είναι το σενάριο υπολογιστικής αιχμής για το οποίο μπορεί να έχετε ακούσει: Μεταφορά της επεξεργαστικής ισχύος, πιο κοντά στον πελάτη, ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων που προκαλούνται από την απόσταση. Εάν οι καθυστερήσεις μπορούν να εξαλειφθούν αρκετά, οι εφαρμογές που απαιτούν επί του παρόντος υπολογιστές θα μπορούσαν να μεταφερθούν σε μικρότερες συσκευές -- ίσως ακόμη και φορητές συσκευές που, από μόνες τους, έχουν λιγότερη επεξεργαστική ισχύ από το μέσο smartphone.
- **Το διαδίκτυο των πραγμάτων.** Σε ένα νοικοκυριό με συνδεσιμότητα 5G χαμηλής καθυστέρησης, οι σημερινές λεγόμενες «έξυπνες συσκευές» που είναι ουσιαστικά υπολογιστές κατηγορίας smartphone θα μπορούσαν να αντικατασταθούν με ανόητα τερματικά που λαμβάνουν τις οδηγίες τους από κοντινά υπολογιστικά συστήματα. Οι συσκευές κουζίνας, τα συστήματα ελέγχου του κλίματος και το πιο σημαντικό, τα μόνιτορ υγείας μπορούν όλα να γίνουν ευκολότερα στην παραγωγή και με ευκολότερο έλεγχο. Ο ρόλος που διαδραματίζουν σήμερα οι κόμβοι IoT, τους οποίους ορισμένοι κατασκευαστές παράγουν σήμερα για να συνεργαστούν μαζί με τους δρομολογητές Wi-Fi, μπορεί στο μέλλον να διαδραματίσουν οι πομποί 5G στη γειτονιά, που λειτουργούν ως κόμβοι εξυπηρέτησης για όλα τα νοικοκυριά στις περιοχές κάλυψής τους. Επιπλέον, οι επικοινωνίες μηχανής με μηχανή (M2M) επιτρέπουν σενάρια όπου συσκευές όπως τα ρομπότ κατασκευής μπορούν να συντονιστούν μεταξύ τους για κατασκευή,

συναρμολόγηση και άλλες εργασίες, υπό τη συλλογική καθοδήγηση ενός διανομέα M2M στο σταθμό βάσης 5G.

- **Φροντίδα υγείας.** Η διαθεσιμότητα συνδεσιμότητας χαμηλής καθυστέρησης σε αγροτικές περιοχές θα έφερε επανάσταση στη θεραπεία εντατικής θεραπείας για άτομα σε εθνικό επίπεδο. Δεν θα αναγκάζονταν πλέον οι ασθενείς σε μικρές πόλεις να ανατρέψουν τη ζωή τους και να μετεγκατασταθούν σε μεγαλύτερες πόλεις, μακριά από τα προς το ζην που γνωρίζουν και αγαπούν, μόνο και μόνο για να λάβουν το επίπεδο φροντίδας που θα έπρεπε να δικαιούνται. Όπως έχουν αποδείξει οι δοκιμές στο Μισισσιπή, η συνδεσιμότητα σε επίπεδα 5G επιτρέπει στους φροντιστές σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές να λαμβάνουν οδηγίες και υποστήριξη σε πραγματικό χρόνο από τους καλύτερους χειρουργούς στον κόσμο, όπου κι αν βρίσκονται.

Για να καταστήσουν εφικτή τη μετάβαση σε σπίτια και επιχειρήσεις, οι τηλεπικοινωνίες επιδιώκουν να μετακινήσουν τους πελάτες σε μια επιχειρηματική τροχιά 5G τώρα, ακόμη και πριν ακόμα υπάρξουν οι περισσότερες αληθινές υπηρεσίες 5G. Πιο συγκεκριμένα, βάζουν τα «θεμέλια» για τεχνολογικές διαδρομές που μπορούν πιο εύκολα να αναβαθμιστούν σε 5G, μόλις γίνουν διαθέσιμες αυτές οι υπηρεσίες 5G.

3. Επαναδιαμορφώσιμα (Reconfigurable) 5G δίκτυα

Ανάγκη για προσαρμοσζώμενα δίκτυα fronthaul

Με την έλευση της εποχής 5G, η ακόρεστη ζήτηση για πανταχού παρούσα ευρυζωνική συνδεσιμότητα γέννησε μια πληθώρα αναδυόμενων περιπτώσεων χρήσης, όπως η ενισχυμένη κινητή ευρυζωνική συνδεσιμότητα (eMBB), η επαυξημένη πραγματικότητα, η σταθερή ασύρματη πρόσβαση (FWA) κ.λπ., καθώς και μια απότομη αύξηση της κινητής κυκλοφορίας με CAGR 31%. Οι παγκόσμιοι οργανισμοί τηλεπικοινωνιών που προτυποποιούν τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς δημιούργησαν ένα σύνολο βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs) για μια υψηλής ποιότητας εμπειρία χρήστη, προβλέποντας ρυθμούς χρηστών έως και 1 Gb/s, κίνηση αιχμής 10 Gb/s και καθυστέρηση 1 ms. Διερευνώνται μεγάλες στοιχειοκεραίες διαμόρφωσης λοβού (Phased Array Antennas – PAA) με έως και 256 στοιχεία σε σχέδια πολλαπλών τομέων για την παροχή σχηματισμού δέσμης και διεύθυνσης δέσμης για μειωμένη παρεμβολή χρηστών και επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων εντός κυψέλης καθώς και χιλιοστομετρικές συχνότητες millimeter wave (mmWave) για ευρυζωνική συνδεσιμότητα. Παρ' όλα αυτά, οι αυξημένες απώλειες διάδοσης του mmWave θα καταστήσουν αναγκαία την τοποθέτηση των σημείων πρόσβασης πιο κοντά στους τελικούς χρήστες, απαιτώντας μια πιο αποδοτική πύκνωση του δικτύου ραδιοπρόσβασης (RAN) όσον αφορά την ενέργεια, την καθυστέρηση, το κόστος και την ανάγκη αναπροσαρμογής της οπτικής διασύνδεσης μεταξύ του Σταθμού Βάσης του δικτύου και των πολλαπλών σημείων ασύρματης πρόσβασης, το επονομαζόμενο δίκτυο fronthaul.

Τα κεντροποιημένα δίκτυα ραδιοπρόσβασης (C-RAN) μπορούν να ικανοποιήσουν τις μακροπρόθεσμες απαιτήσεις των κινητών δικτύων με την ένωση ενός έξυπνου κουτιού BaseBand Unit (BBU) σε πολλές απομακρυσμένες κεφαλές ραδιοεπικοινωνίας (RRH) σε όλο το πεδίο. Το C-RAN επιδιώκει να διαχειριστεί την πύκνωση του δικτύου χρησιμοποιώντας στατιστική πολυπλεξία των πόρων υλικού, η οποία θα ενεργοποιεί επιλεκτικά το δενδροφύλλο στο κατάλληλο mmWave RRH. Η αύξηση της χωρητικότητας του RAN, ωστόσο, καθιστά ακατάλληλη την παρούσα

κοινή δημόσια ραδιοδιεπαφή (CPRI) μεταξύ σταθερών συνδέσεων σημείου προς σημείο (PtP) BBU-RRH, δεδομένου ότι είναι γνωστό ότι η ψηφιοποίηση και η μεταφορά του ραδιοσήματος απαιτεί υπερβολική επιβάρυνση εύρους ζώνης.

Τα οπτικά δίκτυα μεταφοράς αναμένεται να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στην επιτυχή ανάπτυξη του 5G και πέραν αυτού. Διάφορες τεχνολογίες, που κυμαίνονται από αποδοτικότερα σχήματα συμπίεσης των σταθερών συνδέσεων οπτικών ινών PtP έως τοπολογίες PtMP που βασίζονται σε παθητικά οπτικά δίκτυα (PON), Radio-over-Ethernet, Time-sensitive-networking για επικοινωνίες D-RoF, καθώς και Free Space Optical (FSO) ή διάφορες μορφές Radio over Fiber (RoF) υπό το πρίσμα των αυστηρών απαιτήσεων εύρους ζώνης των συχνοτήτων mmWave, δεν είναι ακόμη σαφές ποια τεχνολογία μεταφοράς θα είναι η καταλληλότερη για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των δικτύων 5G. Τα PONs, για παράδειγμα, επωφελούνται από την ανάπτυξη οπτικών ινών στο πεδίο και η παθητική τοπολογία PtMP είναι ένα άλλο παράδειγμα τεχνολογίας με ξεχωριστά χαρακτηριστικά.

Παρά το γεγονός ότι το βελτιωμένο CPRI (eCPRI), το οποίο βασίζεται σε υψηλότερες διασπάσεις που μετατοπίζουν τη διαμόρφωση και τη λειτουργικότητα επιπέδου 2 στο RRH, μειώνει την απαίτηση ρυθμού μετάδοσης bit μέσω της οπτικής διεπαφής, εξακολουθεί να απαιτεί πιο πολύπλοκα, ενεργοβόρα και ακριβά RRH με υπερβολικά υψηλές συνολικές χωρητικότητες fronthaul για τοποθεσίες κεραιών PAA 8 mmWave, ακόμη και για την επιλογή 2 διάσπασης 3GPP. Με αυτόν τον τρόπο, η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) μπορεί να παρέχει έναν πρόσθετο βαθμό παραλληλισμού της κίνησης, παρέχοντας στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων την απαιτούμενη ευελιξία στη δρομολόγηση καναλιών πληροφοριών τόσο στο φασματικό όσο και στο χωρικό πεδίο, αναθέτοντας ξεχωριστές συνδέσεις FiWi σε μεμονωμένες δέσμες ή πάνελ PAA που καλύπτουν διαφορετικούς τομείς RRH.

Η τεχνολογία πυριτίου Silicon Photonics (SiPho) μπορεί να παρέχει μικρής κλίμακας, χαμηλού κόστους, υψηλού εύρους ζώνης, μικροσκοπικούς οπτικούς διακόπτες επιλεκτικού μήκους κύματος και επαναδιαμορφώσιμους οπτικούς πολυπλέκτες προσθαφαίρεσης μήκους κύματος (ROADM) με στόχο την

προγραμματιζόμενη αναδρομολόγηση του δικτύου και τη βελτιωμένη ανακατανομή των οπτικών πόρων στο δίκτυο fronthaul. Η Ericsson εφάρμοσε πρόσφατα τέτοιους μειωμένου μεγέθους μίνι-ROADMs για ευέλικτη δρομολόγηση μήκους κύματος των γραμμών CPRI 10 Gb/s. Αυτά τα mini-ROADMs χρησιμοποιούνται κυρίως στον τομέα Digital RoF για τη δρομολόγηση μήκους κύματος.

Αρχιτεκτονική δικτύου

Η έλευση του mmWave στα 5G C-RAN παρέχει μια σημαντική πρόκληση για την οικονομικά αποδοτική διασύνδεση μαζικών χωρητικότητας ασύρματης κίνησης στο πεδίο με ένα οπτικό δίκτυο υψηλού εύρους ζώνης με δυναμική κατανομή. Μελετώνται τόσο οι τοπολογίες WDM που βασίζονται σε δέντρα/διαύλους όσο και οι τοπολογίες WDM που βασίζονται σε δακτυλίους, προκειμένου να προσαρμοστούν τα σημερινά σταθερά δίκτυα fronthaul PtP σε επαναδιαμορφώσιμες τοπολογίες δικτύου PtMp. Η πρώτη μπορεί να προσφέρει απλότητα με λίγους μόνο κλιμακωτούς κόμβους ROADMs, π.χ. όταν περικυκλώνονται μικροσκοπικές ζώνες hotspot 5G με εφαρμογές eMBB, αλλά σε βάρος της φτωχότερης ανοχής σε σφάλματα, εκτός αν περιλαμβάνονται βοηθητικές οπτικές συνδέσεις. Ωστόσο, η συμπερίληψη μεγάλων δακτυλίων με πολλούς διασυνδεδεμένους RRH αναμένεται να αυξήσει την πολυπλοκότητα των κόμβων και τον αριθμό των θυρών.

Και οι δύο τοπολογίες μπορούν να διαδραματίσουν συμπληρωματικούς ρόλους στη μελλοντική γενιά των FiWi C-RAN, με τις λύσεις δακτυλίου να προτιμούν συνδεσιμότητα backhaul/fronthaul πιο κοντά στις δεξαμενές BBU και τις λύσεις με βάση το δέντρο/διαύλου να ταιριάζουν πιο κοντά στις θέσεις κυψέλης και τα RRH. Ένα κεντρικό αναλογικό BBU Box εγκαθίσταται στο κεντρικό γραφείο του φορέα εκμετάλλευσης, π.χ. στο δίκτυο backhaul ή στο δίκτυο δακτυλίου μετρό, και συνδέεται με μια σειρά από RRHs σε μια τοπολογία οπτικού διαύλου από κλιμακωτά ROADMs. Για τα C-RAN, ένα ROADM χαμηλών απωλειών υποστηρίζει πολλά κλιμακωτά στάδια σε απαιτητικά δίκτυα A-RoF με προϋπολογισμό ισχύος με βελτιωμένη δυνατότητα αναδιαμόρφωσης, ενώ τα συστήματα SiPho καλύπτουν

απαιτήσεις χαμηλού κόστους και υψηλού εύρους ζώνης. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική είναι ικανή να υποστηρίξει τις ποικίλες απαιτήσεις κίνησης των αναπτυσσόμενων περιπτώσεων χρήσης 5G, όπως FWA σε πυκνές μητροπολιτικές περιοχές ή eMBB σε περιοχές hotspot, όπως γήπεδα, εμπορικά κέντρα ή συναυλίες.



Εικόνα 5 Επαναδιαμορφώσιμο οπτικό δίκτυο fronthaul με mmWave κεραίες για την εξυπηρέτηση πυκνών και hotspot περιοχών, μέσω κλιμακωτών Reconfigurable Add/Drop Multiplexer. (mmWave: millimeter Wave, PAA: eMBB: ενισχυμένη κινητή ευρυζωνική επικοινωνία).

Στο πρώτο σενάριο, η σύνδεση FiWi mmWave μπορεί να κατευθυνθεί προς τη σταθερή κεραία ενός μικρού σημείου πρόσβασης, όπως μια κεραία στην οροφή ή μια κεραία σε φανοστάτη, η οποία θα φιλοξενεί μια δευτερεύουσα διεπαφή για την πρόσβαση των χρηστών. Χρησιμοποιώντας νέες μορφές διαμόρφωσης διαμορφωμένες σε οπτικά χαμηλού εύρους ζώνης και χαμηλού κόστους, μια σύνδεση FiWi mmWave μπορεί να διανείμει μια δέσμη με επαρκές φάσμα προς τις σταθερές κεραίες στέγης για να φορτώσει μια ενιαία ροή υψηλής χωρητικότητας που πρέπει να μεταφερθεί πίσω στο κεντρικό γραφείο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι συνδέσεις mmWave μπορούν να αποτελέσουν μια πιθανή επιλογή για τη γεφύρωση του τελευταίου μιλίου, χωρίς την ανάγκη αντικατάστασης της τρέχουσας καλωδιακής υποδομής στα κτίρια, ενώ οι μέσες αποστάσεις μεταφοράς μεταξύ της BBU και του RRH κυμαίνονται έως και 10 χιλιόμετρα. Από την άλλη πλευρά, η λύση hotspot αποσκοπεί στην παροχή άμεσης πρόσβασης mmWave σε πολλαπλούς χρήστες, όπου πολλαπλά PAA μπορούν να τοποθετηθούν γύρω από ένα στάδιο και να κατευθυνθούν προς τους οπαδούς και μερικές εκατοντάδες μέτρα οπτικής ίνας μπορούν να περιβάλλουν την περιοχή για τη διασύνδεση κάθε ROADM με ένα PAA

ή το επόμενο κλιμακωτό στάδιο ROADM. Οι ανάγκες του δικτύου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα σενάρια κίνησης και τις περιπτώσεις χρήσης.

Ο πρωταρχικός στόχος για τις ευρυζωνικές καταστάσεις σε εσωτερικούς χώρους, όπως σε χώρους εργασίας ή σε σπίτια, είναι να προσφέρονται υψηλοί ρυθμοί χρήσης έως και 1 Gb/s για σταθερή ευρυζωνική συνδρομή. Επιπλέον, σε αστικές περιοχές αναμένονται ρυθμοί δεδομένων χρήστη έως και 300 Mb/s, αλλά με πρωταρχικό στόχο την παροχή μεγαλύτερης κάλυψης και διεύθυνσης της δέσμης, π.χ. για την πανταχού παρούσα κάλυψη μιας ανοιχτής πλατείας ή για την παροχή πολλαπλών συνδέσεων από μια κεραία στέγης σε όλο τον περιβάλλοντα δρόμο ή για τη σύνδεση πολλαπλών συσκευών μιας υποδομής έξυπνης πόλης. Σε αντίθεση με τις αστικές περιοχές, όπου οι χρήστες και οι συσκευές μπορούν να είναι πιο ομοιόμορφα κατανεμημένες, οι υπηρεσίες eMBB σε hotspots απευθύνονται σε μεγάλο αριθμό χρηστών που απαιτούν προσωρινά τεράστια μέγιστη συνολική κυκλοφορία και πυκνότητα σύνδεσης κατά τη διάρκεια ενός παιχνιδιού ή μιας κοινωνικής εκδήλωσης, γεγονός που συνεπάγεται νομαδικά χαρακτηριστικά, όπως όταν οι οπαδοί αποχωρούν από το στάδιο.

Στην προτεινόμενη σχεδίαση, η BBU και οι RRH ανταλλάσσουν κίνηση χρησιμοποιώντας αφιερωμένα μήκη κύματος και τον ίδιο αριθμό καναλιών WDM αξίας γραμμικών οπτοηλεκτρονικών πομποδεκτών ειδικού μήκους κύματος χαμηλού εύρους ζώνης. Για την καθοδική επικοινωνία, κάθε ένα από τα τέσσερα μήκη κύματος των καναλιών δεδομένων IFoF μεταφέρεται στο πρώτο στάδιο ROADM, το οποίο είναι υπεύθυνο για την απόρριψη κάθε καναλιού στο σύστημα PAA Tx του RRH για ασύρματη μετάδοση ή την προώθησή του στο επόμενο RRH του διαύλου. Ομοίως, το σύστημα PAA Rx του RRH είναι υπεύθυνο για την καθοδική μετατροπή του σήματος χρήστη mmWave σε IF πριν από τη διαμόρφωσή του σε έναν οπτικό πομπό ειδικού μήκους κύματος για μετάδοση προς τα πάνω προς μια σχετική θύρα Add του ROADM για διάδοση προς την BBU. Κατά συνέπεια, η αρχιτεκτονική του δικτύου χρησιμοποιεί ένα ζεύγος μηκών κύματος που πρέπει να κατανεμηθεί κατάλληλα για να διευκολύνει την αμφίδρομη κίνηση ανοδικής/καθοδικής ζεύξης σε διάφορες περιοχές της περιοχής εξυπηρέτησης, π.χ. ελεγχόμενη από έναν κατάλληλο αλγόριθμο δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης

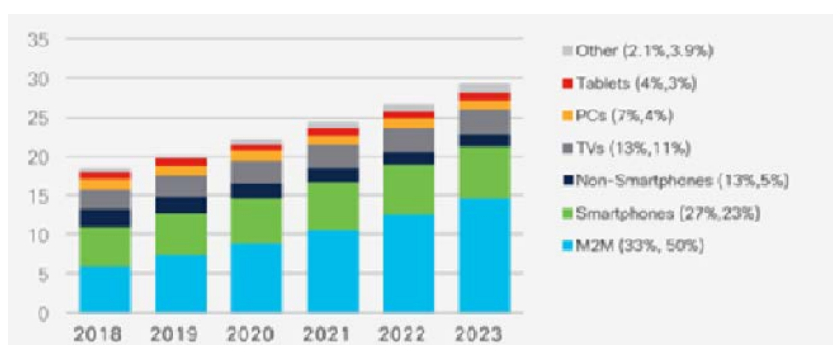
για την αναδιαμόρφωση μικρότερου αριθμού μηκών κύματος σε σχέση με τον αριθμό των RRH, με βάση τον αριθμό των ενεργών χρηστών.

4. Τεχνολογίες Οπτικής μεταγωγής

Ένα οπτικός μεταγωγέας, γνωστός και ως οπτικός διακόπτης, είναι μια συσκευή που δρομολογεί οπτικά σήματα προς διαφορετικές διαδρομές. Το φως που εμφανίζεται στην είσοδο ενός οπτικού διακόπτη/μεταγωγέα υπό τη μορφή φωτονίων απαιτείται να περάσει από μία συμβολομετρική διάταξη, ικανής να αλλάξει δείκτη διάθλασης, με στόχο διαφορετικά φαινόμενα συμβολής στις θύρες εξόδου, για την επίτευξη της επιθυμητής μεταγωγής. Η συσκευή αυτή θα αποτελεί το οπτικό ανάλογο των ηλεκτρονικών μεταγωγέων (switch) που αποτελούν τη βάση των σύγχρονων ηλεκτρονικών συσκευών δρομολόγησης/μεταγωγής. Τα οπτικά switch παρέχουν ένα μέσο ελέγχου του φωτός και βρίσκουν πληθώρα εφαρμογών σε δίκτυα ευρυζωνικής μετάδοσης και δίκτυα οπτικών ινών, όπως π.χ. σε Κέντρα Δεδομένων Υπερυπολογιστών (Data Centers), σε οπτικά δίκτυα κορμού, καθώς και πλέον σε δίκτυα 5^{ης} γενιάς. Η υλοποίηση και χρήση οπτικών μεταγωγέων (switch) προσφέρει τη δυνατότητα υλοποίησης αμιγώς οπτικών δικτύων, με δυνατότητα αλλαγής της συνδεσιμότητας των τερματικών του δικτύου, παρακάμπτοντας τους αργούς και κοστοβόρους ηλεκτρονικούς μεταγωγείς (electrical switch) και αποφεύγοντας τη μετατροπή οπτικών σε ηλεκτρονικά σήματα ως ενδιάμεσο βήμα. Έχουν προταθεί και αποδειχθεί πειραματικά υλοποιήσεις που χρησιμοποιούν μια ποικιλία λειτουργικών μέσων.

Δεδομένου του τεράστιου δυναμικού των οπτικών ινών, δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι αντικαθιστούν κατά κύριο λόγο τον χαλκό ως το μέσο μετάδοσης επιλογής, αυξάνοντας κατά πολύ το εύρος ζώνης μιας ζεύξης. Η περασμένη δεκαετία έγινε μάρτυρας μιας μετατόπισης του παραδείγματος δικτύωσης από την επικοινωνία προσανατολισμένη στη σύνδεση σε υψηλού εύρους ζώνης, με επίκεντρο την IP, κίνηση δεδομένων με μεταγωγή πακέτων. Όλη αυτή η κίνηση καθοδηγείται από την εισροή εφαρμογών υψηλού εύρους ζώνης που έχουν προκαλέσει μια ακόρεστη ζήτηση για αυξημένους ρυθμούς δεδομένων σε οπτικές

επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων. Η διαθεσιμότητα τέτοιων εφαρμογών υψηλού εύρους ζώνης βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ικανότητα μεταφοράς δεδομένων σε γρήγορη ταχύτητα και αξιόπιστο τρόπο χωρίς να αυξάνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας και ιδιοκτησίας. Κατά συνέπεια, οι ερευνητές αναγκάζονται να δημιουργήσουν δίκτυα υψηλής ταχύτητας ικανά να υποστηρίξουν τους ποικίλους ρυθμούς bit, τα πρωτόκολλα και τις μορφές που απαιτούνται από αυτές τις εφαρμογές με εξαιρετικά επεκτάσιμο τρόπο. Καθώς τα σύγχρονα δίκτυα συνεχίζουν να εξελίσσονται τόσο σε μέγεθος όσο και σε πολυπλοκότητα, έχουν εμφανιστεί νέες τεχνολογίες για να διευκολύνουν τις πιο βασικές λειτουργίες δικτύωσης και να αξιοποιήσουν αποτελεσματικά τις δυνατότητες των οπτικών ινών για δρομολόγηση, μεταγωγή και πολυπλεξία. Σε παγκόσμιο επίπεδο οι συσκευές και οι συνδέσεις αυξάνονται ταχύτερα τόσο από τον πληθυσμό όσο και από τους χρήστες του διαδικτύου. Ο μέσος αριθμός συσκευών και συνδέσεων προβλέπεται να αυξηθεί από 2,4 δις το 2018 έως και 3,6 δις έως το 2023.



Εικόνα 6. Παγκόσμια ανάπτυξη συσκευών και συνδέσεων. Η πηγή δεδομένων είναι αναφορά της Cisco Annual Internet Report, 2018-2023.

Φωτονική τεχνολογία και ολοκληρωμένοι μεταγωγείς πυριτίου

Η φωτονική τεχνολογία έχει κεντρίσει το ερευνητικό ενδιαφέρον με στόχο την επίτευξη των διεργασιών της παραγωγής, διάδοσης, μετάδοσης, διαμόρφωσης, επεξεργασίας και μεταγωγής οπτικών σημάτων, μεταφέροντας την πληροφορία από το ηλεκτρικό πεδίο στο πεδίο του φωτός. Περιλαμβάνει όλες τις χρήσεις του φωτός σε ένα ευρύ φάσμα, από το υπεριώδες έως το ορατό και το υπέρυθρο. Ωστόσο, η

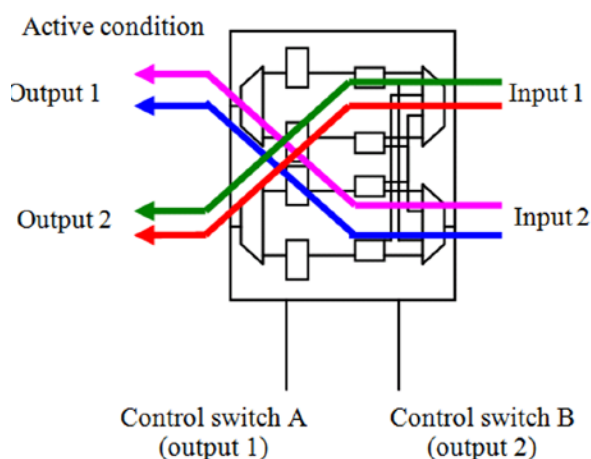
πλειονότητα των εφαρμογών που σχετίζονται με τη φωτονική χρησιμοποιεί το φάσμα από το ορατό έως το υπέρυθρο.

Η χρήση του πυριτίου στην έρευνα της φωτονικής αναφέρεται στη μελέτη και τη χρήση φωτονικών συστημάτων στα οποία το πυρίτιο χρησιμοποιείται ως δομικό υλικό. Οι φωτονικές διατάξεις πυριτίου μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας τις υπάρχουσες διαδικασίες κατασκευής ημιαγωγών για ηλεκτρικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, καθώς το πυρίτιο είναι το υπόστρωμα για την πλειονότητα αυτών των κυκλωμάτων. Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση φωτονικών στοιχείων πυριτίου με την τεχνολογία πυριτίου μπορεί να οδηγήσει σε υβριδικές αρχιτεκτονικές στις οποίες τα οπτικά και τα ηλεκτρικά στοιχεία μπορούν να συγχωνευθούν στην ίδια πλατφόρμα ολοκλήρωσης και σε ένα μόνο μικροσίπ. Η φωτονική τεχνολογία πυριτίου έχει μελετηθεί στα εργαστήρια πολλών μεγάλων κατασκευαστών ηλεκτρονικών επεξεργαστών, όπως η IBM και η Intel, καθώς και από ακαδημαϊκές ερευνητικές ομάδες από διάσημα ινστιτούτα και πανεπιστήμια, όπως αυτή της καθηγήτριας Michal Lipson, η οποία προβλέπει ότι το πυρίτιο είναι ένα μέσο συμβατό με το νόμο του Moore.

Ο Moore προέβλεψε ότι κάθε 18 μήνες ο αριθμός των τρανζίστορ σε έναν μικροεπεξεργαστή θα διπλασιάζεται. Η Lipson υποστηρίζει, με βάση αυτόν τον τύπο, ότι η υιοθέτηση οπτικών διασυνδέσεων πυριτίου μπορεί να προσφέρει μεταφορά δεδομένων με εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς εντός του μικροσίπ, οι οποίοι θα αυξάνονται όσο αυξάνεται ο αριθμός των τρανζίστορ στον μικροεπεξεργαστή. Κατά συνέπεια, η ηλεκτρονική τεχνολογία μεταγωγής έχει φθάσει στα όριά της, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη μετάβαση σε μια εναλλακτική οπτική τεχνολογία, η οποία φαίνεται να είναι η οπτική μεταγωγή πυριτίου.

Ο έλεγχος της διέλευσης και της κατεύθυνσης των απεσταλμένων πληροφοριών ονομάζεται μεταγωγή. Είναι επωφελής επειδή επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ πολλών χρηστών μέσω του ίδιου τηλεπικοινωνιακού δικτύου, χωρίς αυτήν όλοι οι χρήστες θα έπρεπε να είναι απευθείας συνδεδεμένοι. Ο τελικός προορισμός της προς μετάδοση πληροφορίας καθορίζεται από ηλεκτρικά σήματα ελέγχου που

εφαρμόζονται πάνω στο μεταγωγέα. Η οπτική μεταγωγή χρησιμοποιείται για συστήματα με υποδομή πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) πολύ υψηλής χωρητικότητας, ενώ η ηλεκτρονική μεταγωγή χρησιμοποιείται για ηλεκτρονικά κυκλώματα. Μια σχηματική απεικόνιση της μεταγωγής με τη χρήση ενός διακόπτη 2x2, δηλαδή δύο εισόδους και δύο εξόδους, απεικονίζεται στο σχήμα 7.



Εικόνα 7. Ένας 2x2 μεταγωγέας (2 εισοδοι-2 έξοδοι)

Τα τελευταία χρόνια έχουν καταβληθεί προσπάθειες να αποφευχθεί η χρήση συμβατικής ηλεκτρονικής μεταγωγής στο πλαίσιο ενός αμιγώς οπτικού ή ηλεκτρο-οπτικού δικτύου επικοινωνίας για τα συστήματα αυτά, καθώς απαιτεί χρονοβόρες οπτο-ηλεκτρονικές μετατροπές σημάτων και την μετατροπή μιας γρήγορης οπτικής μετάδοσης σε πολλαπλές παράλληλες ηλεκτρονικές μεταδόσεις μικρότερης ταχύτητας για την αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων, που συνεπάγεται καθυστερήσεις διάδοσης και περιορισμένο εύρος ζώνης. Από την άλλη πλευρά, ένας οπτικός διακόπτης επιτρέπει την οπτική δρομολόγηση απευθείας με τον έλεγχο της κατεύθυνσης του φωτός, διατηρώντας τα δεδομένα στο οπτικό πεδίο και αποφεύγοντας τις οπτοί-ηλεκτρονικές μετατροπές. Επιπλέον, η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος επιτρέπει την ταυτόχρονη δρομολόγηση πολλών ροών δεδομένων χρησιμοποιώντας έναν μόνο οπτικό εξοπλισμό.

Τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα μεταγωγής (MEMS), τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία οπτικών κυκλωμάτων μεταγωγής σε περιβάλλον υπολογιστή, συγκαταλέγονται στις πλέον συνηθισμένες εφαρμογές της οπτικής

μεταγωγής. Οι διακόπτες MEMS, ωστόσο, έχουν περιορισμένες δυνατότητες κλιμάκωσης, δεν είναι άμεσα ενσωματώσιμοι με την τεχνολογία CMOS, την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για την παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, έχουν συχνά πολύ μεγάλες διάρκειες διάδοσης και συχνά χρειάζονται περίπλοκες μεθόδους κατασκευής.

Τα στοιχεία μεταγωγής πυριτίου, από την άλλη πλευρά, είναι άμεσα συμβατά με την τεχνολογία ολοκλήρωσης CMOS, που χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή ηλεκτρονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, και προσφέρουν το πρόσθετο πλεονέκτημα της ενσωμάτωσης υψηλής χωρητικότητας, επιτρέποντας την αξιοποίηση της υψηλής ταχύτητάς τους σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος. Ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή οπτικών διαμορφωτών και διακοπών υψηλής ταχύτητας.

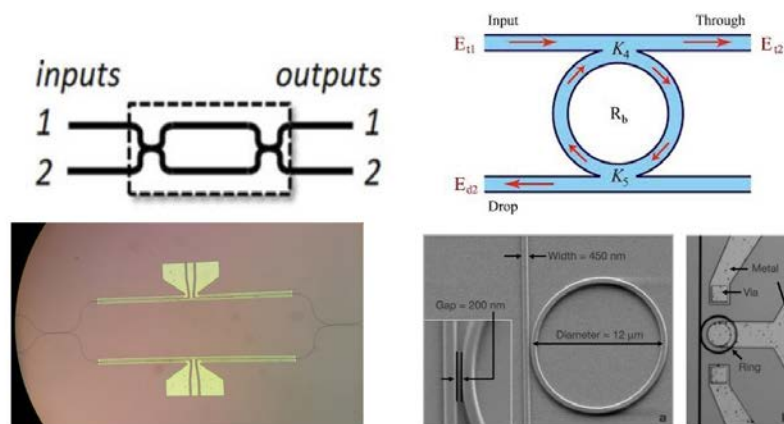
Η τεχνολογία φωτονικής πυριτίου έχει ως απώτερο στόχο τη μονολιθική ενσωμάτωση των οπτικών τμημάτων με την τεχνολογία CMOS, εκτός από την παροχή εξαιρετικά υψηλού εύρους ζώνης και ρυθμών μετάδοσης με δραστικά μειωμένο κόστος κατανάλωσης ενέργειας και χαμηλές απώλειες και θόρυβο.

Οπτικοί μεταγωγείς πυριτίου

Μία από αυτές τις μελέτες και διατάξεις που χρησιμοποιεί τον οπτικό διακόπτη 2x2 που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και συγκεκριμένα στο επάνω αριστερά διάγραμμα, που αποτελεί το βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας. Αυτός ο σχεδιασμός βασίζεται στη δομή του συμβολόμετρου Mach-Zehnder (MZI), και αποτελείται από δύο παράλληλους κλάδους που ενώνονται μέσω δύο οπτικών συζευκτών.

Η αρχή λειτουργίας της μεταγωγής ενός συμβολόμετρου MZI μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Σε περίπτωση απουσίας μεταγωγής δεδομένων, η πληροφορία εισάγεται μέσω της εισόδου 1 και εξέρχεται μέσω της εξόδου 2. Σε περίπτωση μεταγωγής δεδομένων, η πληροφορία εξέρχεται μέσω της εξόδου 1. Ομοίως, η είσοδος 2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φύγει η πληροφορία από την έξοδο 1 σε

περίπτωση μη μεταγωγής και από την έξοδο 2 σε περίπτωση μεταγωγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν επίσης επιδειχθεί και αναλυθεί θεωρητικά οπτικοί διακόπτες που βασίζονται στη σχεδίαση του συντονιστή δακτυλίου, όπως απεικονίζεται στο πάνω δεξιό τμήμα της εικόνας. Η διατριβή δεν περιλαμβάνει την αρχιτεκτονική του αντηχείου δακτυλίου. Σχηματικά σχέδια και μικρογραφίες και των δύο τύπων διακοπών απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα. Η εικόνα μαζί με τις διατάξεις που απεικονίζονται στην πρώτη γραμμή και περιγράφουν την αρχή λειτουργίας, επίσης απεικονίζουν φωτογραφίες από μικροσκόπιο όπως έχουν δημοσιευτεί στη βιβλιογραφία.



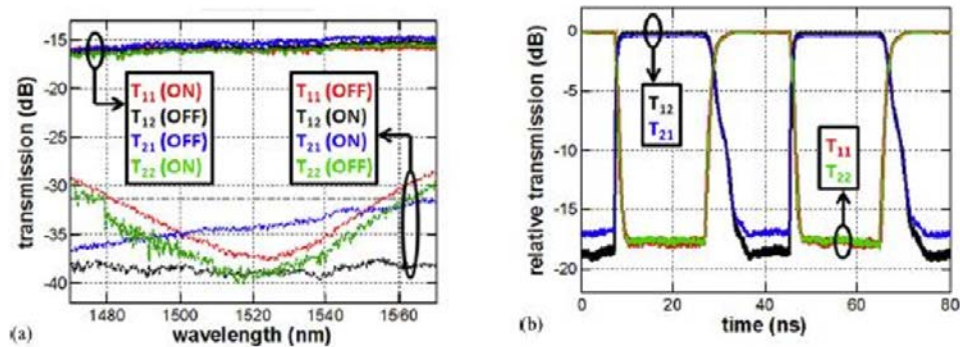
Εικόνα 8 Σχηματική αναπαράσταση ενός οπτικού μεταγωγέα με αρχιτεκτονική i) Mach-Zehnder και ενός ii) Ring resonator και αντίστοιχες φωτογραφίες από μικροσκόπιο για i) Mach-Zehnder και ενός ii) Ring resonator οπτικό μεταγωγέα.

Σημαντικά μεγέθη για την αξιολόγηση και τη μέτρηση της απόδοσης των διακοπών περιλαμβάνουν:

- Την ισχύ που απαιτείται για την εναλλαγή πακέτων από τη μία θύρα εξόδου στην άλλη και αντίστροφα.
- Τον λόγο σβέσης (Extinction Ratio - ER) μεταξύ των διαδρομών εξόδου της θύρας μεταγωγής και της θύρας χωρίς μεταγωγή.
- Τους χρόνους ανόδου και καθόδου, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση από τη μεταγωγή στη μη μεταγωγή και αντίστροφα.

- Το μήκος του μεταγωγέα φάσης L και το συνολικό αποτύπωμα του διακόπτη.

Η οπτική ισχύς εξόδου συναρτήσκει του μήκους κύματος για κάθε μία από αυτές τις διαδρομές στις συνθήκες μη μεταγωγής (κατάσταση OFF) και μεταγωγής παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα φάσματος (κατάσταση ON). Σημειώνουμε ότι, στα μονοπάτια χωρίς μεταγωγή χωρίς την παρουσία μεταγωγής καθώς και στα μονοπάτια με μεταγωγή με την παρουσία μεταγωγής, η οπτική ισχύς εξόδου κυμαίνεται περίπου στα -15dbm και το παρακάτω γράφημα απεικονίζει τη χρονικά εξαρτώμενη μεταβολή της οπτικής ισχύος εξόδου για κάθε μονοπάτι. Στην παρούσα μελέτη, οι περίοδοι ανόδου και πτώσης είναι $4,5$ και $2,3$ νανοδευτερόλεπτα, αντίστοιχα.



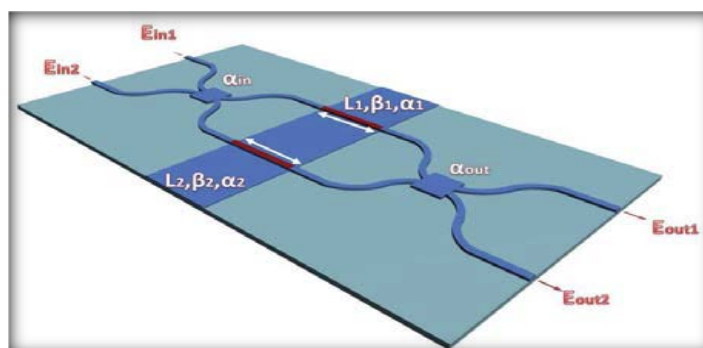
Εικόνα 9 Γραφική παράσταση της ισχύος εξόδου

Τα συστήματα μεγάλων αποστάσεων χρησιμοποιούν τις οπτικές επικοινωνίες εδώ και δεκαετίες, εν μέρει λόγω των εγγενών χαμηλών απωλειών και της χαμηλής παραμόρφωσης σήματος που προκύπτουν από τη διαφάνεια του ρυθμού δεδομένων, την ελάχιστη διασπορά και τη γραμμικότητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν ως αποτέλεσμα βελτιωμένες επιδόσεις ακεραιότητας σήματος. Τα οπτικά μέσα είναι ικανά να μεταφέρουν τεράστια εύρη ζώνης (δεκάδες terahertz τόσο για τις οπτικές ίνες όσο και για τους κυματοδηγούς πυριτίου)- τεράστια εύρη ζώνης μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (WDM). Επιπλέον, οι καθυστερήσεις οπτικής μεταφοράς περιορίζονται μόνο από τον οπτικό χρόνο πτήσης. Σε συστήματα με μικρότερες χαρακτηριστικές αποστάσεις, όπως τα τοπικά δίκτυα, τα δίκτυα οπτικής ασύρματης πρόσβασης, τα

δίκτυα των κέντρων δεδομένων, δηλαδή δίκτυα με σχετικά μικρών αποστάσεων τηλεπικοινωνιακής μετάδοσης έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται οπτικές τεχνολογίες. Η οπτική μετάδοση σε κλίμακα τσιπ είναι πλέον εφικτή χάρη στις εξελίξεις στη φωτονική πυριτίου συμβατή με CMOS, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας μικροσκοπικών, ενεργειακά αποδοτικών και υψηλού εύρους ζώνης διαμορφωτών και διακοπών.

Συμβολόμετρο Mach-Zehnder

Ένας οπτικός μεταγωγέας μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας ηλεκτροπτικές συμβολομετρικές διατάξεις που βασίζονται στην αρχιτεκτονική του συμβολόμετρου Mach-Zehnder, όπως απεικονίζεται Εικόνα 10. Το Mach-Zehnder είναι μία διάταξη που έχει ως στόχο τον έλεγχο της κατεύθυνσης ενός οπτικού σήματος. Ουσιαστικά, το συμβολόμετρο μεταβάλλει τον οπτικό δρόμο του σήματος, σύμφωνα με την «πορεία» που επιθυμούμε να έχουμε.



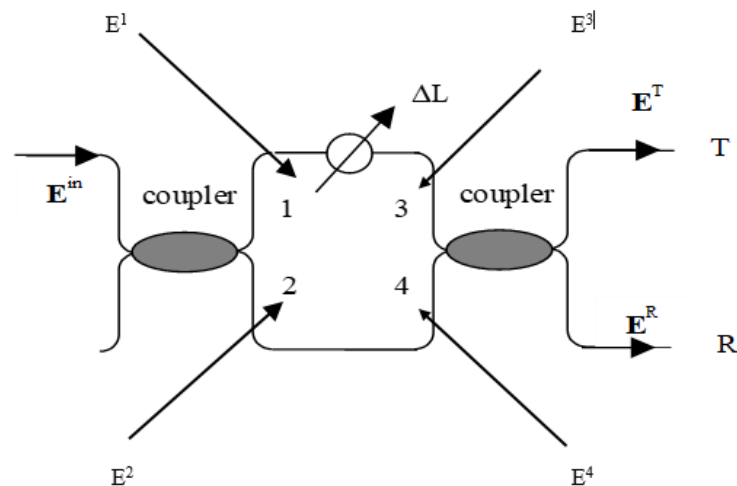
Εικόνα 10 Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder

Διαχωρίζει ένα σήμα εισόδου στο χώρο σε δύο συνιστώσες. Οι δύο συνιστώσες ακολουθούν εν γένει διαφορετικούς δρόμους (μία συνιστώσα στο ένα άκρο και φέρει το στοιχείο κυματοδήγησης μήκους L_1 για στροφή φάσης ϕ_1 και η άλλη συνιστώσα στο άλλο άκρο του συμβολόμετρου της παραπάνω εικόνας και φέρει το στοιχείο κυματοδήγησης μήκους L_2 για στροφή φάσης ϕ_2) και ενώνονται ξανά στην έξοδο, όπου και έχουμε το φαινόμενο της συμβολής. Για το MZI, θεωρούμε

ότι αποτελεί ένα σύστημα και η είσοδος του θα είναι της μορφής μιγαδικών εκθετικών $e^{-j\omega t}$, με σκοπό να γίνει η ανάλυση της συνάρτησης μεταφοράς. Το Mach Zehnder μπορεί να είναι είτε συμμετρικό (τα άκρα του να έχουν το ίδιο μήκος) είτε ασύμμετρο (τα άκρα να μην έχουν το ίδιο μήκος για κάποια διαφορά ΔL).

Συνάρτηση μεταφοράς συμβολόμετρου MZI

Η συνάρτηση υπολογίζεται με την αρίθμηση των θυρών εισόδου και εξόδου των συζευκτών όπως φαίνεται στο εικόνα 11. Το ηλεκτρικό πεδίο θα εισέλθει από την επάνω είσοδο του MZI, θα διαδοθεί πρώτα από τον συζεύκτη εισόδου, δηλαδή τον πρώτο, όπου θα χωριστεί στα δύο, θα περάσει από τα σημεία 1,3 (η 1^η συνιστώσα με το μισό της ισχύς του ηλεκτρικού πεδίου) και 2,4 (η 2^η συνιστώσα με το μισό της ισχύς του ηλεκτρικού πεδίου), πριν ξανά διαχωριστεί εκ νέου στο συζεύκτη εξόδου, δηλαδή το δεύτερο συζεύκτη, ώστε τελικά να ακολουθήσει και να εμφανιστεί στις δυο εξόδους T και R.



Το σήμα στην είσοδο του MZI στην 1^η θύρα θα έχει την παρακάτω αναλυτική έκφραση για το ηλεκτρικό πεδίο: $E^{in} = E^{in} e^{-i\omega t} \hat{p}$, όπου το E^{in} είναι το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου που εισέρχεται στο MZI και το \hat{p} είναι το διάνυσμα κατά το οποίο το πεδίο είναι πολωμένο. Κατά την έξοδο από τον πρώτο συζευκτη,

δεδομένου ότι ο συζεύκτης είναι 50/50 (3db coupler), η κάθε μία από τις συνιστώσες θα περιέχει μόνο το μισό από τη συνολική ισχύ του αρχικά σταλμένου σήματος στην είσοδο. Έπειτα, η συνιστώσα που θα διαδοθεί και εξέλθει στη διαγωνίως απέναντι θύρα εξόδου (cross) από τον συζεύκτη θα αποκτήσει μια διαφορά φάσης $\frac{\pi}{2}$, ενώ αντίστροφα η συνιστώσα του σήματος που θα εξέλθει στην παράλληλη θύρα εξόδου (bar) δεν θα έχει κάποια μεταβολή στη φάση της.

Τα δύο αυτά σήματα, συμβάλουν στον δεύτερο 3dB συζεύκτη. Δεδομένου ότι πάλι έχουμε διαχωρισμό του ηλεκτρικού πεδίου σε συνιστώσες, και ότι η χιαστί μετάβαση εισάγει διαφορά φάση $\frac{\pi}{2}$, ενώ η παράλληλη δεν εισάγει, οι συνιστώσες στην έξοδο T (Θύρα Μεταγωγής) θα είναι οι εξής:

$$E_3^T = \sqrt{a}\sqrt{a}E^{in}e^{-i\beta(\omega)(L+\Delta L)}e^{-i\omega t\hat{p}} \quad (1)$$

$$E_4^T = (\sqrt{1-a})^2 e^{-j\frac{\pi}{2}} e^{-j\frac{\pi}{2}} E^{in} e^{-i\beta(\omega)(L)} e^{-i\omega t\hat{p}} \quad (2)$$

Όπου τα E_3^T, E_4^T είναι τα ηλεκτρικά πεδία που έχουν προκύψει από τις συνιστώσες του σήματος που προήλθαν από τις εξόδους 3 και 4 αντίστοιχα και καταλήγουν στην έξοδο T.

Χρησιμοποιώντας στα άκρα του συμβολόμετρου τους μεταγωγείς φάσης είμαστε σε θέση να πραγματοποιήσουμε τις καταστάσεις μεταγωγής και μη μεταγωγής.

Όταν το $\Delta\phi=2k\pi$ (με k θετικό ακέραιο αριθμό), το $T^T(\omega) = 0$ και το $T^R(\omega) = 1$, βρισκόμαστε στη κατάσταση μη μεταγωγής και η πληροφορία που στέλνουμε περνά από την έξοδο R. Όταν το $\Delta\phi=(2k+1)\pi$, το $T^T(\omega) = 1$ και το $T^R(\omega) = 0$, βρισκόμαστε στη κατάσταση μεταγωγής και η πληροφορία που στέλνουμε περνά από την έξοδο T. Επομένως, αν καταφέρουμε, μέσω μία εφαρμοσμένης τάσης (που ονομάζεται $V\pi$) στον μεταγωγέα φάσης να έχουμε αλλαγή φάσης κατά $\pi, 3\pi$ κτλ., μπορούμε να μετάγουμε όλη την πληροφορία σε διαφορετική έξοδο (έξοδο μεταγωγής).

Τέλος, ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται ασύμμετρη κατασκευή συμβολόμετρου Mach-Zehnder είναι το γεγονός ότι η αλλαγή φάσης που συντελείται εξαρτάται όχι μόνο από την τάση που θα εφαρμοστεί, αλλά και από την διαφορά στο μήκος μεταξύ των δύο άκρων του συμβολόμετρου. Επομένως, μπορούμε να πετύχουμε μεταγωγή ή μη μεταγωγή η οποία θα εξαρτάται και από το ΔL .

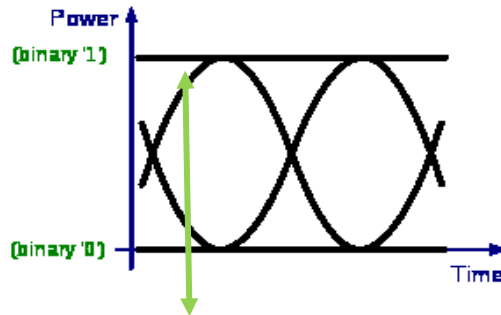
Χαρακτηριστικά συμβολόμετρου MZI

Αναλύονται τα τρία κύρια χαρακτηριστικά ενός συμβολόμετρου MZI, που χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουν την απόδοση της λειτουργίας ως μεταγωγός και είναι ο λόγος απόσβεσης (Extinction Ratio - ER), οι εισαγόμενες απώλειες στην εξασθένιση του σήματος (Insertion Loss - IL) και τέλος ο χρόνος/καθυστέρηση μεταγωγής (Switching Time - ST).

Ο λόγος απόσβεσης είναι ο λόγος μεταξύ των δύο οπτικών επιπέδων ισχύος ενός σήματος. Πιο συγκεκριμένα, εκφράζεται από την μαθηματική σχέση:

$$ER = P1 / P2,$$

όπου $P1$ είναι η ισχύς στην κατάσταση ON (αν έχουμε μεταγωγή ή μη μεταγωγή -τιμή 1) του μεταγωγέα και $P2$ είναι η ισχύς στην κατάσταση OFF (αν δεν έχουμε μεταγωγή ή μη μεταγωγή - τιμή 0), όπως φαίνεται και από την παρακάτω εικόνα και αφορά στο συγκεκριμένο παράδειγμα τη συνάρτηση μεταφοράς (σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισχύς του σήματος). Το extinction ratio χρησιμοποιείται για να περιγράψει την πόσο καλά διακρίνονται τα σήματα και ισχύεις του στις δυο θύρες εξόδου, δηλαδή την αποτελεσματικότητα στη μεταγωγή και διαχωρισμός των μεταδιδόμενων οπτικών σημάτων κατά την μετάδοσή τους στις δύο θύρες και ίνες εξόδου.



Εικόνα 11 Ο λόγος σβέσης

Το Insertion Loss (IL) περιγράφει τις απώλειες ισχύος για το μεταδιδόμενο/μεταγώμενο σήμα εξαιτίας της μεταγωγής που υλοποιεί το συμβολόμετρο MZI. Εκφράζεται ως ο λόγος, σε dB (decibels), της ισχύος που λαμβάνεται πριν την είσοδο, προς την ισχύ που λαμβάνεται μετά την είσοδο του σήματος στη διάταξη, δηλαδή:

$$\text{Insertion Loss (dB)} = 10 \log_{10} (P_T / P_R)$$

Τέλος, ο χρόνος μεταγωγής (ή ταχύτητα μεταγωγής), δηλαδή η καθυστέρηση και διάρκεια του χρόνου που χρειάζεται για την επίτευξη της μεταγωγικής διαδικασίας του MZI, για όλες τις ζητούμενες συχνότητες.

Διαφάνεια στην κυματομορφή μετάδοσης

Κάποιος μπορεί να ορίσει τη διαφάνεια του δικτύου με βάση τις παραμέτρους του φυσικού επιπέδου (π.χ. εύρος ζώνης, αναλογία σήματος προς θόρυβο). Μπορεί επίσης να είναι η μέτρηση των σημάτων που παραμένουν στον οπτικό τομέα, σε αντίθεση με εκείνα που εναλλάσσονται μεταξύ του οπτικού και του ηλεκτρονικού τομέα. Η διαφάνεια μπορεί επίσης να σημαίνει τον τύπο των σημάτων που υποστηρίζει το σύστημα, συμπεριλαμβανομένων των μορφών διαμόρφωσης και των ρυθμών bit. Λαμβάνοντας υπόψη όλες αυτές τις εκτιμήσεις, ένα διαφανές, πλήρως οπτικό δίκτυο (AON) ορίζεται συνήθως ως ένα δίκτυο όπου το σήμα παραμένει στον οπτικό τομέα σε όλο το δίκτυο. Τα διαφανή δίκτυα είναι ελκυστικά λόγω της ευελιξίας τους και του υψηλότερου ρυθμού δεδομένων. Αντίθετα, ένα

δίκτυο θεωρείται αδιαφανές εάν απαιτεί από τους κόμβους που το αποτελούν να γνωρίζουν τη μορφή του υποκείμενου πακέτου και τον ρυθμό μετάδοσης bit.

Η έλλειψη διαφάνειας αποτελεί επιτακτική ανησυχία στα τρέχοντα δίκτυα, καθώς η ανάγκη διαχείρισης ροών δεδομένων στον ηλεκτρικό τομέα προκαλεί μεγάλη αναντιστοιχία οπτικού-ηλεκτρονικού εύρους ζώνης. Το εύρος ζώνης σε ένα μόνο μήκος κύματος είναι 10 Gb/s σήμερα και είναι πιθανό να ξεπεράσει τα 100Gbps και 400 Gb/s στο εγγύς μέλλον. Τα ηλεκτρονικά θα πιεστούν σκληρά για να συμβαδίσουν με τον ρυθμό οπτικών δεδομένων καθώς κινείται προς τα πάνω. Επιπλέον, τα ηλεκτρονικά υψηλής ταχύτητας απαιτούν απαγορευτικά δαπανηρές αναβαθμίσεις υποδομής. Οποιαδήποτε αναβάθμιση δικτύου απαιτεί την αντικατάσταση όλου του παλαιού εξοπλισμού. Τα αμιγώς οπτικά δίκτυα αποφεύγουν αυτό το πρόβλημα, καθώς ο ρυθμός δεδομένων περιορίζεται μόνο από τις δυνατότητες του τερματικού σταθμού. Έτσι, οι αναβαθμίσεις των συνδέσεων δεν απαιτούν αλλαγές στον πυρήνα, επιτρέποντας στους φορείς εκμετάλλευσης του μετρό να κλιμακώσουν τα δίκτυά τους για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των πελατών και να βελτιώσουν τις υπηρεσίες τους πιο εύκολα.

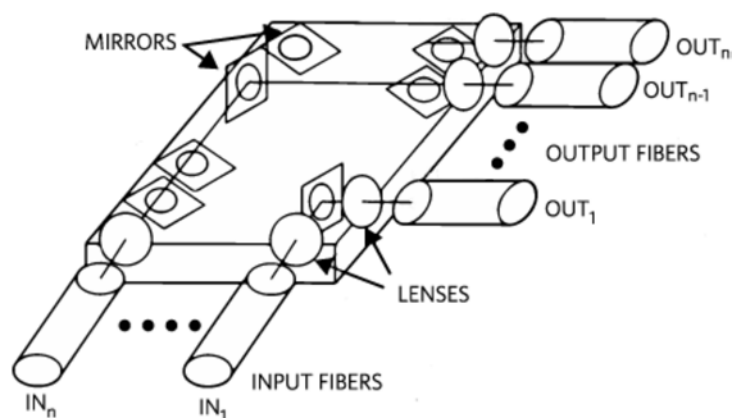
Η πρόοδος των τεχνολογιών υλοποίησης συσκευών καθιστά δυνατό τον σχεδιασμό AON στα οποία οπτικά σήματα σε μήκος κύματος άφιξης μπορούν να μετατραπούν σε μια σύνδεση εξόδου του ίδιου μήκους κύματος χωρίς μετατροπή στον ηλεκτρονικό τομέα. Τα σήματα σε αυτά τα AON μπορεί να έχουν διαφορετικούς ρυθμούς bit και μορφές, καθώς δεν τερματίζονται ποτέ μέσα στο κεντρικό δίκτυο. Αυτός ο ρυθμός bit, η μορφή και η διαφάνεια του πρωτοκόλλου είναι ζωτικής σημασίας στα οπτικά δίκτυα επόμενης γενιάς.

Τεχνολογίες Οπτικής Μεταγωγής

Οπτικός Μεταγωγέας με Καθρέπτες

Τα οπτικά MEMS είναι μικροσκοπικές συσκευές με οπτικές, ηλεκτρικές και μηχανικές λειτουργίες ταυτόχρονα, που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας τεχνικές διαδικασίας παρτίδας που προέρχονται από μικροηλεκτρονική κατασκευή. Τα οπτικά MEMS παρέχουν εγγενώς χαρακτηριστικά όπως μικρή ευαισθησία στο μήκος κύματος ή φαινόμενα πόλωσης και δυνατότητας κλιμάκωσης λόγω χαμηλών

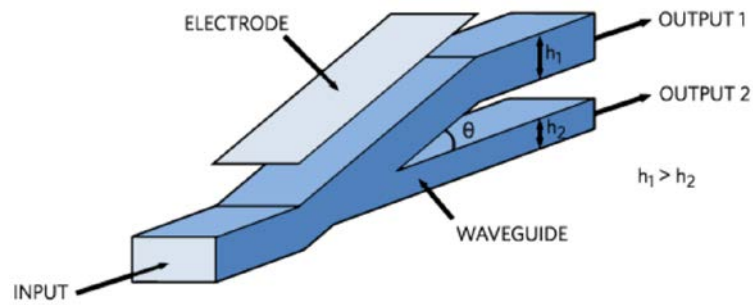
απωλειών εισόδου. Οι διακόπτες που βασίζονται σε οπτικά MEMS διακρίνονται στο ότι βασίζονται σε κάτοπτρα, μεμβράνες και επίπεδους κινούμενους κυματοδηγούς. Οι δύο πρώτοι είναι διακόπτες ελεύθερου χώρου, οι τελευταίοι είναι διακόπτες κυματοδηγών.



Εικόνα 12 Παράδειγμα διακόπτη 2D MEMS

Θερμο-Οπτικός Μεταγωγέας

Οι θερμικοί οπτικοί διακόπτες βασίζονται σε θερμοοπτική επίδραση κυματοδηγού ή θερμικά φαινόμενα υλικών. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι η λειτουργία χωρίς πόλωση και η ταχύτητα μεταγωγής της τάξης του χιλιοστού του δευτερολέπτου. Οι διακόπτες που βασίζονται στο θερμοοπτικό εφέ κυματοδηγού ονομάζονται θερμοοπτικοί διακόπτες (TOSW), οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν την καθιερωμένη τεχνολογία επίπεδου κυκλώματος φωτός (PLC). Χωρίζονται σε δύο βασικούς τύπους: ψηφιακούς οπτικούς διακόπτες (DOS) και συμβολομετρικούς διακόπτες, και βασίζονται στις θερμικές επιδράσεις των υλικών, με αλλαγή του δείκτη διάθλασης του μέσου οδήγησης του φωτός, καθιστώντας το μέσο οπτικά πιο πυκνό ή αραιό, με αντίστοιχη αλλαγή της στροφής φάσης διάδοσης. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει τη διάταξη ενός ψηφιακού θερμοοπτικού μεταγωγέα 1x2, με δυνατότητα να κατευθύνει το ένα σήμα εισόδου στις δύο εξόδους.



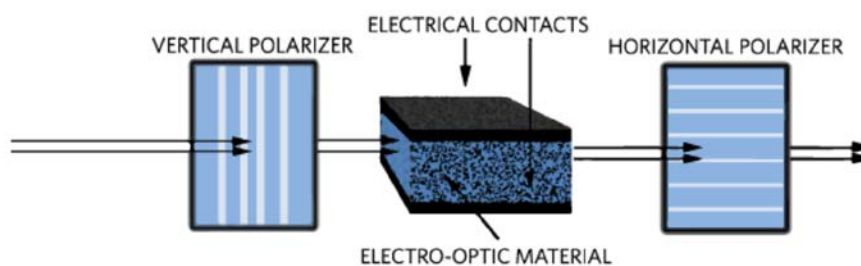
Εικόνα 13 Ψηφιακός θερμοοπτικός διακόπτης κυματοδηγού

Ηλεκτρο-Οπτικός Μεταγωγέας

Οι ηλεκτροοπτικοί διακόπτες πραγματοποιούν λειτουργίες οπτικής μεταγωγής χρησιμοποιώντας ηλεκτροοπτικά εφέ, τα οποία προσφέρουν σχετικά μεγαλύτερη ταχύτητα μεταγωγής. Οι κύριοι τύποι είναι οι διακόπτες LiNbO₃, οι διακόπτες βασισμένοι σε SOA, οι διακόπτες υγρών κρυστάλλων, οι ηλεκτροολογραφικοί (EH) οπτικοί διακόπτες και οι ηλεκτρονικά εναλλάξιμοι διακόπτες κυματοδηγών Bragg . Οι δύο πρώτοι είναι από τους παλαιότερους οπτικούς διακόπτες, οι άλλοι είναι νέοι τύποι ηλεκτροοπτικών διακοπών.

Ο διακόπτης LiNbO₃ βασίζεται στον μεγάλο ηλεκτρο-οπτικό συντελεστή του LiNbO₃. Μία από τις κύριες εφαρμογές του είναι ένας κατευθυντικός ζεύκτης 2×2 που βασίζεται σε παρεμβολές, του οποίου ο λόγος ζεύξης ρυθμίζεται αλλάζοντας τον δείκτη διάθλασης του υλικού στην περιοχή σύζευξης. Τα κύρια αδύναμα σημεία του διακόπτη είναι η υψηλή απώλεια εισαγωγής και η υψηλή αλληλεπίδραση. Μια άλλη εφαρμογή είναι ένας ψηφιακός οπτικός διακόπτης (DOS) που βασίζεται στην εξέλιξη του τρόπου λειτουργίας, ο οποίος έχει μια απόκριση διακόπτη σαν βήμα στην εφαρμοζόμενη τάση. Το PLZT είναι ένα υλικό με υψηλότερο ηλεκτροοπτικό συντελεστή από το LiNbO₃. Ως εκ τούτου, τα ηλεκτροοπτικά DOS PLZT έχουν πολύ καλή συνολική απόδοση διακόπτη. Εδώ, οι διακόπτες που βασίζονται σε SOA αναφέρονται σε οπτικούς διακόπτες ελεγχόμενου ρεύματος, όπου ορισμένα SOA που χρησιμοποιούνται ως πύλες απενεργοποιούνται-ON ελέγχοντας τα ρεύματα πόλωσης . Οι νέοι τύποι διακοπών ημιαγωγών βασίζονται σε παρεμβολόμετρα Mach-Zehnder (MZI) ή σε συζεύκτες παρεμβολής πολλαπλών τρόπων (MMI) .

Συγκρίνοντας τους δύο τύπους, το MMI έχει πολλά πλεονεκτήματα στην ταχύτητα μεταγωγής, τον λόγο εξάλειψης (ER), το μέγεθος της συσκευής κ.λπ.



Εικόνα 14 Διακόπτης ΕΟ χρησιμοποιώντας κρύσταλλο LiNbO3

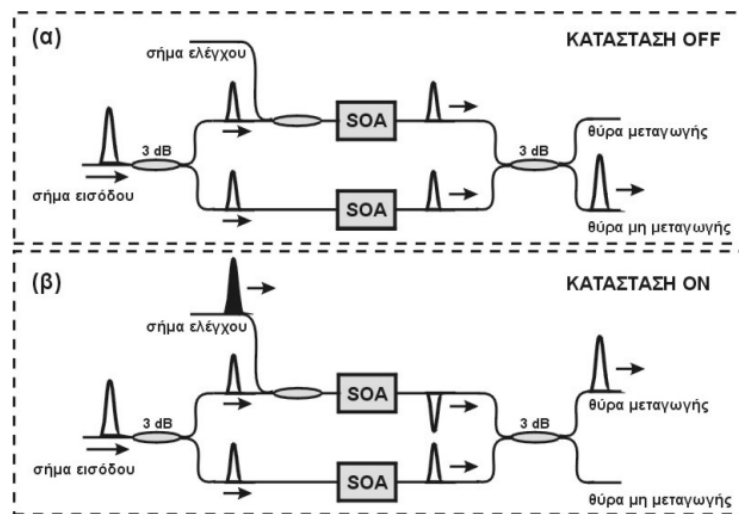
Οι διακόπτες υγρών κρυστάλλων (LC) βασίζονται στον έλεγχο της πόλωσης του φωτός με ηλεκτροοπτική επίδραση. Ο ηλεκτροοπτικός συντελεστής στο LC είναι πολύ υψηλότερος από το LiNbO₃, γεγονός που καθιστά το LC ένα από τα πιο αποδοτικά ηλεκτροοπτικά υλικά. Οι ολογραφικοί οπτικοί διακόπτες LC έχουν πλεονεκτήματα σταθερών απωλειών εισαγωγής όταν αυξάνεται ο αριθμός των καναλιών και προσαρμοστικής ευθυγράμμισης για τη διόρθωση σφαλμάτων κατασκευής και ευθυγράμμισης. Οι οπτικοί διακόπτες ΕΗ βασίζονται στον έλεγχο της διαδικασίας ανακατασκευής των ολογραμμάτων όγκου με εξωτερική εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου. Οι ηλεκτρονικά εναλλασσόμενοι διακόπτες κυματοδηγών Bragg είναι μια διασταύρωση μεταξύ των διακοπών LC και ΕΗ, η οποία βασίζεται σε σύνθετα πολυμερούς/υγρού κρυστάλλου με ολογραφικό πολυμερισμό.

Αμιγώς Οπτικός Μεταγωγέας

Οι οπτικοί διακόπτες πραγματοποιούν λειτουργίες μεταγωγής βασιζόμενοι στο εξαρτώμενο από την ένταση μη γραμμικό οπτικό αποτέλεσμα (το οποίο είναι εξαιρετικά γρήγορο) στους οπτικούς κυματοδηγούς, όπως η απορρόφηση δύο φωτονίων, η αυτενέργεια φωτονίων (που προκαλεί οπτικό φαινόμενο διαμόρφωσης αυτοφάσεως, SPM) και το Kerr αποτέλεσμα (που προκαλεί οπτικά φαινόμενα ανάμειξης τεσσάρων κυμάτων, FWM και διαμόρφωσης διασταυρούμενης φάσης, XPM). Ονομάζονται επίσης οπτικά ελεγχόμενοι διακόπτες ή αμιγώς οπτικοί διακόπτες. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι: διακόπτες με οπτικές ίνες

και διακόπτες με ημιαγωγούς. Οι αμιγώς οπτικοί διακόπτες κυματοδηγών που βασίζονται σε ημιαγωγούς έχουν πολλά σημαντικά ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν από πρακτικές εφαρμογές: χαμηλή ισχύς λειτουργίας, εξαιρετικά γρήγορη λειτουργία, υψηλή αναλογία κατάσβεσης, λειτουργία σε θερμοκρασία δωματίου και λειτουργία ανεξάρτητη από την πόλωση.

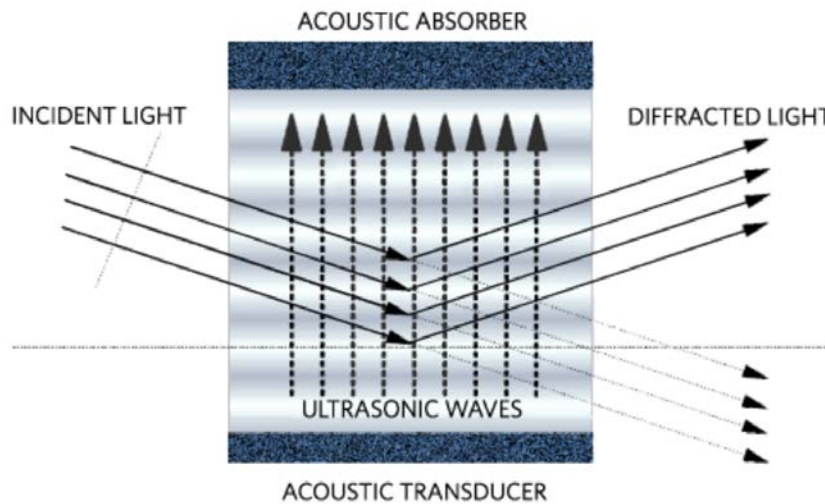
Στην εικόνα (α) περιγράφεται η λειτουργία του σε κατάσταση μη μεταγωγής(κατάσταση OFF, απουσία δηλαδή σήματος ελέγχου). Στην εικόνα (β) ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση μεταγωγής(κατάσταση ON).



Εικόνα 15 Η δομή ενός διακόπτη τύπου Mach-Zehnder με ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή(SOA)

Ακουστο-Οπτικός Μεταγωγέας

Οι ακουστικοί-οπτικοί διακόπτες βασίζονται στο ακουστικό-οπτικό αποτέλεσμα σε κρυστάλλους όπως το TeO₂, στους οποίους χρησιμοποιούνται υπερηχητικά κύματα για την εκτροπή του φωτός.



Εικόνα 16 Δημιουργία πλέγματος περίθλασης από υπερηχητικά κύματα

Σύγκριση με τα ηλεκτρονικά και Μετρικά Απόδοσης

Η πιο συχνά υποστηριζόμενη περίπτωση για την οπτική λογική είναι ότι οι χρόνοι μεταγωγής οπτικών τρανζίστορ μπορεί να είναι πολύ ταχύτεροι από ό,τι στα συμβατικά ηλεκτρονικά τρανζίστορ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του φωτός σε ένα οπτικό μέσο είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα μετατόπισης των ηλεκτρονίων στους ημιαγωγούς.

Οι οπτικοί μεταγωγείς μπορούν να συνδεθούν απευθείας με καλώδια οπτικών ινών, ενώ τα ηλεκτρονικά απαιτούν σύζευξη μέσω φωτοανιχνευτών και πηγής λέιζερ. Η πιο φυσική ενσωμάτωση των πλήρως οπτικών επεξεργαστών σήματος με τις οπτικές ίνες θα μείωνε την πολυπλοκότητα και την καθυστέρηση στη δρομολόγηση και άλλη επεξεργασία των σημάτων στα οπτικά δίκτυα επικοινωνίας.

Ίσως το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της οπτικής σε σχέση με την ηλεκτρονική λογική είναι η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Αυτό προέρχεται από την απουσία χωρητικότητας στις συνδέσεις μεταξύ μεμονωμένων λογικών πυλών. Στα ηλεκτρονικά, η γραμμή μεταφοράς πρέπει να φορτιστεί στην τάση του σήματος. Η χωρητικότητα μιας γραμμής μεταφοράς είναι ανάλογη με το μήκος της και υπερβαίνει τη χωρητικότητα των τρανζίστορ σε μια λογική πύλη όταν το μήκος της είναι ίσο με αυτό μιας μονής πύλης. Η φόρτιση των γραμμών μεταφοράς είναι μία από τις κύριες απώλειες ενέργειας στην ηλεκτρονική λογική. Αυτή η απώλεια

αποφεύγεται στην οπτική επικοινωνία όπου μόνο αρκετή ενέργεια για την εναλλαγή ενός οπτικού μεταγωγέα-τρανζίστορ στο άκρο λήψης πρέπει να μεταδοθεί σε μια γραμμή. Αυτό το γεγονός έχει παίξει σημαντικό ρόλο στην υιοθέτηση των οπτικών τεχνολογιών για επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων.

Εκτός από τα πιθανά πλεονεκτήματα της υψηλότερης ταχύτητας, της χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας και της υψηλής συμβατότητας με συστήματα οπτικών επικοινωνιών, τα οπτικά τρανζίστορ πρέπει να ικανοποιούν ένα σύνολο σημείων αναφοράς προτού μπορέσουν να ανταγωνιστούν τα ηλεκτρονικά. Κανένας μεμονωμένος σχεδιασμός δεν έχει ακόμη ικανοποιήσει όλα αυτά τα κριτήρια, ενώ ξεπερνά την ταχύτητα και την κατανάλωση ισχύος των ηλεκτρονικών τελευταίας τεχνολογίας. Ένα τέτοιο κριτήριο αποτελεί η ποιότητα του σήματος που εμφανίζεται στη θύρα εξόδου του μεταγωγέα. Ο θόρυβος και οι υποβαθμίσεις στην ποιότητα του σήματος λειτουργούν καταστρεπτικά, υποβαθμίζουν την ποιότητα και πιθανόν να χρειαστεί να αντισταθμιστούν ή και να αφαιρεθούν, έτσι ώστε να μην διαδίδονται στο σύστημα και να συσσωρεύονται για να προκαλέσουν σφάλματα. Στην οπτική επικοινωνία, η ένταση του σήματος μειώνεται σε απόσταση λόγω της απορρόφησης του φωτός στο καλώδιο οπτικών ινών.

Οι ακόλουθες παράμετροι απόδοσης της τεχνολογίας οπτικής μεταγωγής εξετάζονται σε αυτή την εργασία. Οι ορισμοί των παραμέτρων απόδοσης επισημαίνονται.

Βασική Απόδοση

- **Απώλεια εισαγωγής:** Η απώλεια εισαγωγής της τεχνολογίας οπτικής μεταγωγής ορίζεται ως η απώλεια οπτικής ισχύος όταν τα οπτικά σήματα διέρχονται από τον οπτικό μεταγωγέα-διακόπτη, που αποτελείται κυρίως από την απώλεια σύζευξης και την απώλεια διάδοσης κυματοδηγού. Όταν σχεδιάζεται ένα δίκτυο σύμφωνα με τον προϋπολογισμό της οπτικής ισχύος, οι οπτικοί διακόπτες 2x2 και η χρήση πολλαπλών μεταγωγών για την επίτευξη πολλαπλών θυρών εισόδου-εξόδου επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου. Επιπλέον, η απώλεια εισαγωγής περιορίζει την

επεκτασιμότητα των οπτικών διακοπών και αυξάνει το κόστος του συστήματος.

- **Ταχύτητα μεταγωγής:** Η ταχύτητα μεταγωγής ορίζεται ως η χρονική περίοδος από τη στιγμή που δίνεται η εντολή στον διακόπτη για αλλαγή κατάστασης έως τη στιγμή που η απώλεια εισαγωγής της διαδρομής μεταγωγής επιτυγχάνει περισσότερο από το 90 τοις εκατό της τελικής του τιμής. Σύμφωνα με τις εφαρμογές μεταγωγής, ο χρόνος μεταγωγής χωρίζεται σε τρία επίπεδα: σειρά πολλαπλών χιλιοστών του δευτερολέπτου για εφαρμογή προστασίας, σειρά νανοδευτερολέπτου για εφαρμογή μεταγωγής πακέτων και σειρά picosecond για εφαρμογή πολυπλεξίας οπτικής διαίρεσης χρόνου σε επίπεδο bit (OTDM).
- **Crosstalk:** Το Crosstalk είναι ο λόγος της ισχύος που διαρρέει προς τη λάθος έξοδο και τη σωστή έξοδο ισχύος, που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της παρεμβολής σήματος μεταξύ των καναλιών. Η χαμηλή αλληλεπίδραση και ο υψηλός λόγος κατάσβεσης υποδηλώνουν μικρές παρεμβολές σήματος ή υψηλή ποιότητα σήματος. Συνήθως, η τιμή του crosstalk είναι περίπου 40 ή 50 dB.
- **Απώλεια που εξαρτάται από την πόλωση:** Η ευαισθησία πόλωσης χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της εξάρτησης της πόλωσης. Όταν είναι πολύ υψηλό, βλάπτει την αξιοπιστία της μετάδοσης και αυξάνει τις απαιτήσεις παρακολούθησης και δυναμικής αντιστάθμισης.
- **Εξάρτηση από το μήκος κύματος:** Περιγράφει τη δυνατότητα του μεταγωγέα να λειτουργεί ομοiotρόπως για όλα τα μήκη κύματος μιας μπάντας ή να εμφανίζει εξάρτηση από το μήκος κύματος του σήματος.
- **Ρυθμός bit και διαφάνεια πρωτοκόλλου:** Η δυνατότητα δίνει μεγαλύτερη ευελιξία στη διαμόρφωση των δικτύων. Οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να

αλλάξουν ολόκληρη τη χωρητικότητα της ίνας παραθύρου λειτουργίας χρήσης, ή μέρος αυτής, για πιο αποτελεσματική διαχείριση εύρους ζώνης και κυκλοφορίας και να διαθέτουν 1300–1600 nm.

Απαιτήσεις Δικτύου και Συστήματος Μεταγωγού

Multicast: Το Multicast μπορεί να προσφέρει ισχυρή δυνατότητα σύνδεσης και να εξοικονομήσει πολλούς πόρους. Έχει γίνει μια σημαντική παράμετρος για τη μέτρηση των οπτικών διακοπών.

Διάσταση συσκευής μεταγωγής: Η διάσταση του υφάσματος μεταγωγής/το μέγεθος της μήτρας μεταγωγής αντικατοπτρίζει την ικανότητα μεταγωγής ενός οπτικού διακόπτη. Η ζήτηση για οπτικούς διακόπτες βασίζεται στη θέση των οπτικών διακοπών στο οπτικό δίκτυο. Οι οπτικοί διακόπτες μικρής κλίμακας είναι ιδανικοί για μια ποικιλία εφαρμογών ανά κανάλι, όπως προγραμματιζόμενοι οπτικοί πολυπλέκτες προσθαφαίρεσης μήκους κύματος (OADM) και διακόπτες προστασίας μικρών καναλιών. Οι μεγάλοι μεταγωγείς μήτρας συνήθως αναπτύσσονται σε δίκτυα κορμού, τα οποία αποτελούνται από μεγάλο αριθμό οπτικών ινών μέσω των οποίων διαδίδονται μεγάλα μήκη κύματος.

Μέγεθος - Επεκτασιμότητα: Με το μέγεθος αναφέρεται συνήθως το πλήθος των θυρών εισόδου – εξόδου και ο χώρος πάνω στο chip που καταλαμβάνει ο μεταγωγέας, ενώ η εύκολη επεκτασιμότητα είναι απαραίτητη για τη δημιουργία μεγαλύτερων N×N διακοπών από μικρότερες παραγγελίες για εφαρμογές.

Μη αποκλεισμός: Μη αποκλεισμός σημαίνει την ευελιξία δρομολόγησης ή αναδρομολόγησης οποιουδήποτε καναλιού εισόδου σε οποιοδήποτε μη κατειλημμένο κανάλι εξόδου, εάν χρειάζεται. Το πρόβλημα μπλοκαρίσματος σε μεγάλης κλίμακας ή διαδοχικούς διακόπτες είναι πιο προφανές από ότι σε μικρότερους οπτικούς διακόπτες. Γενικά, οι οπτικοί διακόπτες πρέπει να είναι αυστηρής λογικής μη μπλοκαρισμένοι, γεγονός που δεν διαταράσσει τις υπάρχουσες συνδέσεις.

Σταθερότητα/αξιοπιστία: Δεδομένου του αριθμού των terabit ανά δευτερόλεπτο που μπορεί να αλλάξει η συσκευή, η αξιοπιστία είναι εξαιρετικά σημαντική για εφαρμογές οπτικής μεταγωγής. Για να πληρούν αυστηρά πρότυπα επικοινωνιών, οι διακόπτες πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις περιβάλλοντος για διακυμάνσεις θερμοκρασίας, κραδασμούς και υγρασία.

Επαναληψιμότητα: Η επαναληψιμότητα από θύρα σε θύρα αναφέρεται σε όλες τις διαδρομές κατά μήκος του υφάσματος μεταγωγής που έχουν ίδιο μήκος.

Κατανάλωση ενέργειας/τάση οδήγησης: Η υψηλή κατανάλωση ενέργειας αυξάνει το κόστος ενός συστήματος και η σχετική απαγωγή θερμότητας αυξάνει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος του συστήματος.

Όλες οι παραπάνω παράμετροι είναι αλληλεξαρτώμενες. Όταν οι οπτικοί διακόπτες καλωδίωσης cading, η απόδοση όλων των οπτικών διακοπών επηρεάζει την απόδοση του δικτύου. Ένα καλό σύστημα θα πρέπει να έχει τα πλεονεκτήματα της χαμηλής απώλειας εισαγωγής, της χαμηλής αλληλεπίδρασης, της χαμηλής ισχύος μεταγωγής, της πόλωσης και της ανεξαρτησίας του μήκους κύματος και της αναισθησίας έναντι της μεροληψίας μεταγωγής και της θερμοκρασίας λειτουργίας.

Οι οπτικοί διακόπτες που βασίζονται σε κάτοπτρα/ηλεκτροστατικούς ενεργοποιητές που κλείνουν διάκενο έχουν πολύ χαμηλές απώλειες εισαγωγής και παρεμβολή, αλλά οι ταχύτητες μεταγωγής τους είναι μέτριες, της τάξης του 1 ms. Ένας οπτικός διακόπτης ελεύθερου χώρου $1 \times N$ με δέσμη ινών, μακρο-φακό και παραμορφώσιμο/προσαρμόσιμο κάτοπτρο που βασίζεται σε μια οπτική μεμβράνη MEMS έχει υψηλότερη ταχύτητα μεταγωγής, υποχλιοστά του δευτερολέπτου, αλλά υψηλότερη απώλεια εισαγωγής και παρεμβολή, η οποία πιστεύεται ότι είναι ανεξάρτητες από τον αριθμό των λιμένων. Η ταχύτητα μεταγωγής των διακοπών ελεύθερου χώρου είναι μεσαία, της τάξης του 1 ms, η οποία είναι κατάλληλη για προστασία και αποκατάσταση στο οπτικό στρώμα χωρίς συχνή αλλαγή των καταστάσεων σύνδεσης. Οι επίπεδοι διακόπτες κυματοδηγών που βασίζονται στην τεχνολογία πυριτίου σε μονωτή (SOI) επισημαίνονται, και έχει τα πλεονεκτήματα της πολύ υψηλής ταχύτητας της τάξης του 1 ns. Όλοι αυτοί οι διακόπτες έχουν πολύ καλή διαφάνεια σε παράθυρο λειτουργίας 1,55 μm .

Οι οπτικοί διακόπτες MEMS που βασίζονται σε ανακλινόμενους μικροκαθρέφτες δεν μπορούν να πραγματοποιήσουν τη λειτουργία drop-and-continue, η οποία είναι πολύ σημαντική για την εφαρμογή πολλαπλής εκπομπής στο οπτικό επίπεδο, και δεν μπορούν να πραγματοποιήσουν την αντιστοίχιση οπτικής ισχύος, η οποία είναι κρίσιμη για τις λειτουργίες διαχείρισης και ελέγχου. Για να πραγματοποιήσουν αυτές τις λειτουργίες πρέπει να συνεργαστούν με άλλες οπτικές συσκευές για να διαμορφώσουν την κατάλληλη αρχιτεκτονική οπτικής μεταγωγής. Οι οπτικοί διακόπτες που βασίζονται σε κινούμενους καθρέφτες έχουν καλή επεκτασιμότητα και μπορούν εύκολα να πραγματοποιήσουν μεγάλες διαστάσεις διακόπτη. Οι πίνακες μεταγωγέα ελεύθερου χώρου είναι πολύ κατάλληλοι για μεγάλης κλίμακας μη αποκλειστικές οπτικές διασυνδέσεις και εφαρμόζονται σε δίκτυα κορμού και μεγάλες υπηρεσίες μεταγωγής. Γενικά, οι οπτικοί διακόπτες MEMS χρειάζονται υψηλή τάση οδήγησης και έχουν υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Έχουν περιορισμένη σταθερότητα λόγω της κινούμενης επιρροής. Η επαναληψιμότητα από θύρα σε θύρα εξακολουθεί να αποτελεί πρόβλημα σε μεγάλους διακόπτες που βασίζονται σε καθρέφτες, επειδή το φως μπορεί να χρειαστεί να διανύσει διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των θυρών. Ωστόσο, οι οπτικοί διακόπτες που βασίζονται σε MEMS έχουν πλεονεκτήματα μηχανικής σταθερότητας και χαμηλού κόστους.

5. Υλοποίηση προσομοίωσης στο περιβάλλον Matlab και ανάλυση αποτελεσμάτων

Στον παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία της προσομοίωσης, καθώς και τα αποτελέσματα της διαδικασίας οπτικής μεταγωγής για διαφορετικά μήκη κύματος. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται δύο τμήματα προσομοίωσης:

1. **Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα Μετάδοσης Εικόνας κατά NRZ-OOK:**
Μετατροπή εικόνας σε παλμοσειρά δεδομένων και μετάδοση κατά NRZ – OOK ,με στόχο τη μελέτη της υποβάθμισης του σήματος
2. **Σύστημα Ηλεκτρο-οπτικής Μεταγωγής Si_3N_4 -MZI :** Μελέτη της συνάρτησης μεταφοράς ενός ηλεκτρο-οπτικού μεταγωγέα με βάση την αρχιτεκτονική MZI και το δείκτη διάθλασης τεχνολογίας πυριτίου Si_3N_4 .

Τα δύο συστήματα παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω:

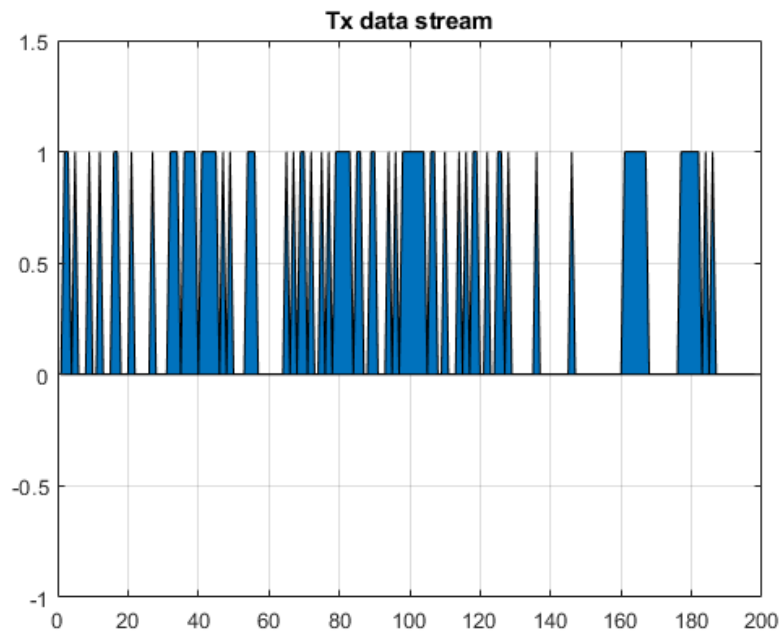
Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα Μετάδοσης Εικόνας NRZ-OOK

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε την υλοποίηση και μελέτη του τηλεπικοινωνιακού συστήματος μετάδοσης. Προσομοιώνουμε την εικόνα ως συνάρτηση του SNR σε ένα κανάλι AWGN. Υποθέτουμε συνεκτικό δέκτη και τέλειο συγχρονισμό. Ο κώδικας που έχει αναπτυχθεί περιλαμβάνεται στο παράρτημα.



Εικόνα 17 Αρχική μεταδιδόμενη εικόνα με «καθαρή» αναπαράσταση των
συμβόλων χωρίς θόρυβο

Αρχικά, διαβάζουμε την παραπάνω ασπρόμαυρη (grayscale) εικόνα. Στην επόμενη εικόνα παρατίθεται το διάγραμμα της ροής δεδομένων κατά τη μετάδοση.



Κανάλι

Προσθέτουμε λευκό Gaussian θόρυβο στην εικόνα.

Ο προσθετικός λευκός Gaussian θόρυβος είναι τυχαίος θόρυβος που χαρακτηρίζεται από ένα εύρος συχνοτήτων σε σχέση με ένα σήμα στο κανάλι επικοινωνίας.

Αρχικά, θα εξηγήσουμε τη διαδικασία και τα αποτελέσματα για λόγο σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio) $SNR = 1$, όπου είναι το μέτρο που χρησιμοποιείται για την σύγκριση του επιπέδου ενός επιθυμητού σήματος με το επίπεδο του θορύβου περιβάλλοντος, και στη συνέχεια η διαδικασία θα επαναληφθεί και για περισσότερες τιμές $SNR = 1, 5, 20$ και 30 dB.

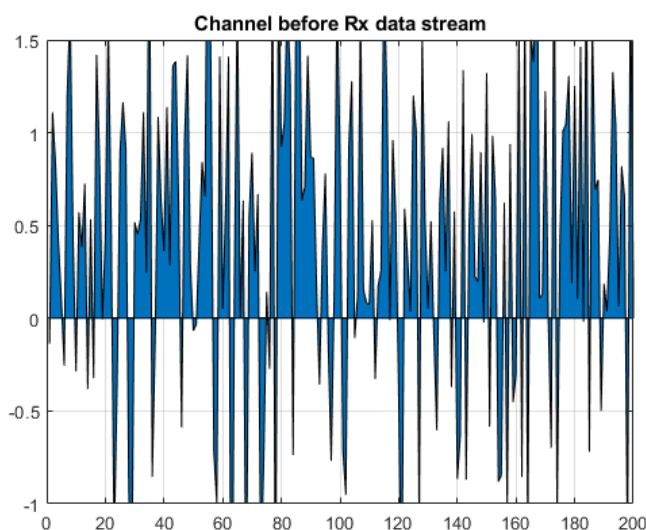
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η λαμβανόμενη εικόνα όπως διαμορφώθηκε μετά την πρόσθεση του θορύβου για τα πρώτα 200 δείγματα.

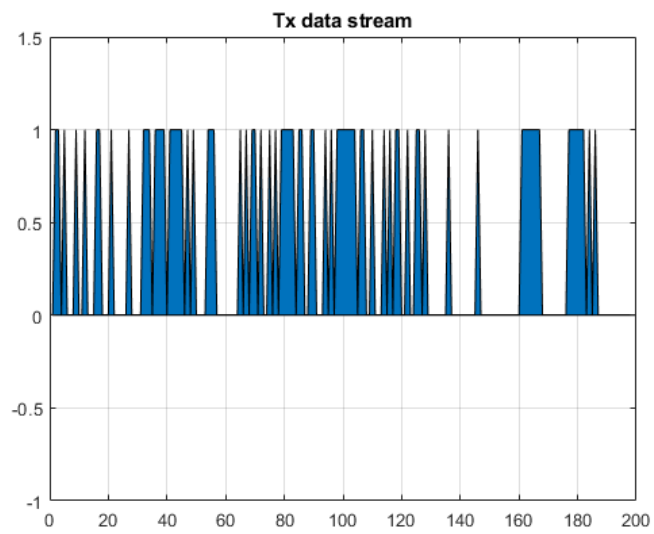
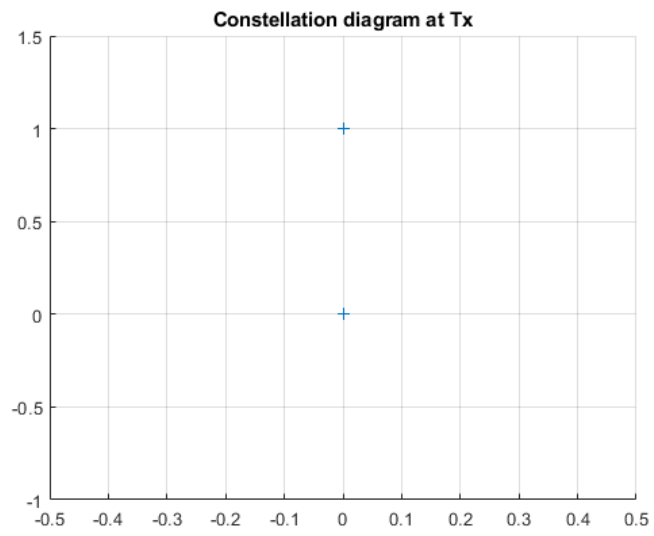
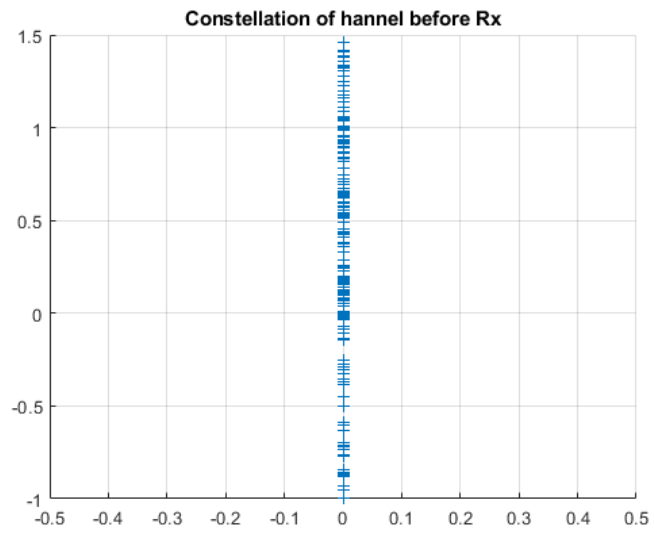


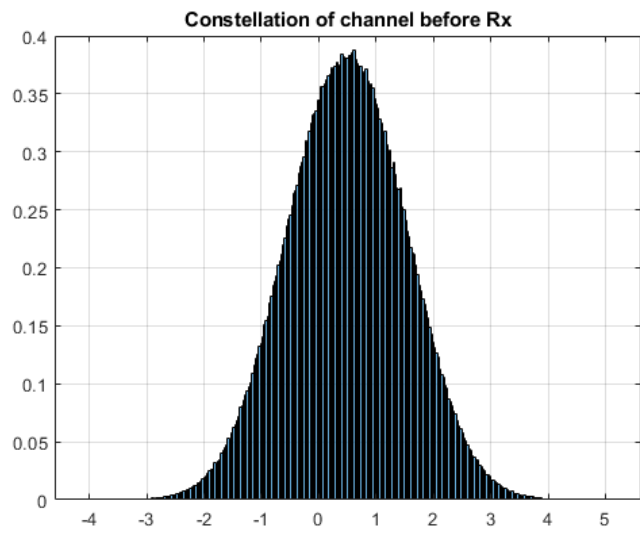
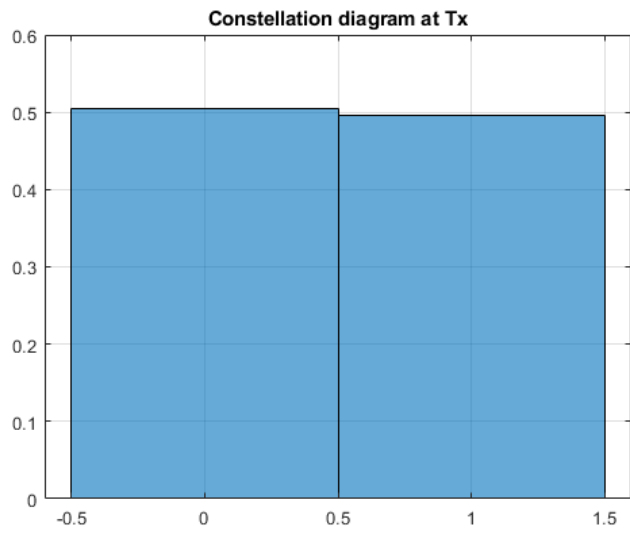
Από την παραπάνω εικόνα, παρατηρούμε την επίδραση του θορύβου στο σήμα της εικόνας και στο πώς αυτό αλλοιώνεται. Η επίδραση του θορύβου εμφανίζεται σαν ασπρόμαυρες κουκίδες τυχαίας φωτεινότητας/χρωματισμού, μη επιθυμητές, και χωρίς να ακολουθούν την πληροφορία της εικόνας. Κάποια pixel παίρνουν αυθαίρετες τιμές.

Ένα διάγραμμα αστερισμού είναι μια αναπαράσταση ενός σήματος που διαμορφώνεται από ένα σχήμα ψηφιακής διαμόρφωσης όπως η διαμόρφωση πλάτους τετραγωνισμού ή η ψηφιακή μετατόπιση φάσης.

Τα παρακάτω διαγράμματα αστερισμού δείχνουν όλα τα πιθανά σύμβολα που μπορούν να μεταδοθούν από το σύστημα ως συλλογή σημείων.







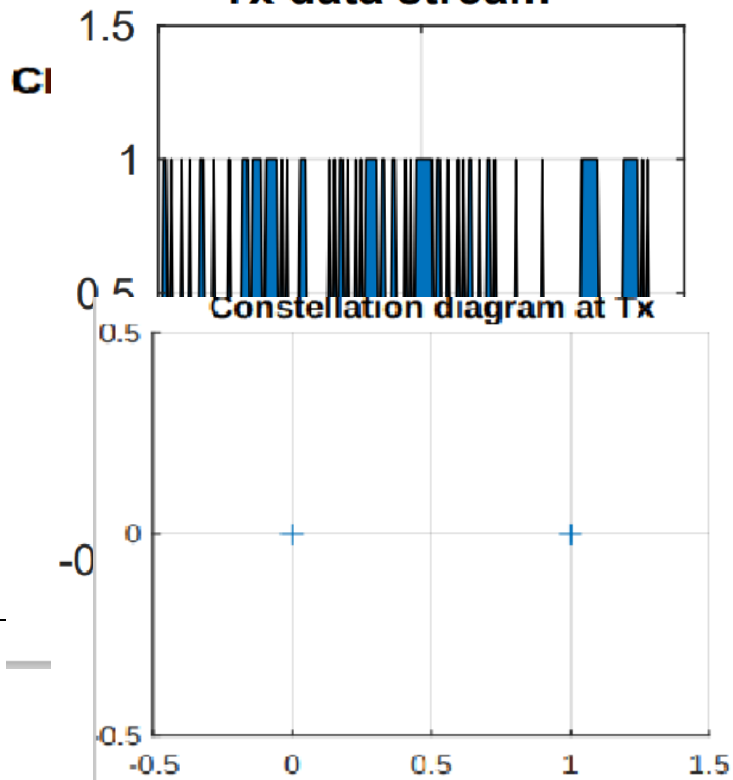
SNR = 5

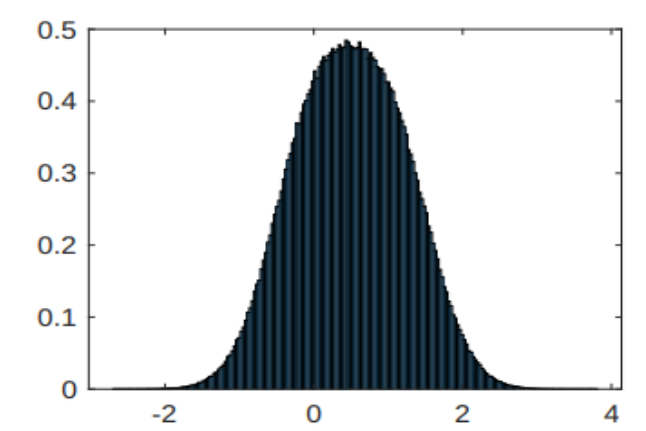
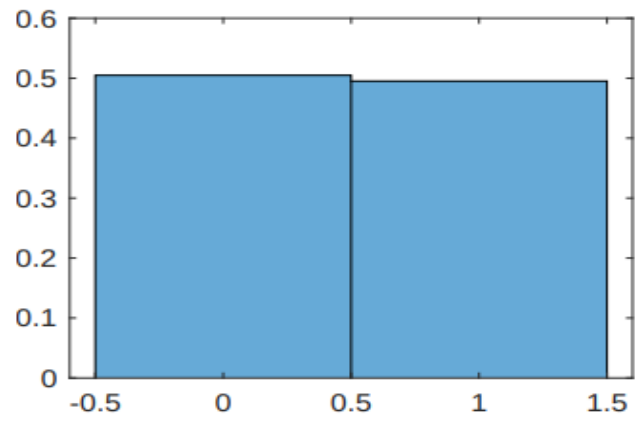
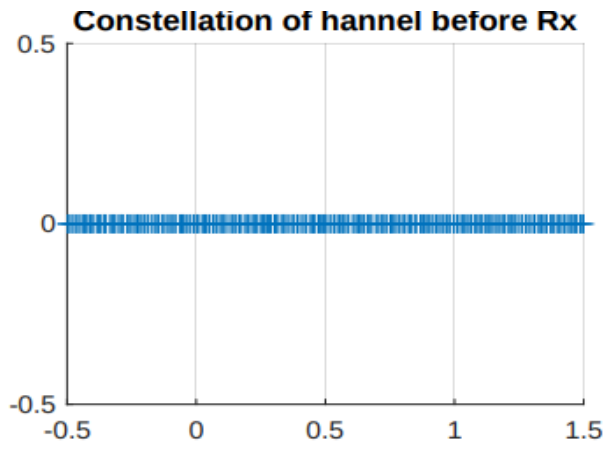


Impact of noise



Tx data stream

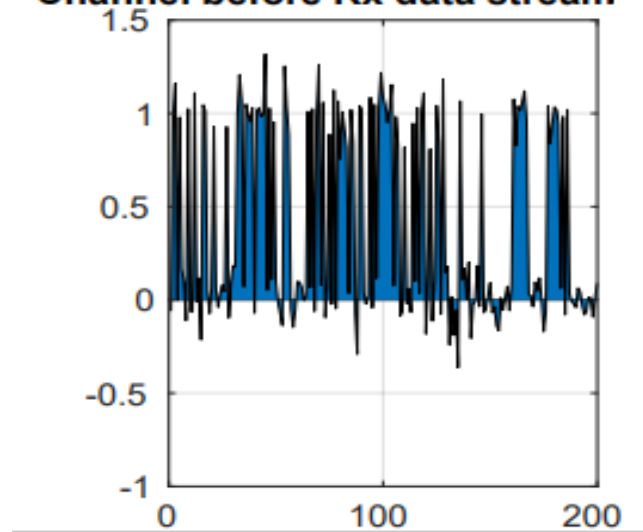


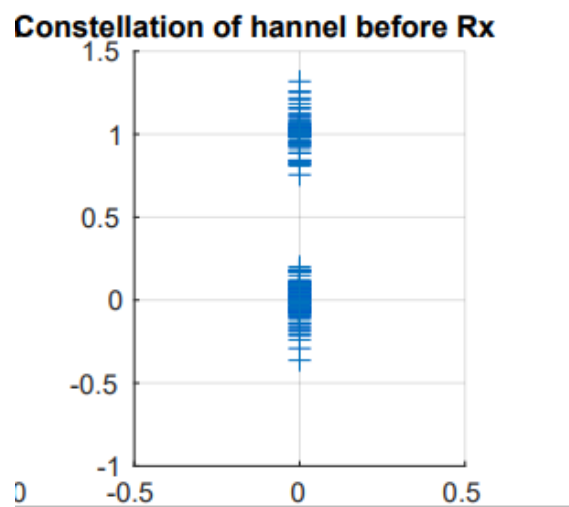
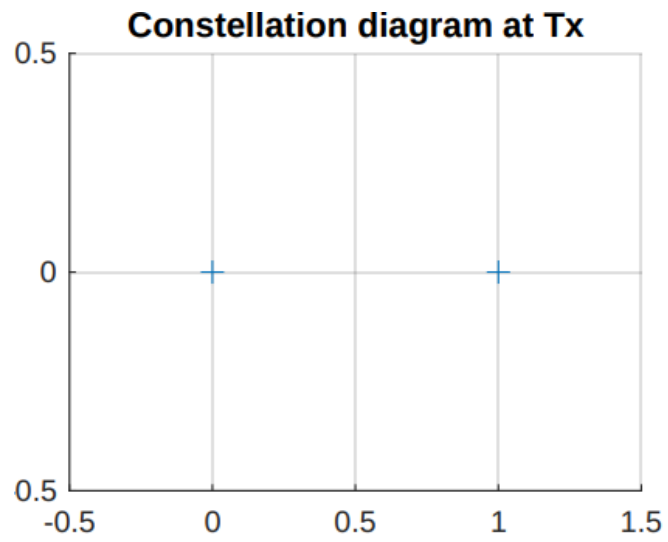
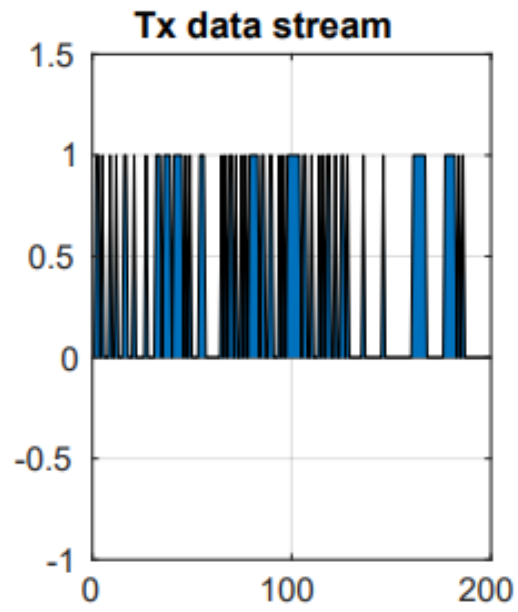


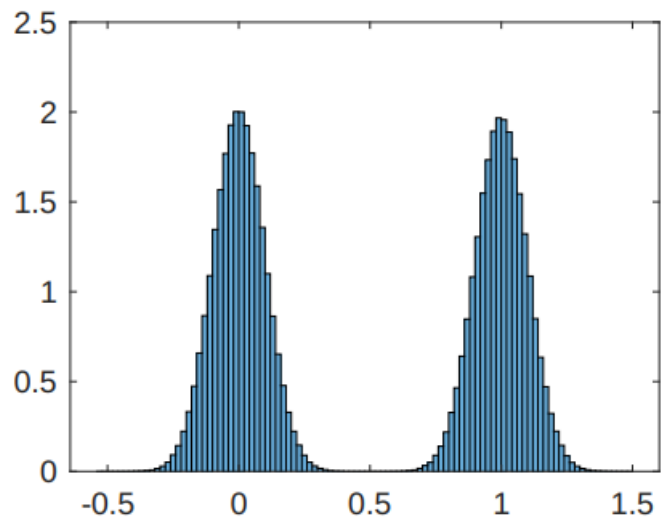
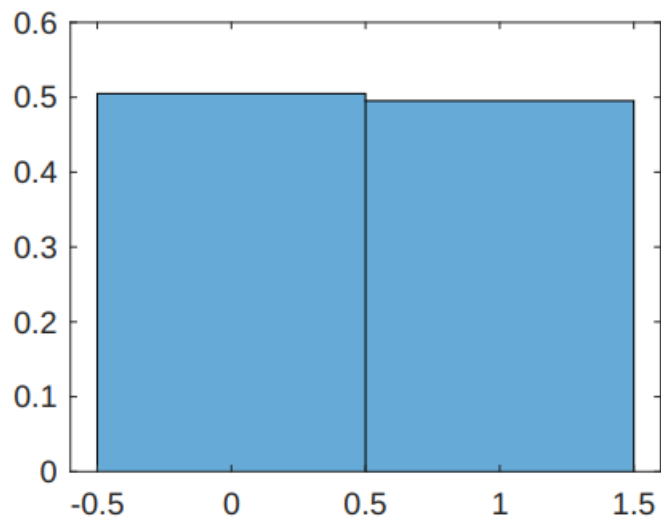
SNR = 20



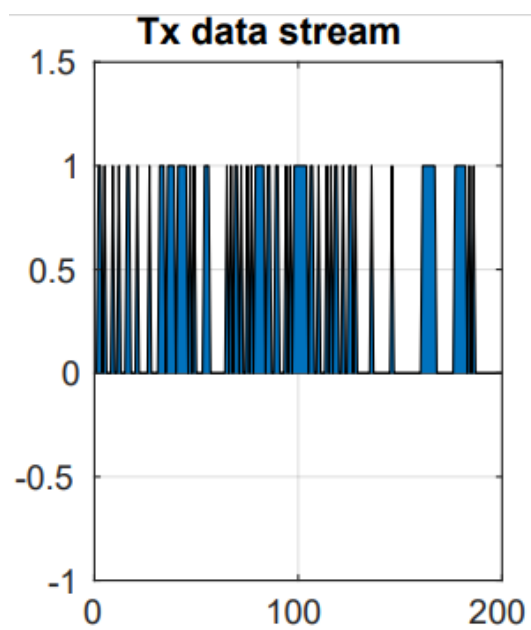
Channel before Rx data stream



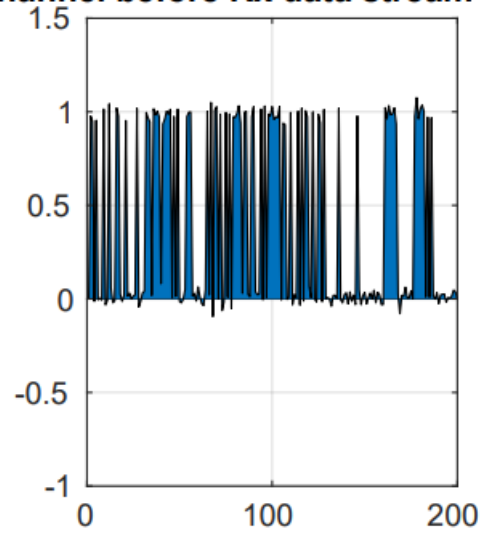




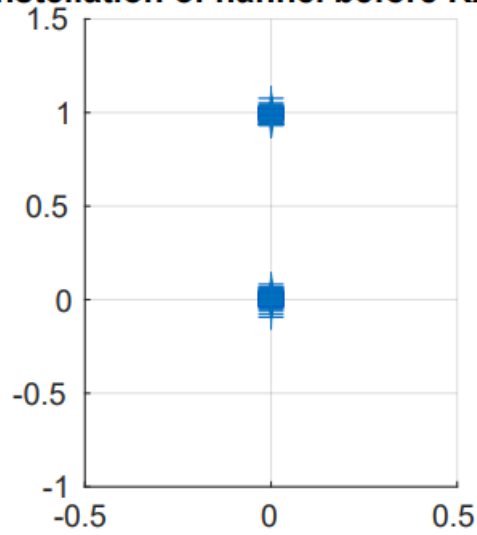
SNR = 30



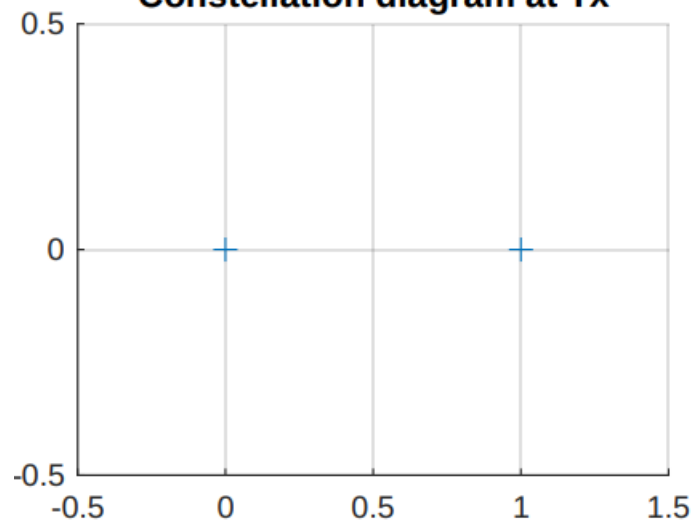
Channel before Rx data stream

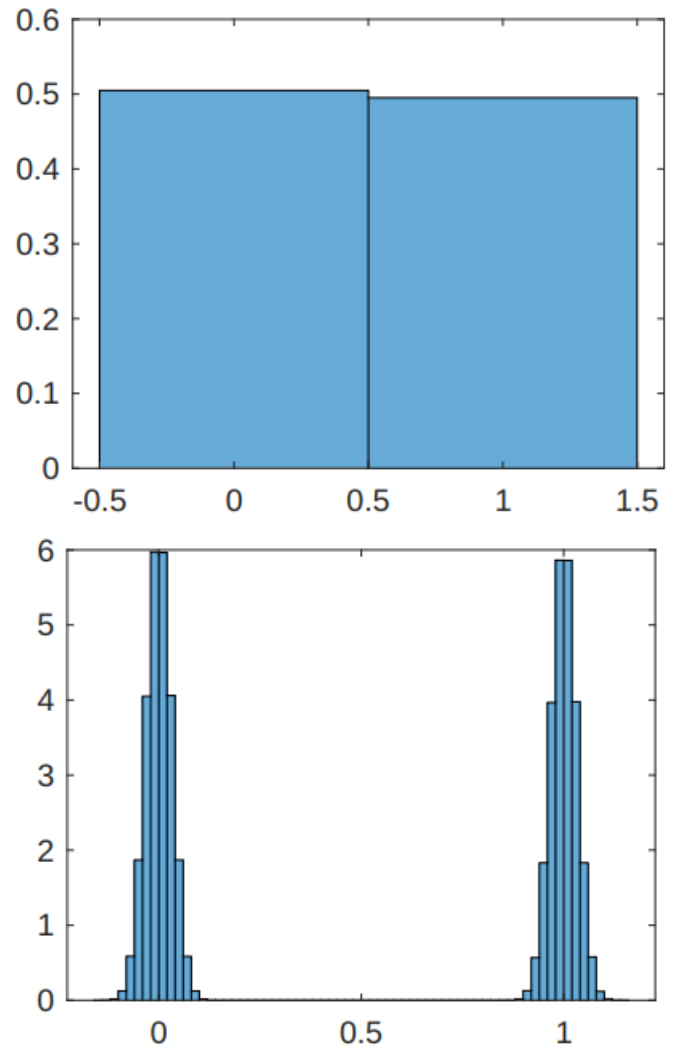


Constellation of hannel before Rx







Constellation diagram at Tx





Έπειτα από τα παραπάνω, για να γίνει κατανοητή και εμφανής η επίδραση του σηματοθορυβικού λόγου, απεικονίζουμε συνοπτικά έναν πίνακα με το τελικό

λαμβανόμενο σήμα της εικόνας στο δέκτη, για αυξανόμενες τιμές του σηματοθορυβικού λόγου:

| Τιμή του SNR [dB] | Τελική απεικόνιση στο δέκτη |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 |  A very noisy and grainy grayscale image of a hand pointing at a 5G logo. The signal is almost completely obscured by noise. |
| 5 |  A noisy grayscale image of a hand pointing at a 5G logo. The noise is slightly less than in the 1 dB case, but the logo remains difficult to discern. |
| 20 |  A clear grayscale image of a hand pointing at a 5G logo. The signal is well-defined and the noise is significantly reduced. |
| 30 |  A very clear grayscale image of a hand pointing at a 5G logo. The signal is sharp and the noise is minimal, making the logo and hand easily recognizable. |

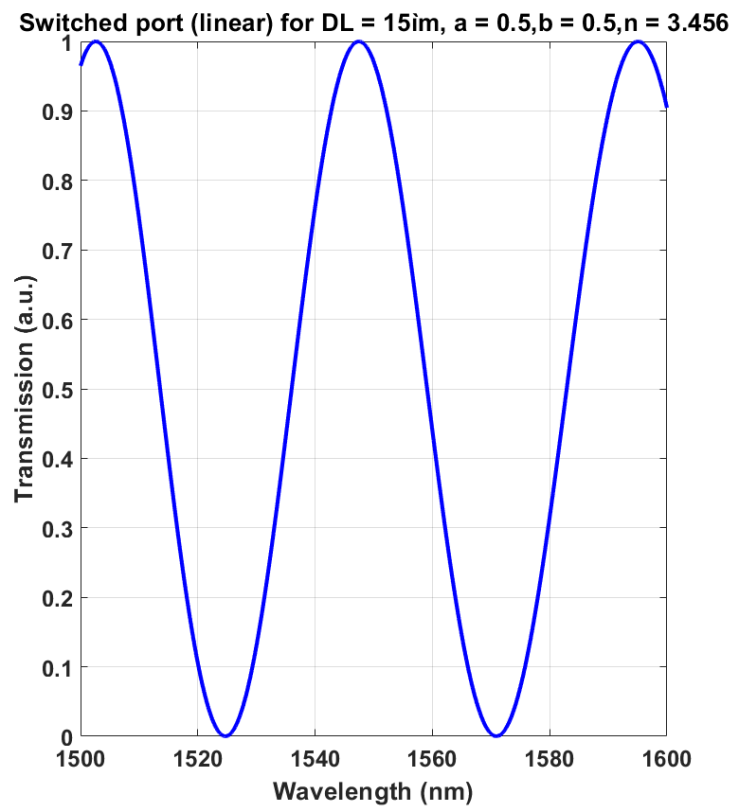
Με βάση τα παραπάνω παρατηρείται ότι:

1. Για $SNR > 20$ dB, παρατηρείται μικρή υποβάθμιση της ποιότητας της εικόνας με μικρή επιβάρυνση από το θόρυβο και η τελική απεικόνιση στο δέκτη μπορεί να γίνει άμεσα αντιληπτή, σε αντίθεση με τα μικρότερα SNR, όπου η απεικόνιση έχει επιβαρυνθεί σημαντικά.
2. Το μεταδιδόμενο σήμα που φτάνει στο δέκτη (channel before Rx) για μικρές τιμές του SNR εμφανίζει έντονη διακύμανση του πλάτους του και τιμές που μπορεί να φτάσουν το -1 , για λογική τιμή του '0' ή την τιμή 1.5V , για λογική τιμή του 1.
3. Για μεγάλες τιμές του SNR, μεγαλύτερες του 20 dB, το διάγραμμα αστερισμού, όπως και το διάγραμμα της μεταδιδόμενης παλμοσειράς, εμφανίζει μεγάλη συγκέντρωση των τιμών του πλάτους των δειγμάτων γύρω από το λογικό '0' και το '1' και δεν παρατηρείται αλληλοεπικάλυψη των σταθμών/τιμών των δειγμάτων, με αποτέλεσμα την πολύ καλή απεικόνιση των συμβόλων και την πιστή αναπαράσταση της εικόνας στο δέκτη.

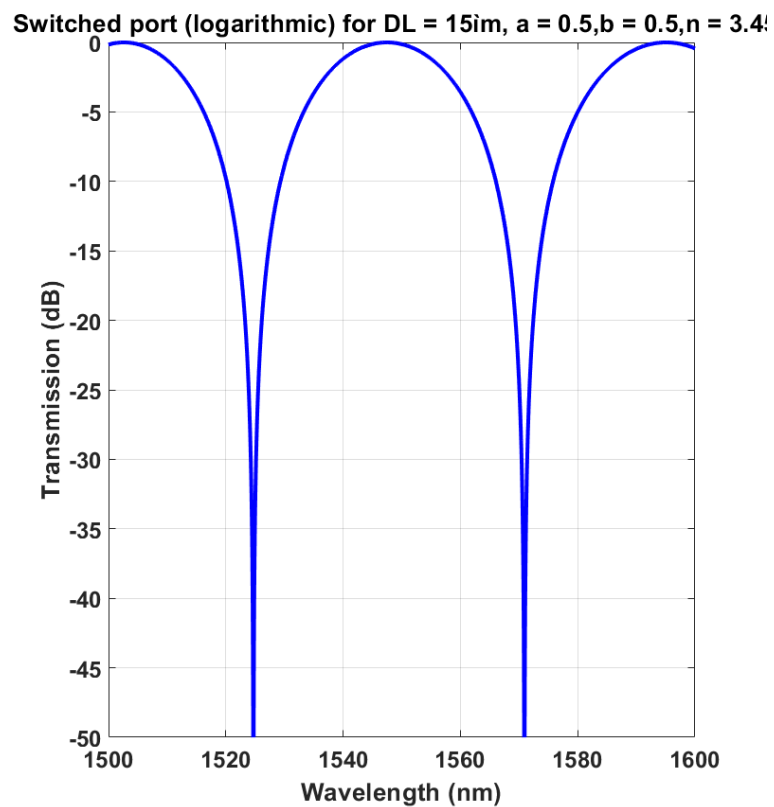
Σύστημα Οπτικής Μεταγωγής Si_3N_4 -MZI

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση μελετήθηκε η συνάρτηση μεταφοράς ενός ηλεκτρο-οπτικού μεταγωγέα που βασίζεται στην αρχιτεκτονική MZI. Συγκεκριμένα προσομοιώθηκε η συνάρτηση μεταφοράς, δηλαδή το πλάτος της έντασης του οπτικού σήματος για τις δύο θύρες εξόδου του μεταγωγέα MZI, όπως έχει αναλυθεί στις εξισώσεις (1) και (2) της παρούσας εργασίας και μελετάται για διαφορετικά (διαφορικά) μήκη των δύο κλάδων του MZI. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι αποστάσεις $DL = 15,100,200,300,400,500$.

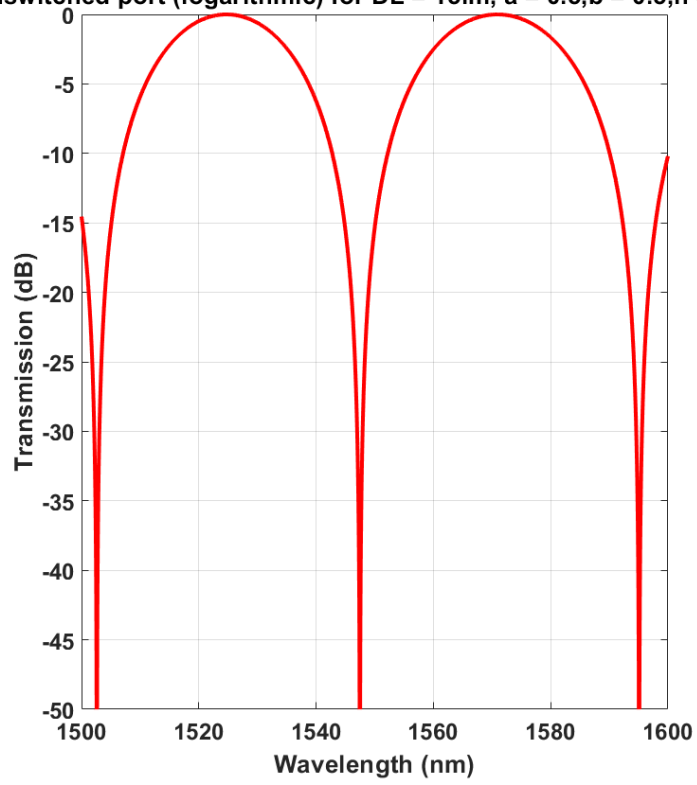
1) Αποτελέσματα προσομοίωσης της συνάρτησης μεταφοράς μη-συμμετρικού συμβολόμετρου Si_3N_4 MZI για διαφορά μήκους των κλάδων



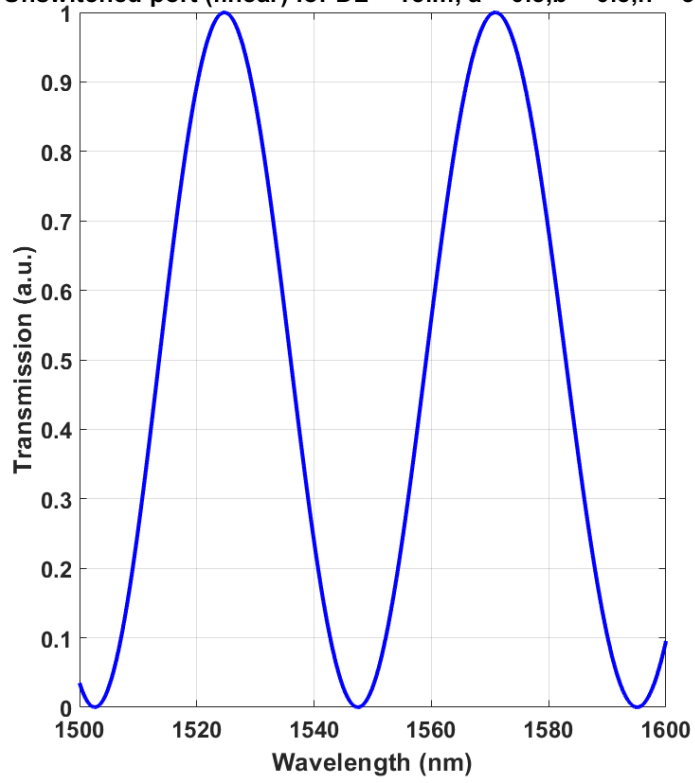
$DL = 15\mu\text{m}$



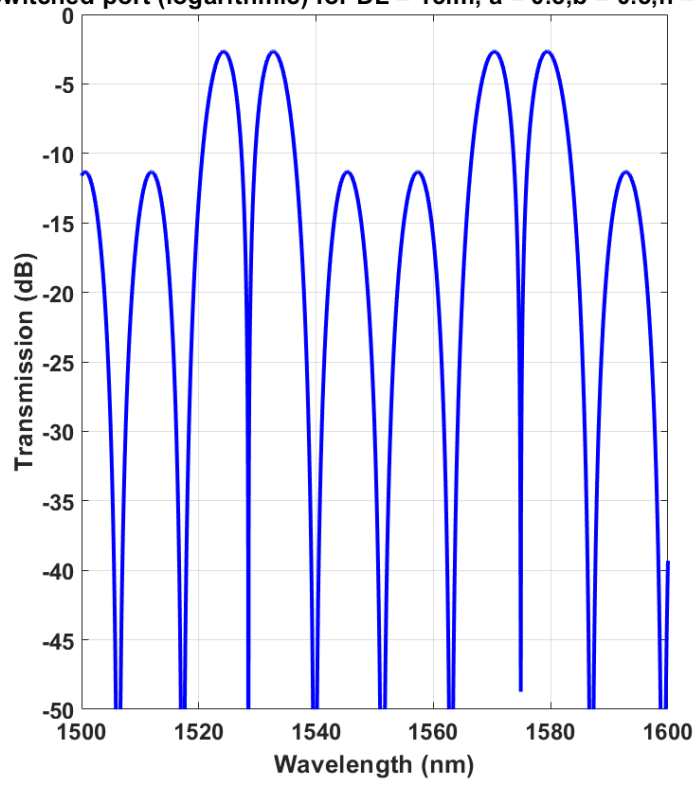
Inswitched port (logarithmic) for DL = 15im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.



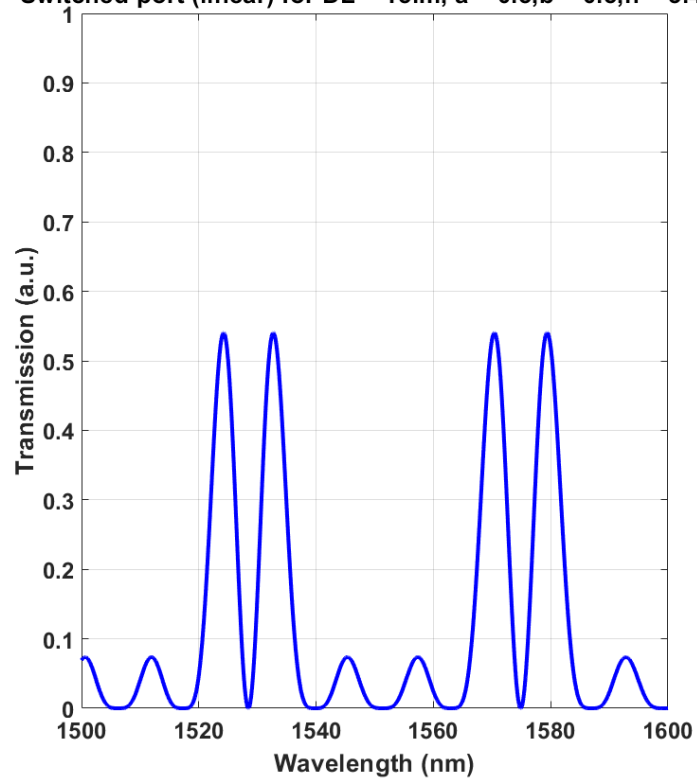
Unswitched port (linear) for DL = 15im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.45€



Switched port (logarithmic) for DL = 15im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.4

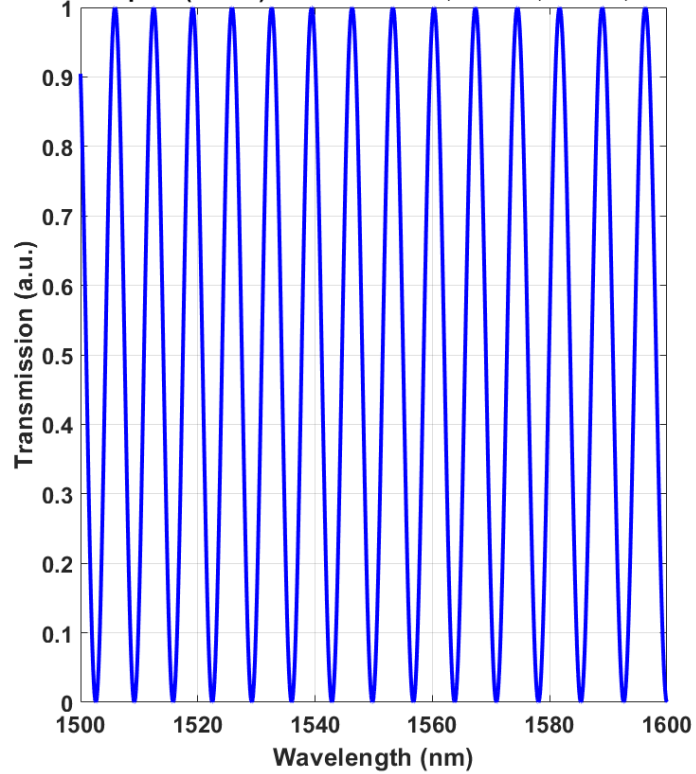


Switched port (linear) for DL = 15im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.456



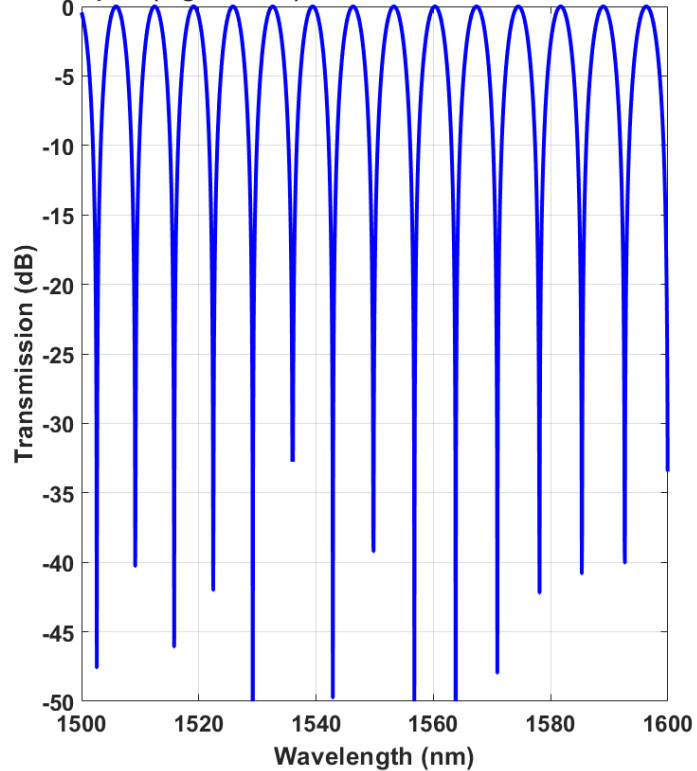
2) Αποτελέσματα προσομοίωσης της συνάρτησης μεταφοράς μη-συμμετρικού συμβολόμετρου Si_3N_4 MZI για διαφορά μήκους των κλάδων

Switched port (linear) for $DL = 100\text{im}$, $a = 0.5, b = 0.5, n = 3.456$

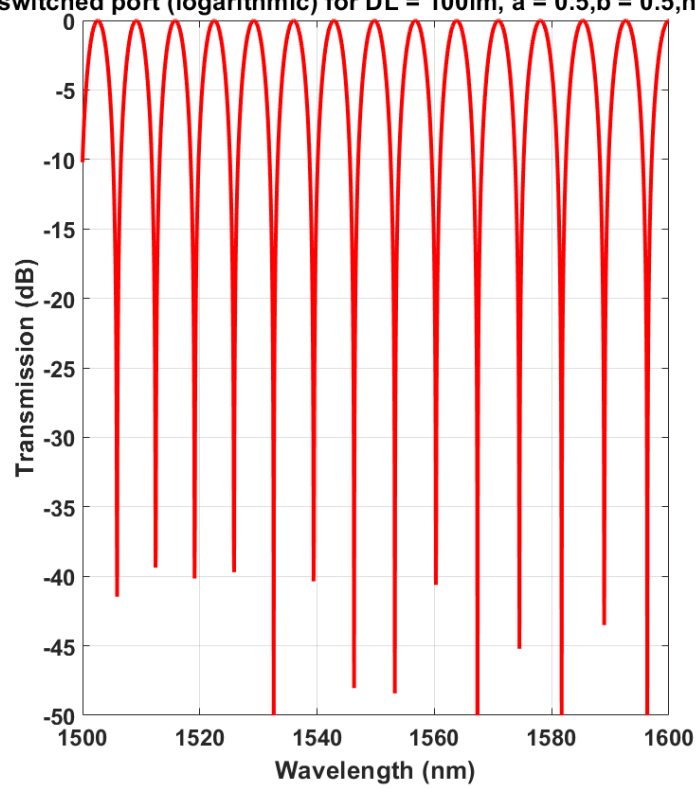


$DL = 100\mu\text{m}$

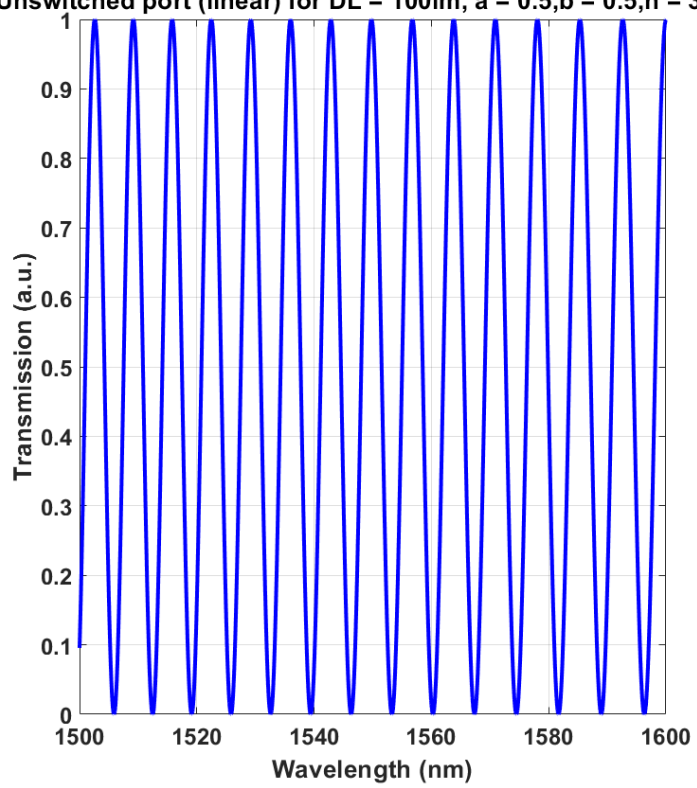
Switched port (logarithmic) for $DL = 100\text{im}$, $a = 0.5, b = 0.5, n = 3.4$



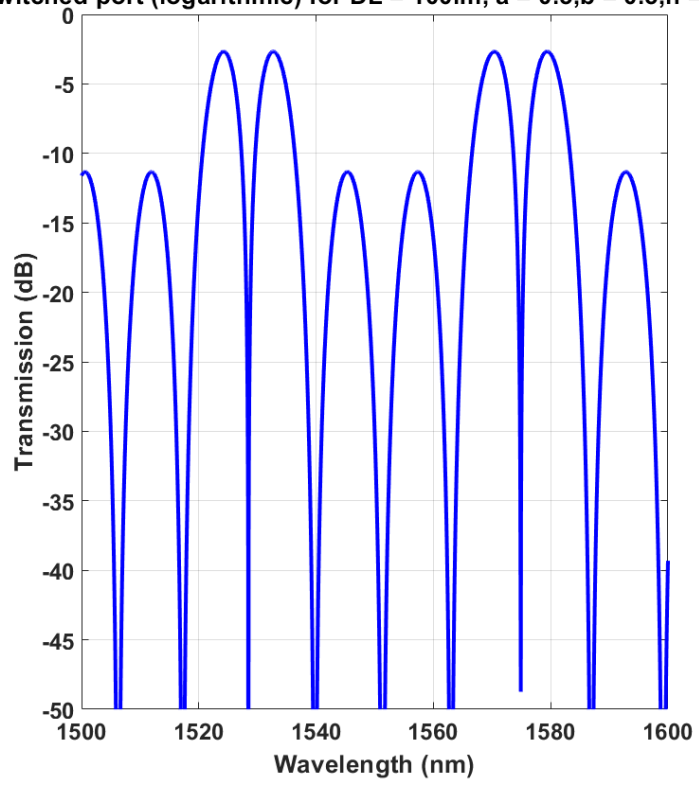
nswitched port (logarithmic) for DL = 100im, a = 0.5,b = 0.5,n = 3



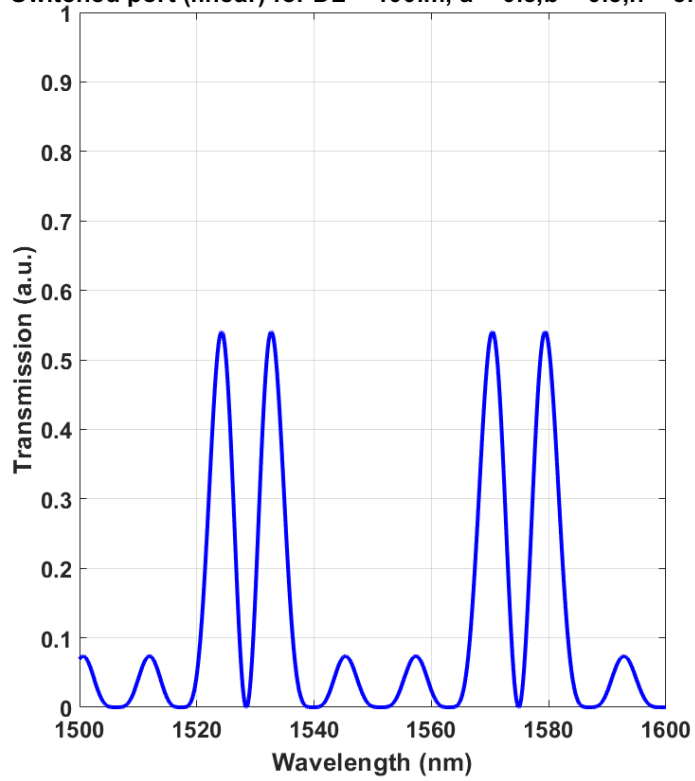
Unswitched port (linear) for DL = 100im, a = 0.5,b = 0.5,n = 3.45



Switched port (logarithmic) for DL = 100im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.4

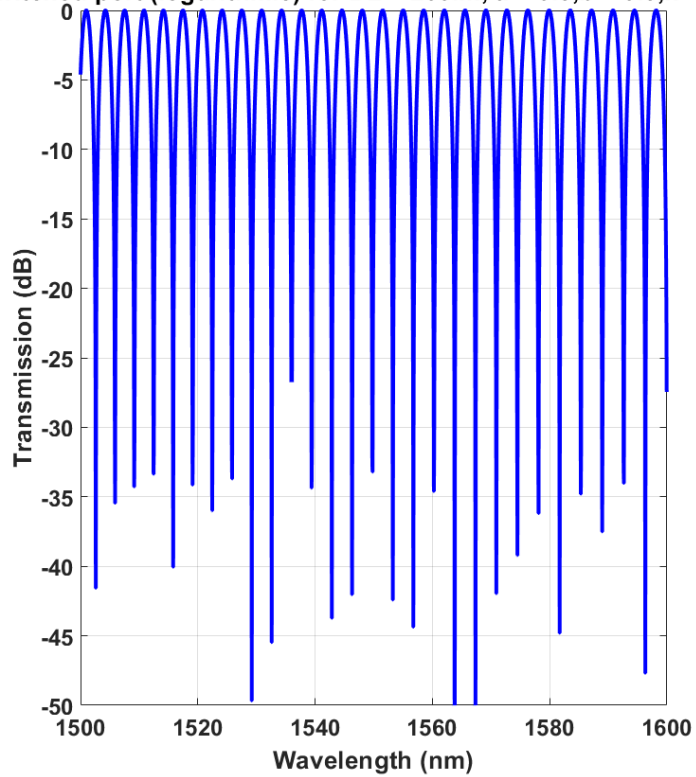


Switched port (linear) for DL = 100im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.456



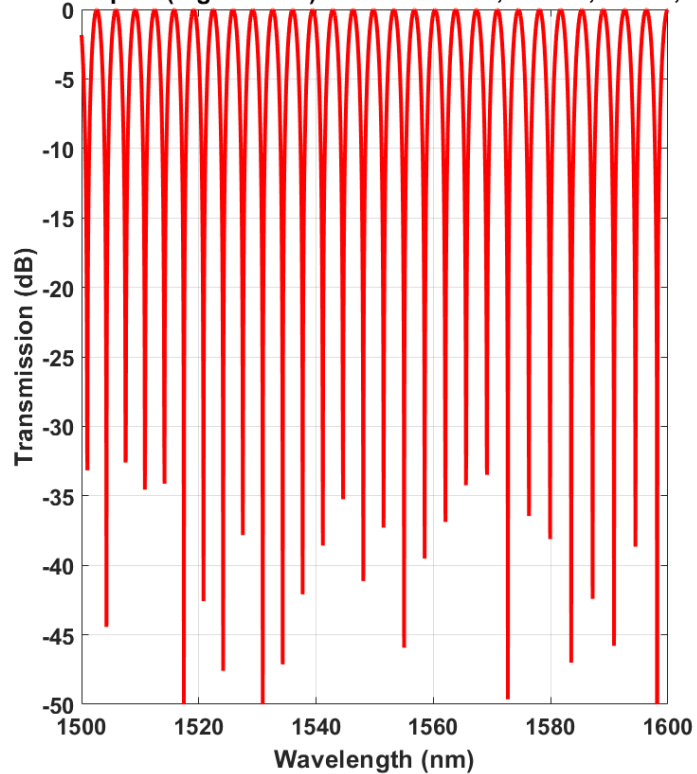
3) Αποτελέσματα προσομοίωσης της συνάρτησης μεταφοράς μη-συμμετρικού συμβολόμετρου Si_3N_4 MZI για διαφορά μήκους των κλάδων

Switched port (logarithmic) for DL = 200 μm , a = 0.5, b = 0.5, n = 3.4

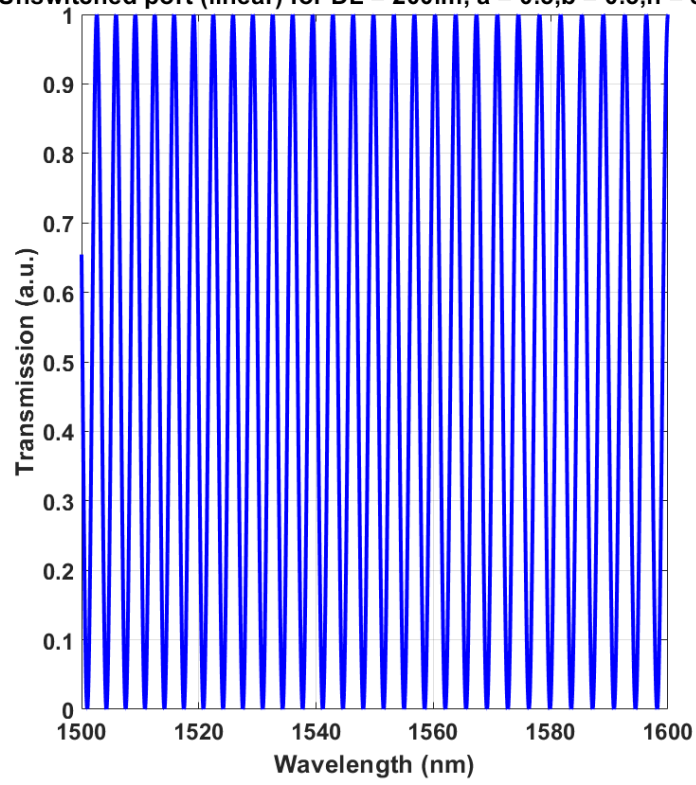


DL = 200 μm

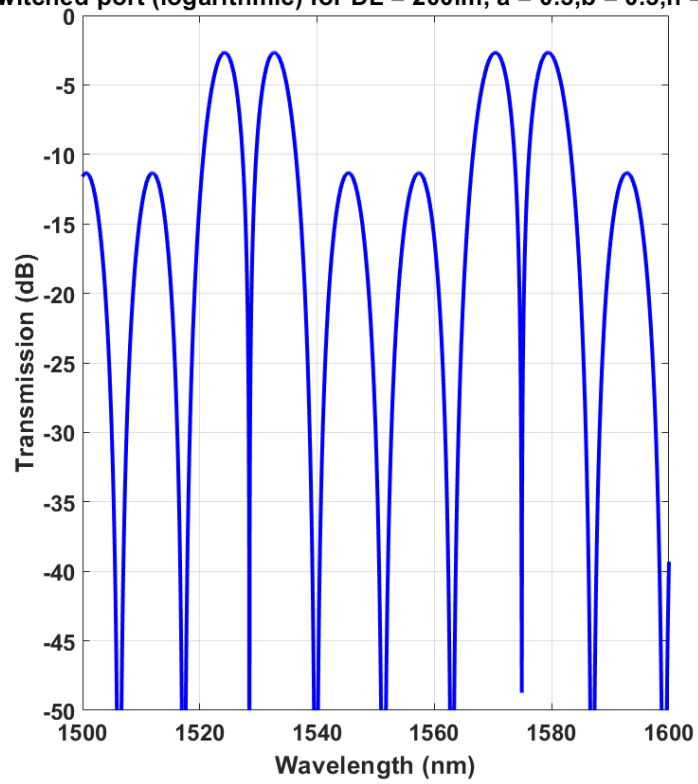
nswitched port (logarithmic) for DL = 200 μm , a = 0.5, b = 0.5, n = 3



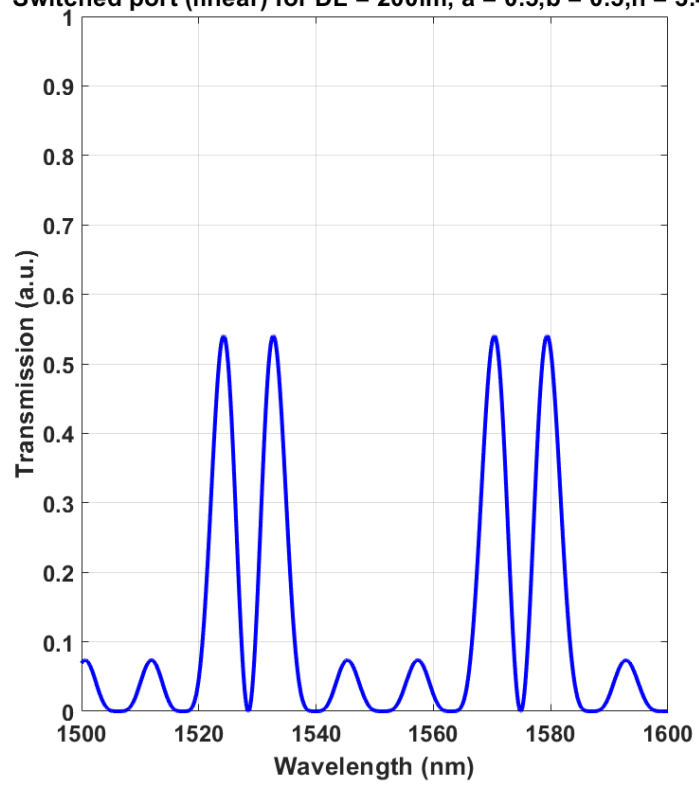
Unswitched port (linear) for DL = 200im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.45



Switched port (logarithmic) for DL = 200im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.4

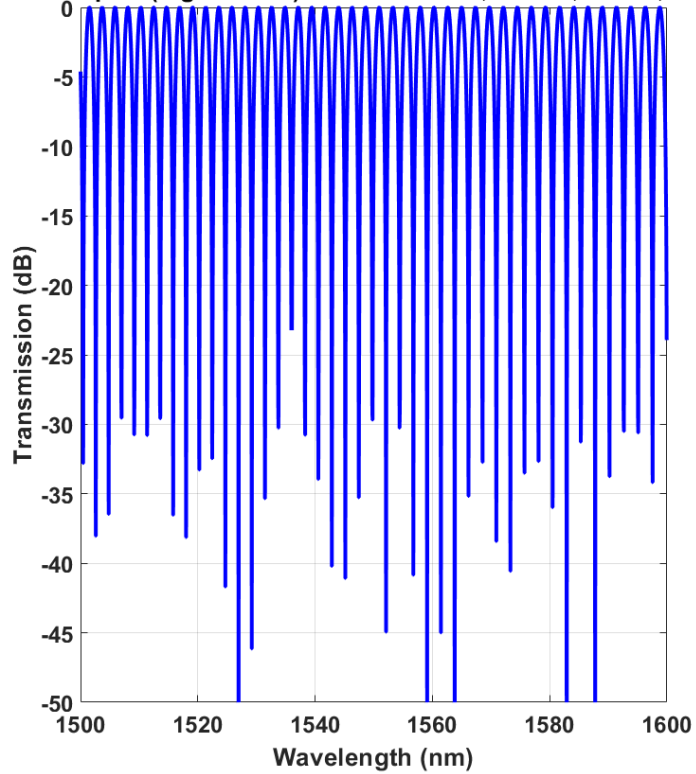


Switched port (linear) for DL = 200im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.456



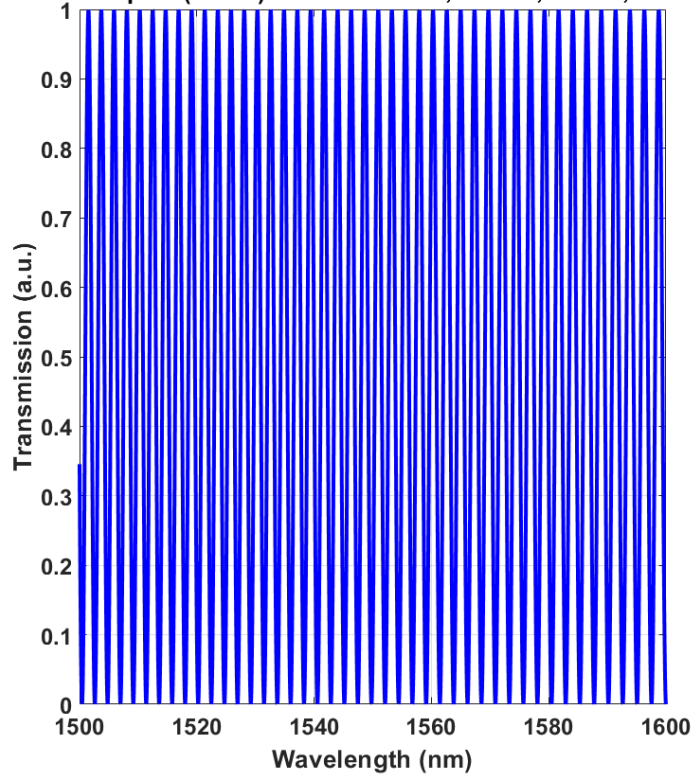
4) Αποτελέσματα προσομοίωσης της συνάρτησης μεταφοράς μη-συμμετρικού συμβολόμετρου Si_3N_4 MZI για διαφορά μήκους των κλάδων

Switched port (logarithmic) for DL = 300 μm , a = 0.5, b = 0.5, n = 3.4

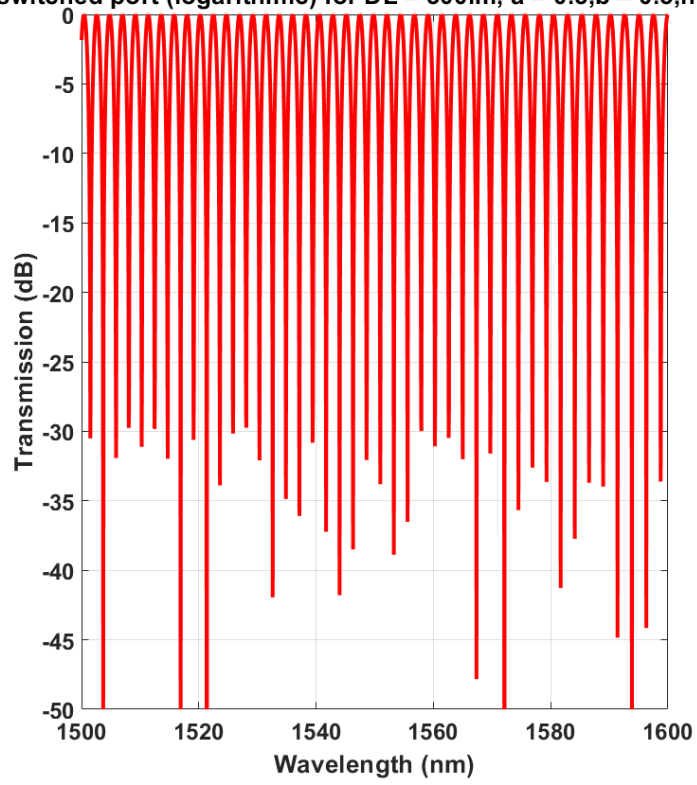


DL = 300 μm

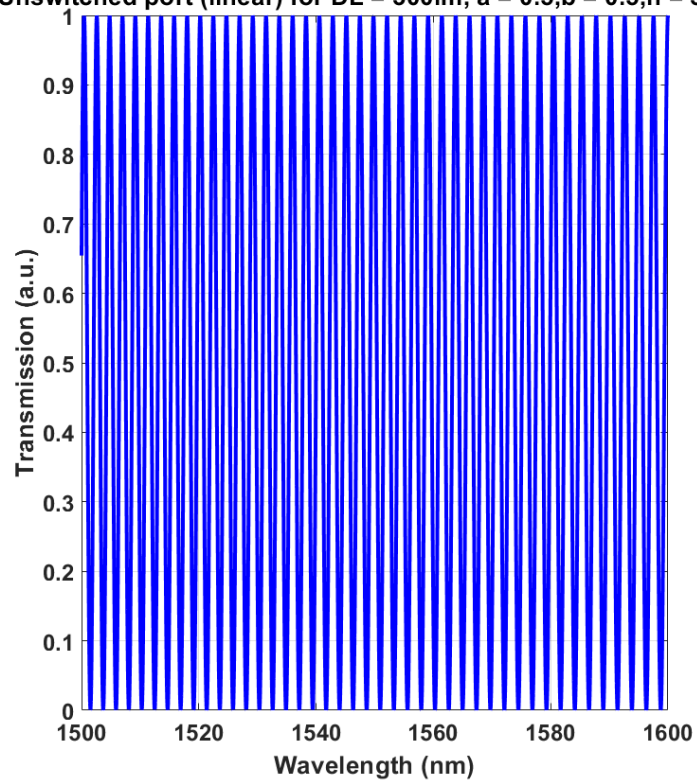
Switched port (linear) for DL = 300 μm , a = 0.5, b = 0.5, n = 3.456



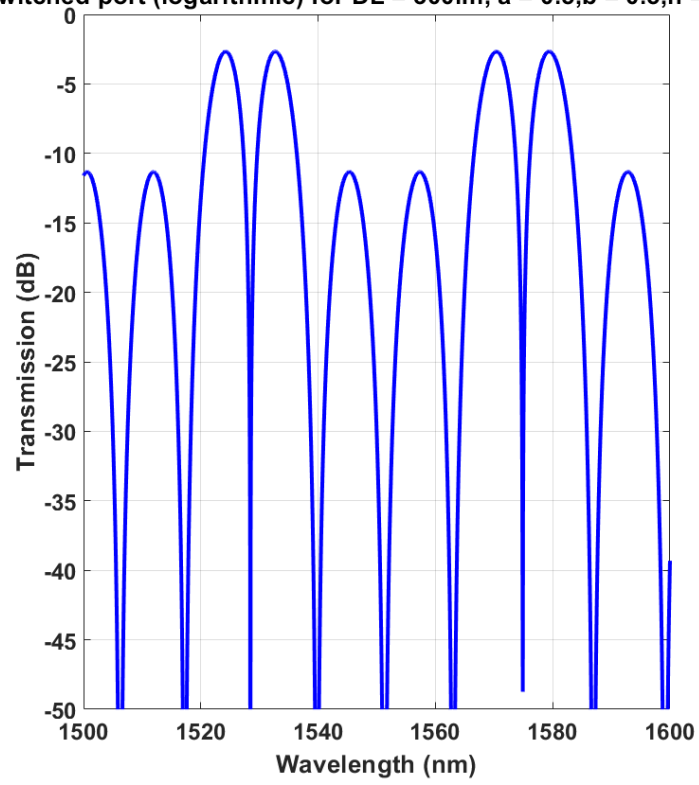
nswitched port (logarithmic) for DL = 300im, a = 0.5,b = 0.5,n = 3



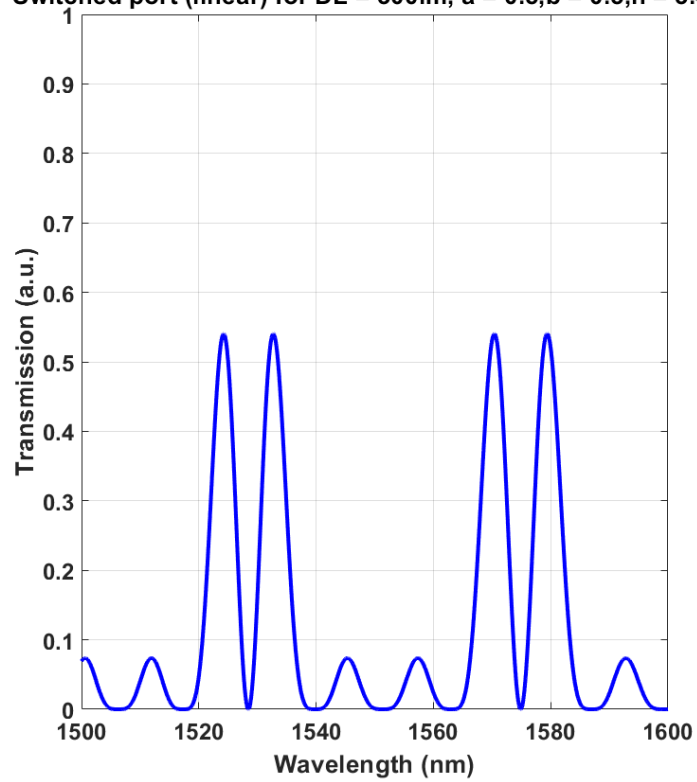
Unswitched port (linear) for DL = 300im, a = 0.5,b = 0.5,n = 3.45



Switched port (logarithmic) for DL = 300im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.4

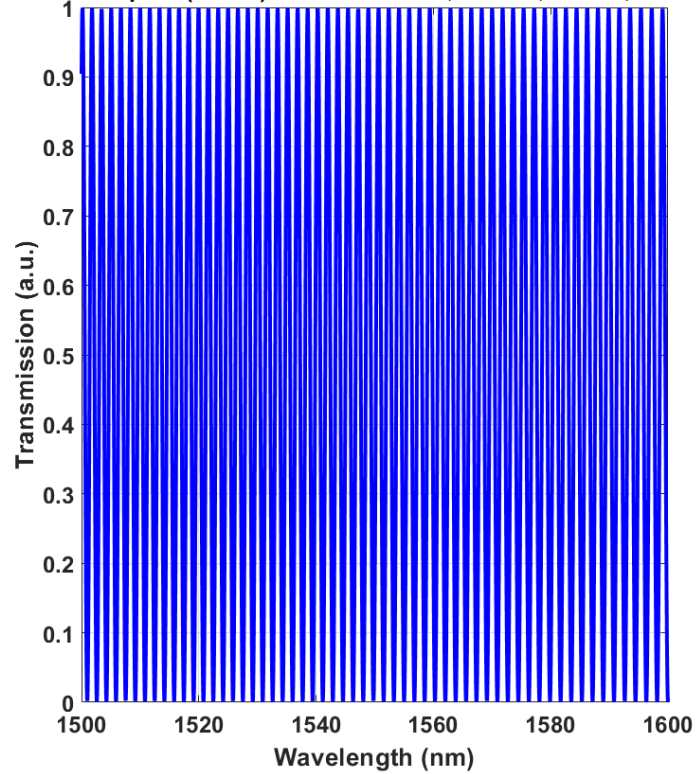


Switched port (linear) for DL = 300im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.456

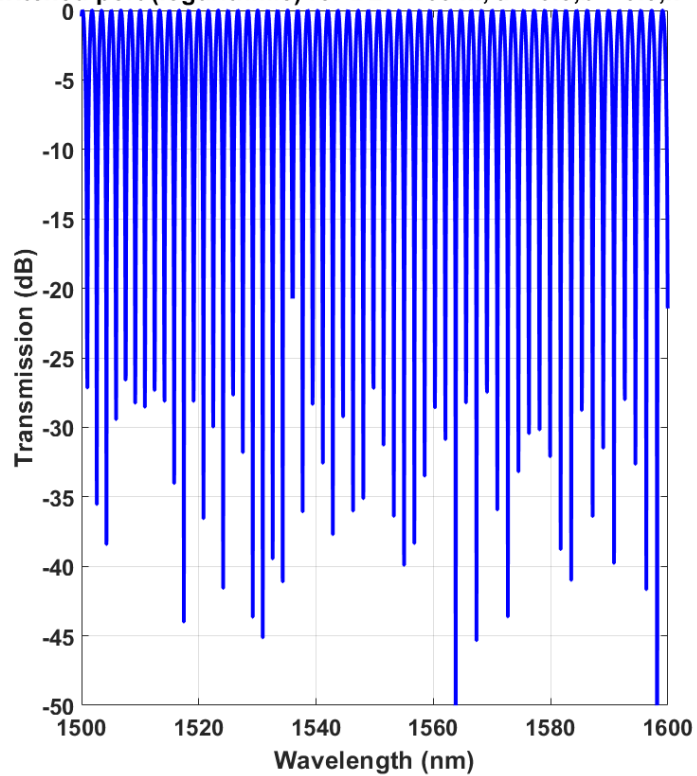


5) Αποτελέσματα προομοίωσης της συνάρτησης μεταφοράς μη-συμμετρικού συμβολόμετρου Si_3N_4 MZI για διαφορά μήκους των κλάδων $DL = 400\mu\text{m}$

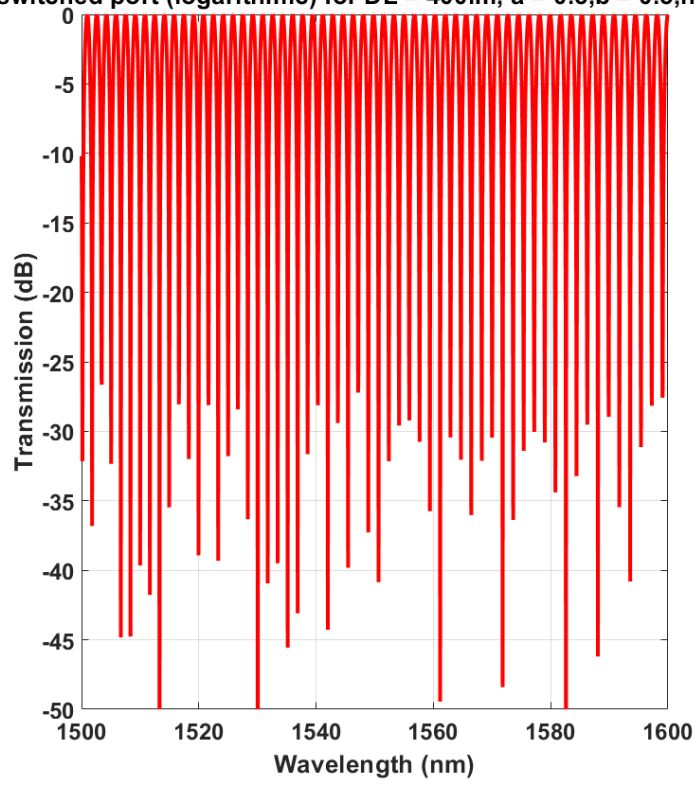
Switched port (linear) for $DL = 400\mu\text{m}$, $a = 0.5$, $b = 0.5$, $n = 3.456$



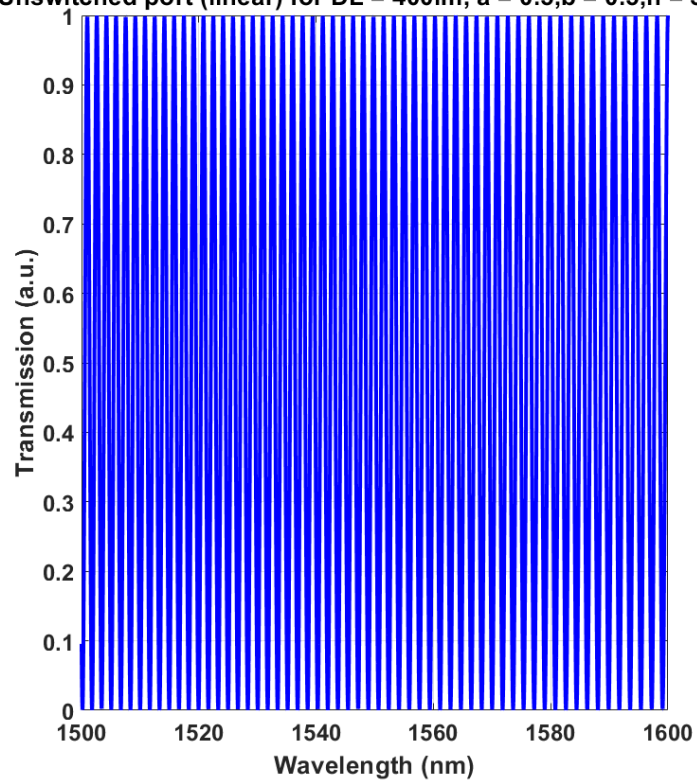
Switched port (logarithmic) for $DL = 400\mu\text{m}$, $a = 0.5$, $b = 0.5$, $n = 3.4$



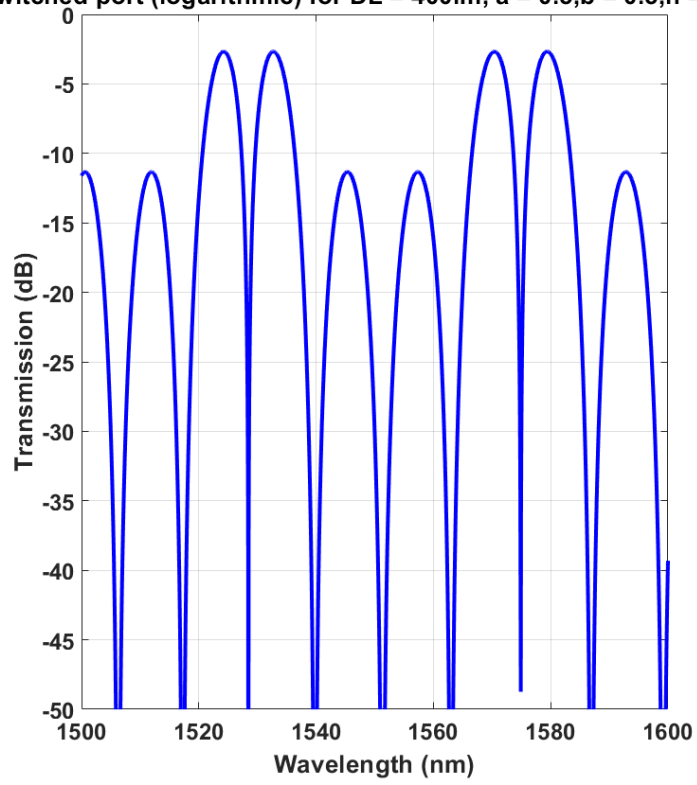
nswitched port (logarithmic) for DL = 400im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3



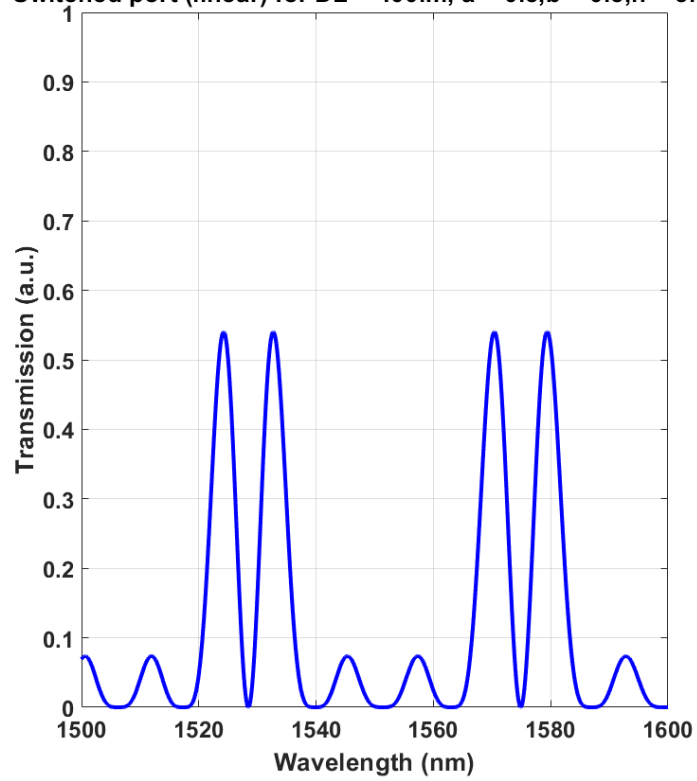
Unswitched port (linear) for DL = 400im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.45



Switched port (logarithmic) for DL = 400im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.4

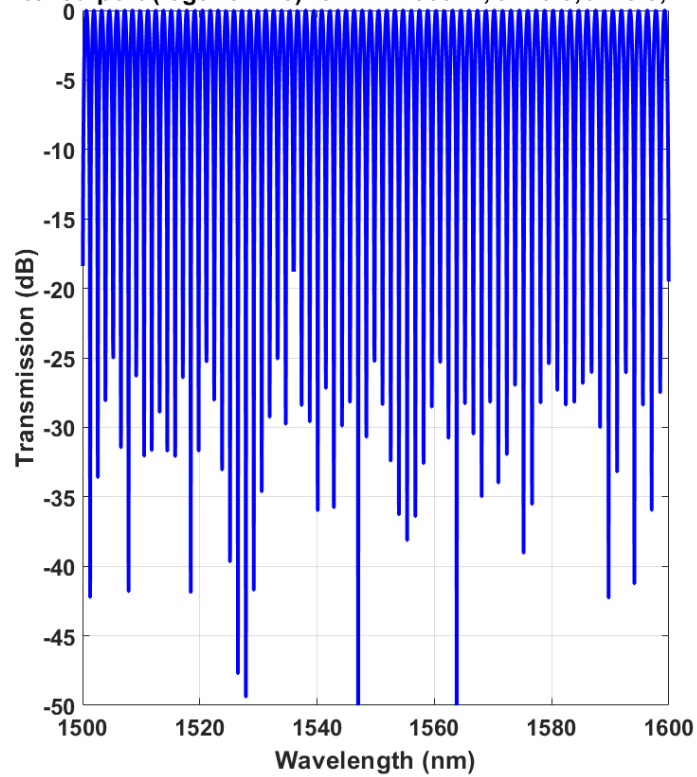


Switched port (linear) for DL = 400im, a = 0.5, b = 0.5, n = 3.456



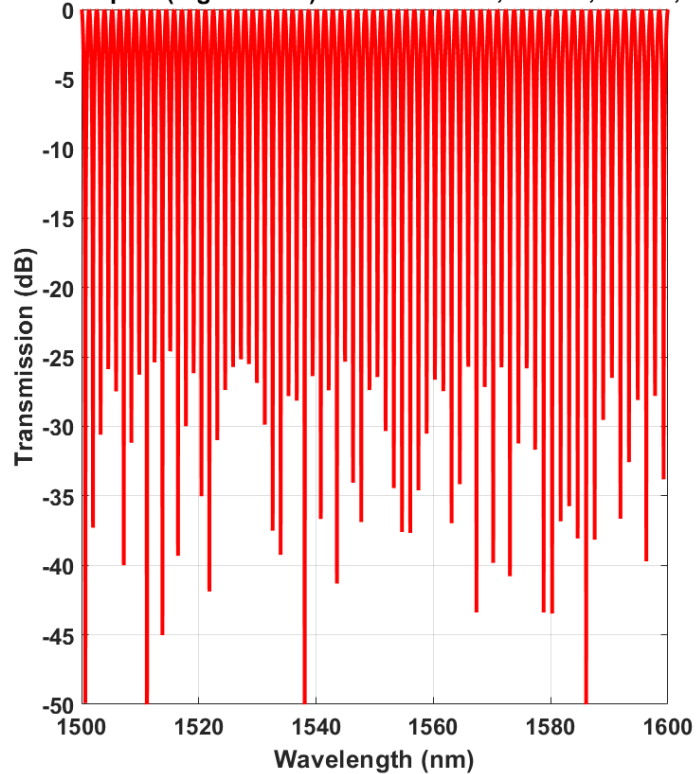
6. Αποτελέσματα προσομοίωσης της συνάρτησης μεταφοράς μη-συμμετρικού συμβολόμετρου Si_3N_4 MZI για διαφορά μήκους των κλάδων

Switched port (logarithmic) for DL = 500 μm , a = 0.5, b = 0.5, n = 3.4

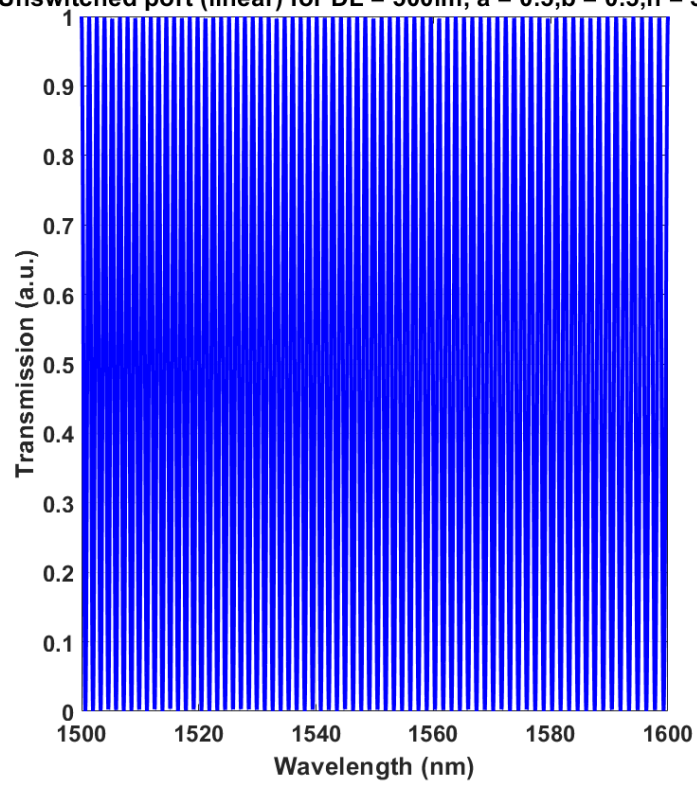


DL = 500 μm

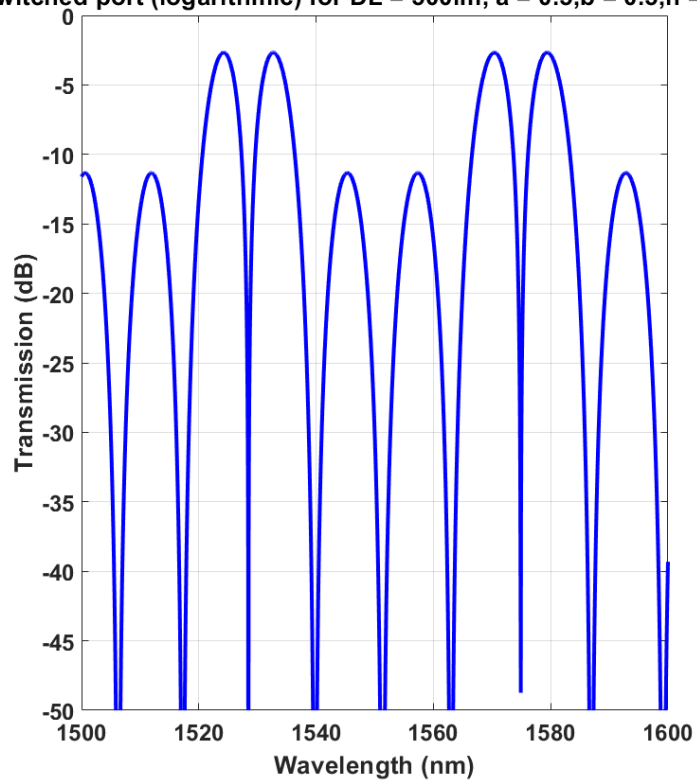
nswitched port (logarithmic) for DL = 500 μm , a = 0.5, b = 0.5, n = 3

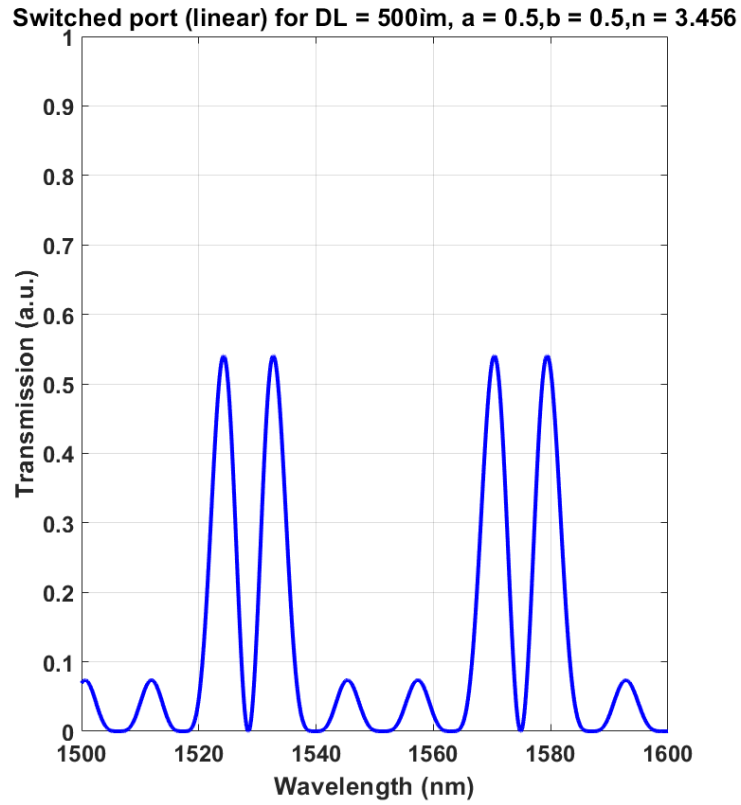


Unswitched port (linear) for DL = 500im, a = 0.5,b = 0.5,n = 3.45



Switched port (logarithmic) for DL = 500im, a = 0.5,b = 0.5,n = 3.4





Στις προηγούμενες εικόνες παρακολουθήσαμε τις αλλαγές κατά τη μεταβολή του DL για switched και unswitched port σε λογαριθμική αλλά και μη κλίμακα. Οι τιμές για τις οποίες εξετάσαμε το εκπεμπόμενο σήμα είναι DL = 15,100,200,300,400,500. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το DL, η κυματομορφή διαδίδεται με μεγαλύτερη συχνότητα.

Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία, συζητήθηκαν τα υπάρχοντα και μελλοντικά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας με στόχο την υλοποίηση αναπροσαρμοζόμενων οπτικών-ασύρματων δικτύων 5^{ης} γενιάς. Η εργασία εξέτασε την αρχιτεκτονική του συστήματος ασύρματης επικοινωνίας 5G, τις προκλήσεις και τα οφέλη. Επίσης, επανεξετάσαμε εν συντομία την εξέλιξη των ασύρματων και κυψελοειδών συστημάτων εστιάζοντας σε τέσσερις βασικούς παράγοντες: ασύρματη πρόσβαση, ρυθμούς δεδομένων, εύρος ζώνης και συστήματα μεταγωγής, εκτός από την αλλαγή στην αρχιτεκτονική του δικτύου. Τα επερχόμενα δίκτυα 5G πρόκειται να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των χρηστών σε προσιτές τιμές, μεγάλη αξιοπιστία καθώς και εξαιρετικές εφαρμογές.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν οι οπτικοί μεταγωγείς, η λειτουργία και οι εφαρμογές τους. Στη συνέχεια υλοποιήθηκε μια προσομοίωση της λειτουργίας αυτών στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab και εκτέθηκαν τα σχετικά αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

1. Lucky, R.W.; Eisenberg, J. *Renewing*, The National Academies Press:, U.S. Telecommunications Research; Washington, DC, USA, 2006.
2. Penttinen, J.T.J., «5G Explained: Security and Deployment of Advanced Mobile Communications»; Wiley Telecom: Hoboken, NJ, USA, 2019; pp. 47–70.
3. Global Digital Overview, Digital 2020:. Available online: <https://datareportal.com/reports/digital-2020-global-digital-overview>
4. Miraz, M.H.; Ali, M.; Excell, P.S.; Picking, R. «A review on Internet of Things (IoT), Internet of Everything (IoE) and Internet of Nano Things (IoNT)». *Internet Technologies and Applications*, Wrexham, UK, pp. 219–224, Sep. 2015;.
5. *World Urbanization Prospects*; United Nations: New York, NY, USA, 2018.
6. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*; United Nations: New York, NY, USA, 2019.
7. Joss, S.; Sengers, F.; Schraven, D.; Caprotti, F.; Dayot, Y. «The Smart City as Global Discourse: Storylines and Critical Junctures across 27 Cities». *J. Urban Technol.* 2019, 26, 3–34.
8. Zanella, A.; Bui, N.; Castellani, A.; Vangelista, L.; Zorzi, M. «Internet of Things for Smart Cities». *IEEE Internet Things J.*, ππ. 22–32, 2014
9. Yan, J.; Liu, J.; Tseng, F.M., «An evaluation system based on the self-organizing system framework of smart cities: A case study of smart transportation systems in China». *Technol. Forecast. Soc. Chang.*, 119371, 2020
10. IoT-Analytics,; Technical Report; «The Top 10 IoT Segments in 2018—Based on 1600 Real IoT Projects», IoT-Analytics: Hamburg, Germany, 2018. Online: <https://iot-analytics.com/top-10-iot-segments-2018-real-iot-projects>

11. Wood, L. «Analysis & Forecasts of Smart Transportation, Smart Buildings, Smart Utilities, Smart Citizen Services», Global Smart Cities Market Report 2020–2025.: 2020. Available online: <https://www.businesswire.com/news/home/20201008005413/en/Global-Smart-Cities-Market-Report-2020-2025-Analysis-Forecasts-of-Smart-Transportation-Smart-Buildings-Smart-UtilitiesSmart-Citizen-Services---ResearchAndMarkets.com>
12. Nencioni, G.; Garroppo, R.G.; Gonzalez, A.J.; Helvik, B.E.; Procissi, G. «Orchestration and Control in Software-Defined 5G Networks: Research Challenges.» *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, 1–18, 2018
13. Monserrat, J.F.; Mange, G.; Braun, V.; Tullberg, H.; Zimmermann, G.; Bulakci, O. METIS research advances towards the 5G mobile and wireless system definition. *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.* 2015, 2015.
14. Al-Falahy, N.; Alani, O.Y. Technologies for 5G Networks: Challenges and Opportunities. *IT Prof.* 2017, 19, 12–20.
15. Klaine, P.V.; Imran, M.A.; Onireti, O.; Souza, R.D. A Survey of Machine Learning Techniques Applied to Self-Organizing Cellular Networks. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2017, 19, 2392–2431.
16. Fourati, H.; Maaloul, R.; Chaari, L. A survey of 5G network systems: Challenges and machine learning approaches. *Int. J. Mach. Learn. Cybern.* 2020, 12, 385–431.
17. Agiwal, M.; Roy, A.; Saxena, N. Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2016, 18, 1617–1655.
18. PSB Research—5G Economy Global Public Survey Report Commissioned by Qualcomm. 2019. Available online: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/psb-public-survey-report.pdf>
19. 3GPP—Technical Specification Group Services and System Aspects; System Architecture for the 5G System (5GS); Stage 2 (Release 16). 2020. Available online:

<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3144>

20. ITU—IMT Vision—Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and beyond. 2015. Available online: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083>
21. Popovski, P.; Mange, G.; Gozalvez-Serrano, D.; Rosowski, T.; Zimmermann, G.; Agyapong, P.; Fallgren, M.; Höglund, A.; Queseth, O.; Tullberg, H.; et al. D6.6 Final Report on the METIS 5G System Concept and Technology Roadmap. 2014. Available online: <https://riunet.upv.es/handle/10251/76765>
22. Guevara, L.; Auat Cheein, F. The Role of 5G Technologies: Challenges in Smart Cities and Intelligent Transportation Systems. *Sustainability* 2020, *12*, 6469.
23. Sánchez-Corcuera, R.; Nuñez-Marcos, A.; Sesma-Solance, J.; Bilbao-Jayo, A.; Mulero, R.; Zulaika, U.; Azkune, G.; Almeida, A. Smart cities survey: Technologies, application domains and challenges for the cities of the future. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* 2019, *15*, 155014771985398.
24. Attaran, M. The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization. *J. Ambient. Intell. Humaniz. Comput.* 2021.
25. Abdel Hakeem, S.A.; Hady, A.A.; Kim, H. 5G-V2X: Standardization, architecture, use cases, network-slicing, and edge-computing. *Wirel. Netw.* 2020, *26*, 6015–6041.
26. Syed, A.S.; Sierra-Sosa, D.; Kumar, A.; Elmaghraby, A. IoT in Smart Cities: A Survey of Technologies, Practices and Challenges. *Smart Cities* 2021, *4*, 429–475.
27. Bagheri, H.; Noor-A-Rahim, M.; Liu, Z.; Lee, H.; Pesch, D.; Moessner, K.; Xiao, P. 5G NR-V2X: Toward Connected and Cooperative Autonomous Driving. *IEEE Commun. Stand. Mag.* 2021, *5*, 48–54.
28. Arbib, J.; Seba, T. Rethinking Transportation 2020–2030—The Disruption of Transportation and the Collapse of the InternalCombustion Vehicle and Oil Industries. 2017. Available online:

https://static1.squarespace.com/static/585c3439be65942f022bbf9b/t/591a2e4be6f2e1c13df930c5/1509063152647/RethinkX%2bReport_051517.pdf

29. E. Ollier, "Optical MEMS Devices Based on Moving Waveguides", IEEE J. Sel. Topics Quantum Elect., vol. 8, no. 1, pp. 155-162, Jan./Feb. 2002.
30. P. De Dobbelaere, "Digital MEMS for Optical Switching", IEEE Commun. Mag., vol. 40, no. 3, pp. 88-95, Mar. 2000.
31. R. Kasahara, "New Structure of Silica-Based Planar Lightwave Circuits for Low-Power Thermo-optic Switch and Its Application to 8×8 Optical Matrix Switch", J. Lightwave Tech., vol. 20, no. 6, pp. 993-1000, June 2002.
32. T. Sakata, "Improvement of Switching Time in a Thermocapillarity Optical Switch", J. Lightwave Tech., vol. 19, no. 7, pp. 1023-1027, July 2001.
33. H. C. Tapalian, J.-P. Laine and P. A. Lane, "Thermo-optical Switches Using Coated Microsphere Resonators", IEEE Photonics Tech. Lett., vol. 14, no. 8, pp. 1118-1120, Aug. 2002.
34. R. Krähenbühl (Krahenbuhl), "Performance and Modeling of Advanced Ti:LiNbO₃ Digital Optical Switches", J. Lightwave Tech., vol. 20, no. 1, pp. 92-99, Jan. 2002.
35. C. M. Gallep and E. Conforti, "Reduction of Semiconductor Optical Amplifier Switching Times by Preimpulse Step-Injected Current Technique", IEEE Photonics Tech. Lett., vol. 14, no. 7, pp. 902-904, July 2002.
36. N. A. Riza and S. Yuan, "Low Optical Interchannel Crosstalk Fast Switching Speed Polarisation Independent 2×2 Fiber Optic Switch Using Ferroelectric Liquid Crystals", Elect. Lett., vol. 34, no. 13, pp. 1341-1342, June 1998.
37. A. J. Agranat, "Electroholographic Wavelength Selective Crossconnect", Nanostructures and Quantum Dots/WDM Components/VCSELs and Microcavities/RF Photonics for CATV and HFC Systems 1999 Dig. LEOS Summer Topical Mtgs. 1999 pp. 617.

38. L. H. Domash, "Electronically Switchable Waveguide Bragg Gratings for WDM Routing", 1997 Dig. IEEE/LEOS Summer Topical Mtgs.- WDM Components Tech., pp. 34-35, 1997-Aug.-11.
39. M. J. Potasek and Y. Yang, "Multiterabit-per-Second All-Optical Switching in a Nonlinear Directional Coupler", IEEE J. Sel. Topics Quantum Elect., vol. 8, no. 3, pp. 714-721, May/June 2002.
40. K. Nashimoto, PLZT Electro-optic Waveguides and Switches, 2001.
41. M. P. Earnshaw, "Semiconductor Space Switches Based on Multimode Interference Couplers", J. Lightwave Tech., vol. 20, no. 4, pp. 643-650, Apr. 2002.
42. Y.-A. Peter, "Micro-optical Fiber Switch for a Large Number of Interconnects Using a Deformable Mirror", IEEE Photonics Tech. Lett., vol. 14, no. 3, pp. 301-303, Mar. 2002.
43. T. Bakke, C. P. Tigges and C. T. Sullivan, "1x2 MOEMS Switch Based on Silicon-on-Insulator and Polymeric Waveguides", Elect. Lett., vol. 38, no. 4, pp. 177-178, Feb. 2002.
44. D. Kucharski et al., "10 Gb/s 15 mW optical receiver with integrated germanium photodetector and hybrid inductor peaking in 0.13 nm SOI CMOS technology," in IEEE ISSCC Dig. Tech. Papers, Feb. 2010, pp. 360–361
45. S. Assefa, W. M. Green, A. Rylyakov, C. Schow, F. Horst, and Y. Vlasov, "CMOS integrated nanophotonics: Enabling technology for exascale computing systems," in OSA Tech. Dig., 2011 [Online]. Available: <http://www.research.ibm.com/photonics/>, paper OMM6
46. Vlasov A et al, 4x4 and 8x8 Monolithic Si-Integration of Photonic Switch Fabrics, CMOS Logic, and Device Driver Circuits_JLT_Feb2014
47. Liu, J. et al. Waveguide-integrated, ultralow-energy GeSi electro-absorption modulators. Nature Photon. 2, 433–437 (2008)
48. Miller, D. Device requirements for optical interconnects to silicon chips Proc. IEEE 97, 1166–1185 (2009)

49. Soref, R. & Bennett, B. Electrooptical effects in silicon. *IEEE J. Quant. Electron.* 23, 123–129 (1987).
50. Cocorullo, G. & Rendina, I. Thermo-optical modulation at 1.5 μm in silicon etalon. *Electron. Lett.* 28, 83–85 (1992)
51. G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, and D. J. Thomson, “Silicon optical modulators”, *Nat. Photonics* 4(8), 518–526 (2010)

Παράρτημα A: Κώδικας Matlab μελέτης τηλεπικοινωνιακού συστήματος μετάδοσης εικόνας κατά NRZ-OOK

Tx - Rx

```
clear all
```

```
% file_in = input('source data filename: ', 's');
```

```
file_in = '5g.bmp';
```

```
% read data from input file
```

```
x = imread(file_in);
```

```
size(x);
```

```
% arrange data read from image for OFDM processing
```

```
h = size(x,1);
```

```
w = size(x,2);
```

```
x = reshape(x', 1, w*h);
```

```
baseband_tx = double(x);
```

```
% convert original data to word size (bits/word)
```

```
baseband_txBi = de2bi(baseband_tx(1, :));
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% CHANNEL
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% -----Different SNR-----
```

```
channelout = (awgn(baseband_txBi, 10)); %Change SNR here
```

```
% channelout = (awgn(baseband_txBi, 1));
% channelout = (awgn(baseband_txBi, 0.1));
% channelout = (awgn(baseband_txBi, 100));
% channelout = baseband_txBi;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%% decision / mapping at Rx of 0 or 1
```

```
baseband_rxBi = zeros(size(channelout, 1), size(channelout, 2));
for i=1:1:size(channelout, 1)
    for j = 1:1:size(channelout, 2)
        if channelout(i, j)>0.5
            baseband_rxBi(i, j) = 1;
        else
            baseband_rxBi(i, j) = 0;
        end
    end
end
end
```

```
baseband_rx = bi2de(baseband_rxBi);
```

```
data_out = baseband_rx;
```

```
file_out = [file_in '_myRx.bmp'];
disp(['Output file will be: ' file_out])
```



```

%%%%%%%%%%
% format the demodulated data to reconstruct a bitmap image
data_out = reshape(data_out, w, h);

data_out = uint8(data_out);
% save the output image to a bitmap (*.bmp) file
imwrite(data_out, file_out, 'bmp');

subplot(2, 3, 1)
imshow(file_in);
title('input image')

subplot(2, 3, 4)
imshow(file_out);
title('impact of noise')

Nsamplesplot = 200;
subplot(2, 3, 2)
area(baseband_txBi(1:1:Nsamplesplot, 1));
grid on;
axis([0 Nsamplesplot -1 1.5])
title('Tx data stream')

subplot(2, 3, 5)
area(channelout(1:1:Nsamplesplot, 1));
axis([0 Nsamplesplot -1 1.5])
title('Channel before Rx data stream')

```

```

grid on;

subplot(2, 3, 3)
% scatterplot(baseband_txBi(:, 1))
scatter(zeros(Nsamplesplot, 1), baseband_txBi(1:1:Nsamplesplot,1), '+',
'markerfacecolor', 'b');
axis([-0.5 0.5 -1 1.5])
grid on;
title('Constellation diagram at Tx')

subplot(2, 3, 6)
% scatterplot(channelout(:, 1))
scatter(zeros(Nsamplesplot, 1), channelout(1:1:Nsamplesplot,1), '+',
'markerfacecolor', 'b');
axis([-0.5 0.5 -1 1.5])
grid on;
title('Constellation of hannel before Rx')

Nsamplesplot = 50*Nsamplesplot ;
figure
subplot(2, 2, 1)
% scatterplot(baseband_txBi(:, 1))
scatter(baseband_txBi(1:1:Nsamplesplot,1), zeros(Nsamplesplot, 1), '+',
'markerfacecolor', 'b');
axis([-0.5 1.5 -0.5, 0.5])
grid on;
title('Constellation diagram at Tx')

```

```
subplot(2, 2, 2)
% scatterplot(channelout(:, 1))
scatter(channelout(1:1:Nsamplesplot,1), zeros(Nsamplesplot, 1), '+',
'markerfacecolor', 'b');
axis([-0.5 1.5 -0.5, 0.5])
grid on;
title('Constellation of hannel before Rx')

subplot(2, 2, 3)
histogram(baseband_txBi(:,1), 'normalization', 'pdf');

subplot(2, 2, 4)
histogram(channelout(:,1), 'normalization', 'pdf');
```

Παράρτημα Β: Κώδικας Matlab υλοποίησης συστήματος οπτικής μεταγωγής συμβολομέτρου Si₃N₄-MZI

```
clear all;
% close all;
clc;

lambda_init = 1500;
lambda_fin = 1600;
lambda_res = 0.05;
lambda = (lambda_init:lambda_res:lambda_fin)*1e-9; %miki kumatos
length_lambda = length(lambda);

n_const = 3.456;
n = n_const*ones(1,length_lambda);

a_const = 0.5;
a = a_const*ones(1,length_lambda);

b_const = 0.5;
b = b_const*ones(1,length_lambda);

DL = 400*1e-6; %Change DL (15,100,200,300,400)
DL1 = 15*1e-6;
DL2 = 30*1e-6;
DL3 = 60*1e-6;

Low_dB = -50;
High_dB = 0;

Low_au = 0;
```

```

High_au = 1;

% init_phase = -1*pi/14; % To match with VPI
init_phase = -pi/2.4;

for i = 1:length_lambda
    H_s1(i) = 1 - 4*a(i)*b(i)*(cos((DL1*pi*n(i)/lambda(i))+ init_phase))^2;
    H_u1(i) = 4*a(i)*b(i)*(cos((DL1*pi*n(i)/lambda(i))+ init_phase))^2;

    H_s2(i) = 1 - 4*a(i)*b(i)*(cos((DL2*pi*n(i)/lambda(i))+ 2*init_phase))^2;
    H_u2(i) = 4*a(i)*b(i)*(cos((DL2*pi*n(i)/lambda(i))+ 2*init_phase))^2;

    H_s3(i) = 1 - 4*a(i)*b(i)*(cos((DL3*pi*n(i)/lambda(i))+ 4*init_phase))^2;
    H_u3(i) = 4*a(i)*b(i)*(cos((DL3*pi*n(i)/lambda(i))+ 4*init_phase))^2;

    H_switched(i) = H_s1(i); % *H_s2(i)*H_s3(i);
    H_unswitched(i) = H_u1(i); % *H_u2(i)*H_u3(i);

    H_s_final(i) = H_s1(i)*H_u2(i)*H_s3(i);

    H_switched(i) = 1 - 4*a(i)*b(i)*(cos(DL*pi*n(i)/lambda(i)))^2; % Linear
    H_unswitched(i) = 4*a(i)*b(i)*(cos(DL*pi*n(i)/lambda(i)))^2; % Linear
end

Hs_dB = 10*log10(H_switched); % Logarithmic
Hu_dB = 10*log10(H_unswitched); % Logarithmic
H_s_f_dB = 10*log10(H_s_final);

width = 800;
height = 900;
font_size = 18;

```

```

fig = figure();
set(fig, 'Position', [400 75 width-1 height])
plot_1 = plot(1e9*lambda,Hs_dB,'-'); %Transmission in dB for switched port
set(plot_1,'Color','blue','LineWidth',3)
title(['Switched port (logarithmic) for DL = ',num2str(DL*1e6),'\u03bcm, a =
',num2str(a_const),'b = ',num2str(b_const),'n =
',num2str(n_const)],'FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
xlabel('Wavelength (nm)','FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
ylabel('Transmission (dB)','FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
handle_var = gca; % returns handle to current axis in the current figure
set(handle_var,'FontSize',font_size,'FontWeight','bold') % sets the font size of
axis values to font_size
axis([lambda_init lambda_fin Low_dB High_dB])
hold on
grid on

fig2 = figure();
set(fig2, 'Position', [400 75 width-1 height])
plot_2 = plot(1e9*lambda,H_switched,'-'); %Transmission in dB for switched port
set(plot_2,'Color','blue','LineWidth',3)
title(['Switched port (linear) for DL = ',num2str(DL*1e6),'m, a =
',num2str(a_const),'b = ',num2str(b_const),'n =
',num2str(n_const)],'FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
xlabel('Wavelength (nm)','FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
ylabel('Transmission (a.u.)','FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
handle_var = gca; % returns handle to current axis in the current figure
set(handle_var,'FontSize',font_size,'FontWeight','bold') % sets the font size of
axis values to font_size
axis([lambda_init lambda_fin Low_au High_au])
hold on
grid on

```

```

fig3 = figure();
set(fig3, 'Position', [400 75 width-1 height])
plot_3 = plot(1e9*lambda,Hu_dB,'-'); %Transmission in dB for unswitched port
set(plot_3,'Color','red','LineWidth',3)
title(['Unswitched port (logarithmic) for DL = ',num2str(DL*1e6),'im, a =
',num2str(a_const),'b = ',num2str(b_const),'n =
',num2str(n_const)],'FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
xlabel('Wavelength (nm)','FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
ylabel('Transmission (dB)','FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
handle_var = gca; % returns handle to current axis in the current figure
set(handle_var,'FontSize',font_size,'FontWeight','bold') % sets the font size of
axis values to font_size
axis([lambda_init lambda_fin Low_dB High_dB])
hold on
grid on

fig4 = figure();
set(fig4, 'Position', [400 75 width-1 height])
plot_4 = plot(1e9*lambda,H_unswitched,'-'); %Transmission in dB for switched
port
set(plot_4,'Color','blue','LineWidth',3)
title(['Unswitched port (linear) for DL = ',num2str(DL*1e6),'im, a =
',num2str(a_const),'b = ',num2str(b_const),'n =
',num2str(n_const)],'FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
xlabel('Wavelength (nm)','FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
ylabel('Transmission (a.u.)','FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
handle_var = gca; % returns handle to current axis in the current figure
set(handle_var,'FontSize',font_size,'FontWeight','bold') % sets the font size of
axis values to font_size
axis([lambda_init lambda_fin Low_au High_au])
hold on
grid on

```

```

fig5 = figure();
set(fig5, 'Position', [400 75 width-1 height])
plot_5 = plot(1e9*lambda,H_s_f_dB,'-'); %Transmission in dB for switched port
set(plot_5,'Color','blue','LineWidth',3)
title(['Switched port (logarithmic) for DL = ',num2str(DL*1e6),'m, a =
',num2str(a_const),'b = ',num2str(b_const),'n =
',num2str(n_const)],'FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
xlabel('Wavelength (nm)','FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
ylabel('Transmission (dB)','FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
handle_var = gca; % returns handle to current axis in the current figure
set(handle_var,'FontSize',font_size,'FontWeight','bold') % sets the font size of
axis values to font_size
axis([lambda_init lambda_fin Low_dB High_dB])
hold on
grid on

fig6 = figure();
set(fig6, 'Position', [400 75 width-1 height])
plot_6 = plot(1e9*lambda,H_s_final,'-'); %Transmission in dB for switched port
set(plot_6,'Color','blue','LineWidth',3)
title(['Switched port (linear) for DL = ',num2str(DL*1e6),'m, a =
',num2str(a_const),'b = ',num2str(b_const),'n =
',num2str(n_const)],'FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
xlabel('Wavelength (nm)','FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
ylabel('Transmission (a.u.)','FontSize',font_size,'FontWeight','bold')
handle_var = gca; % returns handle to current axis in the current figure
set(handle_var,'FontSize',font_size,'FontWeight','bold') % sets the font size of
axis values to font_size
axis([lambda_init lambda_fin Low_au High_au])
hold on
grid on

```