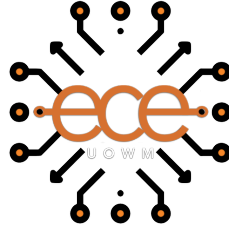


Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Τηλεπικοινωνιών



Ταφάνι Γιούλιξ

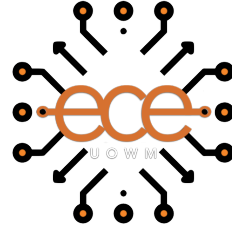
## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάλυση επιδόσεων μη-επίγειων συστημάτων επικοινωνιών

Επιβλέπων: Δρ. Αλέξανδρος-Απόστολος Α. Μπουλογεώργος

Κοζάνη, Ιούλιος 2023

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Τηλεπικοινωνιών



Ταφάνι Γιούλιξ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάλυση επιδόσεων μη-επίγειων συστημάτων επικοινωνιών

Επιβλέπων: Δρ. Αλέξανδρος-Απόστολος Α. Μπουλογεώργος

Κοζάνη, Ιούλιος 2023

## Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο

“Ανάλυση επιδόσεων μη-επίγειων συστημάτων επικοινωνιών”

καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν,

και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Αλέξανδρο-Απόστολο Α. Μπουλογεώργο

αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

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. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Ονοματεπώνυμο Φοιτητή & Επιβλέποντα/ες, Έτος, Πόλη

Copyright (C) Γιούλιξ Ταφάνι, Αλέξανδρος-Απόστολος Α. Μπουλογεώργος, 2023, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή:





# Περίληψη

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να προτείνει και να εξετάσει τις επιδόσεις ενός υβριδικού συστήματος επικοινωνιών terahertz (THz)/ορατού φωτός (visible light), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει συνδεσιμότητα σε χρήστες εντός αεροπλάνου μέσου δορυφόρου. Συγκεκριμένα, παραθέτει τα κύρια δομικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του υβριδικού συστήματος και εξηγείται η λειτουργία της κάθε μονάδας. Για την εκτίμηση των επιδόσεων του συστήματος ακολουθείται διαδικασία μοντελοποίησης του. Προς την κατεύθυνση αυτή, γίνεται μελέτη τόσο των ντετερμινιστικών όσο και των στοχαστικών χαρακτηριστικών του καναλιού δορυφόρου αεροπλάνου αλλά και του αεροπλάνου τελικού χρήστη. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται υπόψιν φαινόμενα γεωμετρικών και μοριακών απωλειών, όπως επίσης και φαινόμενα διαλείψεων εξαιτίας του συγκρίσιμου με το μήκος κύματος μέγεθος των συστατικών του καναλιού δορυφόρου αεροπλάνου, αλλά και της ανομοιομορφίας κατανομής της σύστασης μορίων του καναλιού αυτού. Όσο αφορά την μοντελοποίηση του καναλιού ορατού φωτός λαμβάνονται υπόψιν οι γεωμετρικές απώλειες και λάθη στόχευσης της διόδου LED και της φωτοδιόδου. Χτίζοντας πάνω στα μοντέλα των καναλιών εξάγουμε κλειστές μορφές για την πιθανότητα διακοπής επικοινωνίας του συστήματος επικοινωνίας δορυφόρου-αεροπλάνου, αεροπλάνου-τελικού χρήστη, αλλά και του υβριδικού συστήματος δορυφόρου-αεροπλάνου-τελικού χρήστη. Οι εκφράσεις αυτές αποδεικνύουν ότι ένα τέτοιο σύστημα είναι υλοποιήσιμο και ότι μπορεί να επιτρέψει υψηλής φασματικής αποδοτικότητας επικοινωνίες. Τέλος, μας επιτρέπουν να επιλέξουμε κατάλληλες παραμέτρους για την σχεδίαση του συστήματος μας.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Υβριδικό σύστημα, Παροχή συνδεσιμότητας, Μοντελοποίηση, Πιθανότητα διακοπής επικοινωνίας



# Abstract

The aim of this thesis is to suggest and examine the performance of a hybrid terahertz (THz)/visible light communication system, that can be used for connectivity provide to users in airplane via satellite. Specifically, lists the main blocks of hybrid system architecture and explains the function of each unit. In order to evaluate the systems performance a modeling process is followed. In this direction both deterministic and stochastic characteristics of the satellite airplane channel as well as the airplane end-user channel are studied. In detail, geometrical and molecular loss phenomena are taken into account as well as lapse phenomena due to the wavelength-comparable size of particles in satellite airplane channel, but also the uneven distribution of the molecule composition of the channel is taken into account. As for visible light channel modeling, geometric losses and targeting errors of the LED and photodiode are taken into account. Building on the channel models we derive closed forms for the outage probability of the satellite-airplane and airplane-end user communication system as well as of hybrid satellite-airplane-end user system. These expressions prove that such a system is feasible and that it can enable high spectral efficiency communications. Finally, they allow us to choose appropriate parameters for our system design.

**KEYWORDS:** Hybrid system; Connectivity provide; Modeling; Outage probability





# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Ασύρματα THz συστήματα . . . . .	1
1.2	Ασύρματα οπτικά συστήματα επικοινωνιών . . . . .	3
1.3	Κίνητρα και συνεισφορά . . . . .	6
1.4	Οργάνωση . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Μοντελοποίηση συστήματος επικοινωνίας δορυφόρου αεροπλάνου</b>	<b>7</b>
2.1	Μοντελοποίηση γεωμετρικών απωλειών . . . . .	8
2.2	Μοντελοποίηση ατμοσφαιρικών απωλειών . . . . .	8
2.3	Μοντελοποίηση διαλείψεων . . . . .	9
2.3.1	Μοντελοποίηση μέσου λογάριθμο κανονικής κατανομής . . . . .	10
2.3.2	Μοντελοποίηση μέσου Γάμμα-Γάμμα κατανομής . . . . .	12
2.3.3	Μοντελοποίηση μέσου Exponential Weibull κατανομής . . . . .	14
2.3.4	Μοντελοποίηση μέσου Weibull κατανομής . . . . .	15
2.4	Μοντελοποίηση αστοχίας κεραιών . . . . .	16
2.5	Μοντελοποίηση συστήματος . . . . .	17
2.6	Αποτελέσματα . . . . .	22
2.7	Συμπεράσματα . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Μοντελοποίηση συστήματος επικοινωνίας αεροπλάνου τελικού χρήστη</b>	<b>27</b>
3.1	Βιβλιογραφική ανασκόπηση . . . . .	27
3.2	Μοντελοποίηση γεωμετρικών απωλειών . . . . .	28
3.3	Μοντελοποίηση κατανομής γωνίας πρόσπτωσης . . . . .	30
3.4	Αποτελέσματα . . . . .	31
3.5	Συμπεράσματα . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Μοντελοποίηση υβριδικού συστήματος THz/VLC</b>	<b>35</b>
4.1	Μοντελοποίηση σήματος αεροπλάνου και τελικού χρήστη . . . . .	35
4.2	Μοντελοποίηση ασύμπτωτης πιθανότητας διακοπής λειτουργίας . . . . .	37
4.3	Αποτελέσματα . . . . .	39
4.4	Συμπεράσματα . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Μελλοντικές επεκτάσεις</b>	<b>49</b>
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>51</b>



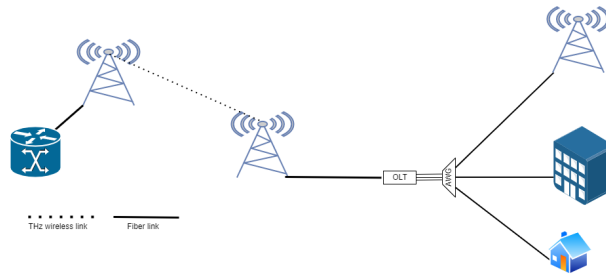
# Κεφάλαιον 1

## Εισαγωγή

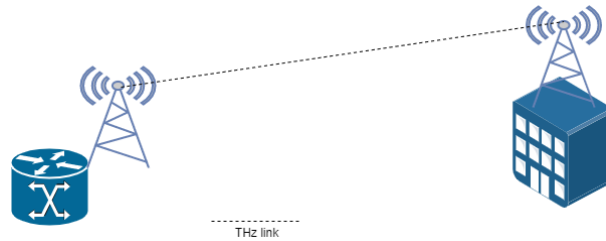
Καθώς προχωράμε προς την έκτη γενιά (sixth generation - 6G) συστημάτων επικοινωνιών, η ανάγκη υποστήριξης πολλαπλών χρηστών, που βρίσκονται στον ίδιο χώρο στην επιφάνεια ή μη της γης, και που αιτούνται αξιόπιστη υποστήριξη εφαρμογών υψηλών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης, γίνεται συνεχώς πιο επιτακτική [1]. Έχει αποδειχτεί ότι η αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας μέσω σχεδίασης ολοένα και πιο πολύπλοκων τεχνικών και σχημάτων εκπομπής και λήψης στο ήδη διαθέσιμο εύρος ζώνης δεν αποτελεί μια βιώσιμη λύση, καθώς τα συστήματα πλησιάζουν ταχέως στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους σε όρους ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και αξιοπιστίας [2]. Αναγνωρίζοντας το πρόβλημα αυτό, τόσο ο ερευνητικός όσο και ο βιομηχανικός κόσμος στράφηκαν σε τεχνολογίες μετάδοσης υψηλών συχνοτήτων [3–5]. Συγκεκριμένα, δυο φάσματα συχνοτήτων εξετάζονται ήτοι: (i) terahertz (THz) [6–11] και (ii) οπτικές [12–14]. Στη συνέχεια της ενότητας αυτής παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές των ασύρματων THz και οπτικών συστημάτων. Συγκεκριμένα, η ενότητα 1.1 είναι αφιερωμένη στα ασύρματα THz και η ενότητα 1.2 στα ασύρματα οπτικά συστήματα.

### 1.1 Ασύρματα THz συστήματα

Ασύρματα THz συστήματα θεωρούνται τα συστήματα που λειτουργούν στη μπάντα συχνοτήτων των THz, δηλαδή στο φάσμα 0.1-10 THz. Το φάσμα των THz αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο για το επόμενο βήμα στην επόμενη γενιά (6G) ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών, λόγω του υψηλού διαθέσιμου εύρους ζώνης [15]. Οι εφαρμογές που θα ήταν εφικτή η χρήση ασύρματου THz συστήματος είναι πολλές, όπως για παράδειγμα η ασύρματη επέκταση οπτικών ινών [16]. Ο ρυθμός δεδομένων έχει αυξηθεί πάρα πολύ τα τελευταία χρόνια στις οπτικές ίνες αλλά και στις ασύρματες επικοινωνίες, όμως στις ασύρματες επικοινωνίες παρουσιάζεται ένα συγκεκριμένο πρόβλημα, καθώς οι ασύρματες επικοινωνίες περιορίζονται λόγω του φάσματος των συχνοτήτων που μπορούν να χρησιμοποιήσουν και επομένως έχουν μικρότερο εύρος ζώνης δεδομένων. Στο πρόβλημα αυτό, λύση μπορεί να προσφέρει η εφαρμογή της μπάντας των THz μεταξύ 200-300 GHz, όπου οι απώλειες λόγω της ατμόσφαιρας είναι μικρές και έχει πολύ πιο υψηλό ρυθμό διάδοσης δεδομένων λόγω του υψηλού εύρους φάσματος συχνοτήτων που λειτουργεί. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1, μπορεί να γίνει χρήση ασύρματου συστήματος THz αντί για εγκατάσταση και επέκταση οπτικών ινών η οποία πέρα από κοστοβόρα, είναι μια δύσκολη διαδικασία για να φτάσει σε μεγάλη απόσταση. Με αυτό το σκεπτικό λοιπόν, μπορούμε πολύ εύκολα να μεταφέρουμε την λογική του υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδο-



Σχήμα 1.1: Επέκταση οπτικών ινών

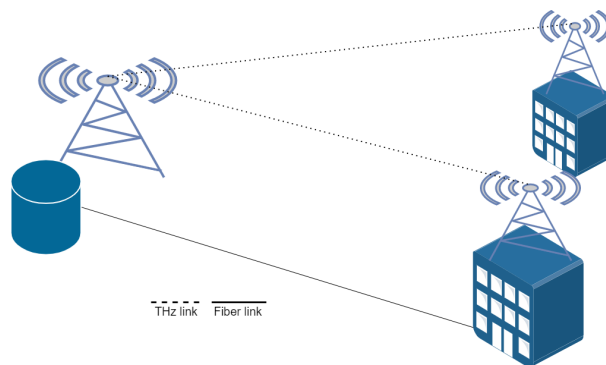


Σχήμα 1.2: Σημείο προς σημείο εφαρμογή P2P

μένων από τα επίγεια συστήματα επικοινωνιών, στα μη-επίγεια συστήματα όπου παρεμπιπτόντως, δεν υπάρχει δυνατότητα χρήσης οπτικών ινών. Η εφαρμογή THz καναλιού χρησιμοποιώντας δορυφόρους για την διάδοση του σήματος από τον δορυφόρο στο αεροπλάνο και αντίστροφα, αποτελεί λύση και μάλιστα το ατμοσφαιρικό κανάλι σε τόσο μεγάλη απόσταση από την επιφάνεια της γης, δεν παρουσιάζει μεγάλες απώλειες και μπορούμε να πετύχουμε υψηλότερο ρυθμό διάδοσης δεδομένων, αυτή την λογική χρησιμοποιούμε και σε αυτή την εργασία.

Επίσης, άλλη εφαρμογή είναι και η επικοινωνία σημείο προς σημείο (point to point - P2P) [16]. Συγκεκριμένα, οι εφαρμογές των P2P σεναρίων χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και μικρή καθυστέρηση δικτύου. Οι σημείο προς σημείο επικοινωνίες αποτελούν εναλλακτική λύση όταν δεν υπάρχει πρόσβαση σε υποδομές οπτικών ινών, είτε λόγω μη ύπαρξης τους είτε στην περίπτωση βλάβης στο δίκτυο οπτικών ινών. Επιπλέον, στις εμπορικές συναλλαγές υψηλού ρυθμού απαιτούν και υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, καθώς το περιβάλλον εμπορικών συναλλαγών αλλάζει συνεχώς και όταν 'κλείνει' μια εμπορική συμφωνία πρέπει οι μεταφορές να είναι στιγμιαίες. Για αυτό το λόγο, πολλοί έμποροι εγκαθιστούν τον εξοπλισμό τους κοντά σε βάσεις δεδομένων των εμπορεύσιμων αποθεμάτων για να επιτύχουν υψηλό ρυθμό διάδοσης δεδομένων. Λύση στο πρόβλημα μπορεί να προσφέρει το ασύρματο THz σύστημα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2, που χαρακτηρίζεται από υψηλό ρυθμό δεδομένων και μικρή καθυστέρηση δικτύου (latency) και επομένως η χρήση οπτικών ινών μπορεί να παρακαμφτεί σε περίπτωση που δεν υπάρχει πρόσβαση σε δίκτυο οπτικών ινών ή δεν υπάρχει δυνατότητα χρήσης λόγω βλάβης. Παρόμοια με το προηγούμενο παράδειγμα εφαρμογής, μπορούμε να μεταφέρουμε το επίγειο σύστημα P2P σε μη-επίγειο σύστημα επικοινωνιών δορυφόρου αεροπλάνου για επίτευξη υψηλού ρυθμού με μικρή καθυστέρηση.

Επιπρόσθετα, η εναλλακτική σύνδεση εταιριών για λόγους ασφάλειας, αποτελεί άλλη μια εφαρμογή ασύρματου συστήματος THz [16]. Αναλυτικότερα, η εφαρμογή αυτή αφορά στην ασφαλή σύνδεση σε δεδομένα όταν υπάρξει κάποια βλάβη ή κάποιο πρόβλημα στην βασική σύνδεση και δεν υπάρχει εναλλακτική σύνδεση μέσω οπτικών ινών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3. Άρα, η χρήση THz



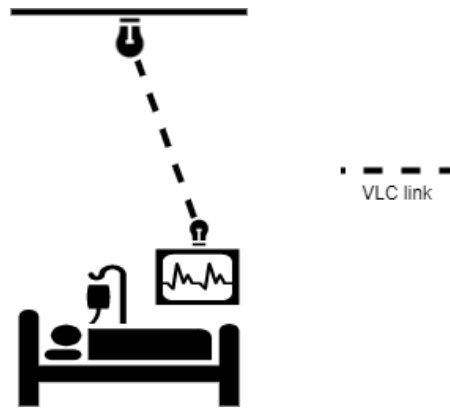
Σχήμα 1.3: Εναλλακτική σύνδεση σε αρχεία ασφαλείας

ασύρματου συστήματος μπορεί να εφαρμοστεί, ακόμη και για χρήση από διαφορετικές εταιρίες ως η κύρια σύνδεση με τα αντίγραφα ασφαλείας της εκάστοτε εταιρίας, να εξυπηρετήσει δηλαδή κάποια δίκτυα επιχειρήσεων. Η παραπάνω εφαρμογή του ασύρματου THz συστήματος μπορεί να υιοθετηθεί και σε ένα μη-επίγειο ασύρματο σύστημα επικοινωνιών, όπου ο επιβάτης αεροπλάνου μπορεί να έχει άμεση πρόσβαση στα δεδομένα της εταιρίας λόγω του υψηλού ρυθμού μεταφοράς δεδομένων όπου κι αν βρίσκεται χρησιμοποιώντας το THz κανάλι αεροπλάνου δορυφόρου, όπως εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία.

Αν και η εφαρμογή THz ασύρματου συστήματος προσφέρει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης με πολύ μικρή καθυστέρηση, δεν αποτελεί πανάκεια, δηλαδή υπάρχουν μερικοί περιορισμοί που αφορούν τα χαρακτηριστικά του καναλιού στις συχνότητες THz (0.1-10THz). Το σημαντικότερο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η εξασθένιση του κύματος THz λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των αέριων μορίων ακόμη και σε 'καθαρό' φαινομενικά κανάλι [17]. Επιπλέον, σε αυτές τις υψηλές συχνότητες υπάρχει σημαντική απώλεια διάδοσης που έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της μέγιστης απόστασης που μπορεί να είναι αποδοτικό το σύστημα [18]. Επίσης, λόγω της υψηλής συχνότητας υπάρχει πολύ μεγάλη πιθανότητα απώλειας διαδρομής, οι δύο προηγούμενοι περιορισμοί-χαρακτηριστικά του καναλιού στις συχνότητες THz μπορούν να αντιμετωπιστούν, έως μια πεπερασμένη απόσταση, με την χρήση κεραιών υψηλού κέρδους στους πομποδέκτες [18].

## 1.2 Ασύρματα οπτικά συστήματα επικοινωνιών

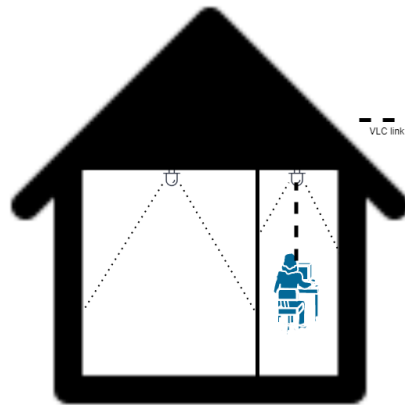
Με τον όρο ασύρματα οπτικά συστήματα επικοινωνιών (optican wireless communications - OWC), εννοούμε τα συστήματα επικοινωνιών που αποστέλλουν το σήμα τους στο κενό/αέρα χρησιμοποιώντας μεταδότες που μετατρέπουν το ηλεκτρικό σήμα σε οπτικό και λαμβάνεται από ένα δέκτη light emitting diode (LED) ή light amplification by stimulated emission of radiation (LASER) [19]. Τα συστήματα που λειτουργούν στο οπτικό φάσμα αποτελούνται από τις εξής περιοχές, του υπέρυθρου (infrared - IR), το φάσμα του οπτικού φωτός (visible light - VL) και το φάσμα του υπεριώδους (ultraviolet - UV) [20]. Το καθένα από αυτά τα φάσματα χρησιμοποιούνται για διαφορετικούς λόγους, προσφέροντας διαφορετικές δυνατότητες στη λειτουργία τους, συγκεκριμένα τα μήκη κύματος χωρίζονται ως εξής: IR στο διάστημα (750-1600nm), σε αυτό το φάσμα λειτουργούν συστήματα



Σχήμα 1.4: Ιατρικές εξετάσεις με χρήση VLC

με πομπούς LASER με υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Στα οπτικά συστήματα επικοινωνιών (visible light communication - VLC) το μήκος κύματος είναι από (390-750nm)[20], συγκεκριμένα η μπάντα που χρησιμοποιούν στο φάσμα των συχνοτήτων διακυμαίνεται από (400-800THz). Επομένως, λόγω της πολύ υψηλής συχνότητας που χρησιμοποιούν, έχει ως αποτέλεσμα να πετυχαίνει πολύ υψηλούς ρυθμούς διάδοσης δεδομένων και έτσι χρησιμοποιείται για πολλά συστήματα επικοινωνιών. Επίσης, επειδή το συγκεκριμένο φάσμα δεν απαιτεί άδεια χρήσης και οι πομποδέκτες δεν χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα αλλά ούτε είναι κοστοβόροι, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν LED [20, 21], έχει προσεγγίσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών. Τέλος, στο φάσμα της υπεριώδους επικοινωνίας UVC που χρησιμοποιεί μήκος κύματος από (200-280nm), η ηλιακή ακτινοβολία σε αυτό το φάσμα δεν επηρεάζει το κανάλι στην επιφάνεια της γης και είναι εφικτή η χρήση ανιχνευτών φωτονίων [20].

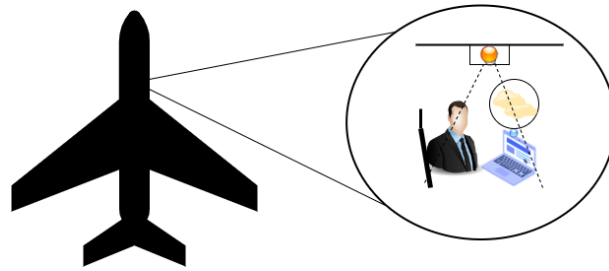
Τα ασύρματα οπτικά συστήματα επικοινωνιών VLC έχουν πολλές εφαρμογές, αφού πέρα του μεγάλου ρυθμού διάδοσης και εύρους ζώνης που έχουν, χαρακτηρίζονται και από υψηλή ασφάλεια και αξιοπιστία [21]. Αναλυτικότερα, καθώς το VLC σύστημα είναι ευαίσθητο σε παρεμβολές, επομένως αναγνωρίζει τις μεταβολές με μεγάλη ακρίβεια και πολύ γρήγορα, γεγονός που το καθιστά μια δελεαστική πρόταση για εφαρμογή στην περίθαλψη και την υγεία [21], όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Συγκεκριμένα, ο ασθενής που υπόκειται σε εξετάσεις που αφορούν την υγεία του χρησιμοποιώντας το ιατρικό μηχάνημα, αποστέλλει τα δεδομένα των εξετάσεων του σε ένα απομακρυσμένο σημείο όπου βρίσκεται ο ιατρός του και έχει άμεση πρόσβαση σε αυτές και την κατάσταση της υγείας του ασθενή. Με παρόμοιο τρόπο, η σύνδεση αυτή VLC μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο σύστημα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Για παράδειγμα ένας ασθενής που μεταφέρεται από ένα απομακρυσμένο σημείο σε ένα νοσοκομείο και βρίσκεται σε κρίσιμη κατάσταση, ο ιατρός του μπορεί να έχει άμεση πρόσβαση στην εξέλιξη της υγείας του μέσω των δεδομένων που λαμβάνει από το ιατρικό μηχάνημα που είναι συνδεδεμένος ο ασθενής, αποστέλλει τα δεδομένα με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια μέσω του συστήματος VLC. Επιπλέον, το σύστημα δεν προκαλεί παρεμβολή ραδιοσυχνοτήτων όπως κάποιο μέσο που λειτουργεί στο φάσμα της ραδιοσυχνότητας (radio frequency - RF), που αυτός είναι και ο λόγος που απαγορεύεται η χρήση τηλεφώνων στα νοσοκομεία και στα αεροπλάνα [19].



Σχήμα 1.5: Σύνδεση στο διαδίκτυο μέσω VLC

Επίσης, VLC σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί για να έχουμε πρόσβαση σε διαδικτυακές εφαρμογές και γενικά να έχουμε πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω VLC καναλιού στην κατοικία μας, αφού οι αποστάσεις μέσα στο σπίτι δεν είναι πολύ μεγάλες, οπότε μπορεί να εξυπηρετηθεί το κάθε δωμάτιο από ένα LED [22]. Έτσι, μπορούμε να πετύχουμε πολύ υψηλές ταχύτητες σύνδεσμενοι στο δίκτυο ασύρματα, γεγονός που προσφέρει στον χρήστη την ελευθερία κίνησης και άνεσης μέσα στο σπίτι, στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζεται το σχετικό σχεδιάγραμμα. Παρόμοια με τον οικιακό χρήστη διαδικτύου, μεταφέρουμε την ίδια λογική και στο κανάλι VLC μέσα στο αεροπλάνο για να προσφέρουμε στον επιβάτη την δυνατότητα ψυχαγωγίας αλλά και εργασίας κατά την διάρκεια του ταξιδιού του. Συγκεκριμένα, να επικοινωνεί ο τελικός χρήστης, δηλαδή ο επιβάτης με τον LED πομποδέκτη που θα βρίσκεται πάνω από το κάθισμα του. Οι εφαρμογές μετάδοσης εικόνας και ήχου σε πραγματικό χρόνο και η συνεχής πρόσβαση σε cloud server, απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και μεγάλο εύρος ζώνης [19]. Το γεγονός ότι μέσω του VLC καναλιού επιτυγχάνονται οι απαιτήσεις αυτές καθώς προσφέρει επίσης ασφάλεια και αξιοπιστία, είναι πολύ εύκολη και βολική η εφαρμογή του συστήματος VLC αεροπλάνου τελικού χρήστη που χρησιμοποιείται σε αυτή την διπλωματική εργασία.

Εν κατακλείδι, το ασύρματο σύστημα προσφέρει υψηλές ταχύτητες και πολύ μικρή καθυστέρηση που επιτυγχάνεται λόγω της πολύ υψηλής συχνότητας που χρησιμοποιεί το κανάλι, αλλά ακριβώς επειδή χρησιμοποιεί υψηλή συχνότητα υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί που το διέπουν. Αναλυτικότερα, για να είναι επιτυχής η σύνδεση πρέπει να υπάρχει διαρκώς οπτική επαφή πομπού και δέκτη, γεγονός που χαρακτηρίζει το κανάλι ευαίσθητο σε οπτικές παρεμβολές, δηλαδή διακόπτεται η σύνδεση όταν ο χρήστης βγαίνει εκτός οπτικού πεδίου του LED πομποδέκτη [22]. Επιπλέον, λόγω της μεγάλης εξασθένησης του σήματος στο κανάλι η μέγιστη απόσταση που μπορεί να λειτουργήσει το σύστημα περιορίζεται σημαντικά [23], συγκεκριμένα η μέγιστη απόσταση λειτουργίας χωρίς προβλήματα είναι λίγα μέτρα. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιούμε οπτικό σύστημα επικοινωνίας VLC αεροπλάνου τελικού χρήστη/επιβάτη και στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζεται μια οπτική απεικόνιση του συστήματος που εφαρμόζεται.



Σχῆμα 1.6: Εφαρμογή VLC επιβάτη αεροπλάνου

### 1.3 Κίνητρα και συνεισφορά

Τα κίνητρα για την εκπόνηση αυτής της εργασίας προήλθαν από την παρατήρηση της έλλειψης που υπάρχει στην παροχή υπηρεσιών διαδικτύου σε μη-επίγεια συστήματα επικοινωνιών, όπως στην ατμόσφαιρα της γης όπου μετακινούνται αεροπλάνα. Από την μελέτη επιστημονικών άρθρων γύρω από τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα πέρα της πέμπτης γενιάς και έκτης γενιάς, προσέξαμε πως η τεχνολογία VLC μπορεί να προσφέρει πολλές δυνατότητες για να επιτευχθεί ένα υβριδικό σύστημα που λειτουργεί με υψηλό εύρος ζώνης και χαρακτηρίζεται από ασφάλεια και αξιοπιστία [24–26]. Πολλά υβριδικά συστήματα έχουν προταθεί που λειτουργούν και με VLC όπως υβριδικά συστήματα Radio Frequency (RF)/VLC, αλλά για την δική μας περίπτωση δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε RF καθώς λειτουργεί σε αρκετά χαμηλή συχνότητα, γεγονός που το καθιστά μη βιώσιμη επιλογή για εφαρμογή. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψιν μας τις εξελίξεις στα οπτικά συστήματα επικοινωνιών αλλά και στα συστήματα που λειτουργούν στην ζώνη των THz, σχεδιάζουμε ένα υβριδικό σύστημα THz/VLC επικοινωνίας δορυφόρου αεροπλάνου και αεροπλάνου τελικού-χρήστη (επιβάτη) και αξιολογούμε τις επιδόσεις του.

### 1.4 Οργάνωση

Το υπόλοιπο της εργασίας οργανώνεται ως εξής: Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται ο τρόπος και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση του THz καναλιού, δηλαδή το κανάλι δορυφόρου αεροπλάνου. Στο κεφάλαιο 3 αντίστοιχα, μοντελοποιείται το VLC κανάλι αεροπλάνου τελικού χρήστη. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η υβριδική μοντελοποίηση της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας και παραδίδονται τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την μοντελοποίηση. Στο κεφάλαιο 5 γίνεται σχολιασμός για πιθανές μελλοντικές έρευνες σχετικές με το θέμα της εργασίας.



## Κεφάλαιον 2

# Μοντελοποίηση συστήματος επικοινωνίας δορυφόρου αεροπλάνου

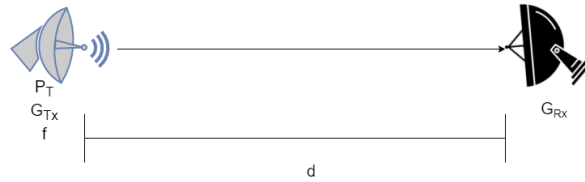
Μία από τις βασικές προκλήσεις που έχουν σήμερα οι αεροπορικές εταιρίες και οι βιομηχανίες αεροσκαφών, είναι η άνεση και η προσφορά υπηρεσιών στον ταξιδιώτη [27]. Μία από τις υπηρεσίες είναι η ασφαλής και αξιόπιστη παροχή σύνδεσης στο διαδίκτυο. Η εφαρμογή των υπαρχόντων τεχνικών και μεθόδων που χρησιμοποιούνται στα επίγεια συστήματα δεν είναι εφικτή, καθώς οι συνθήκες του μέσου διάδοσης διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό και η εφαρμογή τους παρουσιάζει πολλά προβλήματα. Η άλλη επιλογή που έχουμε είναι η χρήση των δορυφορικών συστημάτων επικοινωνιών (satellite communication – SatCom), που προσφέρει λύσεις στα προβλήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή επίγειων μεθόδων επικοινωνιών [27].

Το πρώτο βήμα για να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί ένα σύστημα επικοινωνίας αεροπλάνου δορυφόρου είναι η μοντελοποίηση του ασύρματου μέσου διάδοσης. Με άλλα λόγια, να εκφράσουμε με κάποιο μαθηματικό μοντέλο την εξασθένιση του σήματος καθώς διαδίδεται στο μέσο [17]. Στον τομέα των ατμοσφαιρικών συστημάτων επικοινωνιών έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές μοντελοποιήσεις για την προσομοίωση της εξασθένισης και των απωλειών διάδοσης που προκαλούνται στο σήμα λόγω του μέσου διάδοσης, δηλαδή το ατμοσφαιρικό κανάλι [28]. Στα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούνται διάφορες μπάντες συχνοτήτων για διαφορετικές εφαρμογές, συγκεκριμένα οι μπάντες χωρίζονται με βάση την συχνότητα λειτουργίας όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1 [29, 30]. Οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές που χρησιμοποιείται ένα δορυφορικό σύστημα είναι η ψηφιακή μετάδοση βίντεο (digital video broadcasting - DVB), για στρατιωτικούς σκοπούς όπως χρήση ραντάρ, απεικόνιση χαρτών και global positioning system (GPS), καθώς και για χρήση σε τηλεπικοινωνίες [31–33].

Η μπάντα των THz εμφανίστηκε σαν μια λύση που μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη στις δορυφορικές επικοινωνίες, εφόσον μπορεί να παρέχει υψηλή ταχύτητα διάδοσης δεδομένων λόγω του

Μπάντα	L	S	C	X	Ku	K	Ka	V
Εύρος συχνοτήτων (GHz)	1-2	2-4	4-8	8-12	12-18	18-26	26-40	40-75

Πίναξ 2.1: Φάσμα συχνοτήτων



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση παραμέτρων τύπου Friis

ανεχμετάλλευτου μεγάλου εύρους ζώνης [17, 34]. Ωστόσο, ένα από τα προβλήματα που χαρακτηρίζει τα συστήματα που λειτουργούν στο φάσμα των THz, είναι το πολύ μικρό μήκος κύματος ( $\lambda$ ) του σήματος που διαδίδεται στο μέσο και αλληλεπιδρά και με τα μικροσωματίδια τα οποία απορροφούν μέρος της ισχύς του σήματος και το μετατρέπουν σε κινητική ενέργεια, γεγονός που μεταφράζεται σε επιπρόσθετες απώλειες διαδρομής [18]. Αλλά, αποτελεί ευτύχημα το γεγονός ότι στις μη-επίγειες επικοινωνίες οι απώλειες διαδρομής λόγω μοριακής απορρόφησης δεν αποτελούν πρόβλημα όσο η κακή ευθυγράμμιση των κεραιών, καθώς ο λοβός εκπομπής είναι πολύ στενός και οι κεραιές που χρησιμοποιούνται έχουν υψηλή κατευθυντικότητα που έχει ως αποτέλεσμα η λαμβανόμενη ισχύ να είναι σημαντικά μειωμένη [34, 35].

## 2.1 Μοντελοποίηση γεωμετρικών απωλειών

Σε κάθε τηλεπικοινωνιακό σύστημα υπάρχει το φαινόμενο της απώλειας ακόμη και όταν δεν υπάρχει κάποιο εμπόδιο στο μέσο που ονομάζεται free space path loss (FSPL), που προέρχεται από το γεγονός ότι σε μια ασύρματη σύνδεση η λαμβανόμενη ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης του πομπού με τον δέκτη και εκφράζεται από τον τύπο του Friis όπως φαίνεται παρακάτω [17, 36]:

$$L_{FS} = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) - G_{Tx} - G_{Rx} \quad (2.1)$$

όπου  $f$  είναι η συχνότητα σε MHz,  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη σε χιλιόμετρα (km),  $G_{Tx}$  και  $G_{Rx}$  είναι το κέρδος της κεραιάς πομπού και δέκτη αντίστοιχα όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.1.

## 2.2 Μοντελοποίηση ατμοσφαιρικών απωλειών

Η ατμοσφαιρική απώλεια που παρουσιάζεται σε μια ακτινοβολία, στην περίπτωση μας μια δέσμη ισχύος μπορεί να περιγραφεί από τον νόμο Beer-Lambert όπως παρουσιάζεται παρακάτω [17]. Επιπλέον, μια άλλη ατμοσφαιρική απώλεια προκύπτει από την απορρόφηση της ισχύς του πομπού από

τα μικροσωματίδια του μέσου και η μετατροπή της σε κινητική ενέργεια, για ένα ανομοιογενές μέσο η μοντελοποίηση παρουσιάζεται στη συνέχεια [37]:

$$h_{at}(z) = \frac{P(z)}{P(0)} = e^{-\sigma z} \quad (2.2)$$

όπου  $P(0)$  είναι η ισχύς πομπού,  $P(z)$  είναι η ισχύς σε μία απόσταση  $z$  σε μέτρα (m) και  $\sigma$  είναι ο συντελεστής εξασθένησης που μετριέται σε  $(1/m)$  και μπορεί να προσδιοριστεί με βάση τη σχέση του μεγέθους των μικροσωματιδίων και του μήκους κύματος ( $\lambda$ ) του THz σήματος χρησιμοποιώντας τις θεωρίες της σκέδασης κύματος, επίσης μπορεί να μετρηθεί αμέσως από το μέσο διάδοσης. Μπορούμε να μετατρέψουμε την παράμετρο  $\sigma$  από  $1/m$  σε  $1/km$  ως εξής:

$$\sigma\left(\frac{1}{km}\right) = \frac{\sigma\left(\frac{dB}{km}\right) \times \ln(10)}{10} \quad (2.3)$$

παρόμοια, πρέπει να γίνει και μετατροπή του  $z$  σε km από m που ήταν.

Ενώ η μοντελοποίηση των μοριακών απωλειών ενός ομοιογενούς μέσου πάχους  $r$  μπορεί να βρεθεί από το νόμο Beer-Lambert

$$PL(f, r) = \exp\left[\sum_i k_a^i(f)r\right] \quad (2.4)$$

$k_a^i$  είναι ο συντελεστής απορρόφησης του  $i$ -οστού είδους απορρόφησης στη συχνότητα  $f$ , αναλυτικότερα μπορεί να εκφραστεί ως

$$k_a^i(f, p(h_{atm}), T(h_{atm})) = \frac{p(h_{atm})\mu_i N_A}{R_g T(h_{atm})} S^i(T(h_{atm})) F^i(f, p(h_{atm}), T(h_{atm})) \quad (2.5)$$

όπου  $p(h_{atm})$  είναι η πίεση,  $N_A$  είναι η σταθερά Avogadro,  $R_g$  η σταθερά του αερίου,  $S^i(T(h_{atm}))$  είναι η ένταση γραμμής,  $T(h_{atm})$  είναι η θερμοκρασία,  $F^i(f, p(h_{atm}), T(h_{atm}))$  είναι το πλάτος γραμμής απορρόφησης,  $h_{atm}$  είναι το ύψος της ατμόσφαιρας.

## 2.3 Μοντελοποίηση διαλείψεων

Ένα άλλο ελάττωμα που πρέπει να παραμετροποιήσουμε είναι η αναταραχή που ενεργεί πάνω στο σήμα και παρουσιάζει διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης, καθώς το μέσο είναι ανομοιογενές λόγω των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και της πίεσης [38]. Σε αυτή την ενότητα χρησιμοποιούμε μερικά από τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες ερευνητικές εργασίες για να χαρακτηρίσουν το μέσο διάδοσης. Συγκεκριμένα, παραμετροποίηση του μέσου για την ταραχή που υπάρχει σε αυτό καθώς διαδίδεται το κύμα [17].

### 2.3.1 Μοντελοποίηση μέσου λογάριθμο κανονικής κατανομής

Πολλές εργασίες χρησιμοποιούν την λογαριθμική (log-normal – LN) κατανομή για να περιγράψουν το ατμοσφαιρικό κανάλι [39–43]. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς στη [39] ερευνούν ένα οπτικό σύστημα επικοινωνίας δορυφόρου με επίγειο δέκτη, βγάζοντας συμπεράσματα για την αποδοτικότητα μέσω του bit error rate (BER), της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας (outage probability) και της μέσης χωρητικότητας (average capacity) του συστήματος, κάνοντας χρήση της διαμόρφωσης Binary Phase Shift Keying (BPSK). Επίσης, οι συγγραφείς στη [40] εξετάζουν την αποτελεσματικότητα της χρήσης αναδιαμορφωμένων ευφυών επιφανειών (Reconfigurable intelligent surface - RIS) για ανάκλαση και αναμετάδοση σήματος σε σύστημα Free-space optical (FSO) επικοινωνίας και υπολογίζουν το average symbol error rate (ASER), χρησιμοποιώντας διαμόρφωση Quadrature Amplitude Modulation (QAM). Επιπλέον, οι συγγραφείς στη [41] παρουσιάζουν ένα σύστημα FSO για βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας του BER κάνοντας χρήση τεχνικών single-input multiple-output (SIMO) με μέγιστη συνδυαστική αναλογία (maximal ratio combining – MRC), εφαρμόζοντας Differential phase shift keying με subcarrier intensity διαμόρφωση (SIM-DPSK). Παρόμοια, οι συγγραφείς στη [42] παρουσιάζουν πανομοιότυπο σύστημα με αυτό που αναφέρθηκε προηγουμένως στη [41], αλλά κάνοντας χρήση BPSK με subcarrier intensity διαμόρφωση υποστηρίζοντας την υπερίσχυση του σε σχέση με το SIM-DPSK, παραθέτοντας αριθμητικά αποτελέσματα για να υπερασπιστούν αυτό τους τον ισχυρισμό. Τέλος, οι συγγραφείς στη [43] αναλύουν το μέσο BER και την επίδοση της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας ενός συστήματος FSO, κάνοντας χρήση M-ary amplitude shift keying διαμόρφωση (M-ary ASK) και εξάγουν συμπεράσματα εξετάζοντας το σύστημα με χρήση και χωρίς SIMO τεχνικών.

Παρακάτω παραθέτονται τα μοντέλα και οι εξισώσεις που παρουσιάζονται στη κάθε εργασία που αναφέρεται παραπάνω. Αναλυτικότερα, στο οπτικό σύστημα της [39] ο δείκτης της λαμβανόμενης ισχύος της δέσμης του πομπού στο δέκτη δίνεται μετά από μαθηματικές απλοποιήσεις από τον τύπο:

$$\sigma_I = 2.25k^{7/6}sec^{11/6}(\zeta) \int_{h_0}^H C_n^2(h)(h - h_0)^{5/6} dh \quad (2.6)$$

όπου  $k$  είναι ο κυματάρηθος του σήματος και προκύπτει από τη σχέση

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.7)$$

και  $\lambda$  το μήκος κύματος, τα  $H$  και  $h_0$  είναι το ύψος του δορυφόρου και του δέκτη αντίστοιχα,  $\zeta$  είναι η κατακόρυφη γωνία ζενίθ του δορυφόρου,  $C_n^2(h)$  είναι η παράμετρος του δείκτη διάθλασης που προκύπτει από την σχέση

$$C_n^2(h) = 0.00594\left(\frac{w}{27}\right)^2(10^{-5}h)^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + A \exp\left(-\frac{h}{100}\right) \quad (2.8)$$

όπου  $h$  είναι το ύψος,  $w$  είναι η rms ταχύτητα του αέρα και  $A$  είναι η τιμή του  $C_n^2(0)$  μπορεί να βρεθεί από το ύψος του επίγειου δέκτη.

Χρησιμοποιώντας την LN κατανομή για το οπτικό σήμα προκύπτει η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function - PDF)

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_I^2}} \frac{1}{I} \exp\left(-\frac{(\ln \frac{I}{I_0} - \bar{E}[I])^2}{2\sigma_I^2}\right), I \geq 0 \quad (2.9)$$

όπου  $\bar{E}[I]$  είναι η μέση τιμή ακτινοβολίας και προκύπτει από.

$$\bar{E}(I) = -\frac{\sigma_I^2}{2} \quad (2.10)$$

Στη [40] θεωρώντας μια αυθαίρετη διαδικασία  $h(t)$  και χρησιμοποιώντας τη κατανομή LN για το FSO σύστημα προκύπτει η PDF

$$f_h(h) = \frac{1}{X\sigma_s\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[\ln(h) + 0.5\sigma_s^2]^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (2.11)$$

όπου  $\sigma_s$  είναι ο δείκτης ισχύος και προκύπτει από

$$\sigma_s = \exp(w_1 + w_2) + 1 \quad (2.12)$$

και

$$w_1 = \frac{0.49\sigma_2^2}{(1 + 0.18d^2 + 0.56\sigma_2^{12/5})^{7/6}} \quad (2.13)$$

$$w_2 = \frac{0.51\sigma_2^2(1 + 0.69\sigma_2^{12/5})^{-5/6}}{1 + 0.9d^2 + 0.62d^2\sigma_2^{12/5}} \quad (2.14)$$

στις παραπάνω εξισώσεις

$$d = \sqrt{(kD^2/4L)} \quad (2.15)$$

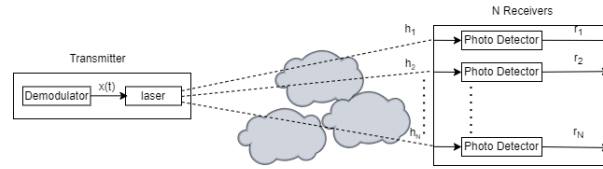
$k$  είναι ο κυματάρηθος και  $\lambda$  το μήκος κύματος,  $L$  είναι η απόσταση του πομπού από τον δέκτη,  $D$  είναι η κυκλική οπή κεραίας δέκτη,  $\sigma_2$  είναι η διακύμανση Rytov και προκύπτει από

$$\sigma_2^2 = 0.492C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2.16)$$

και  $C_n^2$  είναι η παράμετρος του δείκτη μέσου.

Στη [41] υποθέτοντας το σύστημα σαν ένα LASER για πομπό και  $N$  φώτο-ανιχνευτές που αποτελούν οι δέκτες όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 και το λαμβανόμενο σήμα στο κάθε δέκτη προκύπτει από την σχέση

$$r = \eta\mu P_t x(t) h_n + v_n \quad (2.17)$$



Σχήμα 2.2: FSO SIMO σύστημα με χρήση LN κατανομής μέσου διάδοσης

όπου  $\eta$  είναι ο συντελεστής μετατροπής οπτικό σε ηλεκτρικό σήμα,  $\mu$  είναι ο δείκτης διαμόρφωσης με  $0 \leq \mu \leq 1$ ,  $P_t$  είναι η ισχύς του σήματος πομπού,  $x(t)$  είναι το διαμορφωμένο σήμα εξόδου του SIM-DPSK,  $h_n$  και  $v_n$  είναι οι τυχαίες μεταβλητές που αφορούν τον θόρυβο του καναλιού και την αστοχία κεραιών που αφορούν το οπτικό σήμα με διακύμανση  $\sigma_x^2$ .

Χρησιμοποιώντας τον λογάριθμο κανονικής κατανομής (LN) για να χαρακτηριστεί η τυχαία μεταβλητή  $h_n$  που προκύπτει από τη σχέση

$$f_h(h_n) = \frac{\xi_n^2}{2(A_{on}h_{ln})\xi_n^2} h_n^{\xi_n^2-1} \exp(0.5\sigma_R^2\xi_n^2(1 + \xi_n^2)) \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln(\frac{h_n}{A_{on}h_{ln}}) + \sigma_R^2(0.5 + \xi_n^2)}{\sqrt{2\sigma_R^2}} \right) \quad (2.18)$$

όπου  $\xi_n$  και  $A_{on}$  είναι παράμετροι που προκύπτουν από το αποτέλεσμα του pointing error (PE),  $\sigma_R^2$  είναι η διακύμανση Rytov. Η απώλεια διαδρομής  $h_{ln}$  είναι μια ντετερμινιστική τιμή και εκφράζεται από την εκθετική σχέση του νόμου Beers-Lambert όπως τη σχέση (2.2) και  $\operatorname{erfc}()$  είναι η συνάρτηση σφάλματος. Παρόμοιες συναρτήσεις προκύπτουν από τις εργασίες [40, 42, 43] για την μοντελοποίηση της κατανομής που ακολουθεί το κανάλι κάνοντας χρήση της LN συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.

### 2.3.2 Μοντελοποίηση μέσου Γάμμα-Γάμμα κατανομής

Πολλές εργασίες επίσης, έχουν γίνει λαμβάνοντας υπόψιν τις ισχυρές ταραχές που παρουσιάζονται στο μέσο μετάδοσης ενός σήματος, όταν δηλαδή παρουσιάζονται διάφορα φαινόμενα που επηρεάζουν το κανάλι όπως βροχή, σύννεφα ή ομίχλη [17, 38, 44–47]. Αναλυτικότερα, Οι συγγραφείς στη [17], μοντελοποιούν ένα γενικό κανάλι για ασύρματη επικοινωνία με οπτική επαφή πομπού και δέκτη στο THz φάσμα, χρησιμοποιώντας Γάμμα-Γάμμα κατανομή για το στοχαστικό μέρος της μοντελοποίησης του καναλιού και βγάζουν συμπέρασμα μέσω του BER και της χωρητικότητας του καναλιού για την αποδοτικότητα του καναλιού. Επιπλέον, οι συγγραφείς στη [38], αντλούν συμπεράσματα για τα όρια του σφάλματος αποδοτικότητας ενός FSO συστήματος που λειτουργεί σε κανάλι ισχυρής ταραχής χρησιμοποιώντας την Γάμμα-Γάμμα κατανομή. Οι συγγραφείς στη [44], ερευνούν το BER της ζεύξης καθόδου της οπτικής επικοινωνίας μέσω ατμοσφαιρικού καναλιού εξασθένισης, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση differential phase shift keying (DPSK) σε σύστημα ετεροδύναμου δέκτη πολλαπλών διαφραγμάτων. Παρόμοια, οι συγγραφείς στη [45] αντλούν συμπέρασμα μέσω της αποδοτικότητας του BER σε ένα FSO σύστημα ρυθμιζόμενης έντασης άμεσης ανίχνευσης (intensity-modulated direct detection – IM/DD) κάνοντας χρήση on-off keying (OOK) και avalanche photodiode (APD) δέκτη, και οι διακυμάνσεις της έντασης μοντελοποιούνται με Γάμμα-Γάμμα κατανομή. Ενώ, οι συγγραφείς της [46] εξετάζουν ένα επικοινωνιακό σύστημα FSO πολλαπλών εισόδων και

εξόδων (multiple-input multiple-output – MIMO) μέσω Γάμμα-Γάμμα κατανομής καναλιού μέσω του ρυθμού σήματος προς θόρυβο. Τέλος, οι συγγραφείς της [47] παρουσιάζουν ένα σύστημα FSO και κάνουν μοντελοποίηση μέσω Γάμμα-Γάμμα κατανομής για να χαρακτηρίσουν την ισχυρή ταραχή στο μέσο διάδοσης και ερευνούν την αποδοτικότητα του συστήματος χρησιμοποιώντας διαμόρφωση Binary phase shift keying (BPSK) και Quadrature amplitude modulation (QAM).

Οι συναρτήσεις που αναπτύσσονται στις παραπάνω εργασίες παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια. Η μοντελοποίηση Γάμμα-Γάμμα του μέσου στη [17] γίνεται με τη χρήση της αντίστοιχης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (PDF)

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a}) \quad (2.19)$$

όπου  $K_{\alpha-\beta}()$  η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel  $\alpha$ - $\beta$  βαθμού και οι  $\alpha, \beta$  είναι ο ατμοσφαιρικός αριθμός μικρής και μεγάλης κλίμακας αντίστοιχα που προκύπτουν από τις σχέσεις

$$\alpha = \left( \exp \left[ \frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 0.65d^2 + 1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right)^{-1} \quad (2.20)$$

$$\beta = \left( \exp \left[ \frac{0.51\sigma_R^2(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{-5/6}}{(1 + 0.9d^2 + 0.62d^2\sigma_R^{12/5})} \right] - 1 \right)^{-1} \quad (2.21)$$

όπου η μεταβλητή  $d$  προκύπτει από την σχέση (2.15),  $\sigma_R^2$  είναι η διακύμανση Rytov.

Το σύστημα για την ζεύξη καθόδου στη [44] που διαδίδεται στο μέσο της ατμόσφαιρας εκφράζεται μέσω της PDF Γάμμα-Γάμμα κατανομής

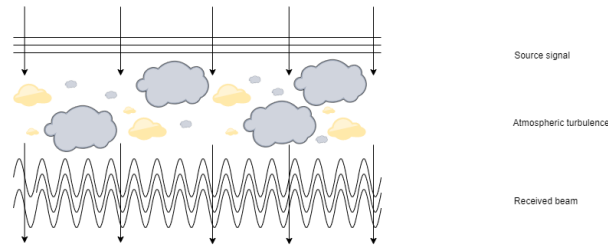
$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Omega} \left(\frac{I}{\Omega}\right)^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta\frac{I}{\Omega}}), I \geq 0 \quad (2.22)$$

όπου  $I$  είναι η λαμβανόμενη ακτινοβολία,  $\Omega$  είναι η μέση τιμή ακτινοβολίας,  $K_{\alpha-\beta}()$  η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel  $\alpha$ - $\beta$  βαθμού και οι  $\alpha, \beta$  είναι ατμοσφαιρικός αριθμός μικρής κλίμακας και μεγάλης κλίμακας αντίστοιχα που προκύπτουν από τις σχέσεις

$$\alpha = \frac{1}{\sigma_X^2} = \frac{1}{\exp \left( \frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right) - 1} \quad (2.23)$$

$$\beta = \frac{1}{\sigma_Y^2} = \frac{1}{\exp \left( \frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right) - 1} \quad (2.24)$$

η διακύμανση Rytov  $\sigma_R^2$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκφράσει το μέγεθος της ταραχής του καναλιού από την σχέση (2.6). Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται το σχετικό μοντέλο. Στις εργασίες [38, 45–47] χρησιμοποιούνται παρόμοιες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας Γάμμα-Γάμμα κατανομής.



Σχήμα 2.3: Επηρεασμός σήματος από την ταραχή του μέσου διάδοσης

### 2.3.3 Μοντελοποίηση μέσου Exponential Weibull κατανομής

Η μοντελοποίηση μέσου Exponential Weibull κατανομής είναι μια παρόμοια μοντελοποίηση με την προηγούμενη Γάμμα-Γάμμα και πολλές εργασίες έχουν γίνει με αυτή [48–52] καθώς μπορεί να χαρακτηρίσει μέσο διάδοσης ισχυρής ταραχής. Συγκεκριμένα οι συγγραφείς στη [48], μοντελοποιούν ένα κανάλι μέσης χωρητικότητας, οπτικού ασύρματου συστήματος μέσου αδύναμης και ισχυρής ταραχής. Συμπεραίνουν ότι στην αδύναμη ταραχή, η χωρητικότητα που ελαττώνεται όσο η απόσταση πομπού-δέκτη αυξάνεται μπορεί να αντιμετωπιστεί απλά αυξάνοντας το διάφραγμα ανίχνευσης, αλλά δεν ισχύει το ίδιο σε μέσο διάδοσης ισχυρής ταραχής. Επιπλέον, οι συγγραφείς στη [49] εξετάζουν ένα υβριδικό κανάλι RF/FSO για ασφαλή μετάδοση δεδομένων για σημαντικά αρχεία, μοντελοποιώντας το FSO κανάλι μέσου Exponential Weibull κατανομής και τέλος, βγάζουν συμπέρασμα για την αποδοτικότητα του συστήματος από τα στατιστικά αποτελέσματα της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας και του BER. Στη [50] ο συγγραφέας ερευνά την αποδοτικότητα υβριδικού συστήματος RF/FSO όπου στο σύστημα αυτό η σύνδεση οπτικής επαφής (line of sight – LOS) FSO μοντελοποιείται με την κατανομή Exponential Weibull, όπου στο σύστημα αυτό πολλαπλοί χρήστες, που είναι ο πομπός, επικοινωνούν με τον προορισμό μέσα από πολλούς αναμεταδότες decode and forward (df) και επιλέγεται ο καταλληλότερος, τέλος βγάζουν συμπεράσματα από τα αποτελέσματα της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας και σφάλματος. Επίσης, οι συγγραφείς στη [51] παρουσιάζουν ένα υβριδικό σύστημα RF/FSO χρησιμοποιώντας αναμεταδότες amplify and forward (af) και εφαρμόζοντας την μοντελοποίηση του καναλιού FSO μέσου Exponential Weibull κατανομής και αντλούν συμπεράσματα από την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας και προσκομίζουν το BER του συστήματος χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης. Τέλος, οι συγγραφείς στη [52] παρουσιάζουν την αποδοτικότητα υβριδικού RF/FSO συστήματος βασισμένο σε αναμετάδοση df, χρησιμοποιώντας για την μοντελοποίηση του FSO την Exponential Weibull κατανομή για να χαρακτηρίσει την αναταραχή του μέσου και παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας και τη μέση πιθανότητα BER.

Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες εργασίες παρουσιάζονται ως ακολούθως, χρησιμοποιώντας την Exponential Weibull κατανομή μέσου για την μοντελοποίηση και τις αντίστοιχες PDF και CDF. Συγκεκριμένα στη [48] χρησιμοποιείται η ακόλουθη PDF

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{ab}{c} \left(\frac{h_a}{c}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{h_a}{c}\right)^b\right] \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{h_a}{c}\right)^b\right]\right]^{a-1}, h_a > 0 \quad (2.25)$$

όπου a,b,c είναι οι συναρτήσεις του δείκτη ακτινοβολίας  $\sigma_T^2$  που προκύπτουν όπως φαίνεται παρακάτω



$$a = \frac{7.220\sigma_I^{2/3}}{\Gamma(2.487\sigma_I^{2/6} - 0.104)} \quad (2.26)$$

$$b = 1.012(a\sigma_I^2)^{-13/25} + 0.142 \quad (2.27)$$

$$c = \frac{1}{a\Gamma(1 + 1/b)g_1(a, b)} \quad (2.28)$$

$$g_1(a, b) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j \Gamma(a)}{j!(j+1)^{1+1/b} \Gamma(a-j)} \quad (2.29)$$

Στη [52] χρησιμοποιείται η μοντελοποίηση μέσου Exponential Weibull κατανομής για το κανάλι FSO ως προς το κατώφλι θορύβου, συγκεκριμένα η PDF είναι

$$f_{\gamma_{s,r}}(\gamma) = \frac{\alpha\beta}{2\bar{\gamma}_{s,r}\eta^\beta} \left(\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{s,r}}}\right)^{\beta-2} \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{s,r}}}\right)^\beta\right] \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{s,r}}}\right)^\beta\right]\right]^{\alpha-1} \quad (2.30)$$

ενώ η CDF είναι η ακόλουθη

$$F_{\gamma_{s,r}}(\gamma) = \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{s,r}}}\right)^\beta\right]\right]^\alpha \quad (2.31)$$

όπου  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$ ,  $\eta > 0$  είναι οι παράμετροι διαβάθμισης του ατμοσφαιρικού καναλιού,  $\gamma$  είναι η σηματοθορυβική σχέση (signal-to-noise-ratio - SNR) και  $\bar{\gamma}_{s,r}$  είναι η μέση τιμή SNR στον πομπό, δηλαδή στον αναμεταδότη. Οι εργασίες [49–51] χρησιμοποιούν παρόμοιες συναρτήσεις με τις παραπάνω.

### 2.3.4 Μοντελοποίηση μέσου Weibull κατανομής

Η μοντελοποίηση μέσου Weibull ανήκει στην ίδια οικογένεια συναρτήσεων με την προηγούμενη Exponential Weibull κατανομής και είναι μια απλουστευμένη μορφή της, η οποία χρησιμοποιείται σε αρκετές εργασίες για να εκφράσει το μέσο διάδοσης αλλά και την ενέργεια του αέρα [53–56]. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς στη [53] χρησιμοποιούν την κατανομή Weibull με τις κατάλληλες τιμές στις παραμέτρους της συνάρτησης και συλλέγοντας δεδομένα για περίοδο ενός χρόνου για την μέση ταχύτητα του αέρα σε διαφορετικά υψόμετρα βγάζουν συμπεράσματα για ποια περίοδο συγκεντρώνεται η μεγαλύτερη αιολική ενέργεια. Στη [54] οι συγγραφείς χρησιμοποιούν την κατανομή Weibull μαζί με την maximum entropy principle (MEP) για να μοντελοποιήσουν την ταχύτητα του αέρα για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας και τα τελικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η Weibull κατανομή είναι κατάλληλη για να χαρακτηρίσει το φαινόμενο. Οι συγγραφείς στη [55] εξετάζουν την μόλυνση του αέρα χρησιμοποιώντας μετρήσεις από ένα radio acoustic sounding system (RASS) και

διάφορες θερμοκρασίες εφαρμόζοντας τες μαζί με την κατανομή Weibull για την μοντελοποίηση του αέρα και την Γκαουσιανή κατανομή για την μέτρηση το βράδυ, συμπεραίνοντας την καταλληλότητα της κατανομής Weibull. Τέλος στη [56] οι συγγραφείς, ερευνούν μια γενική μέθοδο για χρήση PDF και CDF για μια οικογένεια συναρτήσεων κατανομής Weibull για μοντελοποίηση μέσου που χρησιμοποιείται για την διάδοση Γκαουσιανών δεσμών κυμάτων.

Συγκεκριμένα, από την [56] οι συναρτήσεις PDF και CDF αντίστοιχα για μια τυχαία μεταβλητή  $I$  παραθέτονται παρακάτω

$$f_W(I) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{I}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{I}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2.32)$$

και η CDF

$$F_W(I) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{I}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2.33)$$

όπου  $\beta > 0$  είναι η παράμετρος μορφής που σχετίζεται με τον δείκτη ακτινοβολίας  $\sigma_I$  και  $\eta > 0$  είναι η παράμετρος κλίμακας που σχετίζεται με την  $\beta$ . Ο δείκτης ακτινοβολίας προκύπτει από

$$\sigma_I^2 = \frac{\Gamma(1 + 2/\beta)}{[\Gamma(1 + 1/\beta)]^2} - 1 \approx \beta^{-11/6} \quad (2.34)$$

και η παράμετρος κλίμακας από

$$\eta = \frac{1}{\Gamma(1 + 1/\beta)} \quad (2.35)$$

## 2.4 Μοντελοποίηση αστοχίας κεραιών

Μία ακόμη παράμετρο που πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας και είναι απαραίτητο να μοντελοποιήσουμε, είναι η απώλεια λόγω αστοχίας κεραιών πομπού-δέκτη. Πολλές εργασίες λαμβάνουν σοβαρά αυτή τη παράμετρο καθώς είναι ένα φυσικό φαινόμενο που δεν μπορεί να εξαλειφθεί εξολοκλήρου και υπάρχει η πιθανότητα να συμβεί από εξωγενείς παράγοντες [17, 43, 48, 49]. Αναλυτικότερα, στις προαναφερθείς εργασίες γίνεται μοντελοποίηση θεωρώντας κυκλικό διάφραγμα ανίχνευσης στο δέκτη, και η Γκαουσιανή δέσμη ακτινοβολίας λόγω της αστοχίας των κεραιών προκύπτει από την παρακάτω αντίστοιχη PDF

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\gamma^2}{A_0 \gamma^2} h_p^{\gamma^2-1}, 0 \leq h_p \leq A_0 \quad (2.36)$$

όπου

$$\gamma = \frac{w_{zeq}}{2\sigma_s} \quad (2.37)$$

είναι ο λόγος του ισοδύναμου της δέσμης ακτινοβολίας στο δέκτη  $w_{zeq}$  και το σφάλμα προσανατολισμού τυπικής απόκλισης  $\sigma_s$  και

$$w_{zeq}^2 = w_z^2 \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)} \quad (2.38)$$

όπου  $w_{zeq}$  το ισοδύναμο πλάτος λοβού εκπομπής beam width και  $w_z$  το μέσο πλάτος σε απόσταση  $z$  όπου σε μια Γκαουσιανή δέσμη προκύπτει από

$$w_z = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{z\lambda}{\pi w_0^2} \right)^2} \quad (2.39)$$

όπου  $w_0$  το αντίστοιχο πλάτος λοβού στην απόσταση  $z = 0$

$$A_0 = [\operatorname{erf}(v)]^2 \quad (2.40)$$

το κλάσμα της λαμβανόμενης ισχύος στην απόσταση  $r = 0$ , όπου  $r$  εκφράζει την αστοχία μεταξύ του κέντρου της κυκλικής δέσμης ακτινοβολίας και το κέντρο του κυκλικού διαφράγματος δέκτη,  $\operatorname{erf}$  είναι η συνάρτηση σφάλματος και

$$v = \frac{\sqrt{\pi}\alpha}{\sqrt{2}w_z} \quad (2.41)$$

όπου  $\alpha$  είναι η ακτίνα του ανοίγματος του δέκτη.

Συγκεκριμένα, πρέπει να βρεθεί η κατανομή που ακολουθεί το σήμα στο μέσο διάδοσης/κανάλι. Πολλές εργασίες χρησιμοποιούν την λογαριθμική (log-normal – LN) κατανομή για να περιγράψουν το ατμοσφαιρικό κανάλι. Επιπλέον, στον τομέα των οπτικών επικοινωνιών δορυφορικών δικτύων, όπου η ευθυγράμμιση των LASER που βρίσκονται στους πομποδέκτες πρέπει να είναι απόλυτη, η λογαριθμική κατανομή δεν μπορεί να εκφράσει το κανάλι και πρέπει να εφαρμοστεί μια πιο αυστηρή μαθηματική μοντελοποίηση χρησιμοποιώντας την κατανομή Γάμμα-Γάμμα (GG) [44]. Μία σχετικά νεότερη προσέγγιση και εφαρμογή είναι η εκθετική Weibull (exponential Weibull – EW) κατανομή. Που μπορεί να εκφράσει το ατμοσφαιρικό κανάλι αδύναμης ταραχής όταν το κανάλι είναι φαινομενικά κενό και το μόνο που επηρεάζει το σήμα είναι η απορρόφηση του σήματος από τα μικροσωματίδια, καθώς και μέσης ταραχής και ισχυρής ταραχής όταν υπάρχουν σύννεφα στο μέσο μετάδοσης του σήματος [17]. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιούμε για λόγους διευκόλυνσης κατανομή που ανήκει στην οικογένεια της EW κατανομής αλλά μια απλουστευμένη μορφή της, που επίσης μπορεί να εκφράσει τις διάφορες ταραχές του καναλιού, συγκεκριμένα την κατανομή Weibull [56].

## 2.5 Μοντελοποίηση συστήματος

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, θεωρούμε την κάτω ζεύξη ενός συστήματος δορυφόρου αεροπλάνου. Το σύμβολο βασικής ζώνης,  $s$ , μετατρέπεται μέσω του πομπού του δορυφόρου σε σήμα στην ζώνη των THz και αποστέλλεται στο δέκτη του αεροπλάνου. Ο δέκτης στο αεροπλάνο μετατρέπει το

λαμβάνόμενο σήμα από την ζώνη των THz στην βασική, με αποτέλεσμα, το ισοδύναμο λαμβανόμενο σήμα να δίνεται από την σχέση

$$y = h_{sa}s + n \quad (2.42)$$

όπου  $h_{sa}$  παριστάνει το ισοδύναμο βασικής ζώνης κανάλι δορυφόρου αεροπλάνου και  $n$  ο προσθετικός Γκαουσιανός λευκός θόρυβος. Ο προσθετικός λευκός θόρυβος μοντελοποιείται σαν μια Γκαουσιανή διαδικασία με μέση τιμή 0 και διακύμανση  $N_0$ .

Το ισοδύναμο κανάλι βασικής ζώνης μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν το γινόμενο ενός ντετερμινιστικού και ενός στοχαστικού όρου, δηλαδή

$$h_{sa} = h_p h_s \quad (2.43)$$

όπου  $h_p$  μοντελοποιεί τις γεωμετρικές ατμοσφαιρικές και μοριακές απώλειες, ενώ το  $h_s$  μοντελοποιεί τις διαλείψεις και την αστοχία των κεραιών του πομπού και του δέκτη. Με άλλα λόγια, το  $h_p$  μέρος μπορεί να αναλυθεί ως

$$h_p = h_g h_{at} h_{ml} \quad (2.44)$$

όπου  $h_g$  είναι ο συντελεστής γεωμετρικών απωλειών,  $h_{at}$  ο συντελεστής ατμοσφαιρικών απωλειών, και  $h_{ml}$  ο συντελεστής μοριακών απωλειών. Στην παρούσα εργασία μοντελοποιούμε τις γεωμετρικές απώλειες σύμφωνα με τη σχέση (2.1) που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.1.

$$h_g = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) - G_{Tx} - G_{Rx} \quad (2.45)$$

Παρόμοια, για την μοντελοποίηση των ατμοσφαιρικών απωλειών χρησιμοποιούμε τη σχέση (2.2) που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.2.

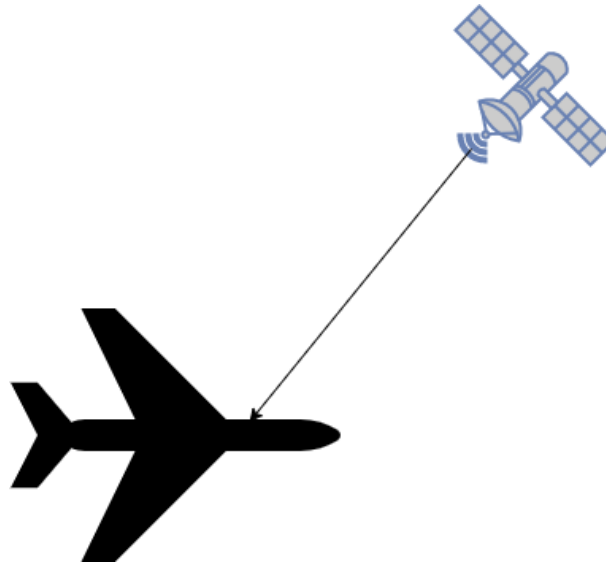
$$h_{at} = e^{-\sigma z} \quad (2.46)$$

Τέλος, για την μοντελοποίηση των μοριακών απωλειών χρησιμοποιούμε τη σχέση (2.4) που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.2.

$$h_{ml} = \exp \left[ \sum_i k_a^i(f)r \right] \quad (2.47)$$

Συνεπώς, από τις (2.45), (2.46), (2.47) η (2.44) γίνεται

$$h_p = [32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) - G_{Tx} - G_{Rx}] \exp \left[ -\sigma z + \sum_i k_a^i(f)r \right] \quad (2.48)$$



Σχήμα 2.4: Επικοινωνία δορυφόρου αεροπλάνου

ο στοχαστικός όρος της (2.43) μπορεί να γραφτεί ως

$$h_{sa} = h_a h_m \quad (2.49)$$

όπου το  $h_a$  μοντελοποιεί τις διαλείψεις εξαιτίας των μορίων της ατμόσφαιρας και  $h_m$  μοντελοποιεί τις διαλείψεις στόχευσης κεραίας. Για την μοντελοποίηση του  $h_a$  χρησιμοποιούμε το μοντέλο που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 2.3.4, ενώ για την μοντελοποίηση του  $h_m$  αυτό που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.4.

Σε αυτή την ενότητα, γίνεται εισαγωγή και ανάλυση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική εργασία, για την μοντελοποίηση του καναλιού μεταξύ δορυφόρου και αεροπλάνου. Στις ασύρματες επικοινωνίες στο φάσμα των THz συχνοτήτων, λόγω του μικρού μήκους κύματος  $\lambda$  το κύμα χάνει ισχύ μέσω της απορρόφησης της από τα μικροσωματίδια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Τα σωματίδια που επηρεάζουν περισσότερο το σύστημα είναι τα μόρια του νερού [17, 29] διότι το μέγεθός τους είναι συγκρίσιμο με το  $\lambda$  του κύματος που εκπέμπεται στο κανάλι της ατμόσφαιρας.

Στην εργασία γίνεται στατιστική ανάλυση για την απόδοση του καναλιού του συστήματος δορυφόρου αεροπλάνου. Το στατιστικό κομμάτι αναλύεται από την μοντελοποίηση της ατμόσφαιρας και της ευθυγράμμισης του δορυφόρου με το αεροπλάνο. Οι πιο συνηθισμένες κατανομές που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εργασίες όπως η λογαριθμική κατανομή, δεν είναι επαρκής για να χαρακτηρίσει το δυναμικό και συνεχώς μεταβαλλόμενο κανάλι της ατμόσφαιρας. Καθώς το αεροπλάνο μετακινείται έτσι μεταβάλλεται και το κανάλι της ατμόσφαιρας (σύννεφα, βροχή) και ισχύουν διαφορετικές συνθήκες, επομένως καταλληλότερη κατανομή που επιλέχθηκε για να χαρακτηρίσει την περίπτωση αυτής της εργασίας είναι η κατανομή Weibull [56] όπου δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα για το κανάλι της ατμόσφαιρας στο φάσμα των THz συχνοτήτων.

Το παρακάτω θεώρημα επιστρέφει τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (probability density function – PDF) και συγκεντρωτικής πιθανότητας (cumulative distribution function – CDF) της  $h_{sa}$ .

**Θεώρημα:** Η PDF και η CDF του  $h_{sa}$  δύνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις

$$f_{h_{sa}}(x) = \frac{1}{l} \frac{\Xi}{A_0^\Xi} \left(\frac{x}{l}\right)^{k-1} \Gamma\left(-\frac{\Xi-k}{k}, \frac{x^k}{l^k} A_0^{-k}\right) \quad (2.50)$$

$$F_{h_{sa}}(x) = 1 - \frac{\Xi l^{-\Xi} x^\Xi \Gamma\left(-\frac{\Xi}{k}, l^{-k} x^k A_0^{-k}\right)}{A_0^\Xi} \quad (2.51)$$

**Απόδειξη:** Για την μοντελοποίηση του συστήματος χρησιμοποιήσαμε την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) Weibull όπου η συνάρτηση μιας τυχαίας μεταβλητής  $x$  είναι

$$f_{h_a}(k, l, x) = \frac{k}{l} \left(\frac{x}{l}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{x^k}{l^k}\right) \quad (2.52)$$

όπου  $k > 0$ , είναι μία παράμετρος που σχετίζεται με το δείκτη της ακτινοβολίας και  $l > 0$  είναι η παράμετρος κλίμακας που εξαρτάται από το  $k$  και σχετίζεται με την μέση τιμή της ακτινοβολίας. Η συσχέτιση της  $l$  με τη  $k$  προκύπτει ως ακολούθως.

$$l = \frac{1}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.53)$$

Όπου  $h_a$  είναι ο συντελεστής εξασθένισης σήματος του καναλιού δορυφόρου αεροπλάνου, και όπως αναφέρεται παραπάνω ακολουθεί Weibull κατανομή. Η (2.52) εκφράζει την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, ενώ στην σχέση (2.54) εκφράζεται η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής Weibull (CDF) μιας τυχαίας μεταβλητής  $x$ .

$$F_{h_a}(k, l, x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^k}{l^k}\right) \quad (2.54)$$

Η μοντελοποίηση του συντελεστή της εξασθένισης λόγω ευθυγράμμισης δορυφόρου αεροπλάνου  $h_m$  μπορεί να εκφραστεί μέσω της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας

$$f_{h_m}(A_0, \Xi, x) = \frac{\Xi}{A_0^\Xi} x^{\Xi-1}, 0 \leq x \leq A_0 \quad (2.55)$$

όπου  $\Xi$  και  $A_0$  είναι οι αντίστοιχες μεταβλητές  $\gamma^2$  και  $A_0$  στην εξίσωση (2.36).

Επομένως, το κανάλι δορυφόρου αεροπλάνου μπορεί να χαρακτηριστεί ως το άθροισμα των  $f_{h_a}$  και  $f_{h_m}$  και έτσι εκφράζεται στατιστικά το κανάλι.

$$f_{h_{sa}} = f_{h_a} f_{h_m} \quad (2.56)$$

Τα  $h_a$  και  $h_m$  είναι ανεξάρτητες τυχαίες διαδικασίες, άρα η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) για την εξασθένιση του σήματος μπορεί να εκφραστεί ως

$$f_{h_{sa}}(x) = \int_0^{A_0} \frac{1}{y} f_{h_a}\left(k, l, \frac{x}{y}\right) f_{h_m}(A_0, \Xi, y) dy$$

$$f_{h_{sa}}(x) = \int_0^{A_0} \frac{1}{y} \frac{k}{l} \left(\frac{x}{l}\right)^{k-1} y^{1-k} \exp\left(-\frac{\left(\frac{x}{y}\right)^k}{l^k}\right) f_{h_m}(A_0, \Xi, y) dy$$

$$f_{h_{sa}}(x) = \frac{k}{l} \left(\frac{x}{l}\right)^{k-1} \int_0^{A_0} y^{-k} \exp\left(-\frac{\left(\frac{x}{y}\right)^k}{l^k}\right) f_{h_m}(A_0, \Xi, y) dy$$

$$f_{h_{sa}}(x) = \frac{k}{l} \left(\frac{x}{l}\right)^{k-1} \int_0^{A_0} y^{-k} \exp\left(-\frac{\left(\frac{x}{y}\right)^k}{l^k}\right) \left(\frac{\Xi}{A_0^\Xi} y^{\Xi-1}\right) dy$$

$$f_{h_{sa}}(x) = \frac{k}{l} \left(\frac{x}{l}\right)^{k-1} \frac{\Xi}{A_0^\Xi} \int_0^{A_0} y^{\Xi-k-1} \exp\left(-\frac{\left(\frac{x}{y}\right)^k}{l^k}\right) dy$$

η οποία μπορεί να γραφεί σε κλειστή μορφή ως

$$f_{h_{sa}}(x) = \frac{k}{l} \left(\frac{x}{l}\right)^{\Xi-1} \frac{\Xi}{A_0^\Xi} \frac{A_0^{1+\Xi-k-1} \left(\frac{x^k}{l^k} A_0^{-k}\right)^{\frac{1+\Xi-k-1}{k}} \Gamma\left(-\frac{1+\Xi-k-1}{k}, \frac{x^k}{l^k} A_0^{-k}\right)}{k}$$

$$f_{h_{sa}}(x) = \frac{1}{l} \frac{\Xi}{A_0^\Xi} \left(\frac{x}{l}\right)^{\Xi-1} \Gamma\left(-\frac{1+\Xi-k-1}{k}, \frac{x^k}{l^k} A_0^{-k}\right)$$

$$f_{h_{sa}}(x) = \frac{1}{l} \frac{\Xi}{A_0^\Xi} \left(\frac{x}{l}\right)^{\Xi-1} \Gamma\left(-\frac{\Xi-k}{k}, \frac{x^k}{l^k} A_0^{-k}\right) \quad (2.57)$$

και η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (CDF) του καναλιού μπορεί επομένως να εκφραστεί ως ακολούθως

$$F_{h_{sa}}(x) = \int_0^{A_0} F_{h_a}\left(k, l, \frac{x}{y}\right) f_{h_m}(A_0, \Xi, y) dy$$

$$F_{h_{sa}}(x) = \int_0^{A_0} \left(1 - \exp\left[-\frac{x^k}{y^k l^k}\right]\right) f_{h_m}(A_0, \Xi, y) dy$$

$$F_{h_{sa}}(x) = 1 - \int_0^{A_0} \left(\exp\left[-\frac{x^k}{y^k l^k}\right]\right) f_{h_m}(A_0, \Xi, y) dy$$

$$F_{h_{sa}}(x) = 1 - \int_0^{A_0} \left( \exp \left[ -\frac{x^k}{y^k l^k} \right] \right) f_{h_m}(A_0, \Xi, y) dy$$

$$F_{h_{sa}}(x) = 1 - \frac{\Xi}{A_0^\Xi} \int_0^{A_0} \exp \left[ -\frac{x^k}{y^k l^k} \right] y^{\Xi-1} dy$$

η οποία μπορεί να γραφεί σε κλειστή μορφή ως

$$F_{h_{sa}}(x) = 1 - \frac{\Xi}{A_0^\Xi} \frac{A_0^\Xi (l^{-k} x^k A_0^{-k})^{\frac{\Xi}{k}} \Gamma \left( -\frac{\Xi}{k}, l^{-k} x^k A_0^{-k} \right)}{k}$$

$$F_{h_{sa}}(x) = 1 - \frac{\Xi l^{-\Xi} x^\Xi \Gamma \left( -\frac{\Xi}{k}, l^{-k} x^k A_0^{-k} \right)}{A_0^\Xi k} \quad (2.58)$$

γενικά ο λόγος σήματος προς θόρυβο για το παραπάνω σύστημα μπορεί να υπολογιστεί από την  $\gamma_1$  όπου

$$\gamma_1(PrNo) = PrNo f_{h_{sa}}^2 \quad (2.59)$$

η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του συστήματος (outage probability) θέτοντας κατώφλι σήματος προς θόρυβο ορίζεται ως

$$P_o^{SA}(\gamma_{th}) = Pr(\gamma_1 < \gamma_{th})$$

$$P_o^{SA}(\gamma_{th}) = Pr(PrNo f_{h_{sa}}^2 < \gamma_{th})$$

$$P_o^{SA}(\gamma_{th}) = Pr(f_{h_{sa}} < \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{PrNo}})$$

$$P_o^{SA}(\gamma_{th}) = F_{h_{sa}} \left( \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{PrNo}} \right) \quad (2.60)$$

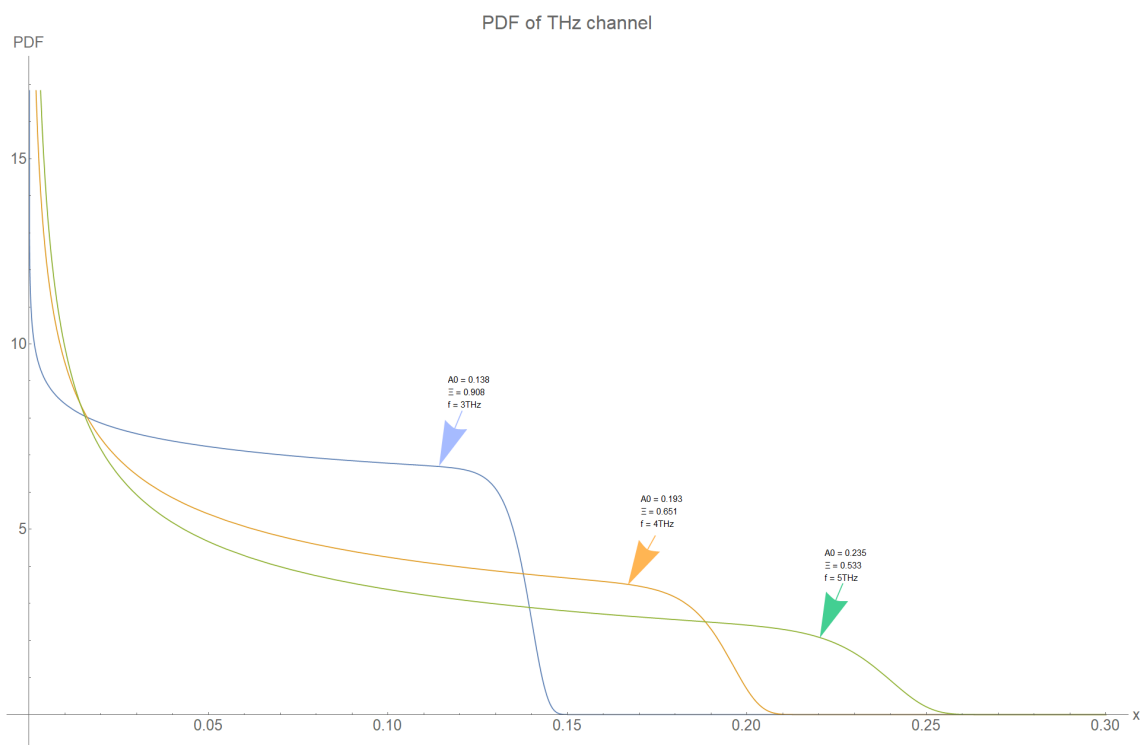
## 2.6 Αποτελέσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα στατιστικά αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω των εξισώσεων (2.50), (2.51) και (2.60), για την μοντελοποίηση του καναλιού δορυφόρου αεροπλάνου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF), την συνάρτηση συγκεντρωτικής πιθανότητας (CDF) και την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (outage probability) ως προς την



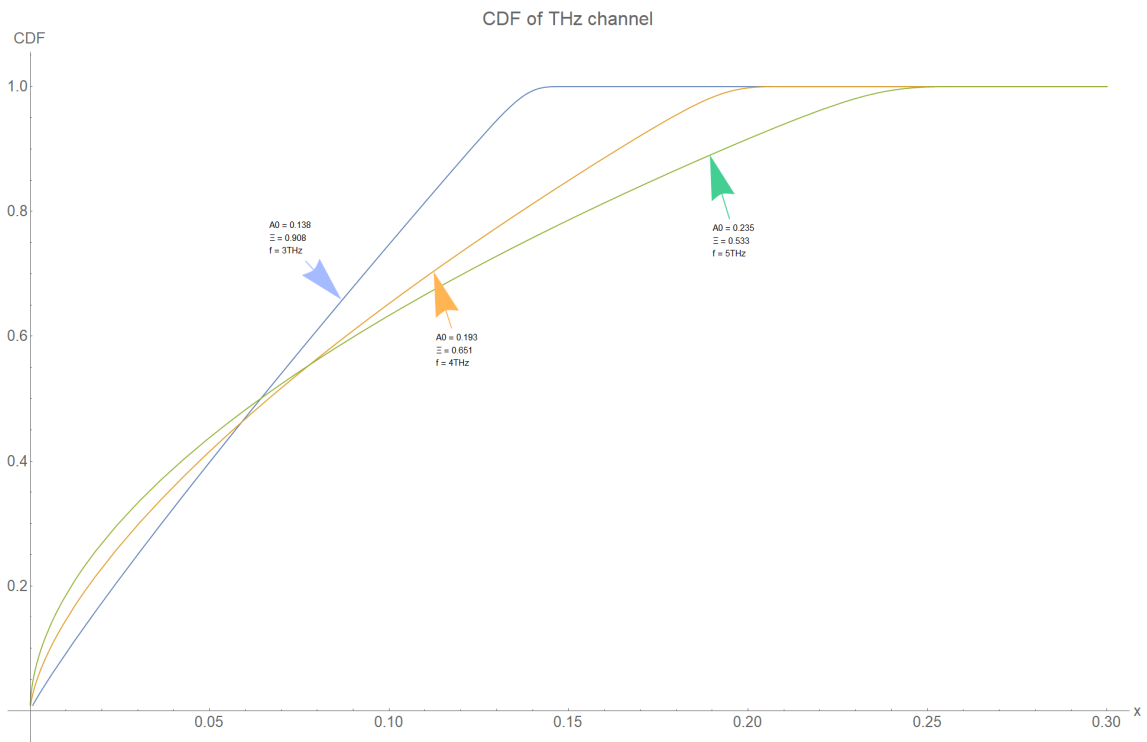
συχνότητα(f)	$3 \times 10^{12} Hz$
ταχύτητα φωτός(c)	$3 \times 10^8 m/s$
μήκος κύματος ( $\lambda$ )	$c/f$ m
Κυματάριθμος (k)	$2\pi/\lambda$
$w_0$	1.44 m
z	100000 m
$\alpha$	0.72 m
$\sigma_s$	1.44
$A_0$	0.138
$\Xi$	0.908
Μεταβλητή κατανομής Weibull (k)	33.474
l	1.017

Πίναξ~2.2: Τιμές μεταβλητών των αποτελεσμάτων

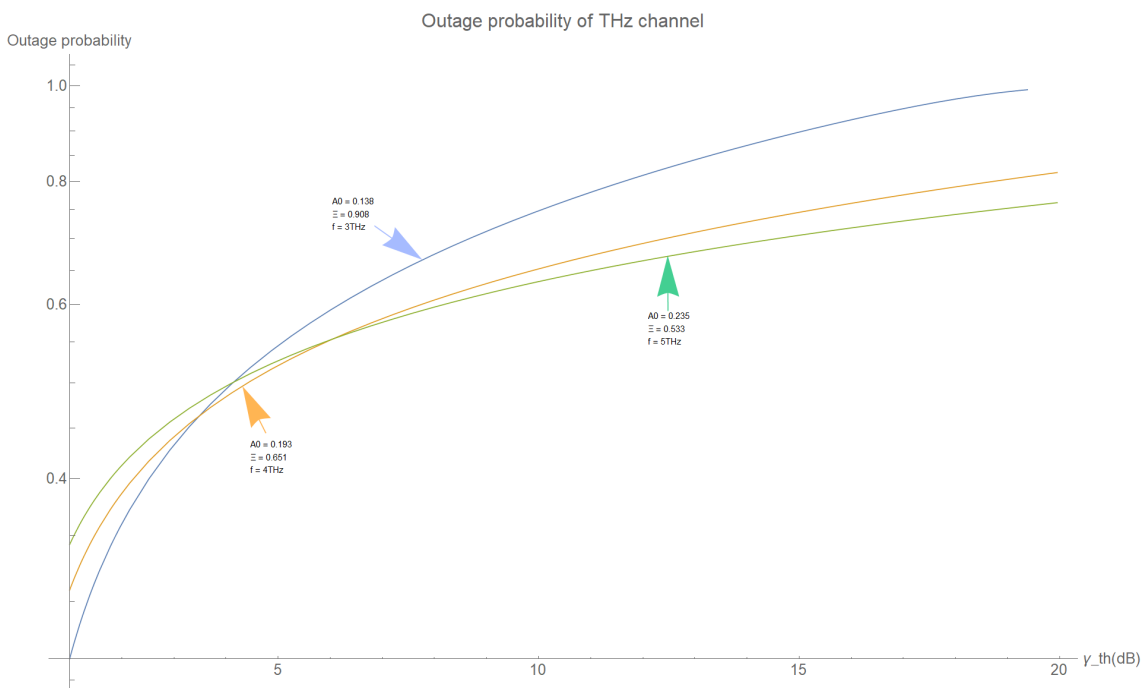
Σχήμα~2.5: Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας PDF τυχαίας μεταβλητής x για διάφορες τιμές  $A_0$ ,  $\Xi$  και συχνότητα λειτουργίας

τυχαία μεταβλητή για διαφορετικές τιμές των μεταβλητών  $\Xi$  και  $A_0$  και για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ως προς την ευαισθησία σηματοθορυβικής σχέσης SNR  $\gamma_{th}$  (dB). Για την εξαγωγή των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις μέσω mathematica. Σε αυτή την ενότητα χρησιμοποιήσαμε σταθερές τιμές για το άνοιγμα στις κεραίες, σταθερή απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 χιλιομέτρα (km), για την διακύμανση του μέσου πήραμε την κατανομή Weibull για μεσαίας ταραχής κανάλι  $C_n^2 = 5.6 \times 10^{-18}$  και εξάγαμε τις παραμέτρους της k,l.

Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας PDF για το ατμοσφαιρικό κανάλι με ασύρματη σύνδεση απόστασης 100 χιλιομέτρων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε την σχέση



Σχήμα 2.6: Συνάρτηση συγκεντρωτικής πιθανότητας CDF τυχαίας μεταβλητής x για διάφορες τιμές  $A_0$ ,  $\Xi$  και συχνότητα λειτουργίας



Σχήμα 2.7: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ως προς  $\gamma_{th}$  για διαφορετικές τιμές  $A_0$ ,  $\Xi$  και συχνότητα λειτουργίας

(2.50) που προκύπτει από τις διαλείψεις λόγω εξασθένησης των μορίων του μέσου και αστοχίας κεραιών. Όπως φαίνεται στο σχέδιο οι καμπύλες για διαφορετικές τιμές συχνότητας λειτουργίας και επομένως διαφορετικές τιμές για  $A_0$  και  $\Xi$  παρουσιάζουν μικρές μεταβολές γεγονός που κάνει την μοντελοποίηση Weibull ορθή για το ατμοσφαιρικό κανάλι, επίσης για την μικρότερη συχνότητα 3 THz παρουσιάζονται οι υψηλότερες τιμές και για την μεγαλύτερη συχνότητα 5 THz οι τιμές που παίρνει η συνάρτηση είναι οι χαμηλότερες για όλο σχεδόν το διάστημα της μεταβλητής  $x$ .

Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα που προέκυψε για την συνάρτηση αθροιστικής κατανομής CDF για σύνδεση δορυφόρου αεροπλάνου με τις παραμέτρους που αναγράφονται στον Πίνακα 2.2. Χρησιμοποιώντας την συνάρτηση (2.51) για σταθερές τιμές και τροποποιώντας μόνο την συχνότητα λειτουργίας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι για την μικρότερη συχνότητα 3 THz για μικρές τιμές της  $x$  έχει μικρότερη τιμή η CDF και για υψηλότερες τιμές της μεταβλητής  $x$  παρουσιάζει υψηλότερες τιμές η CDF. Ενώ, για την μεγαλύτερη συχνότητα που ελέγξαμε 5 THz παρουσιάζει τα αντίθετα αποτελέσματα, και για την ενδιάμεση τιμή 4 THz παρατηρούμε ενδιάμεσα αποτελέσματα για το εύρος τιμών της τυχαίας μεταβλητής  $x$ .

Τέλος, στο Σχήμα 2.7 απεικονίζεται η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας, σε λογαριθμική κλίμακα, του συστήματος αεροπλάνου δορυφόρου για διαφορετικές τιμές στη συχνότητα λειτουργίας και  $A_0$ ,  $\Xi$  κάνοντας χρήση της σχέσης (2.60). Συγκεκριμένα, όσο η ευαισθησία του δέκτη  $\gamma_{th}$  (dB) αυξάνεται, παρόμοια αυξάνεται και η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας. Επιπλέον, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα για συχνότητα 3 THz το σύστημα παρουσιάζει μεγαλύτερη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας όσο η ευαισθησία του δέκτη αυξάνεται σε σύγκριση με τις υψηλότερες συχνότητες. Ενώ, για την μεγαλύτερη συχνότητα 5 THz έχουμε μεγαλύτερες πιθανότητες διακοπής λειτουργίας για μικρές τιμές της  $\gamma_{th}$  (dB) αλλά, παρουσιάζει μικρότερη πιθανότητα διακοπής για υψηλή ευαισθησία του δέκτη. Εν κατακλείδι, αύξηση της συχνότητας συνεπάγεται και υψηλότερη σταθερότητα της επικοινωνίας καθώς, όσο η ευαισθησία του δέκτη είναι μεγαλύτερη τόσο πιο δύσκολα μπορεί να ανιχνεύσει το σήμα από τον θόρυβο και όσο μεγαλύτερη συχνότητα χρησιμοποιούμε τόσο πιο εύκολα ανιχνεύσιμο είναι το σήμα.

## 2.7 Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή είδαμε την μοντελοποίηση του ατμοσφαιρικού καναλιού για σύνδεση στο φάσμα των THz αεροπλάνου δορυφόρου. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν μοντελοποιήσεις για τις γεωμετρικές και ατμοσφαιρικές απώλειες καναλιού και μοντελοποίηση του μέσου του καναλιού μέσω λογάριθμο κανονικής κατανομής, Γάμμα-Γάμμα κατανομής, εκθετικής (Exponential) Weibull και Weibull κατανομής. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήσαμε την κατανομή Weibull διότι μπορεί να χαρακτηρίσει το μέσο ακόμη και υψηλής ταραχής όταν δηλαδή στο κανάλι υπάρχουν σύννεφα, βροχή. Επίσης και για λόγους διευκόλυνσης στην εξαγωγή των συναρτήσεων PDF και CDF σε αντίθεση με τις κατανομές Γάμμα-Γάμμα και EW οι οποίες παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες αλλά και μοντελοποιούν σε πολύ αναλυτικό και ακριβή επίπεδο το κανάλι χρησιμοποιώντας όμως πολύπλοκες συναρτήσεις μοντελοποίησης. Τέλος, στην ενότητα 2.6 παραθέτονται τα εξαγόμενα σχεδιαγράμματα για την PDF, CDF καθώς και την πιθανότητας διακοπής λειτουργίας του συστήματος, χρησιμοποι-

ώντας Weibull κατανομή, λαμβάνοντας υπόψιν και τις απώλειες λόγω της αστοχίας των κεραιών.

## Κεφάλαιο 3

# Μοντελοποίηση συστήματος επικοινωνίας αεροπλάνου τελικού χρήστη

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην επεξεργασία του σήματος terahertz (THz) από αναμεταδότη, για να φτάσει το τελικό σήμα μέσω του visible light communication (VLC) καναλιού στον τελικό χρήστη. Το σήμα THz που λαμβάνεται από τον δορυφόρο δεν μπορεί να ληφθεί αμέσως από τον τελικό χρήστη, πρέπει αρχικά να επεξεργαστεί κατάλληλα για να πέσει στην βασική ζώνη και, στη συνέχεια, το σήμα που προκύπτει να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει τον οπτικό πομποδέκτη. Στην περίπτωση, που εξετάζουμε, ο οπτικός πομποδέκτης χρησιμοποιεί σαν πηγή φωτός ένα light emitting diode (LED), το οποίο βρίσκεται στο φως πάνω από το κάθισμα του επιβάτη στο αεροπλάνο και ο επιβάτης είναι ο τελικός χρήστης.

### 3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Τα VLC συστήματα παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς λόγω του υψηλού φάσματος συχνότητων που χρησιμοποιεί το σύστημα μπορεί να επιτύχει υψηλό ρυθμό διάδοσης δεδομένων και με χαμηλό κόστος [57]. Πολλές εργασίες έχουν γίνει με την χρήση VLC συστημάτων καθώς παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον γιατί είναι ανθεκτικά στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και λόγω της οπτικής επαφής πομπού και δέκτη η επικοινωνία χαρακτηρίζεται από ασφάλεια και ακρίβεια [58]. Επιπλέον, με τις συνεχόμενα αυξανόμενες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και ρυθμό διάδοσης δεδομένων εφαρμογές οι παραδοσιακές μέθοδοι επικοινωνιών δεν μπορούν να υποστηρίξουν τις ανάγκες του τελικού χρήστη [59]. Τα συστήματα VLC μπορούν να αποτελέσουν τον ακρογωνιαίο λίθο για εφαρμογή μελλοντικών συστημάτων επικοινωνιών [60].

Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς στη [61] χρησιμοποιούν σύστημα RF-VLC για την μετάδοση πληροφοριών στον υγειονομικό τομέα. Αναλυτικά, το σήμα αποστέλλεται από ένα ιατρείο μέσω του καναλιού RF στο δωμάτιο που είναι ο ασθενής μέσω ενός αναμεταδότη, ο οποίος μετασχηματίζει το σήμα και χρησιμοποιώντας το amplify-and-forward (AF) πρωτόκολλο που ενισχύει το σήμα με μια

σταθερή παράμετρο για να μεταφέρει το σήμα μέσω του VLC καναλιού και έτσι αποκτά ο ιατρός τις πληροφορίες από το μηχανήμα εξέτασης που είναι ο ασθενής συνδεδεμένος. Ο συγγραφέας του [62] εξετάζει με την χρήση της τεχνολογίας reconfigurable intelligent surface (RIS), την αποδοτικότητα υβριδικού συστήματος RF RIS/ VLC, το σήμα αποστέλλεται από το σταθμό βάσης στο RIS αναμεταδότη το οποίο χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο AF ενισχύει το σήμα με την καταλληλότερη παράμετρο για να επιτευχθεί η βέλτιστη αποδοτικότητα. Οι συγγραφείς στη [63] ασχολούνται με επίγεια μετάδοση σήματος, από σταθμό βάσης στην ζώνη RF σε αναμεταδότη που χρησιμοποιεί πρωτόκολλο decode-and-Forward (DF) για τον μετασχηματισμό του σήματος, αποκωδικοποιεί το λαμβανόμενο σήμα ρίχνοντας το στην βασική ζώνη και στην συνέχεια το κωδικοποιεί ,για να τροφοδοτήσει το LED πομποδέκτη και να αναμεταδώσει το σήμα στον τελικό χρήστη.

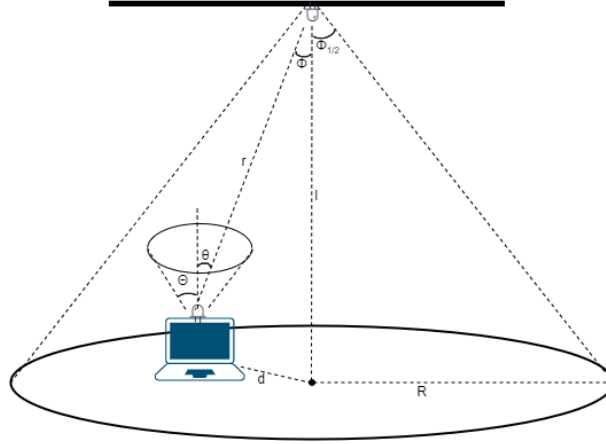
Η χρήση συστημάτων VLC μπορεί να χρησιμοποιηθεί πέρα από την υποστήριξη υπηρεσιών σε απαιτήσεις χρήστη και σε εφαρμογές για επίτευξη επικοινωνίας σε δυσπρόσιτα μέρη ή συνθήκες [64–66]. Αναλυτικά, οι συγγραφείς στη [64] εξετάζουν ένα σύστημα VLC σε επικοινωνία όχημα σε όχημα (vehicle-to-vehicle – V2V) με χρήση διπλού αισθητήρα φωτός για ενίσχυση του λαμβανόμενος σήματος σε συνθήκες κίνησης και εξάγουν αποτελέσματα συγκρίνοντας τη σηματοθορυβική σχέση (signal-to-noise-ratio - SNR) που λαμβάνεται από το κάθε αισθητήρα ξεχωριστά και συνδυαστικά αλλά και το bit error-rate (BER) του συστήματος. Επίσης, οι συγγραφείς στη [65] εξετάζουν την χρήση ενός συστήματος πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (multiple-input-multiple-output - MIMO)/VLC σε μία υπόγεια εξόρυξη τοποθετώντας τους οπτικούς πομποδέκτες σε κατάλληλα σημεία χρησιμοποιώντας μετρητές όπως την απόκριση του καναλιού (channel impulse response – CIR) και την καθυστέρηση διάδοσης root mean square (RMS). Επιπλέον, οι συγγραφείς στη [66] εξετάζουν ένα σύστημα μη-ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (non-orthogonal multiple access – NOMA)/VLC για ασφαλή υποθαλάσσια επικοινωνία χρησιμοποιώντας πομπό στην επιφάνεια της θάλασσας αποστέλλοντας το σήμα σε δύο υποθαλάσσια οχήματα (underwater vehicles – UVs) με πολλαπλούς πομποδέκτες LED και η κάθε σύνδεση εκτιμάται χρησιμοποιώντας μία τεχνική minimum mean square error (MMSE). Τέλος, προτείνουν μηχανισμό επιλογής καταλληλότερου πομποδέκτη LED χρησιμοποιώντας την τεχνική successive interference cancellation (SIC) και εξάγουν αποτελέσματα μέσω της πιθανότητας διακοπής ασφαλούς λειτουργίας σε σύστημα ενός και πολλαπλών LED.

### 3.2 Μοντελοποίηση γεωμετρικών απωλειών

Σε αυτή την ενότητα γίνεται η μαθηματική μοντελοποίηση υποθέτοντας ένα σύστημα VLC εσωτερικού χώρου για το κανάλι αεροπλάνου τελικού χρήστη χρησιμοποιώντας LED τοποθετημένο πάνω από το κάθισμα του επιβάτη. Υποθέτοντας πως υπάρχει οπτική επαφή (LOS) πομπού και δέκτη τότε το στιγμιαίο κέρδος μπορεί να υπολογιστεί από την [67]

$$h = \frac{(\gamma + 1)A_{RG}}{2\pi r^2} \cos^\gamma(\Phi) \cos(\theta) \prod\left(\frac{\theta}{\Theta}\right) \quad (3.1)$$

όπου  $\gamma$  είναι η απόσταση της οπτικής επαφής των πομποδεκτών LED,  $\Phi$  είναι η γωνία πρόσπτωσης του πομποδέκτη του αεροπλάνου και



Σχήμα 3.1: Μοντελοποίηση για LOS VLC σε τυχαία απόσταση  $d$  από το κέντρο της περιοχής κάλυψης του πομπού και  $\theta$  η γωνία πρόσπτωσης που αλλάζει με βάση και την κλίση του δέκτη. Τα σώματα θεωρούνται σημειακά δηλαδή δεν έχουν διαστάσεις απλά απεικονίζονται έτσι για λόγους σχεδίασης.

$$\gamma = \frac{-1}{\log_2(\cos(\Phi_{1/2}))} \quad (3.2)$$

εκφράζει τον Lambertian αριθμό για την εκπομπή του LED στη μισή γωνία του λοβού εκπομπής  $\Phi_{1/2}$ ,  $A_R$  είναι η περιοχή εντοπισμού σήματος στον τελικό χρήστη, ενώ  $g$  είναι το κέρδος του οπτικού δέκτη που προκύπτει από την σχέση

$$g = \frac{n_{ref}^2}{\sin^2(\Theta)} \quad (3.3)$$

$n_{ref}$  είναι ο δείκτης διάθλασης και  $\Theta$  η γωνία οπτικού πεδίου (FOV) του τελικού χρήστη. Η τελευταία παράμετρος της (3.1) είναι μια τριγωνική συνάρτηση όπου παίρνει τιμή 1 όταν  $|\theta/\Theta| \leq 1$  και 0 αλλιώς, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της γωνίας οπτικού πεδίου τότε ο δέκτης έχει στραφεί έτσι ώστε να μην υπάρχει επαφή πομπού με το οπτικό πεδίο του δέκτη, επομένως το κέρδος είναι 0.

Αντικαθιστώντας στην (3.1) τις τριγωνικές παραμέτρους

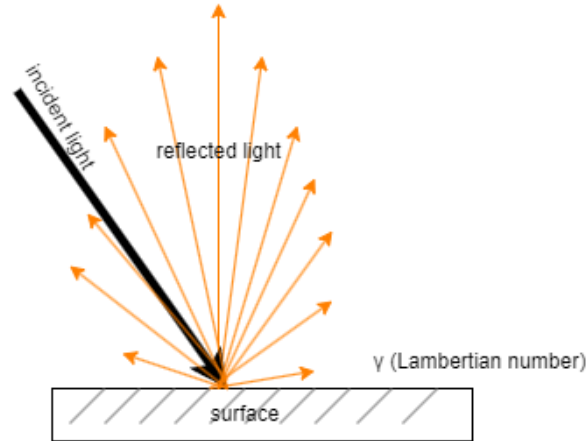
$$r^2 = d^2 + l^2 \quad (3.4)$$

και

$$\cos(\Phi) = \frac{l}{\sqrt{d^2 + l^2}} \quad (3.5)$$

όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1 προκύπτει

$$h = \frac{(\gamma + 1)A_R g l^\gamma}{2\pi} (l^2 + d^2)^{-\frac{\gamma+2}{2}} \cos(\theta) \Pi\left(\frac{\theta}{\Theta}\right) \quad (3.6)$$



Σχῆμα 3.2: Επηρεάση του αριθμού Lambert στο pathloss της VLC επικοινωνίας

### 3.3 Μοντελοποίηση κατανομής γωνίας πρόσπτωσης

Έχοντας δεδομένη την τοποθέτηση του χρήστη άρα η απόσταση  $d$  είναι γνωστή, έχουμε σαν άγνωστη παράμετρο μόνο την γωνία πρόσπτωσης  $\theta$ . Επομένως, η κατανομή του τετραγώνου του καναλιού  $h^2$  προκύπτει από την CDF του, όπως παρουσιάζεται στη [67]

$$h_{\theta}^2 = \cos^2(\theta) \prod\left(\frac{\theta}{\Theta}\right) \quad (3.7)$$

όπως φαίνεται στην σχέση (3.8).

$$F_{h_{\theta}^2}(x) = \Pr[\cos^2(\theta) \prod\left(\frac{\theta}{\Theta}\right) < x]$$

$$F_{h_{\theta}^2}(x) = \Pr[\cos^2(\theta) < x, 0 \leq \theta \leq \Theta] + \Pr[x > 0, \Theta < \theta] \quad (3.8)$$

Το πρώτο μέρος εκφράζει την πιθανότητα της σύνδεση της οπτικής επαφής (LOS) που βρίσκεται στο πεδίο της FOV και το δεύτερο μέρος την πιθανότητα όπου το LOS είναι εκτός του πεδίου FOV. Ορίζοντας  $F_{\theta}$  ως την αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CDF) της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta$ , η CDF της  $h_{\theta}^2$  προκύπτει όπως φαίνεται παρακάτω.

$$F_{h_{\theta}^2}(x) = 1 - F_{\theta}\left(\frac{1}{2} \cos^{-1}(2x - 1)\right) \quad (3.9)$$

Η αντίστοιχη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) μπορεί να προκύψει από την παραγώγιση της (3.9) ως προς  $x$

$$f_{h_{\theta}^2}(x) = \frac{c_{\theta}}{\sqrt{4x(1-x)}} f_{\theta}\left(\frac{1}{2} \cos^{-1}(2x - 1)\right), 0 < x < 1 \quad (3.10)$$

και  $\theta$  αλλού,  $c_{\theta}$  είναι η σταθερά κανονικοποίησης και  $f_{\theta}$  είναι η PDF της τυχαίας γωνίας πρόσπτωσης  $\theta$ .



Μέση τιμή Γκαουσιανής κατανομής ( $\mu$ )	30°
Διακύμανση Γκαουσιανής κατανομής ( $\sigma^2$ )	20°
απόσταση (d)	1m
περιοχή εντοπισμού ( $A_R$ )	1m <sup>2</sup>

Πίναξ 3.1: Τιμές μεταβλητών των αποτελεσμάτων για το VLC κανάλι

Ορίζοντας το ντετερμινιστικό μέρος της (3.6) ως  $h_c$  ούτως ώστε

$$h = h_c h_\theta \quad (3.11)$$

η CDF και η PDF του τετραγώνου του καναλιού, αντίστοιχα, μπορεί να εκφραστεί όπως φαίνεται παρακάτω.

$$F_{h^2}(x) = F_{h_\theta^2}\left(\frac{x}{h_c^2}\right) \quad (3.12)$$

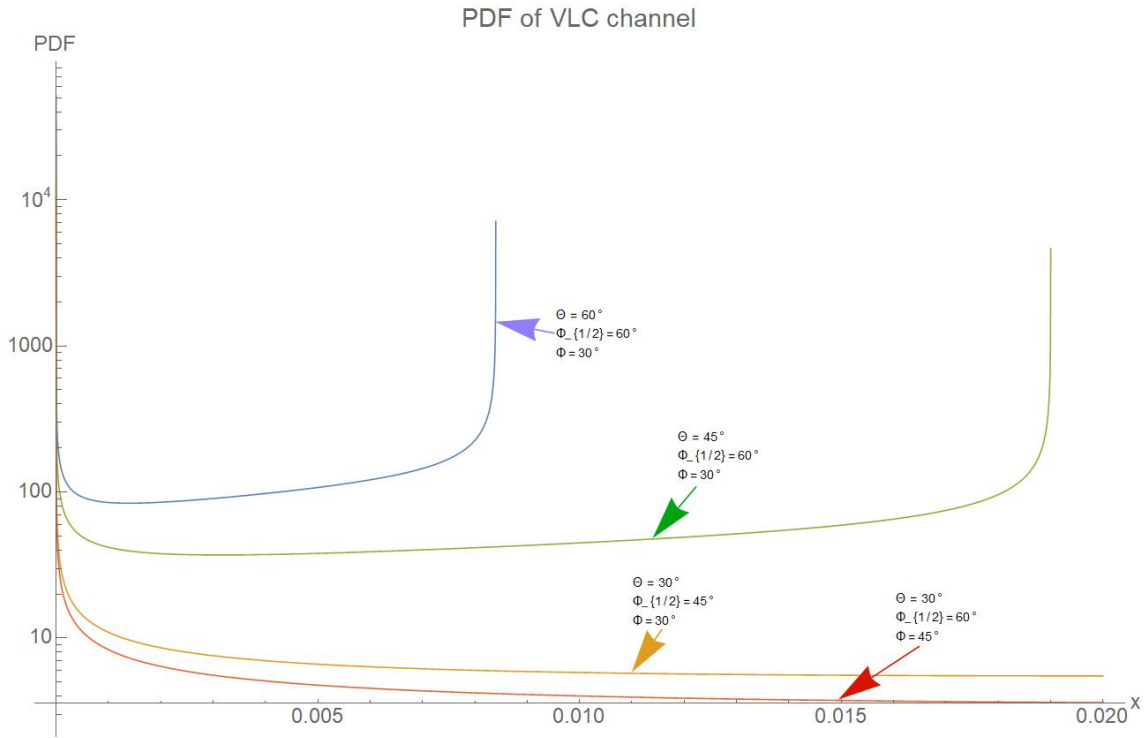
$$f_{h^2}(x) = \frac{1}{h_c^2} f_{h_\theta^2}\left(\frac{x}{h_c^2}\right) \quad (3.13)$$

Οι σχέσεις (3.12) και (3.13) αποτελούν μια γενική μορφή έτσι ώστε οι (3.9) και (3.10) να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιαδήποτε κατανομή που ακολουθεί η τυχαία γωνία πρόσπτωσης  $\theta$ .

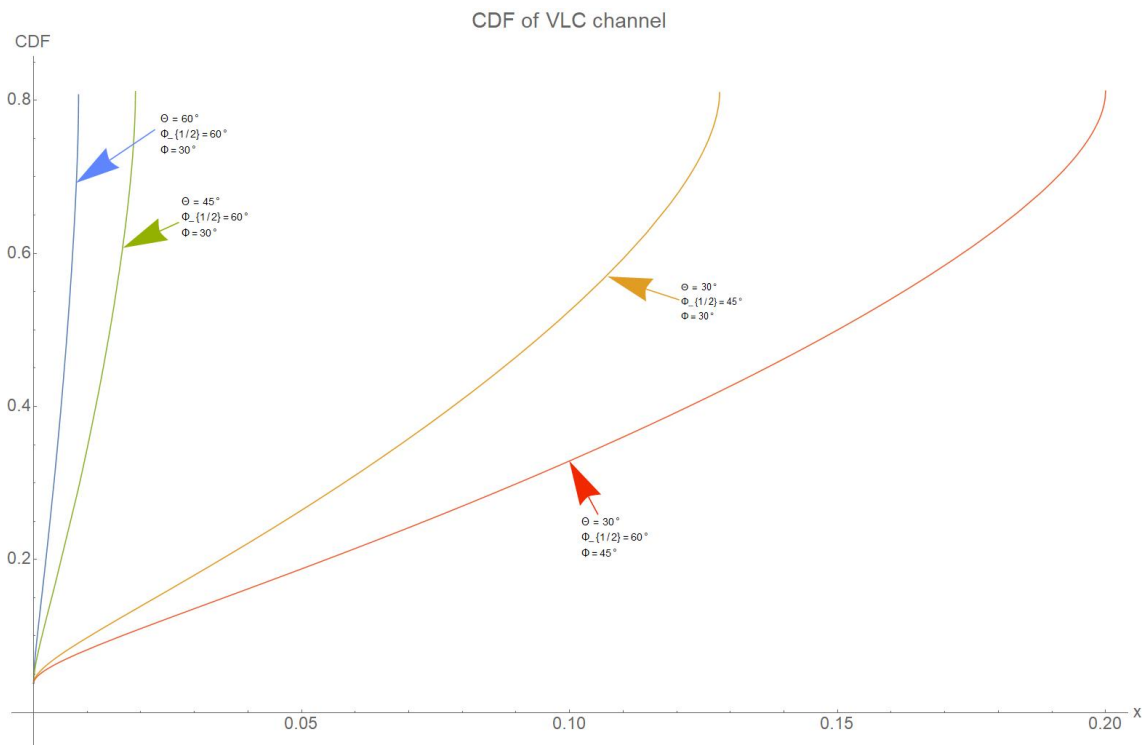
### 3.4 Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα στατιστικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τις εξισώσεις (3.12) και (3.13) για την μοντελοποίηση του καναλιού αεροπλάνου τελικού χρήστη (επιβάτης). Αναλυτικά, χρησιμοποιούμε την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) και την συνάρτηση συγκεντρωτικής πιθανότητας (CDF) ως προς τυχαία μεταβλητή που ανήκει στο διάστημα πραγματικών αριθμών (0,1) για διαφορετικές τιμές των μεταβλητών γωνιών  $\Theta$ ,  $\Phi_{1/2}$  και  $\Phi$ . Για την εξαγωγή των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι οι συναρτήσεις μέσω mathematica.

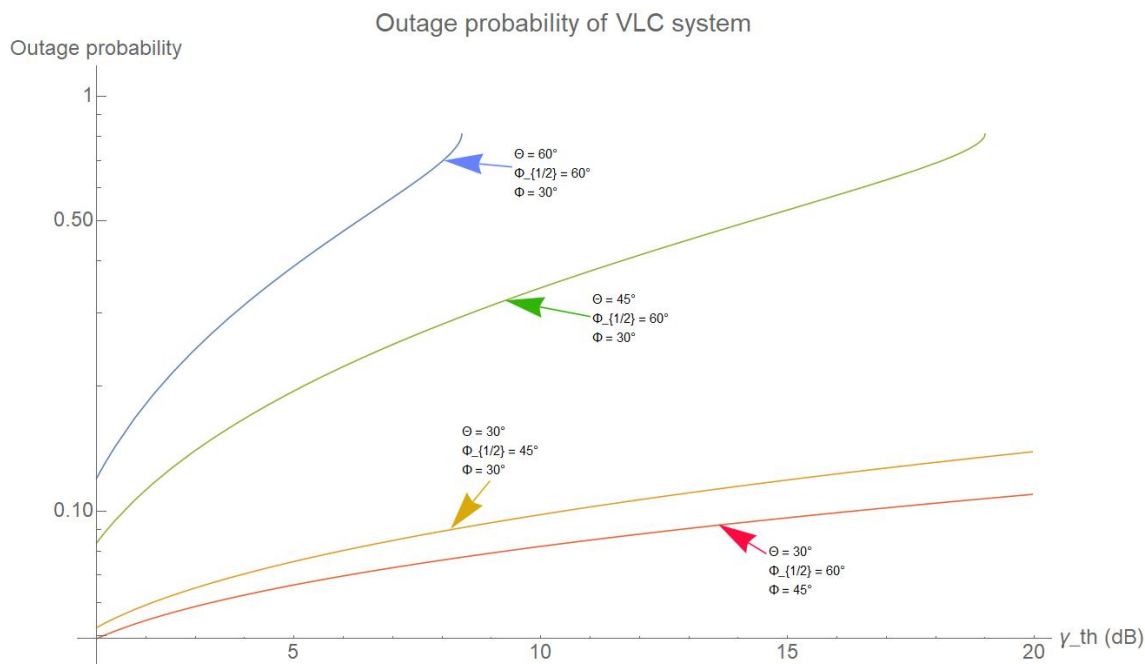
Για την εξαγωγή των διαγραμμάτων PDF και CDF χρησιμοποιήσαμε σταθερή απόσταση του πομποδέκτη τελικού χρήστη από το κέντρο του νοητού κύκλου που δημιουργεί ο πομποδέκτης του αεροπλάνου 1 μέτρο και περιοχή εντοπισμού σήματος του δέκτη 1 επίσης, χρησιμοποιήσαμε Γκαουσιανή διακύμανση με μέση τιμή και διακύμανση 30° και 20° αντίστοιχα. Αναλυτικά, στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας PDF για το κανάλι αεροπλάνου τελικού χρήστη. Χρησιμοποιώντας την σχέση (3.13) για τιμές της τυχαίας μεταβλητής στο διάστημα (0,1) και υπολογίζοντας το τετράγωνο του ντετερμινιστικού μέρους του κέρδους του καναλιού για διαφορετικές γωνίες  $\Theta$ ,  $\Phi_{1/2}$  και  $\Phi$  παρατηρούμε ότι έχουμε μεγαλύτερη τιμή όσο η γωνία μισής εκπομπής πομπού και δέκτη είναι μεγαλύτερη για την αυξανόμενη τιμή της τυχαίας μεταβλητής. Επίσης η γωνία πρόσπτωσης  $\Phi$  φαίνεται να μην επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το αποτέλεσμα της τυχαίας μεταβλητής, όταν φυσικά οι πομποδέκτες βρίσκονται σε οπτική επαφή.



Σχήμα 3.3: Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας PDF τυχαίας μεταβλητής x για διάφορες τιμές μεταβλητών



Σχήμα 3.4: Συνάρτηση συγκεντρωτικής πιθανότητας CDF τυχαίας μεταβλητής x για διάφορες τιμές μεταβλητών



Σχήμα 3.5: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του VLC συστήματος ως προς  $\gamma_{th}$  για διαφορετικές τιμές μεταβλητών

Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται το σχεδιάγραμμα της συνάρτησης συγκεντρωτικής πιθανότητας (CDF) της σύνδεσης αεροπλάνου τελικού χρήστη. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την συνάρτηση (3.12) για διαφορετικές τιμές των γωνιών  $\Theta$ ,  $\Phi_{1/2}$  και  $\Phi$ . Τελικώς, συμπεραίνουμε πως όσο μικρότερη είναι η μισή γωνία FOV του δέκτη τόσο μικρότερος είναι ο θόρυβος από άλλες πηγές φωτός του περιβάλλοντος. Επομένως, όταν οι πομποδέκτες βρίσκονται σε οπτική επαφή και εντός του πεδίου εντοπισμού τους τόσο μικραίνει και ο ρυθμός διακοπής λειτουργίας για διάφορες τιμές της τυχαίας μεταβλητής. Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζεται η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του VLC συστήματος επικοινωνίας αεροπλάνου επιβάτη. Αναλυτικά, χρησιμοποιώντας την συνάρτηση (4.8) για διάφορες τιμές μεταβλητών γωνιών εξάγουμε την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του VLC συστήματος. Τελικά, συμπεραίνουμε πως για μεγάλες γωνίες μισής εκπομπής του τελικού-χρήστη τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα διακοπής επικοινωνίας.

### 3.5 Συμπεράσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση του καναλιού αεροπλάνου τελικού χρήστη χρησιμοποιώντας VLC σύστημα. Αρχικά, το σήμα που λαμβάνει το αεροπλάνο από τον δορυφόρο το μετατρέπει σε οπτικό σήμα που μεταδίδεται από οπτικό πομποδέκτη στον τελικό χρήστη. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση του κέρδους του καναλιού με βάση την γωνία πρόσπτωσης του οπτικού σήματος στο δέκτη, έχοντας ως σταθερές την απόσταση του πομποδέκτη του τελικού χρήστη από το κέντρο του νοητού επιπέδου, που δημιουργεί ο οπτικός πομποδέκτης του αεροπλάνου και την περιοχή εντοπισμού σήματος από τον τελικό χρήστη. Παραθέτοντας στο τέλος μια γενική μορφή της PDF και της CDF που μπορεί να εφαρμοστεί για οποιαδήποτε κατανομή και αν ακολουθεί η τυχαία γωνία πρόσπτωσης του οπτικού σήματος. Τέλος, παρουσιάζονται τα διαγράμματα PDF και CDF για διαφορετικές τιμές των γωνιών οπτικού πεδίου των πομποδεκτών

και γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

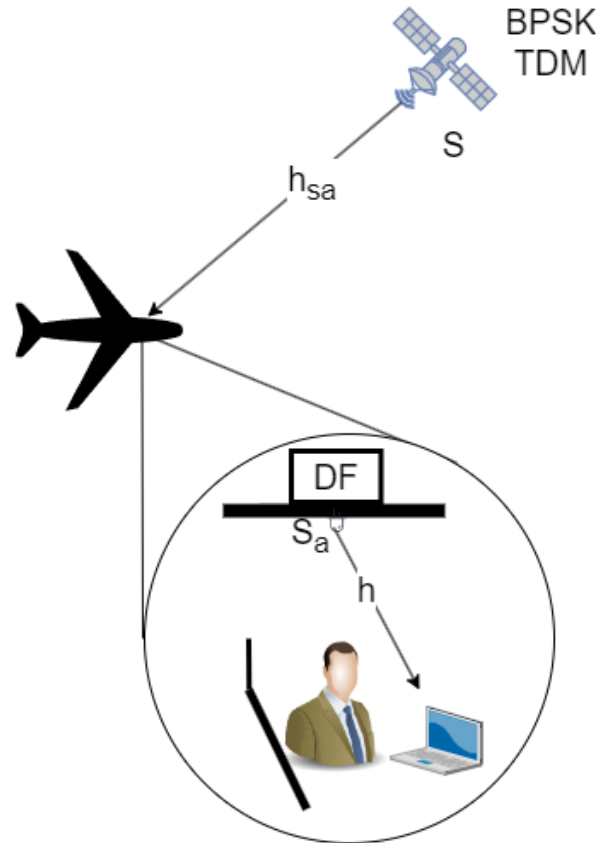
## Κεφάλαιον 4

# Μοντελοποίηση υβριδικού συστήματος THz/VLC

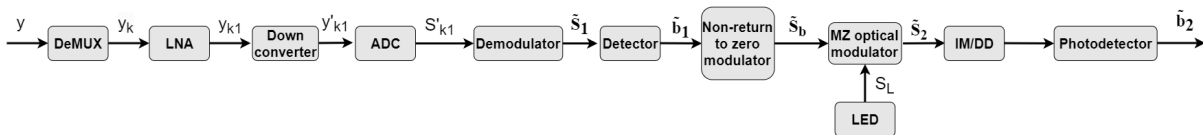
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η υβριδική μοντελοποίηση συστήματος ασύρματης επικοινωνίας δορυφόρου-αεροπλάνου και αεροπλάνου-τελικού χρήστη, που προτείνεται για εφαρμογή από την παρούσα διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα, η επικοινωνία δορυφόρου-αεροπλάνου γίνεται στη μπάνα των THz, όπου ο δορυφόρος χρησιμοποιεί ψηφιακή διαμόρφωση binary phase shift keying (BPSK) και εφαρμόζοντας τεχνική πολυπλεξίας time division multiplexing (TDM) αποστέλλει πολλαπλά σήματα για εξυπηρέτηση πολλών χρηστών. Στη συνέχεια, το λαμβανόμενο σήμα στο αεροπλάνο περνάει από αποπολυπλέκτη και αναμεταδότη, που λειτουργεί με το πρωτόκολλο decode and forward (DF), ο οποίος τροφοδοτεί τον αντίστοιχο πομποδέκτη LED που επικοινωνεί με τον αντίστοιχο τελικό χρήστη μέσω VLC συστήματος. Τελικώς, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση της σηματοθορυβικής σχέσης από άκρη σε άκρη στα ανεξάρτητα κανάλια δορυφόρου-αεροπλάνου και αεροπλάνου-τελικού χρήστη, με σκοπό την επίτευξη καθορισμένου ρυθμού διάδοσης δεδομένων.

### 4.1 Μοντελοποίηση σήματος αεροπλάνου και τελικού χρήστη

Το σήμα που αποστέλλεται από τον δορυφόρο έχει περάσει από πολυπλέκτη, διότι αποστέλλει ένα σύνολο σημάτων για εξυπηρέτηση πολλών χρηστών ταυτόχρονα, στη συνέχεια το σήμα που λαμβάνεται από το αεροπλάνο αποπολυπλέκεται, επομένως το σήμα που αναλύεται στη συνέχεια αφορά το σήμα ενός τελικού χρήστη. Η διαδικασία που ακολουθεί το αρχικό σήμα που φτάνει στο αεροπλάνο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2, αρχικά το σήμα  $y$  που φτάνει στο αεροπλάνο αποπολυπλέκεται (DeMUX) για να ληφθεί το απομονωμένο σήμα  $y_k$  του ενός χρήστη. Ακόλουθα, περνά από ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA) για να ενισχυθεί το σήμα, καθώς η ισχύς του σήματος έχει πέσει λόγω του DeMUX χωρίς να αλλοιωθεί από τον προστιθέμενο θόρυβο, δημιουργώντας το σήμα  $y_{k1}$ . Στη συνέχεια, μετατρέπεται και πέφτει στη βασική ζώνη συχνότητας (Down converter) δημιουργώντας το σήμα  $y'_{k1}$ , για να πέσει η συχνότητα του σήματος και ο ρυθμός δόνησής του που λαμβάνει το αεροπλάνο από τον δορυφόρο με σηματοθορυβική (SNR)  $\gamma_1$ . Ο λόγος σήματος προς θόρυβο στο ατμοσφαιρικό κανάλι δορυφόρου-αεροπλάνου έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 2, συγκεκριμένα στην ε-



Σχῆμα 4.1: THz/VLC σύστημα παροχής υπηρεσιών διαδικτύου στους επιβάτες αεροπλάνου



Σχῆμα 4.2: Διαδικασία παροχής υπηρεσιών διαδικτύου στον τελικό χρήστη

νότητα 2.5 λαμβάνοντας υπόψιν την σχέση (2.59), μπορούμε να υπολογίσουμε την συγκεκριμένη SNR. Επακόλουθα, το αναλογικό σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό (ADC) δημιουργώντας τη ψηφιακή σειρά σήματος  $S'_{k1}$ , το σήμα αποδιαμορφώνεται (Demodulator) δημιουργώντας το σήμα  $\tilde{S}_1$  και περνώντας από τον ανιχνευτή (Detector) δημιουργείται η δυαδική ψηφιακή σειρά  $\tilde{b}_1$  του σήματος στην οποία εφαρμόζεται διαμόρφωση non-return to zero (NZ), έπειτα το διαμορφωμένο σήμα  $\tilde{S}_b$  περνώντας από οπτικό διαμορφωτή Mach-Zehnder (MZ optical modulator) λαμβάνοντας σαν είσοδο και το οπτικό σήμα του LED  $S_L$  δημιουργείται το ψηφιακό σήμα  $\tilde{S}_2$ . Τέλος, χρησιμοποιώντας σύστημα διαμόρφωσης έντασης άμεσης ανίχνευσης (IM/DD), ο φωτοανιχνευτής του αεροπλάνου που βρίσκεται πάνω από το κάθισμα του επιβάτη, τροφοδοτείται από το λαμβανόμενο σήμα και εκπέμπει το τελικό ψηφιακό σήμα  $\tilde{b}_2$  που λαμβάνει ο τελικός χρήστης από το αεροπλάνο με λόγο σήματος προς θόρυβο  $\gamma_{ap}$ . Ο λόγος σήματος προς θόρυβο προκύπτει από την σχέση (4.1) όπως φαίνεται παρακάτω

$$\gamma_{ap} = \frac{hP_{s,a}}{N_o} \quad (4.1)$$

όπου το κέρδος του καναλιού αεροπλάνου-τελικού χρήστη  $h$  έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3, συγκεκριμένα στην ενότητα 3.2 μέσω της σχέσης (3.6) μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή του.

## 4.2 Μοντελοποίηση ασύμπτωτης πιθανότητας διακοπής λειτουργίας

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας του υβριδικού συστήματος THz/VLC. Για να μπορεί το υβριδικό σύστημα να λειτουργεί χωρίς διακοπή πρέπει ο ισοδύναμος λόγος σήματος προς θόρυβο να έχει μεγαλύτερη τιμή από ένα κατώφλι  $\gamma_{th}$ . Αρχικά, υπολογίζουμε τον ισοδύναμο λόγο σήματος προς θόρυβο  $\gamma_e$  μέσω της σχέσης (4.2) όπως παρουσιάζεται παρακάτω

$$\gamma_e = \min(\gamma_1, \gamma_{ap}) \quad (4.2)$$

όπου  $\gamma_1$  και  $\gamma_{ap}$  οι λόγοι σήματος προς θόρυβο του συστήματος δορυφόρου-αεροπλάνου και αεροπλάνου-τελικού χρήστη αντίστοιχα όπως παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.1.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το κατώφλι του λόγου σήματος προς θόρυβο  $\gamma_{th}$  μέσω του ρυθμού διάδοσης δεδομένων που θέλουμε να επιτύχουμε μέσω του θεωρήματος του Shannon ως ακολούθως

$$R_{th} = B \log_2(1 + \gamma_{th}) \quad (4.3)$$

όπου  $R_{th}$  είναι η χωρητικότητα του συστήματος σε bits per second (bps) και  $B$  είναι το αντίστοιχο εύρος ζώνης σε hertz (Hz). Ορίζοντας ως  $r_{th}$  τον λόγο χωρητικότητας προς εύρος ζώνη τότε η σχέση (4.3) μας επιστρέφει το κατώφλι λόγο σήματος προς θόρυβο όπως φαίνεται παρακάτω.

$$r_{th} = \frac{R_{th}}{B} \quad (4.4)$$

$$r_{th} = \log_2(1 + \gamma_{th})$$

$$\gamma_{th} = 2^{r_{th}} - 1 \quad (4.5)$$

Τέλος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω το υβριδικό σύστημα για να λειτουργεί χωρίς διακοπή της επικοινωνίας, πρέπει ο ισοδύναμος λόγος σήματος προς θόρυβο του συστήματος  $\gamma_e$  να είναι μεγαλύτερος από το κατώφλι  $\gamma_{th}$ . Επομένως πρέπει να υπολογίσουμε την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του υβριδικού συστήματος που εκφράζεται σε μαθηματική μορφή όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια

$$P_o = Pr(\gamma_e < \gamma_{th})$$

όπου χρησιμοποιώντας την σχέση (4.2)

$$P_o = Pr(\min(\gamma_1, \gamma_{ap}) < \gamma_{th})$$

εφαρμόζοντας την συμπληρωματική της πιθανότητας έχουμε

$$P_o = 1 - Pr(\min(\gamma_1, \gamma_{ap}) > \gamma_{th})$$

πρέπει να είναι και οι δύο σχέσεις σήματος προς θόρυβο  $\gamma_1, \gamma_{ap}$  μεγαλύτερες από το κατώφλι  $\gamma_{th}$

$$P_o = 1 - Pr(\gamma_1 > \gamma_{th}, \gamma_{ap} > \gamma_{th})$$

επειδή, τα δύο μεμονωμένα συστήματα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους μπορούμε να τα διαχωρίσουμε

$$P_o = 1 - Pr(\gamma_1 > \gamma_{th})Pr(\gamma_{ap} > \gamma_{th})$$

εφαρμόζοντας πάλι την συμπληρωματική της πιθανότητας

$$P_o = 1 - (1 - Pr(\gamma_1 < \gamma_{th}))(1 - Pr(\gamma_{ap} < \gamma_{th}))$$

κάνοντας επιμεριστική προκύπτει

$$P_o = 1 - (1 - Pr(\gamma_{ap} < \gamma_{th}) - Pr(\gamma_1 < \gamma_{th}) + Pr(\gamma_1 < \gamma_{th})Pr(\gamma_{ap} < \gamma_{th}))$$

$$P_o = 1 - 1 + Pr(\gamma_{ap} < \gamma_{th}) + Pr(\gamma_1 < \gamma_{th}) - Pr(\gamma_1 < \gamma_{th})Pr(\gamma_{ap} < \gamma_{th})$$

μετά από μαθηματικές πράξεις καταλήξαμε στη σχέση (4.6).

$$P_o = Pr(\gamma_{ap} < \gamma_{th}) + Pr(\gamma_1 < \gamma_{th}) - Pr(\gamma_1 < \gamma_{th})Pr(\gamma_{ap} < \gamma_{th}) \quad (4.6)$$

Όπου, η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας της επικοινωνίας δορυφόρου αεροπλάνου έχει οριστεί στο κεφάλαιο 2 μέσω της σχέσης (2.60). Εφαρμόζοντας παρόμοια μεθοδολογία μπορούμε να ορίσουμε και την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας της επικοινωνίας αεροπλάνου τελικού-χρήστη όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Ο λόγος σήματος προς θόρυβο μπορεί να υπολογιστεί από την (4.7)

$$\gamma_{ap}(PrNo) = PrNo f_{h^2} \quad (4.7)$$

και η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (outage probability) θέτοντας κατώφλι σηματοθορυβικής σχέσης  $\gamma_{th}$  τότε

$$P_o(\gamma_{th}) = Pr(\gamma_{ap} < \gamma_{th})$$

αντικαθιστώντας από την (4.7)

$$P_o(\gamma_{th}) = Pr(PrNo f_{h^2} < \gamma_{th})$$

λύνοντας ως προς την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατανομής του κέρδους του καναλιού  $f_{h^2}$

$$P_o(\gamma_{th}) = Pr(f_{h^2} < \frac{\gamma_{th}}{PrNo})$$

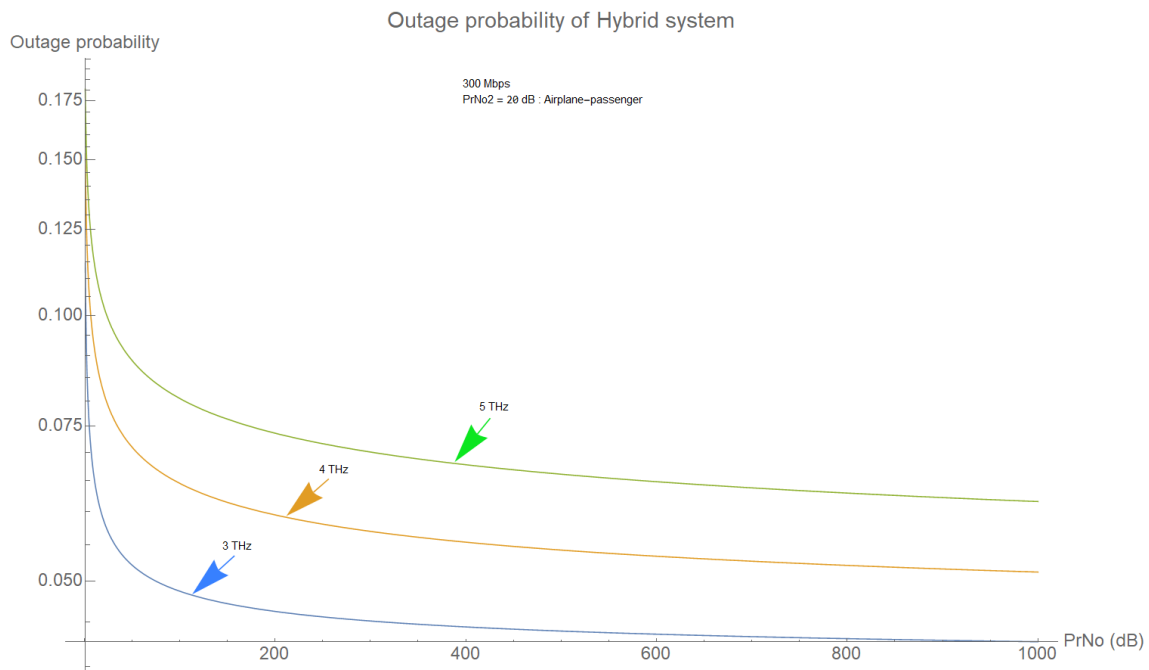
εφαρμόζοντας τον ορισμό της συνάρτησης αθροιστικής πιθανότητας

$$P_o(\gamma_{th}) = F_{h^2}(\frac{\gamma_{th}}{PrNo}) \quad (4.8)$$

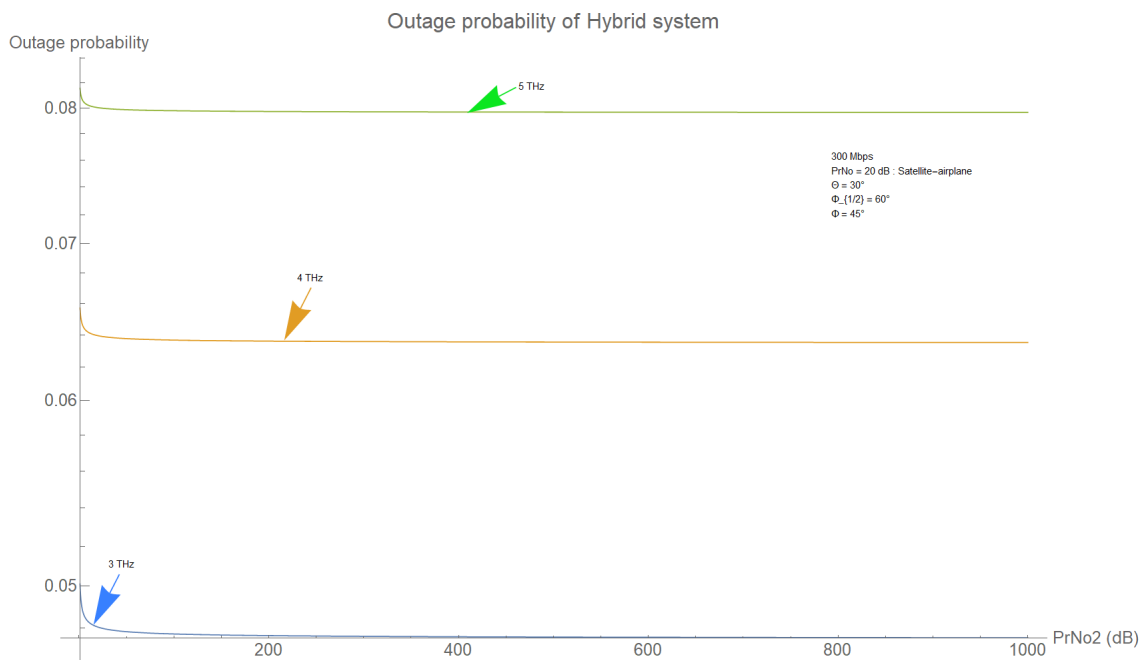
όπου  $F_{h^2}$  είναι η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας του VLC καναλιού αεροπλάνου τελικού-χρήστη, όπως έχει οριστεί στο κεφάλαιο 3.

### 4.3 Αποτελέσματα

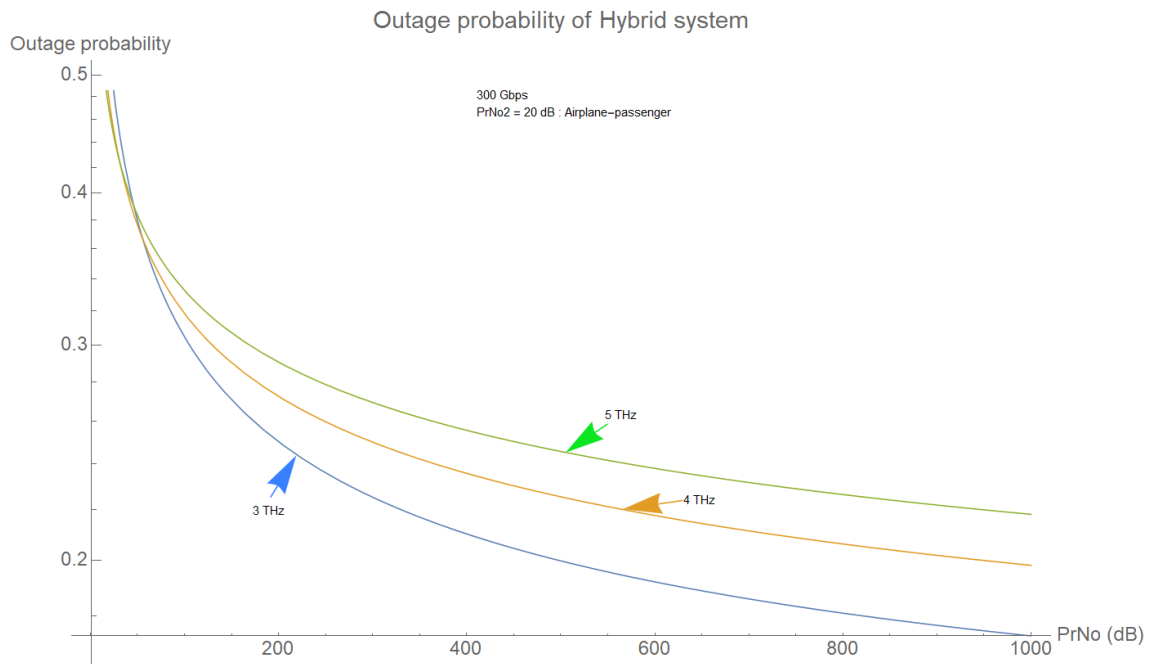
Παρακάτω παρουσιάζονται τα στατιστικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την σχέση (4.6), για την μοντελοποίηση του υβριδικού συστήματος THz/VLC μέσω της στιγμιαίας πιθανότητας διακοπής λειτουργίας, για επίτευξη καθορισμένου ρυθμού διάδοσης, ως προς το στιγμιαίο λόγο σήματος προς θόρυβο ( $PrNo$ ) της ασύρματης επικοινωνίας δορυφόρου αεροπλάνου και του σηματοθορυβικού λόγου ( $PrNo_2$ ) της ασύρματης επικοινωνίας αεροπλάνου τελικού-χρήστη. Οι καθορισμένες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 km και στον Πίνακα 4.2 για απόσταση 50 km, χρησιμοποιούμε κατανομή Weibull για την διακύμανση του μέσου για μεσαίας ταραχής κανάλι  $C_n^2 = 5.6 \times 10^{-18}$ , για τις διαφορετικές καμπύλες του διαγράμματος διακοπής λειτουργίας. Επίσης, χρησιμοποιούμε και διαφορετικές γωνίες στο VLC σύστημα επικοινωνίας αεροπλάνου-επιβάτη, για να εντοπίσουμε αν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την σταθερή λειτουργία του υβριδικού συστήματος ως προς την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας. Υποθέτουμε ότι η τυχαία γωνία πρόσπτωσης στον χρήστη  $\theta$ , ακολουθεί Γκαουσιανή κατανομή με παραμέτρους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 στην ενότητα 3.3.



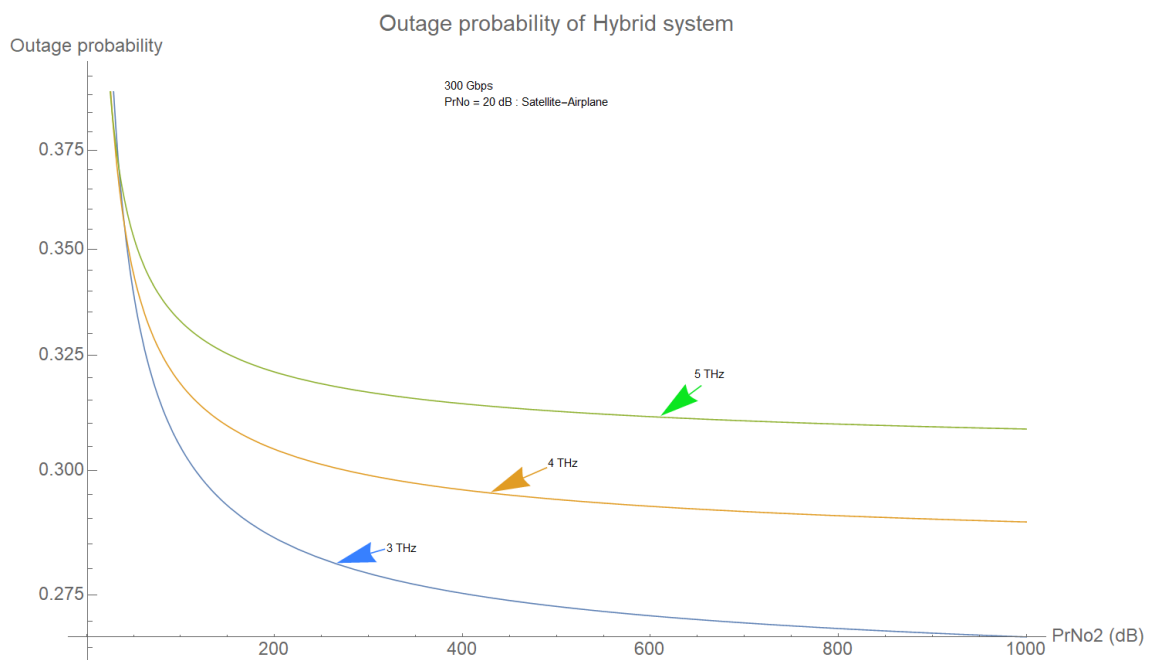
Σχήμα 4.3: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 km και ταχύτητα σύνδεσης 300 megabits per second (Mbps)



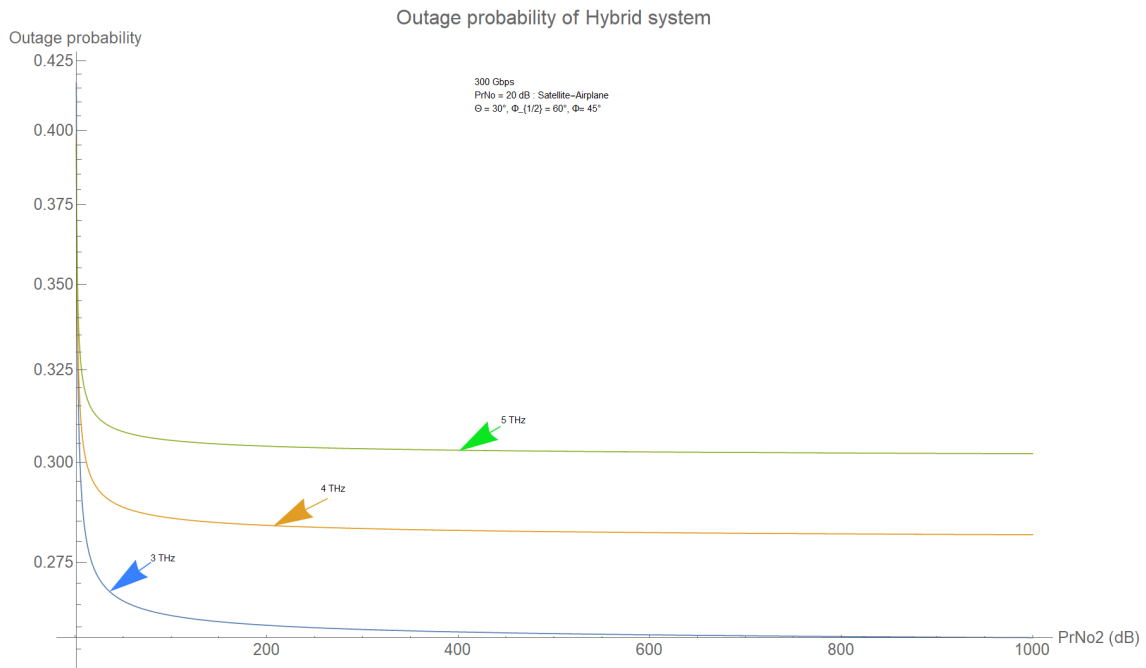
Σχήμα 4.4: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 km και ταχύτητα σύνδεσης 300 megabits per second (Mbps) ως προς την σηματοδορυβική σχέση αεροπλάνου-επιβάτη



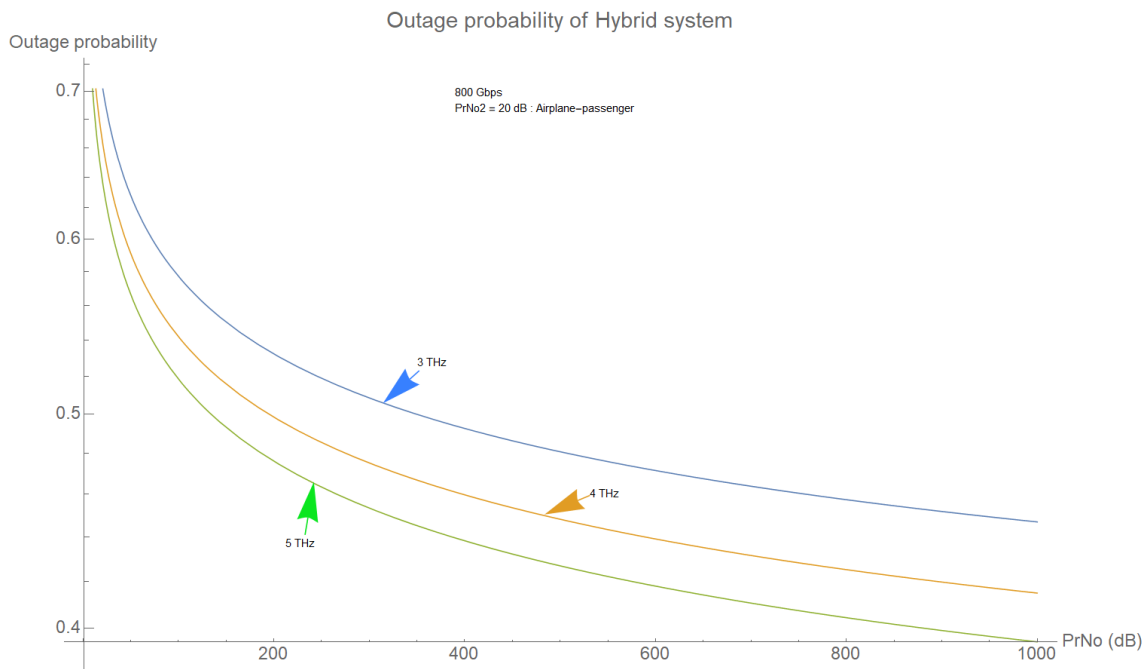
Σχήμα 4.5: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 km και ταχύτητα σύνδεσης 300 gigabits per second (Gbps)



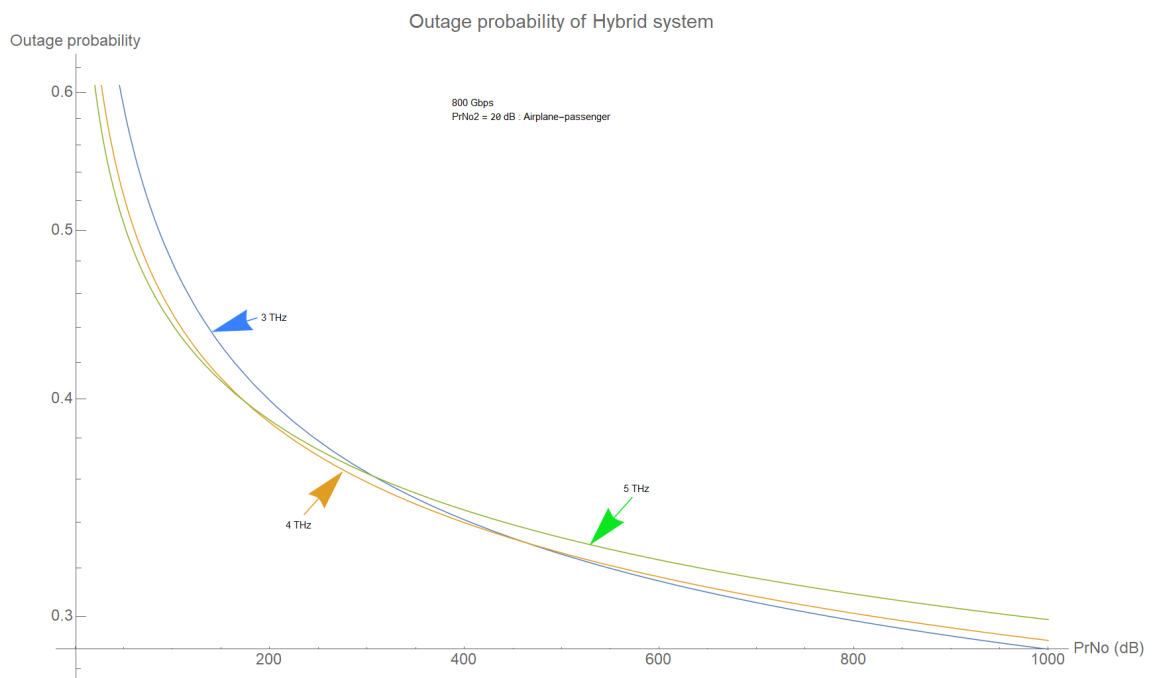
Σχήμα 4.6: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 km και ταχύτητα σύνδεσης 300 gigabits per second (Gbps) για διαφορετικές σηματοθορυβικές σχέσεις σύνδεσης αεροπλάνου-επιβάτη



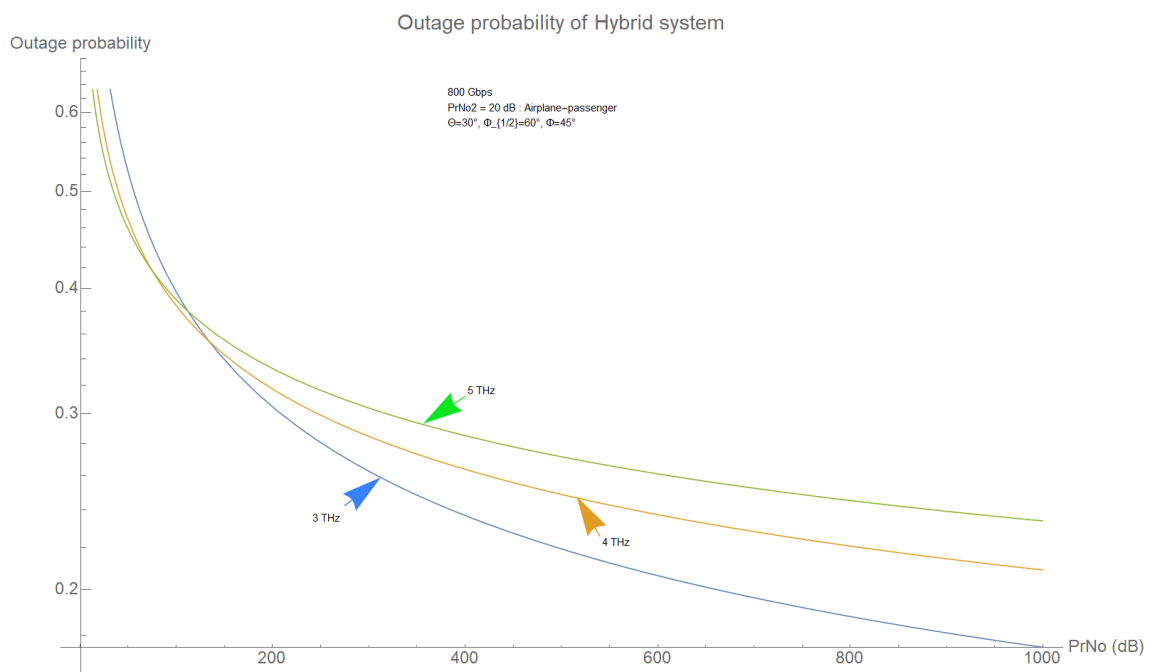
Σχῆμα 4.7: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 km και ταχύτητα σύνδεσης 300 gigabits per second (Gbps) για διαφορετικές σηματοθροβικές σχέσεις σύνδεσης αεροπλάνου-επιβάτη για διαφορετικές σταθερές γωνίες στο VLC κανάλι



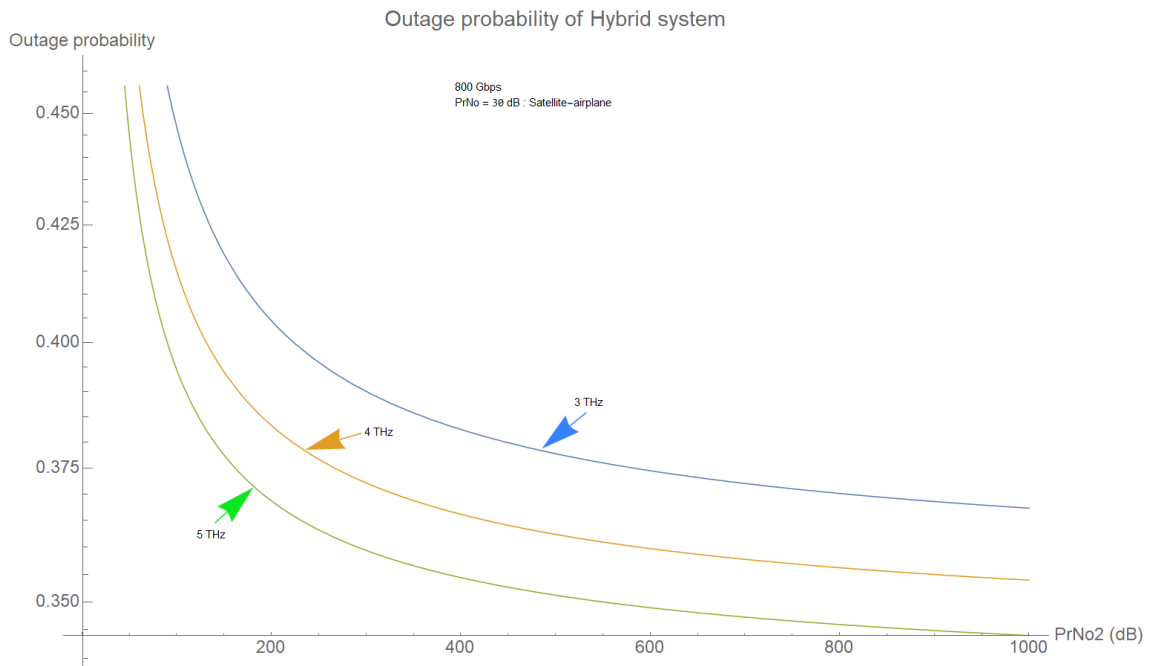
Σχῆμα 4.8: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 50 km και ταχύτητα σύνδεσης 800 gigabits per second (Gbps)



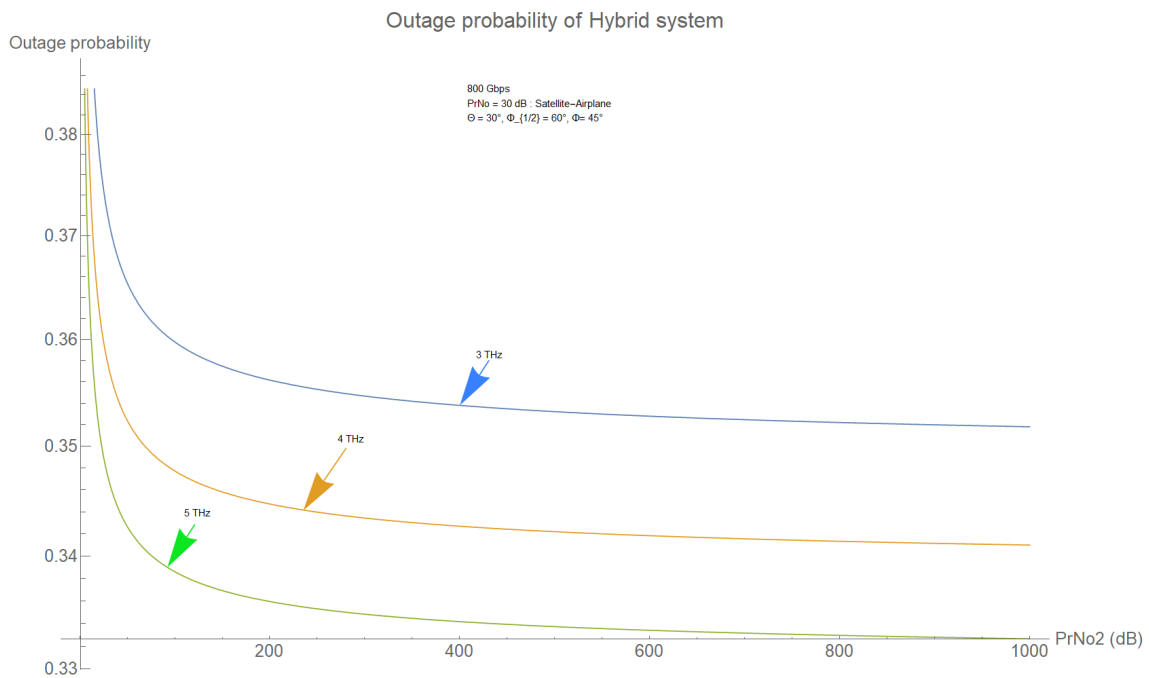
Σχήμα 4.9: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 km και ταχύτητα σύνδεσης 800 gigabits per second (Gbps)



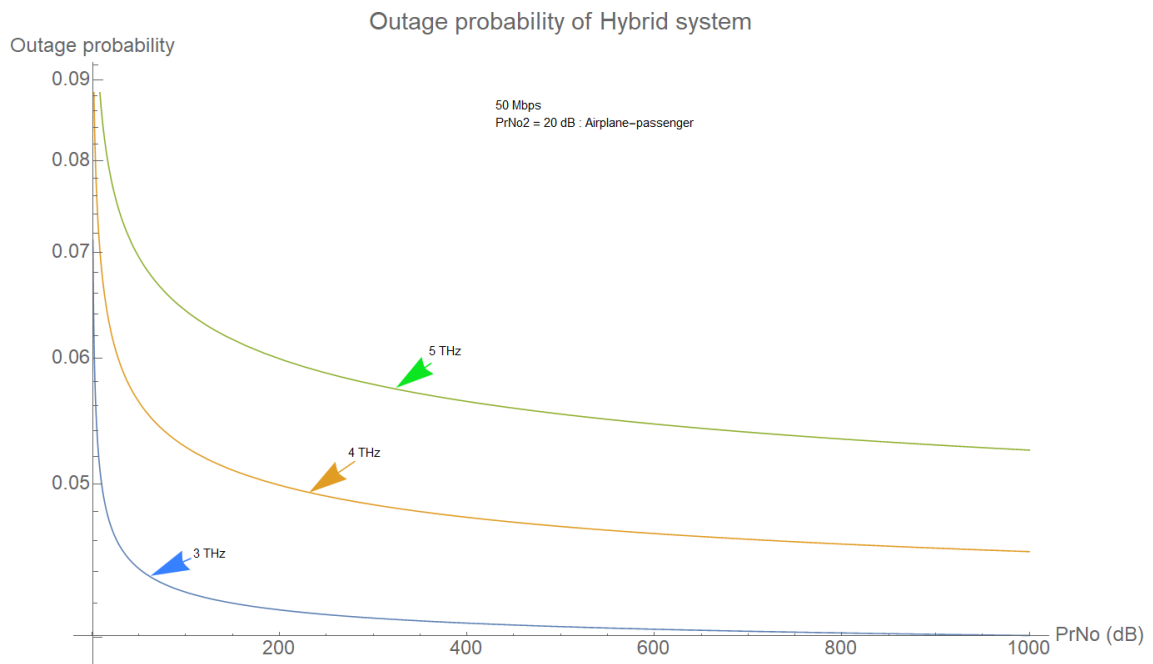
Σχήμα 4.10: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 km και ταχύτητα σύνδεσης 800 gigabits per second (Gbps) για διαφορετικές σταθερές γωνίες στο VLC κανάλι



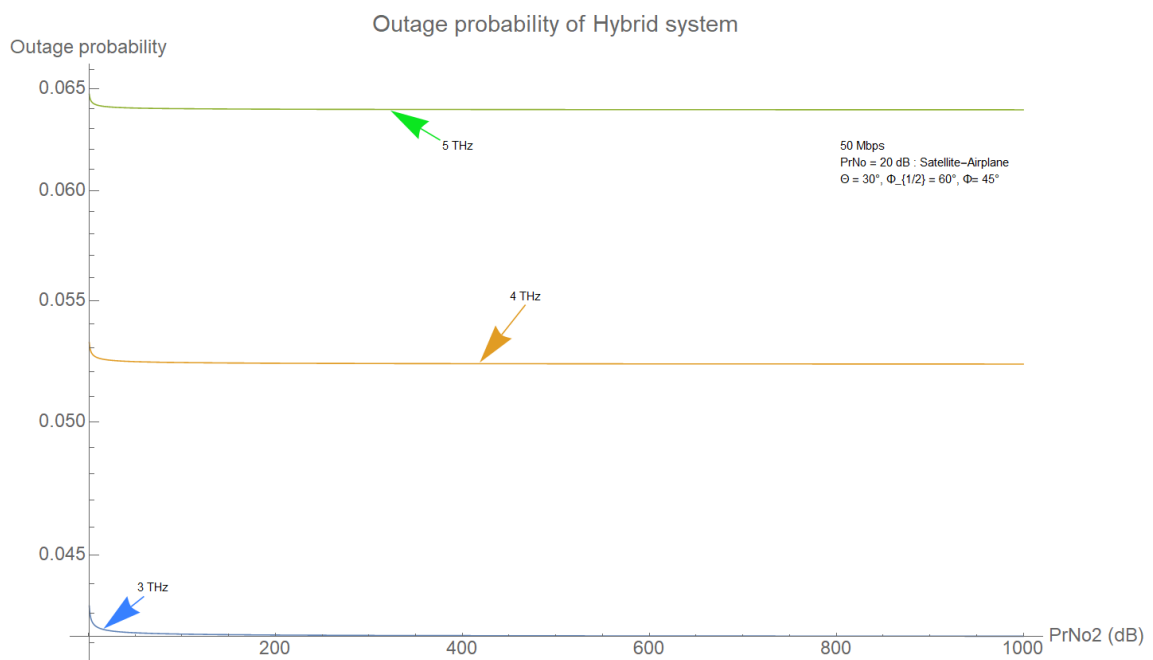
Σχήμα 4.11: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 50 km και ταχύτητα σύνδεσης 800 gigabits per second (Gbps) για διαφορετικές σηματοδορυβικές σχέσεις σύνδεσης αεροπλάνου-επιβάτη



Σχήμα 4.12: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 50 km και ταχύτητα σύνδεσης 800 gigabits per second (Gbps) για διαφορετικές σηματοδορυβικές σχέσεις σύνδεσης αεροπλάνου-επιβάτη και για διαφορετικές σταθερές γωνίες στο VLC κανάλι



Σχήμα 4.13: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 km και ταχύτητα σύνδεσης 50 megabits per second (Mbps)



Σχήμα 4.14: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 km και ταχύτητα σύνδεσης 50 megabits per second (Mbps) για διαφορετικές σηματοθρομβικές σχέσεις σύνδεσης αεροπλάνου-επιβάτη και για διαφορετικές σταθερές γωνίες στο VLC κανάλι

συχνότητα(f)	$3 \times 10^{12}, 4 \times 10^{12}, 5 \times 10^{12}$ Hz
$w_0$	1.44 m
$z$	100000 m
$\alpha$	0.72 m
$\sigma_s$	1.44
$A_0$	0.138, 0.193, 0.236
$\Xi$	0.908, 0.651, 0.533
Μεταβλητή κατανομής Weibull(k)	33.474, 27.874, 24.184
l	1.017, 1.020, 1.023
γωνία μισής εκπομπής του χρήστη ( $\Theta$ )	60°, 30°
γωνία μισής εκπομπής αεροπλάνου ( $\Phi_{1/2}$ )	60°
γωνία επικοινωνίας αεροπλάνου-επιβάτη ( $\Phi$ )	30°, 45°

Πίναξ~4.1: Τιμές μεταβλητών των αποτελεσμάτων διακοπής λειτουργίας του υβριδικού συστήματος για 100 km απόσταση δορυφόρου-αεροπλάνου

συχνότητα(f)	$3 \times 10^{12}, 4 \times 10^{12}, 5 \times 10^{12}$ Hz
$w_0$	1.44 m
$z$	50000 m
$\alpha$	0.72 m
$\sigma_s$	1.44
$A_0$	0.364, 0.375, 0.380
$\Xi$	0.349, 0.340, 0.335
Μεταβλητή κατανομής Weibull(k)	167.371, 139.372, 120.922
l	1.003, 1.004, 1.005
γωνία μισής εκπομπής του χρήστη ( $\Theta$ )	60°, 30°
γωνία μισής εκπομπής αεροπλάνου ( $\Phi_{1/2}$ )	60°
γωνία επικοινωνίας αεροπλάνου-επιβάτη ( $\Phi$ )	30°, 45°

Πίναξ~4.2: Τιμές μεταβλητών των αποτελεσμάτων διακοπής λειτουργίας του υβριδικού συστήματος για 50 km απόσταση δορυφόρου-αεροπλάνου

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας, θέτοντας ρυθμό διάδοσης 300 megabits per second (Mbps) για σταθερή σηματοθρουβική σχέση αεροπλάνου-επιβάτη (PrNo2) και για σταθερές τιμές  $\Theta = 60^\circ$ ,  $\Phi_{1/2} = 60^\circ$  και  $\Phi = 30^\circ$  για απόσταση δορυφόρου-αεροπλάνου 100 km, ως προς τον λόγο σήματος προς θόρυβο δορυφόρου αεροπλάνου (PrNo). Ενώ, στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η αντίστοιχη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για τον ίδιο ρυθμό διάδοσης 300 Mbps και απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου, αλλά διαφορετικές γωνίες  $\Theta = 30^\circ$ ,  $\Phi_{1/2} = 60^\circ$  και  $\Phi = 45^\circ$ , με σταθερή σηματοθρουβική σχέση δορυφόρου-αεροπλάνου ως προς την σηματοθρουβική σχέση αεροπλάνου-επιβάτη. Οι συχνότητες λειτουργίας που εξετάζουμε για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του υβριδικού συστήματος όπως φαίνεται και από τα σχήματα είναι 3 THz, 4THz και 5 THz. Τελικά, συμπεραίνουμε ότι ο λόγος σήματος προς θόρυβο στο THz κανάλι επηρεάζει την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας σχεδόν όσο επηρεάζει η σηματοθρουβική σχέση στο VLC κανάλι για 300 Mbps και όσο μικρότερη η συχνότητα λειτουργίας, τόσο μικρότερη η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του συστήματος.



Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για διάφορες συχνότητες λειτουργίας, θέτοντας ρυθμό 300 gigabits per second (Gbps) και σταθερό PrNo2 και απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 km. Παρατηρούμε, ότι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας είναι μικρότερη, όσο ο λόγος σήματος προς θόρυβο του THz καναλιού δορυφόρου-αεροπλάνου αυξάνει για  $\Theta = 60^\circ$ ,  $\Phi_{1/2} = 60^\circ$  και  $\Phi = 30^\circ$ . Παρόμοια, στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας με σταθερό PrNo ως προς τον λόγο σήματος προς θόρυβο του VLC καναλιού και παρατηρούμε πως η σηματοθορυβική σχέση του THz καναλιού επηρεάζει την σταθερότητα της σύνδεσης περισσότερο από τον λόγο σήματος προς θόρυβο του VLC καναλιού. Ακόμη, στο Σχήμα 4.7 εφαρμόζοντας τις ίδιες παραμέτρους με αυτές του Σχήματος 4.6, αλλά χρησιμοποιώντας διαφορετικές γωνίες στην επικοινωνία αεροπλάνου τελικού χρήστη  $\Theta = 30^\circ$ ,  $\Phi_{1/2} = 60^\circ$  και  $\Phi = 45^\circ$ . Παρατηρούμε ότι το σύστημα είναι πιο σταθερό σε όλο το διάστημα που εξετάζουμε και παρουσιάζει μικρότερες πιθανότητες διακοπής λειτουργίας για μικρές τιμές του PrNo2.

Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για ρυθμό διάδοσης 800 Gbps με απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 50 km με σταθερό σηματοθορυβικό λόγο PrNo2 αεροπλάνου-επιβάτη και  $\Theta = 60^\circ$ ,  $\Phi_{1/2} = 60^\circ$  και  $\Phi = 30^\circ$  ως προς την τιμή του PrNo, παρατηρούμε πως η υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας παρουσιάζει μικρότερες πιθανότητες διακοπής από τις μικρότερες συχνότητες. Επιπλέον, στο Σχήμα 4.9 για τον ίδιο ρυθμό αλλά για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 km παρατηρούμε ότι για μικρές τιμές του PrNo, όσο μικρότερη η συχνότητα λειτουργίας τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ενώ για μεγάλες τιμές παρατηρούμε το αντίθετο. Επίσης, στο Σχήμα 4.10 χρησιμοποιώντας  $\Theta = 30^\circ$ ,  $\Phi_{1/2} = 60^\circ$  και  $\Phi = 45^\circ$  για το κανάλι VLC και παρατηρούμε μικρότερες πιθανότητες διακοπής λειτουργίας με αυτές του συστήματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9.

Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του υβριδικού συστήματος για ρυθμό 800 Gbps και σταθερή τιμή PrNo για απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 50 km με  $\Theta = 60^\circ$ ,  $\Phi_{1/2} = 60^\circ$  και  $\Phi = 30^\circ$  ως προς την σηματοθορυβική σχέση αεροπλάνου-επιβάτη PrNo2. Ενώ, στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η αντίστοιχη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας αλλά για διαφορετικές τιμές στο VLC κανάλι, με  $\Theta = 30^\circ$ ,  $\Phi_{1/2} = 60^\circ$  και  $\Phi = 45^\circ$ . Τελικά, παρατηρούμε ότι παρουσιάζει μεγαλύτερη σταθερότητα και μικρότερες πιθανότητες διακοπής λειτουργίας για σταθερές τιμές  $\Theta = 30^\circ$ ,  $\Phi_{1/2} = 60^\circ$  και  $\Phi = 45^\circ$ .

Στο Σχήμα 4.13 απεικονίζεται η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του υβριδικού συστήματος για ταχύτητα 50 Mbps και απόσταση δορυφόρου αεροπλάνου 100 km με σταθερή σχέση σήματος προς θόρυβο αεροπλάνου-επιβάτη PrNo2 ως προς τον σηματοθορυβικό λόγο του ατμοσφαιρικού καναλιού. Επίσης, στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζεται η πιθανότητα διακοπής επικοινωνίας για ρυθμό διάδοσης δεδομένων 50 Mbps ως προς το σηματοθορυβικό λόγο του VLC καναλιού επικοινωνίας αεροπλάνου-επιβάτη για σταθερές γωνίες  $\Theta = 30^\circ$ ,  $\Phi_{1/2} = 60^\circ$  και  $\Phi = 45^\circ$ . Παρατηρούμε ότι, η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του συστήματος που προτείνουμε είναι πολύ μικρή για ταχύτητα

50 Mbps, συγκριτικά με τις πιθανότητες που παρουσιάζονται σε πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες που εξετάσαμε πιο πάνω.

#### 4.4 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η πρόταση ασύρματης επικοινωνίας, για παροχή υπηρεσιών διαδικτύου σε χρήστες που δεν βρίσκονται στην επιφάνεια της γης, όπως είναι οι επιβάτες αεροπλάνου. Το υβριδικό σύστημα που προτείνουμε χρησιμοποιεί την μπάντα των THz για επικοινωνία δορυφόρου αεροπλάνου, αξιοποιώντας το τεράστιο εύρος ζώνης μπορεί να επιτευχθεί αξιόπιστος και σταθερός υψηλός ρυθμός διάδοσης δεδομένων. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας ασύρματο οπτικό σύστημα επικοινωνίας VLC επιτυγχάνουμε την επικοινωνία αεροπλάνου τελικού χρήστη (επιβάτη). Τέλος, μέσω των διαγραμμάτων που εξάγουμε από την μαθηματική μοντελοποίηση στην ενότητα 4.3, παρατηρούμε ότι η υψηλότερη συχνότητα είναι προτιμότερη για μικρές αποστάσεις και οι μικρότερες συχνότητες λειτουργίας για μεγαλύτερες αποστάσεις δορυφόρου-αεροπλάνου.

## Κεφάλαιον 5

# Μελλοντικές επεκτάσεις

Στη παρούσα διπλωματική έγινε η μελέτη σκοπιμότητας (feasibility study) ενός συστήματος επικοινωνιών δορυφόρου αεροπλάνου τελικού χρήστη που χρησιμοποιεί τις τεχνολογίες THz και VLC χρησιμοποιώντας θεωρητικές εκφράσεις. Συγκεκριμένα, για την επικοινωνία δορυφόρου αεροπλάνου για τις διαλείψεις στην μπάντα των THz, χρησιμοποιήθηκε μοντελοποίηση μέσου Weibull κατανομής και για την επικοινωνία αεροπλάνου τελικού χρήστη μέσω VLC συστήματος, χρησιμοποιήθηκε μοντελοποίηση Γκαουσιανής κατανομής γωνίας πρόσπτωσης για την τοποθέτηση του πομποδέκτη του επιβάτη. Περιγραφικά, από την πλευρά του υλικού, αν και υπάρχει μονάδα μετατροπής σήματος THz σε σήμα βασικής ζώνης και μονάδα μετατροπής σήματος βασικής ζώνης σε VLC που θα μπορούσαν εύκολα να συνδυαστούν και να χρησιμοποιηθούν σε πειραματικές μετρήσεις, από όσο γνωρίζουμε δεν υπάρχει μία μονάδα σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Παρατηρώντας τις πρόσφατες εξελίξεις στην περιοχή της κατασκευής συσκευών THz, που χρησιμοποιούν τεχνικές που προέρχονται από την φωτονική, ανοίγεται ο δρόμος στην κατασκευή φωτονικών συσκευών THz-VLC decode-and-forward. Για την ολοκλήρωση του feasibility study, υπάρχει ανάγκη μετάβασης στο εργαστήριο. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας κατάλληλους προσομοιωτές καναλιού μπορεί κάποιος σε εργαστηριακές συνθήκες να κατασκευάσει το προτεινόμενο σύστημα και να επαληθεύσει τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης. Τέλος, τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές μελέτες για την βελτιστοποίηση του συστήματος. Επεξηγηματικά, με στόχο την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας διακοπής επικοινωνίας του συστήματος, μπορούν να οριστούν και να λυθούν αρκετά προβλήματα βέλτιστης διαχείρισης πόρων. Για παράδειγμα, βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής μεταξύ διαφορετικών χρηστών ώστε οι ελάχιστες απαιτήσεις σε ταχύτητα επικοινωνίας του καθενός να ικανοποιούνται. Επιπλέον, προβλήματα μεγιστοποίησης της ολικής ταχύτητας επικοινωνίας ή της ενεργειακής αποδοτικότητας λαμβάνοντας ως απαίτηση μια μέγιστη πιθανότητα διακοπής επικοινωνίας, μπορούν να διατυπωθούν και να λυθούν. Εν κατακλείδι, οι εκφράσεις που δώσαμε μας επιτρέπουν να κάνουμε κατάλληλες επιλογές όσο αναφορά τις παραμέτρους αποστολής και λήψης (π.χ. συχνότητα επικοινωνίας).



# Βιβλιογραφία

- [1] *Cisco Visual Networking Index, Forecast and Trends, 2017-2022, White Paper, Cisco*, Feb. 2019.
- [2] J. Andrews and A. Gatherer, “Will densification be the death of 5g?” *ComSoc Technology News*, May 2015.
- [3] A.-A. A. Boulogeorgos, A. Alexiou, T. Merkle, C. Schubert, R. Elschner, A. Katsiotis, P. Stavrianos, D. Kritharidis, P.-K. Chartsias, J. Kokkonemi, M. Juntti, J. Lehtomaki, A. Teixeira, and F. Rodrigues, “Terahertz technologies to deliver optical network quality of experience in wireless systems beyond 5g,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 6, pp. 144–151, 2018.
- [4] A.-A. A. Boulogeorgos, J. M. Jornet, and A. Alexiou, “Directional terahertz communication systems for 6g: Fact check,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 16, no. 4, pp. 68–77, 2021.
- [5] A.-A. A. Boulogeorgos, S. E. Trevlakis, and N. D. Chatzidiamantis, “Optical wireless communications for in-body and transdermal biomedical applications,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 1, pp. 119–125, 2021.
- [6] A.-A. A. Boulogeorgos, E. N. Papatirou, and A. Alexiou, “Analytical performance assessment of thz wireless systems,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 11 436–11 453, 2019.
- [7] —, “A distance and bandwidth dependent adaptive modulation scheme for thz communications,” in *2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2018, pp. 1–5.
- [8] A.-A. A. Boulogeorgos and A. Alexiou, “Error analysis of mixed thz-rf wireless systems,” *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 2, pp. 277–281, 2020.
- [9] A.-A. A. Boulogeorgos, E. N. Papatirou, J. Kokkonemi, J. Lehtomaeki, A. Alexiou, and M. Juntti, “Performance evaluation of thz wireless systems operating in 275-400 ghz band,” in *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2018, pp. 1–5.
- [10] G. Stratidakis, E. N. Papatirou, H. Konstantinis, A.-A. A. Boulogeorgos, and A. Alexiou, “Relay-based blockage and antenna misalignment mitigation in thz wireless communications,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–4.

- [11] A.-A. A. Boulogeorgos, S. K. Goudos, and A. Alexiou, "Users association in ultra dense thz networks," in *2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2018, pp. 1–5.
- [12] A. Al-Kinani, C.-X. Wang, L. Zhou, and W. Zhang, "Optical wireless communication channel measurements and models," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1939–1962, 2018.
- [13] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on free space optical communication: A communication theory perspective," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, 2014.
- [14] A.-A. A. Boulogeorgos, N. D. Chatzidiamantis, H. G. Sandalidis, A. Alexiou, and M. D. Renzo, "Cascaded composite turbulence and misalignment: Statistical characterization and applications to reconfigurable intelligent surface-empowered wireless systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 4, pp. 3821–3836, 2022.
- [15] C. Chaccour, M. N. Soorki, W. Saad, M. Bennis, P. Popovski, and M. Debbah, "Seven defining features of terahertz (thz) wireless systems: A fellowship of communication and sensing," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 967–993, 2022.
- [16] J. Machado, A.-A. Boulogeorgos, R. Elschner, R. Ferreira, J. Kokkonen, N. Kokkalis, D. Kritharidis, G. Ntouni, S. Mushtaq, and j.-c. Point, "Wireless terahertz system applications for networks beyond 5g," 03 2019.
- [17] M. Taherkhani, Z. G. Kashani, and R. A. Sadeghzadeh, "On the performance of thz wireless links through random turbulence channels," *Nano Communication Networks*, vol. 23, p. 100282, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878778919301061>
- [18] A. Saeed, O. Gurbuz, and M. A. Akkas, "Terahertz communications at various atmospheric altitudes," *Physical Communication*, vol. 41, p. 101113, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490720301907>
- [19] R. Hou, Y. Chen, J. Wu, and H. Zhang, "A brief survey of optical wireless communication," vol. 163, pp. 41–50, 01 2015.
- [20] M. Uysal and H. Nouri, "Optical wireless communications — an emerging technology," 07 2014, pp. 1–7.
- [21] N. K. Shukla, A. M. Mayet, A. Vats, M. Aggarwal, R. K. Raja, R. Verma, and M. A. Muqeet, "High speed integrated rf–vlc data communication system: Performance constraints and capacity considerations," *Physical Communication*, vol. 50, p. 101492, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490721002287>
- [22] A. Vats, M. Aggarwal, and S. Ahuja, "Outage and error performance analysis of dual hop hybrid rf–vlc system with wireless energy harvesting," *Physical Communication*, vol. 55,

- p. 101882, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490722001598>
- [23] H. Chen and Z. Xu, "Oled panel radiation pattern and its impact on vlc channel characteristics," *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 1–10, 2018.
- [24] Y. Lu and X. Zheng, "6g: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 19, p. 100158, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X20300339>
- [25] S. A. Abdel Hakeem, H. H. Hussein, and H. Kim, "Vision and research directions of 6g technologies and applications," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 6, Part A, pp. 2419–2442, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157822001033>
- [26] K. Tekbıyık, A. R. Ekti, G. K. Kurt, and A. Görçin, "Terahertz band communication systems: Challenges, novelties and standardization efforts," *Physical Communication*, vol. 35, p. 100700, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490718307766>
- [27] B. Zhao, H. Kong, X. Liu, M. Lin, J. Ouyang, and W.-P. Zhu, "Transmit diversity and performance analysis for aeronautical broadband satellite communication systems," *Physical Communication*, vol. 48, p. 101424, 07 2021.
- [28] H. Shankar and A. Kansal, "Performance analysis of  $\kappa$ - $\mu$ /gamma shadowed fading model over indoor off body communication channel," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 93, pp. 283–288, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841117323907>
- [29] O. Trotsko, "Analysis of ways to improve the efficiency of modern satellite communication systems," *Technology audit and production reserves*, vol. 3, pp. 51–56, 06 2022.
- [30] H. BUSARI and O. Fakolujo, "Rain attenuation prediction models in microwave and millimeter bands for satellite communication system: A review," *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, vol. 6, 03 2021.
- [31] T. Javornik, I. Jelovcan, and M. Mohorcic, "Coexistence analysis of dvb-s satellite services with dvb-t based terrestrial service in the 11.7-12.5 ghz frequency band," 11 2006, pp. 41–46.
- [32] J. Naghar, A. NAGHAR, O. Aghzout, A. Alejos, and F. Falcone, "A uwb frequency-band reconfigurable antenna for satellite applications," *International Journal of Microwave and Optical Technology*, vol. 13, 01 2018.
- [33] N. Fonseca, "Very compact waveguide orthomode transducer in the k-band for broadband communication satellite array antennas," *Sensors*, vol. 23, p. 735, 01 2023.
- [34] K. Tekbıyık, G. Karabulut Kurt, and A. Ekti, "Reconfigurable intelligent surfaces empowered thz communication in leo satellite networks," *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 01 2022.

- [35] A. Ekti, A. Boyaci, A. Alparslan, I. Unal, S. Yarkan, A. Gorcin, H. Arslan, and M. Uysal, "Statistical modeling of propagation channels for terahertz band," 09 2017.
- [36] O. Oyeleke, S. Thomas, B. Idowu-Bismark, P. Nzerem, and I. Muhammad, "Absorption, diffraction and free space path losses modeling for the terahertz band," *International Journal of Engineering and Manufacturing*, vol. 10, pp. 54–65, 02 2020.
- [37] J. Kokkonieni, J. Jornet, V. Petrov, Y. Koucheryavy, and M. Juntti, "Channel modeling and performance analysis of airplane-satellite terahertz band communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. PP, pp. 1–1, 02 2021.
- [38] M. Uysal, J. li, and M. Yu, "Error rate performance analysis of coded free-space optical links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 1229 – 1233, 07 2006.
- [39] H. Li, Y. Huang, Q. Wang, D. He, Z. Peng, and Q. Li, "Performance analysis of satellite-to-ground coherent optical communication system with aperture averaging," *Applied Sciences*, vol. 8, p. 2496, 12 2018.
- [40] D. Ai, C. Vuong, and D. Dang, "Average symbol error rate analysis of reconfigurable intelligent surfaces-assisted free-space optical link over log-normal turbulence channels," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 13, p. 571, 02 2023.
- [41] M. Al-Nahhal, H. Kasem, T. Ismail, and M. Nasr, "Fso-simo system with sim-dpsk over log-normal atmospheric turbulence and misalignment," 07 2017.
- [42] M. Al-Nahhal, T. Ismail, H. Selmy, and M. Elmesalawy, "Bpsk based sim-fso communication system with simo over log-normal atmospheric turbulence with pointing errors," 07 2017.
- [43] M. Yasser, T. Ismail, and A. Ghuniem, "M-ary ask modulation in fso system with simo over log-normal atmospheric turbulence with pointing errors," 07 2018.
- [44] K. Li, B. Lin, and J. Ma, "Dpsk modulated multiple apertures receiver system for satellite-to-ground heterodyne optical communication," *Optics Communications*, vol. 454, p. 124466, 08 2019.
- [45] M. Petkovic, G. Djordjevic, D. Milic, and B. Vasic, "Ber analysis of im/dd fso system with apd receiver over gamma-gamma turbulence," *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 11, pp. 61–72, 01 2014.
- [46] M. Miao and X. Li, "Gallager exponent analysis of coherent mimo fso systems over gamma-gamma turbulence channels," *Entropy*, vol. 22, p. 1245, 11 2020.
- [47] A. Bukola, K. Odeyemi, O. Pius, and V. Srivastava, "Performance of ofdm-fso communication system with different modulation schemes over gamma-gamma turbulence channel," *Journal of Communications*, vol. 14, pp. 490–497, 05 2019.



- [48] M. Cheng, Y. Zhang, J. Gao, F. Wang, and F. Zhao, "Average capacity for optical wireless communication systems over exponentiated weibull distribution non-kolmogorov turbulent channels," *Applied optics*, vol. 53, pp. 4011–4017, 06 2014.
- [49] L. Xinzhong, J. Zou, G. Xie, X. Peng, and C. Li, "Performance analysis of ris-assisted mixed dual-hop fso-rf communication systems over exponentiated weibull channels," *Security and Communication Networks*, vol. 2021, 10 2021.
- [50] E. Erdogan, "Joint user and relay selection for relay-aided rf/fso systems over exponentiated weibull fading channels," *Optics Communications*, vol. 436, pp. 209–215, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401818310940>
- [51] J. Zhao, S.-H. Zhao, W.-H. Zhao, Y. Liu, and X. Li, "Performance of mixed rf/fso systems in exponentiated weibull distributed channels," *Optics Communications*, vol. 405, pp. 244–252, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401817305953>
- [52] Z. Jing, Z. Shang-hong, Z. Wei-hu, and C. Ke-fan, "Performance analysis for mixed fso/rf nakagami-m and exponentiated weibull dual-hop airborne systems," *Optics Communications*, vol. 392, pp. 294–299, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401817300524>
- [53] Y. Devrim, L. Bilir, M. İmir, and A. Albostan, "Seasonal and yearly wind speed distribution and wind power density analysis based on weibull distribution function," *International Journal of Hydrogen Energy*, 05 2015.
- [54] R. Ihaddadene, I. Nabila, and M. Marouane, "Comparison between hybrid weibull and mep methods for calculating wind speed distribution," 03 2014, pp. 1–6.
- [55] I. Pérez, M. García, M. Sánchez, and B. Torre, "Description of atmospheric variables measured with a rass sodar: Cycles and distribution functions," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, p. 436–453, 04 2008.
- [56] R. Barrios and F. Dios, "Exponentiated weibull distribution family under aperture averaging for gaussian beam waves," *Optics express*, vol. 20, pp. 13 055–64, 06 2012.
- [57] S. Farid, M. Saleh, H. Elbadawy, and S. Elramly, "Asco-ofdm based vlc system throughput improvement using papr precoding reduction techniques," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 55, 03 2023.
- [58] W. J. Ryu, K. Jaewoo, and D.-S. Kim, "Resource allocation in downlink vlc-noma systems for factory automation scenario," *Sensors*, vol. 22, p. 9407, 12 2022.
- [59] C. Chen, R. Zhang, W. Wen, M. Liu, P. Du, Y. Yang, and X. Ruan, "Hybrid 3dma for multi-user mimo-vlc," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 14, pp. 780–791, 10 2022.
- [60] S. Aboagye, T. Ngatched, O. Dobre, and H. V. Poor, "Energy-efficient resource allocation for aggregated rf/vlc systems," 06 2022.

- [61] N. K. Shukla, A. M. Mayet, A. Vats, M. Aggarwal, R. K. Raja, R. Verma, and M. A. Muqeet, "High speed integrated rf-vlc data communication system: Performance constraints and capacity considerations," *Physical Communication*, vol. 50, p. 101492, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490721002287>
- [62] A. Upadhya, "Investigation of ris enabled mixed rf/vlc relaying with interference," *Physical Communication*, vol. 55, p. 101920, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490722001975>
- [63] A. Vats, M. Aggarwal, and S. Ahuja, "Outage and error performance analysis of dual hop hybrid rf-vlc system with wireless energy harvesting," *Physical Communication*, vol. 55, p. 101882, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490722001598>
- [64] B. Mohamed, M. Uysal, and M. Elamassie, "Vehicular vlc system with selection combining," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, 07 2022.
- [65] J. Solis, P. Palacios, C. Azurdia-Meza, D. Zabala-Blanco, I. Soto, and M. Ijaz, "A general mimo vlc channel model for underground mining environments," 10 2022.
- [66] R. Alkanhel, A. Kumar, D. Jayakody, and S. Al-Kuwari, "Security performance analysis of a noma-assisted underwater vlc system under imprecise channel estimations," *IEEE Access*, vol. PP, 10 2022.
- [67] Y. Eroglu, Y. Yapici, and I. Guvenc, "Impact of random receiver orientation on visible light communications channel," *IEEE Transactions on Communications*, vol. PP, 10 2017.