



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Σχολή Οικονομίας, Διοίκησης και Πληροφορικής

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

ΠΜΣ “Προηγμένα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα και Δίκτυα”

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συχνότητες Terahertz

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γαραντζιώτης Περικλής

Επιβλέπουσα : Αθανασιάδου Γεωργία,
Επίκουρη Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Πελοποννήσου

Τρίπολη, 2018

Σύνοψη

Η επικοινωνία στην συχνοτική ομάδα των Terahertz (0.06–10 THz) συγκαταλέγεται ως μία από τις βασικές τεχνολογίες για την ικανοποίηση της αυξανόμενης ζήτησης για ασύρματες ζεύξεις σε πιο γρήγορες ταχύτητες από τις ήδη παρεχόμενες.

Η μπάντα των THz θα ελαττώσει την φασματική ανεπάρκεια και τους περιορισμούς στην χωρητικότητα των υφιστάμενων ασύρματων δικτύων και θα επιτρέψει την ανάπτυξη νέων εφαρμογών τόσο στο κλασσικούς δικτυακούς κλάδους όσο και σε καινοτόμες ιδεολογικές δομές που αφορούν εφαρμογές σε νανοεπίπεδο.

Σε αυτή την εργασία, αρχικά αναφέρονται κάποιες από τις εφαρμογές αυτές, ενώ αναφέρονται και προκλήσεις αλλά και τομείς περαιτέρω έρευνας για την επικοινωνία σε THz. Παρουσιάζεται ένα ομογενοποιημένο μοντέλο καναλιού πολλαπλών διαδρομών στην μπάντα των THz βασισμένο σε τεχνικές ανίχνευσης ακτίνων, το οποίο ενσωματώνει τα μοντέλα διάδοσης για τις απευθείας, τις ανακλώμενες, τις σκεδαζόμενες και τις περιθλώμενες ακτίνες. Ακόμα, λόγω της αυξημένης ατμοσφαιρικής απορρόφησης στις συχνότητες αυτές, είναι επιβεβλημένη η μελέτη των απωλειών λόγω μοριακής ατμοσφαιρικής απορρόφησης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Στον υπολογισμό της μοριακής αυτής απορρόφησης εστιάζεται το τελευταίο κομμάτι της εργασίας, όπου προσομοιώνονται δύο διαφορετικά μοντέλα υπολογισμού των απωλειών και τα αποτελέσματα συγκρίνονται για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Abstract

THz band (0.06–10 THz) communication is considered as one of the key technologies to be used for the satisfaction of the constantly growing need for higher speed wireless communication networks.

THz band will diminish spectral scarcity and capacity limitations of the present wireless networks. The development of new applications in the classical networking domains as well as in pioneer nanoscale application paradigms will be facilitated.

In this thesis, we commence by mentioning some of the applications, while also citing challenges and research domains in THz band communications. A unified multi-ray channel model is presented based on ray tracing techniques, which embodies the propagation models for the line-of-sight, reflected, scattered and diffracted rays. Moreover, due to the higher atmospheric absorption happening in these frequencies, it is essential to study the molecular atmospheric absorption path loss of the EM waves. The calculation of the molecular absorption is what we are coping with in the last section of this thesis, where we simulate two different models for the calculation of absorption path loss and we compare the results.

Περιεχόμενα

Σύνοψη	1
Abstract.....	2
Περιεχόμενα.....	3
Ευρετήριο Σχημάτων	5
Ευρετήριο Πινάκων	7
Κεφάλαιο 1.....	9
Εισαγωγή Στα Συστήματα Επικοινωνιών σε THz Συχνότητες.....	9
1.1 Εισαγωγικά	9
1.2 Κίνητρο για THz Επικοινωνίες	9
1.3 Εφαρμογές.....	11
1.3.1 Επικοινωνία σε Terahertz συχνότητες στο μακροεπίπεδο	11
1.3.2 Επικοινωνία σε Terahertz συχνότητες σε μικρο/νανοεπίπεδο	12
1.4 Προκλήσεις και ερευνητικοί σκοποί.....	14
1.4.1 Μοντελοποίηση καναλιού	14
1.4.2 Line-of-Sight διάδοση	15
1.4.3 Non-line-of-sight Διάδοση.....	16
1.4.4 Κανάλι πολλαπλών διαδρομών	17
1.4.5 Πηγές θορύβου στα Terahertz.....	17
Κεφάλαιο 2.....	19
Μοντέλο Καναλιού Διάδοσης Πολλαπλών Ακτίνων.....	19
2.1 Line-of-Sight Διάδοση.....	21
2.2 Διάδοση Ανακλώμενων Ακτίνων.....	22
2.3 Διάδοση Σκεδαζόμενων Ακτίνων	23
2.4 Διάδοση Περιθλώμενων ακτίνων	26
Κεφάλαιο 3.....	29
Ατμοσφαιρική Απορρόφηση στα THz	29
3.1 Ατμοσφαιρική Απορρόφηση Βάσει HITRAN.....	30
3.2 Ατμοσφαιρική Απορρόφηση Σύμφωνα με τους J.M Jornet, I.F. Akyildiz [3]	33
3.3 Ατμοσφαιρική Απορρόφηση Βάσει ITU [13].....	36
Κεφάλαιο 4.....	39

Αποτελέσματα και Συμπεράσματα	39
4.1 Συντελεστής μοριακής απορρόφησης.....	39
4.2 Εξασθένιση λόγω μοριακής απορρόφησης	44
Επίλογος.....	53
Βιβλιογραφία.....	55
Παράρτημα Α.....	56
Τρόπος λειτουργίας του κώδικα.....	56
Παράρτημα Β.....	57
Υπολογιστικός Κώδικας	57
B.1 Εισαγωγή της βάσης δεδομένων του HITRAN σε .mat αρχείο (importhitran.m)	57
B.2 Υπολογισμός Συντελεστών Απορρόφησης Βάσει HITRAN.....	60
B.2.1 Υπολογισμός Συντελεστή Απορρόφησης για άζωτο (Kcoefficient_HITRANnitro.m)	60
B.2.2 Υπολογισμός Συντελεστή Απορρόφησης για οξυγόνο (Kcoefficient_HITRANoxy.m).....	62
B.2.3 Υπολογισμός Συντελεστή Απορρόφησης για υδρατμούς (Kcoefficient_HITRANwat.m).....	65
B.3 Υπολογισμός Συντελεστή Απορρόφησης Βάσει Jorner, Akyildiz	71
B.3.1 Υπολογισμός Συντελεστή Απορρόφησης για υδρατμούς (K_AkyiOxy.m)	71
B.3.2 Υπολογισμός Συντελεστή Απορρόφησης για υδρατμούς (K_AkyiWat.m)	74
B.4 Δημιουργία Διαγραμμάτων Ατμοσφαιρικής Απορρόφησης με τη χρήση της συνάρτησης gaspl (gsplitTU.m).....	80

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Η μπάντα των Terahertz (0.1 - 10 THz) στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	9
Σχήμα 2: Εφαρμογές των THz στο μακροεπίπεδο.....	12
Σχήμα 3: Εφαρμογές των THz στο νανοεπίπεδο.	14
Σχήμα 4: Μοντέλα διάδοσης μεταξύ πομπού και δέκτη	21
Σχήμα 5: Ανάκλαση σε ομαλή και μη-ομαλή επιφάνεια.....	24
Σχήμα 6: Γεωμετρία σκέδασης σε ένα σύστημα συντεταγμένων.	24
Σχήμα 7: Μοντέλο διάδοσης περιθλώμενης ακτίνας.	27
Σχήμα 8: Μοριακή απορρόφηση του αζώτου σε σχέση με τη συχνότητα του μεταδιδόμενου κύματος.....	40
Σχήμα 9: Μοριακή απορρόφηση του οξυγόνου σε σχέση με τη συχνότητα του μεταδιδόμενου κύματος.....	41
Σχήμα 10: Μοριακή απορρόφηση του νερού σε σχέση με τη συχνότητα του μεταδιδόμενου κύματος για ποσότητα υδρατμών 0.5%.	41
Σχήμα 11: Μοριακή απορρόφηση του οξυγόνου σε σχέση με τη συχνότητα του μεταδιδόμενου κύματος για ποσότητα υδρατμών 0.5%.	42
Σχήμα 12: Συντελεστής μοριακής απορρόφησης σε m^{-1} του οξυγόνου σε σχέση με τη συχνότητα.	43
Σχήμα 13: Συντελεστής μοριακής απορρόφησης σε m^{-1} των υδρατμών ποσότητας 0.5% σε σχέση με τη συχνότητα.	43
Σχήμα 14: Συντελεστής μοριακής απορρόφησης σε m^{-1} των υδρατμών ποσότητας 2.72% σε σχέση με τη συχνότητα.	44
Σχήμα 15: Η εξασθένηση σε ξηρή ατμόσφαιρα (μπλε) και με παρουσία υδρατμών (κόκκινο).	45
Σχήμα 16: Εξασθένηση σε ξηρή ατμόσφαιρα, σε διαφορετικές αποστάσεις εκπομπής, στα $R = 1000m$ (κόκκινο) και $R = 5m$ (μπλε).....	45
Σχήμα 17: Εξασθένηση σε ξηρή ατμόσφαιρα, για διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, με $T = 15^{\circ}C$ (κόκκινο) και $T = 30^{\circ}C$ (μπλε).	46
Σχήμα 18α: Εξασθένηση σε ξηρή ατμόσφαιρα σε διαφορετικά υψόμετρα.	46
Σχήμα 18β: Εξασθένηση σε ξηρή ατμόσφαιρα σε διαφορετικά υψόμετρα.	46
Σχήμα 19: Εξασθένηση σε ατμόσφαιρα παρουσία υδρατμών για διαφορετικές αποστάσεις εκπομπής, $R = 1000m$ (κόκκινο) και $R = 5m$ (μπλε).....	47
Σχήμα 20: Εξασθένηση σε υγρή ατμόσφαιρα, σε δύο διαφορετικές συνθήκες υγρασίας, με $w = 7.5 g/m^3$ (κόκκινο) και $w = 15 g/m^3$ (μπλε).....	48
Σχήμα 21: Εξασθένηση σε υγρή ατμόσφαιρα, για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες $T=15^{\circ}C$ (κόκκινη) και $T=30^{\circ}C$, με $w = 7.5 g/m^3$	48
Σχήμα 22: Εξασθένηση σε υγρή ατμόσφαιρα, για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες $T=15^{\circ}C$ (κόκκινη) και $T=30^{\circ}C$, με $w = 15 g/m^3$	49
Σχήμα 23α: Εξασθένηση λόγω μοριακής απορρόφησης από το οξυγόνο σε dB/km συναρτήσει της συχνότητας.	50

Σχήμα 23β: Εξασθένηση λόγω μοριακής απορρόφησης από το οξυγόνο σε dB/km συναρτήσει της συχνότητας.	50
Σχήμα 24α: Εξασθένηση λόγω μοριακής απορρόφησης από τους υδρατμούς σε dB/km συναρτήσει της συχνότητας.	51
Σχήμα 24β: Εξασθένηση λόγω μοριακής απορρόφησης από τους υδρατμούς σε dB/km συναρτήσει της συχνότητας.	51

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Ποσόστωση αερίων στην ατμόσφαιρα	30
Πίνακας 2: Παράμετροι και σταθές κατά HITRAN.....	33
Πίνακας 3: Παράμετροι και σταθερές κατά Akyildiz.....	36
Πίνακας 4: Ισότοπα Αζώτου (α), Οξυγόνου (β) και Νερού (γ) στην ατμόσφαιρα	39

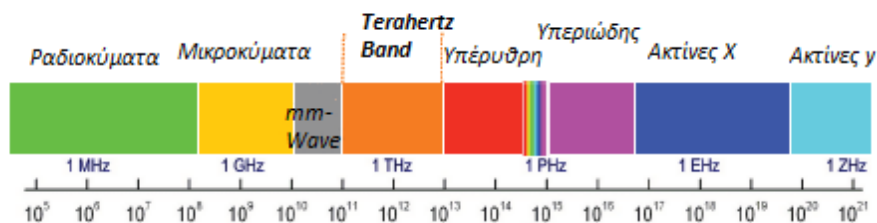
Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή Στα Συστήματα Επικοινωνιών σε THz Συχνότητες

1.1 Εισαγωγικά

Η κίνηση των ασύρματων δεδομένων έχει αυξηθεί εκθετικά τα τελευταία χρόνια, κάτι που συνεπάγεται και την αυξανόμενη ζήτηση για ασύρματες ζεύξεις υψηλότερων ταχυτήτων. Την τελευταία δεκαετία, η κίνηση των ασύρματων δεδομένων έχει αυξηθεί δραστικά λόγω της αλλαγής με την οποία η σύγχρονη κοινωνία δημιουργεί, μοιράζεται και καταναλώνει τις πληροφορίες. Αυτή η αλλαγή έχει ακολουθηθεί από μία αυξανόμενη ζήτηση για ασύρματες επικοινωνίες υψηλότερων ταχυτήτων οπουδήποτε και ανά πάσα χρονική στιγμή. Ακολουθώντας αυτή την τάση, ασύρματες υπερ-ευρυζωνικές ζεύξεις στα 100 Gbps ή ακόμα και Tbps γίνονται πραγματικότητα. Η εισαγωγή προηγμένων λύσεων φυσικού στρώματος, και σημαντικότερα, νέων συχνοτικών ομάδων είναι απαραίτητη για να υποστηριχθεί αυτός ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης στα μελλοντικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Μεταξύ άλλων, η μπάντα των Terahertz (0.06 – 10 THz) έχει βρεθεί ως μία από τις υποσχόμενες συχνοτικές μπάντες που θα προσφέρει επικοινωνίες πολύ υψηλών ταχυτήτων. Η συχνοτική αυτή ομάδα προσφέρει ένα πολύ ευρύ εύρος ζώνης, το οποίο ποικίλει από δεκάδες GHz έως και αρκετά THz, ανάλογα με την απόσταση εκπομπής.



Σχήμα 1: Η μπάντα των Terahertz (0.1 - 10 THz) στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

1.2 Κίνητρο για THz Επικοινωνίες

Εκτός της THz συχνοτικής μπάντα επικοινωνίας, αρκετές άλλες εναλλακτικές εξετάζονται για να ικανοποιήσουν την ζήτηση.

- Στα συστήματα επικοινωνιών σε συχνότητες κάτω των 5 GHz, προηγμένες ψηφιακές διαμορφώσεις όπως η Τεχνική ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) και προηγμένα επικοινωνιακά σχήματα, όπως πολύ μεγάλης κλίμακας συστήματα Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων (Multiple Input Multiple Output - MIMO) χρησιμοποιούνται για να επιτύχουν πολύ υψηλές φασματικές αποδοτικότητες. Ωστόσο, η έλλειψη διαθέσιμου εύρους ζώνης περιορίζουν τους ρυθμούς μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν. Για παράδειγμα, στα Long-Term Evolution Advanced (LTE-A) δίκτυα, οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης της τάξης του 1 Gbps είναι εφικτοί σε αθροιστικό εύρος ζώνης πάνω από 100 MHz. Αυτό είναι τρεις τάξεις μεγέθους κάτω από το επιθυμητό για τις ζεύξεις σε Tbps.
- Τα συστήματα επικοινωνιών σε χιλιοστομετρικές συχνότητες, όπως αυτά στα 60 GHz, έχουν κερδίσει πολύ έδαφος τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της ικανότητας τους να υποστηρίζουν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, της τάξης των 10 Gbps, με κόστος την περιορισμένη απόσταση μετάδοσης. Ο τρόπος για να βελτιωθούν αυτοί οι ρυθμοί δεδομένων περιλαμβάνει την ανάπτυξη πιο πολύπλοκων δομών πομποδεκτών, ικανών να εφαρμόσουν λύσεις φυσικού στρώματος με πολύ υψηλότερη φασματική αποδοτικότητα. Ωστόσο, τελικά, το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης περιορίζεται να είναι λιγότερο των 10 GHz, το οποίο αναπόφευκτα θέτει ένα άνω όριο στους επιτεύξιμους ρυθμούς μετάδοσης.
- Συστήματα επικοινωνίας Οπτικής Ελευθέρου Χώρου (Free Space Optical - FSO), τα οποία λειτουργούν σε υπέρυθρες (IR) συχνότητες και πάνω, ανακαλύπτονται ως ένας τρόπος να βελτιωθούν οι επιτεύξιμοι ρυθμοί μετάδοσης στα ασύρματα δίκτυα. Το εγγενώς πολύ διαθέσιμο εύρος ζώνης σε αυτές τις υψηλές συχνότητες λειτουργεί υπέρ τους. Από την άλλη μεριά, τα χαμηλά επίπεδα εκπομπόμενης ισχύος εξαιτίας των περιορισμών για την προστασία των ματιών, η επίδραση διαφόρων ατμοσφαιρικών φαινομένων στη διάδοση του σήματος (όπως ομίχλη, βροχή σκόνη ή ρύπανση), και το μέγεθος και η ανάγκη για αυστηρή ευθυγράμμιση μεταξύ πομπού και δέκτη, περιορίζουν τους επιτεύξιμους ρυθμούς μετάδοσης ή την πρακτικότητα των FSO συστημάτων για κινητά και προσωπικά ασύρματα δίκτυα.

Αντίθετα, η συχνотική ομάδα των THz προσφέρει ένα πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης, το οποίο ποικίλει από δεκάδες GHz μέχρι αρκετά THz ανάλογα με την απόσταση μετάδοσης [1]. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι περισσότερο από μία τάξη μεγέθους πάνω από τα πιο σύγχρονα συστήματα χιλιοστομετρικών κυμάτων, ενώ η συχνότητα λειτουργίας είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους κάτω από αυτή των FSO συστημάτων. Η τεχνολογία που

απαιτείται για να γίνει πραγματικότητα η επικοινωνία στην μπάντα των THz αναπτύσσεται ραγδαία εξίσου. Επιπρόσθετα σε όσα αναφέρθηκαν, οι συχνότητες στα THz δεν έχουν ακόμα υπαχθεί σε κανονισμούς. Σε όρους ευρύτερης επίπτωσης, η THz τεχνολογία έχει πρόσφατα αναγνωριστεί από την DARPA ως ένας από τους τέσσερις μεγαλύτερους τομείς έρευνας οι οποίοι θα μπορούσαν να έχουν επίδραση στην κοινωνία μεγαλύτερη από το ίδιο το Internet.

1.3 Εφαρμογές

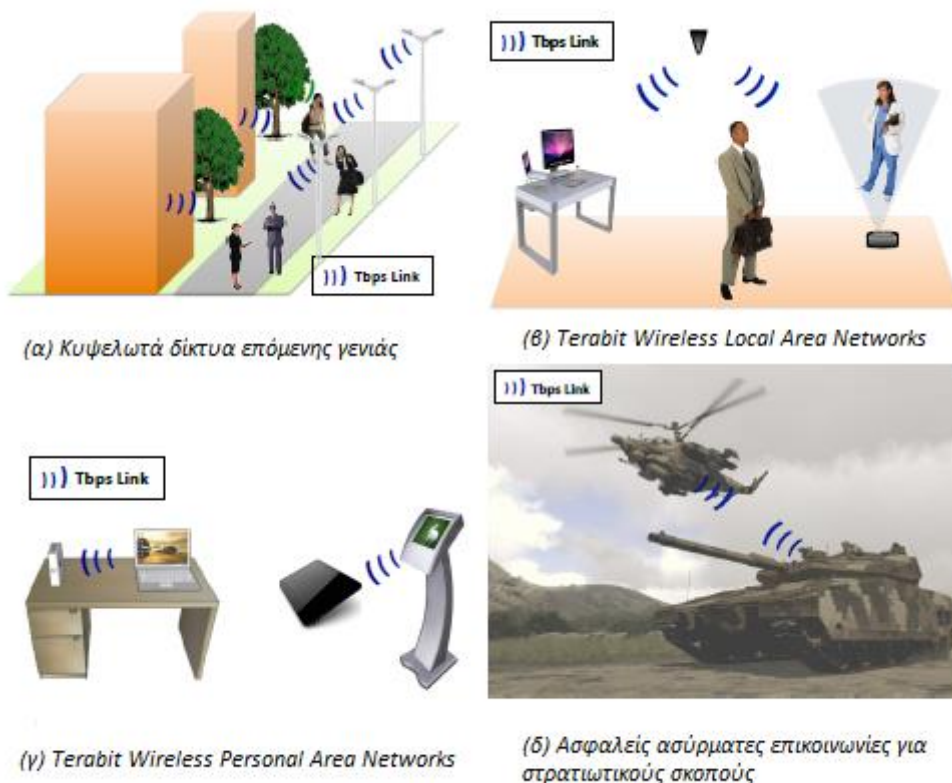
Το μεγάλο εύρος ζώνης που παρέχεται από την μπάντα των THz ανοίγει το δρόμο για μια πληθώρα εφαρμογών οι οποίες απαιτούν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και επιτρέπουν την ανάπτυξη μια πληθώρας καινούργιων εφαρμογών σε κλασικά θέματα δικτύων καθώς και σε καινούργια ζητήματα επικοινωνίας σε επίπεδο νανοκλίμακας.

1.3.1 Επικοινωνία σε Terahertz συχνότητες στο μακροεπίπεδο

Οι εφαρμογές στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν τα THz σε μακροσκοπικό επίπεδο είναι, μεταξύ άλλων:

- **5G Κυψελωτά Δίκτυα:** Η επικοινωνία μέσω της συχνοτικής ομάδας των THz μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις μικροκυψέλες νέας γενιάς, δηλαδή ως μέρος ιεραρχούμενων κυψελωτών δικτύων ή ετερογενών δικτύων. Η μπάντα των THz θα παρέχει στις μικρές κυψέλες εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες δεδομένων σε περιοχή κάλυψης έως και 10 μέτρα. Επιπλέον, οι κατευθυνόμενες ζεύξεις στα THz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν πολύ υψηλές ταχύτητες ασύρματων backhaul συνδέσεων στις μικρές κυψέλες.
- **Terabit Wireless Local Area Networks (T-WLAN):** Η επικοινωνία μέσω THz επιτρέπει την απρόσκοπτη διασύνδεση μεταξύ πολύ γρήγορων ενσύρματων δικτύων, όπως ζεύξεις οπτικών ινών, και προσωπικών ασύρματων συσκευών όπως φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές (καμία διαφορά σε ταχύτητα μεταξύ ασύρματων και ενσύρματων δικτύων).
- **Terabit Wireless Personal Area Networks (T-WPAN):** Οι ζεύξεις σε Tbps μεταξύ συσκευών σε κοντινή απόσταση είναι πιθανές με την επικοινωνία σε THz. Το περιβάλλον λειτουργίας είναι κυρίως εσωτερικός χώρος και συνήθως πάνω σε γραφείο.

- Ασφαλής Ασύρματη Επικοινωνία σε Terabit: Η μπάντα των THz μπορεί ακόμα να επιτρέψει ασφαλείς συνδέσεις επικοινωνίας ευρείας κλίμακας σε στρατιωτικούς τομείς και τομείς άμυνας. Η πολύ υψηλή ατμοσφαιρική απορρόφηση στις συχνότητες των THz και η χρήση πολύ μεγάλων συστοιχίων κεραιών για να υπερνικήσουν την περιορισμένη απόσταση επικοινωνίας έχουν ως αποτέλεσμα πολύ μικρές σε μέγεθος ακτίνες, οι οποίες μειώνουν δραστικά την πιθανότητα υποκλοπής.

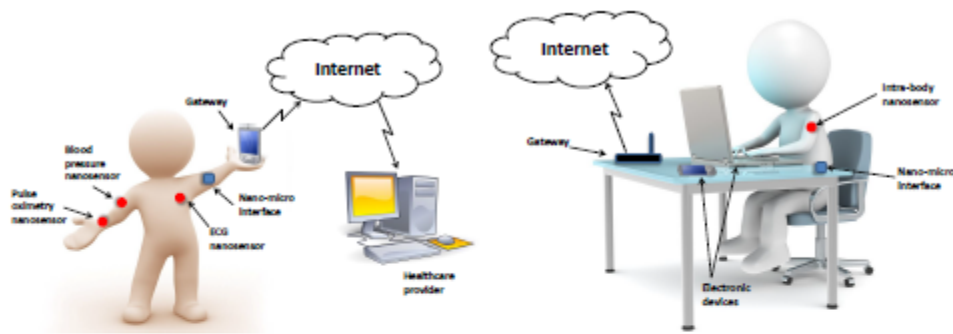


Σχήμα 2: Εφαρμογές των THz στο μακροεπίπεδο [2].

1.3.2 Επικοινωνία σε Terahertz συχνότητες σε μικρο/νανοεπίπεδο

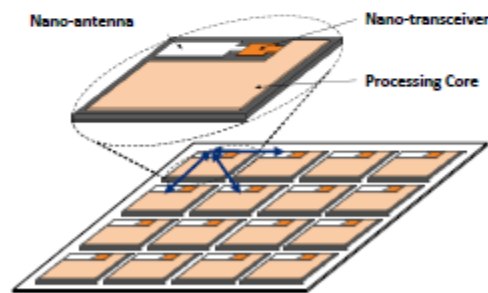
Η μπάντα των THz θα δώσει ακόμα τη δυνατότητα για ασύρματη επικοινωνία μεταξύ μηχανών σε νανοσκοπική κλίμακα ή αλλιώς νανομηχανές. Η τελευταία λέξη της τεχνολογίας στους πομποδέκτες και τις κεραιές αυτής της κλίμακας υποδεικνύουν τα THz ως το ιδανικό συχνοτικό εύρος λειτουργίας τους. Το πολύ μικρό μέγεθος και οι μοναδικές ιδιότητες των νανοκεραιών και των νανοδεκτών επιτρέπουν στις νανομηχανές να επικοινωνούν σε αυτήν την πολύ υψηλή συχνότητα. Μερικές εφαρμογές είναι:

- Συστήματα Παρακολούθησης Υγείας: Το νάτριο, η γλυκόζη και άλλα ιόντα στο αίμα, η χοληστερίνη, βιοδείκτες για τον καρκίνο ή η ύπαρξη διαφόρων μεταδοτικών παραγόντων μπορεί να ελεγχθεί μέσω νανοαισθητήρων. Αρκετοί νανοαισθητήρες οι οποίοι είναι κατανεμημένοι στο σώμα και ορίζουν ένα δίκτυο νανοαισθητήρων στο ανθρώπινο σώμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συλλεχθούν σχετικά δεδομένα για την υγεία του ασθενούς. Μια ασύρματη διεπαφή μεταξύ αυτών των αισθητήρων και μια συσκευή όπως ένα κινητό τηλέφωνο ή ειδικός ιατρικός εξοπλισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συλλεχθούν όλα αυτά τα δεδομένα και να προωθηθούν στο ιατρικό προσωπικό.
- Άμυνα σε πυρηνικά, βιολογικά και χημικά όπλα: Οι χημικές και βιολογικοί νανοαισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ανιχνεύσουν επιβλαβή χημικά και βιολογικά όπλα με έναν κατανεμημένο τρόπο. Ένα από τα βασικά οφέλη της χρήσης νανοαισθητήρων αντί για τους κλασσικούς χημικούς ανιχνευτές είναι ότι η παρουσία ενός χημικού σύνθετου υλικού μπορεί να ανιχνευθεί σε συγκέντρωση τόσο χαμηλή όσο ένα μόριο και πολύ γρηγορότερα από τους κλασσικούς αισθητήρες μικροσκοπικής κλίμακας.
- The Internet of Nano-things: Η διασύνδεση συσκευών νανοσκοπικής κλίμακας με υπάρχοντα επικοινωνιακά δίκτυα και κυρίως με το Internet καθορίζει ένα κυβερνο-φυσικό σύστημα το οποίο είναι γνωστό ως Internet of Nano-Things (IoNT). Το IoNT επιτρέπει νέες ενδιαφέρουσες εφαρμογές οι οποίες θα έχουν επιρροή και στον τρόπο που εργαζόμαστε. Για παράδειγμα, σε ένα διασυνδεδεμένο γραφείο, ένας νανο-πομπός και μια νανο-κεραία μπορούν να ενσωματωθούν σε κάθε αντικείμενο ώστε να τους επιτρέψουμε να είναι μονίμως συνδεδεμένα στο Internet. Ως αποτέλεσμα, ένας χρήστης μπορεί να ανιχνεύει όλα τα επαγγελματικά και προσωπικά του αντικείμενα με μεγάλη ευκολία.
- Πολύ υψηλής ταχύτητας On-chip επικοινωνία: Η THz μπάντα μπορεί να προσφέρει αποτελεσματικούς και κλιμακούμενους τρόπους εσωτερικής επικοινωνίας σε ασύρματα on-chip δίκτυα, χρησιμοποιώντας νανο-κεραίες για να κατασκευάσουμε εξαιρετικά γρήγορες ζεύξεις. Αυτή η καινούργια προσέγγιση θα ικανοποιήσει, σύμφωνα με τις προσδοκίες, τις απαιτητικές προσδοκίες των χωρικά περιορισμένων και εντατικών επικοινωνιών των on-chip εφαρμογών, εξαιτίας τόσο του υψηλού εύρους ζώνης και της εξαιρετικής χωρικής αξιοποίησης.



(α) Ασύρματο δίκτυο νανοαισθητήρων για παρακολούθηση της υγείας

(β) The Internet of nano-things



(γ) Ασύρματη on-chip επικοινωνία

Σχήμα 3: Εφαρμογές των THz στο νανοεπίπεδο [2].

1.4 Προκλήσεις και ερευνητικοί σκοποί

Καθώς οδεύουμε προς την υλοποίηση της επικοινωνίας σε THz, υπάρχουν ακόμα ερευνητικές προκλήσεις για την υλοποίηση αποδοτικών και πρακτικών επικοινωνιακών δικτύων σε THz συχνότητες οι οποίες απαιτούν καινοτόμες λύσεις και την αναθεώρηση ακόμα κάποιων καλά θεμελιωμένων ιδεών στις ασύρματες επικοινωνίες [1], στα διαφορετικά επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλου. Ακολουθως, αναφέρονται οι κύριες προκλήσεις που αφορούν την μοντελοποίηση καναλιού στην μπάντα των THz. Πολλά από αυτά τα ζητήματα είναι κοινά με τα συστήματα των mm-Wave, οπότε οι προτεινόμενες λύσεις μπορούν να εφαρμοστούν κατά κόρον και για τα τελευταία συστήματα.

1.4.1 Μοντελοποίηση καναλιού

Τα υπάρχοντα μοντέλα καναλιού για τις χαμηλότερες συχνοτικές ομάδες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην μπάντα των THz, καθώς δεν

αντικατοπτρίζουν τη συμπεριφορά αυτής της φασματικής ομάδας, δηλαδή τις πολύ υψηλές απώλειες λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης ή ανάκλασης. Προς το παρόν, οι προσπάθειες που γίνονται και αφορούν τον χαρακτηρισμό του καναλιού, επικεντρώνονται στο παράθυρο εκπομπής στα 300 GHz, καθώς σε αυτές τις συχνότητες υπάρχουν οι περισσότερες διαθέσιμες πειραματικές διατάξεις [1]. Ωστόσο, ένα παράθυρο εκπομπής σε υψηλότερες συχνότητες, ή ακόμα και παραπάνω από ένα παράθυρα ταυτόχρονα σε ολόκληρο το φάσμα των THz, θα χρειαστεί για να επιτευχθούν αξιόπιστες ζεύξεις σε Tbps. Επιπρόσθετα, εκτός από την απευθείας επικοινωνία (Line of Sight – LoS), η μη απευθείας διάδοση (Non Line of Sight – NLOS) χρειάζεται να ληφθεί υπόψιν. Συνολικά, ένα ολοκληρωμένο μοντέλο καναλιού πολλαπλών διαδρομών το οποίο θα λαμβάνει υπόψιν το στατιστικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον είναι απαραίτητο.

1.4.2 Line-of-Sight διάδοση

Το πρώτο βήμα για την κατανόηση του καναλιού στα THz είναι ο χαρακτηρισμός των φαινομένων διάδοσης τα οποία επηρεάζουν την διάδοση ελευθέρου χώρου των THz κυμάτων. Προς αυτή την κατεύθυνση, έχει αναπτυχθεί ένα LoS μοντέλο διάδοσης για ολοκληρή την ομάδα των THz (0.1–10 THz) [3]. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η θεωρία μεταφοράς ενέργειας λόγω ακτινοβολίας (radiative transfer theory) και οι πληροφορίες από την βάση δεδομένων του HITRAN [4] για να αναλυθεί η επίδραση της ατμοσφαιρικής απορρόφησης στις απώλειες διαδρομής και στο θόρυβο. Οι απώλειες διαδρομής για ένα διαδιδόμενο κύμα στις THz συχνότητες ορίζεται ως το άθροισμα των απωλειών διάδοσης και των απωλειών λόγω μοριακής απορρόφησης. Οι απώλειες διάδοσης αποτελούν την εξασθένηση εξαιτίας της διεύρυνσης του κύματος καθώς αυτό διαδίδεται στο μέσο. Οι απώλειες απορρόφησης αποτελούν την εξασθένηση που υπόκειται ένα διαδιδόμενο κύμα εξαιτίας της μοριακής απορρόφησης και εξαρτάται από την συγκέντρωση και τη σύσταση του μέσου σε μόρια. Ως αποτέλεσμα, το κανάλι στα THz είναι πολύ επιλεκτικό συχνοτικά. Για μια δεδομένη απόσταση, η συνολική απώλεια καναλιού αυξάνει με τη συχνότητα εξαιτίας των απωλειών διάδοσης. Οι απώλειες διαδρομής μπορούν εύκολα να ξεπεράσουν τα 100 dB για αποστάσεις εκπομπής της τάξης λίγων μόνο μέτρων. Ακόμα, η μοριακή απορρόφηση ορίζει αρκετά παράθυρα, των οποίων η θέση και το εύρος εξαρτάται από την απόσταση εκπομπής. Για αποστάσεις πολύ κάτω του 1 μέτρου, η μοριακή απορρόφηση είναι σχεδόν αμελητέα και, έτσι, η μπάντα των THz συμπεριφέρεται ως ένα παράθυρο εκπομπής εύρους 10 THz.

Ωστόσο, για αποστάσεις εκπομπής μεγαλύτερες του 1 μέτρου, πολλές συνιστώσες γίνονται σημαντικές και τα παράθυρα εκπομπής γίνονται πιο στενά. Στο φάσμα των 10 THz, υπάρχουν παράθυρα εκπομπής στα οποία επίδραση των απωλειών λόγω μοριακής απορρόφησης είναι μηδαμινή, πολύ κάτω των 10 dB/km. Βέβαια, εξαιτίας των απωλειών διάδοσης, οι συνολικές απώλειες είναι υψηλές, κάτι το οποίο οδηγεί στη χρησιμοποίηση πολύ κατευθυντικών με υψηλό κέρδος κεραιές, καθώς και τα καινούργια Massive MIMO σχέδια.

1.4.3 Non-line-of-sight Διάδοση

Οι LoS εκπομπές μπορεί να μην είναι πάντα πιθανές λόγω της παρουσίας εμποδίων. Συγκεκριμένα, οι NLoS εκπομπές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε: διάδοση κατοπτρικής ανάκλασης, διάδοση διάχυτης σκέδασης και περιθλούμενη διάδοση. Για να συνυπολογίσουμε την NLoS διάδοση, χρειάζεται να χαρακτηρίσουμε τους συντελεστές ανάκλασης, σκέδασης και περίθλασης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στις THz συχνότητες. Αυτές οι συνιστώσες εξαρτώνται από το υλικό και τη γεωμετρία της επιφάνειας, καθώς και από τη συχνότητα και γωνία πρόσπτωσης του κύματος. Υπάρχουν και άλλες ερευνητικές προτάσεις για τη μοντελοποίηση της μη απευθείας διάδοσης, οι οποίες είναι:

- Ο χαρακτηρισμός των συντελεστών ανάκλασης, σκέδασης και περίθλασης για κοινά υλικά στην μπάντα των THz συχνοτήτων. Οι ιδιότητες των οικοδομικών υλικών έχουν υπολογισθεί έως το 1 THz [5]. Ωστόσο, οι συντελεστές αυτοί για κοινά υλικά που χρησιμοποιούνται στις οραματιζόμενες εφαρμογές (από εσωτερικά περιβάλλοντα μέχρι on-chip επικοινωνίες) πρέπει να μελετηθούν αναλυτικά και να επαληθευτούν με πειραματικές μετρήσεις για όλο το φάσμα των THz.
- Η μελέτη NLOS επικοινωνιών με κατευθυνόμενη ανάκλαση σε διηλεκτρικούς καθρέπτες. Αυτή η μορφή διάδοσης δρα συμπληρωματικά σε περίπτωση που η απευθείας δεν είναι διαθέσιμη. Συγκεκριμένα σε εσωτερικά περιβάλλοντα, η απευθείας διάδοση είναι το πιο πιθανόν μη διαθέσιμη. Αντ' αυτού, η NLOS διάδοση μπορεί να σχεδιαστεί τοποθετώντας στρατηγικά διηλεκτρικούς καθρέπτες ώστε να ανακλούν την ακτίνα προς τον δέκτη. Οι απώλειες διαδρομής που προκύπτουν είναι αποδεκτές εξαιτίας των χαμηλών απωλειών ανάκλασης στους διηλεκτρικούς καθρέπτες.

1.4.4 Κανάλι πολλαπλών διαδρομών

Με εξαιρετικά μεγάλο εύρος ζώνης, κάθε συχνοτική συνιστώσα του εκπεμπόμενου σήματος υπόκειται διαφορετική εξασθένηση και καθυστέρηση. Αυτό τα φαινόμενα δασποράς συχνότητας, ή αντιστοίχως παραμόρφωσης στον τομέα του χρόνου, δεν εμφανίζονται σε ήδη υπάρχοντα μοντέλα καναλιού πολλαπλών διαδρομών. Έτσι, νέα μοντέλα πολλαπλών διαδρομών πρέπει να αναπτυχθούν για τις THz συχνότητες επικοινωνίας. Μία πιθανή προσέγγιση για να αναλυθεί η διάδοση πολλαπλών διαδρομών είναι η μελέτη μεμονομένων ακτίνων που φτάνουν στο δέκτη, χρησιμοποιώντας τεχνικές ανίχνευσης ακτίνων (ray tracing). Όταν υπάρχει LOS ακτίνα, μόνο η LOS και οι ανακλώμενες ακτίνες χρειάζεται να αναλυθούν για τη μοντελοποίηση καναλιού πολλαπλών ακτίνων. Αντιθέτως, υπό NLOS συνθήκες, τα φαινόμενα σκέδασης πρέπει να ενσωματωθούν στο μοντέλο μαζί με τις ανακλώμενες συνιστώσες. Συγκεκριμένα, υψηλότερο ποσό ενέργειας εμφανίζεται στις σκεδαζόμενες ακτίνες σε σχέση με τις ανακλώμενες, όσο η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνεται. Και στις δύο περιπτώσεις, τα φαινόμενα περίθλασης μπορούν να αγνοηθούν, εκτός μόνο από την περίπτωση που ο δέκτης είναι πολύ κοντά με το προσπίπτον όριο σκίασης. Εναλλακτικά, εξαιτίας του ότι η μελέτη για το μοντέλο του καναλιού όταν αναφερόμαστε σε μεμονομένα σήματα άφιξης απαιτεί προηγούμενη γνώση της γεωμετρίας του περιβάλλοντος, μπορεί να αναπτυχθεί ένα στατιστικό μοντέλο το οποίο θα χαρακτηρίζει το κανάλι πολλαπλών διαδρομών αποτελεσματικά. Μία ερευνητική πρόκληση είναι να αναλυθούν στοχαστικά οι διάφορες παράμετροι που εξαρτώνται σημαντικά από τη συχνότητα και επηρεάζουν τα λαμβανόμενα σήματα πολλαπλών διαδρομών, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν την πιθανότητα παρουσίας LOS διάδοσης, τον αριθμό των υπολογίσιμων NLOS συνιστωσών, καθυστερήσεις διάδοσης και κέρδος διαδρομής. Ακόμα, είναι επίσης σχετικό να συμπεριληφθεί η επίπτωση της κατευθυντικότητας των κεραιών στις απώλειες διαδρομής του καναλιού πολλαπλών διαδρομών.

1.4.5 Πηγές θορύβου στα Terahertz

Υπάρχουν αρκετές πηγές θορύβου στην μπάντα των THz. Από τη μια πλευρά, η πλειονότητα του θορύβου στα κανάλια των THz προέρχεται κυρίως από θόρυβο λόγω μοριακής απορρόφησης. Η απορρόφηση από μόρια του μέσου όχι μόνο εξασθενεί το μεταδιδόμενο σήμα, αλλά εισάγει και θόρυβο [6]. Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου στο δέκτη αποφασίζεται από τον αριθμό και την ποσότητα των μορίων που ανιχνεύονται κατά τη διαδρομή. Ο

θόρυβος μοριακής απορρόφησης δεν είναι λευκός. Όντως, εξαιτίας λόγω των διαφορετικών συχνοτήτων ταλάντωσης κάθε τύπου μορίων, η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου δεν είναι επίπεδη, αλλά έχει αρκετές κορυφές. Ακόμα, αυτός ο τύπος θορύβου εμφανίζεται κυρίως κατά την εκπομπή, το οποίο σημαίνει ότι θα υπάρχει μόνο background noise όταν το κανάλι δεν χρησιμοποιείται. Αυτή η ιδιαιτερότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό νέων διαμορφώσεων και κωδίκων καναλιού. Από την άλλη μεριά, εκτός του πλεονάζοντος θορύβου που δημιουργείται στο κανάλι, μια μεγάλη πηγή θορύβου είναι ο δέκτης. Ο θόρυβος από το δέκτη, ο οποίος συχνά χαρακτηρίζεται από την δείκτη θορύβου (noise figure), εξαρτάται από την τεχνολογία της συσκευής που χρησιμοποιείται. Νέα μοντέλα θορύβου για συσκευές νέας τεχνολογίας από γραφένιο πρέπει να αναπτυχθούν. Προς το παρόν, αντικρουόμενες δηλώσεις για την δείκτη θορύβου του γραφενίου έχουν γίνει. Αφενός, η πολύ υψηλή αντίσταση επαφής των νανο-δομών θεωρούνταν ότι θα έχει ως αποτέλεσμα τον υψηλό θερμικό θόρυβο. Αφετέρου, το γεγονός ότι οι νανο-δομές που έχουν ως βάση το γραφένιο επιτρέπουν την βαλλιστική μεταφορά των ηλεκτρονίων, το οποίο με τη σειρά οδηγεί σε πολύ χαμηλό θερμικό θόρυβο στη συσκευή. Ένα ομοιόμορφο μοντέλο θορύβου για το γραφένιο πρέπει λοιπόν να αναπτυχθεί.

Κεφάλαιο 2

Μοντέλο Καναλιού Διάδοσης Πολλαπλών Ακτίνων

Η κίνηση των ασύρματων δεδομένων έχει αυξηθεί εκθετικά τα τελευταία χρόνια, κάτι που συνεπάγεται και την αυξανόμενη ζήτηση για ασύρματες ζεύξεις υψηλότερων ταχυτήτων. Προηγμένες λύσεις φυσικού στρώματος, και σημαντικότερα, νέες συχνοτικές μπάντες είναι απαραίτητες για να υποστηρίξουν αυτό τον υψηλό ρυθμό μετάδοσης στα μελλοντικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Μεταξύ άλλων, η μπάντα των Terahertz (0.06 – 10 THz) έχει βρεθεί ως μία από τις υποσχόμενες συχνοτικές μπάντες που θα προσφέρει επικοινωνίες πόλυ υψηλών ταχυτήτων. Η συχνοτική αυτή ομάδα προσφέρει ένα πολύ ευρύ εύρος ζώνης, το οποίο ποικίλει από δεκάδες GHz έως και αρκετά THz, ανάλογα με την απόσταση εκπομπής.

Τα υπάρχοντα μοντέλα καναλιών για τις χαμηλότερες συχνοτικές μπάντες όπως τα 60 GHz δεν προσομοιώνουν τη συμπεριφορά της μπάντας των THz, όπως είναι οι πολύ υψηλές απώλειες λόγω μοριακής απορρόφησης ή λόγω ανάκλασης. Τα λίγα μοντέλα στην μπάντα των THz που υπάρχουν, αποδίδουν τις ιδιαιτερότητες της μετάδοσης ΗΜ κυμάτων σε αυτές τις συχνότητες, συμπεριλαμβανομένου του φαινομένου της μοριακής απορρόφησης της απευθείας ακτίνων και τις απώλειες σκέδασης στις ανώμαλες επιφάνειες. Ωστόσο, βασίζονται κυρίως σε μετρήσεις οι οποίες είναι αυστηρά εξαρτώμενες από τις συνθήκες ενός συγκεκριμένου εσωτερικού περιβάλλοντος.

Παρόλα αυτά, η ενδεδειγμένη ανάλυση για τα χαρακτηριστικά του ευρυζωνικού καναλιού απουσιάζει. Έτσι, υπάρχει η απαίτηση για ένα συνολικό μοντέλο διάδοσης πολλαπλών ακτίνων με εις βάθος κατανόηση και ενδεδειγμένη ανάλυση ολόκληρου του φάσματος των Terahertz για να τεθούν οι βάσεις για αξιόπιστες και αποδοτικές ασύρματες επικοινωνίες στην μπάντα των THz.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου καναλιού πολλαπλών ακτίνων χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές ανίχνευσης ακτίνων (ray tracing) [7], εφαρμόζοντας τις αρχές της γεωμετρικής οπτικής για την ανίχνευση της διάδοσης των απευθείας, ανακλώμενων και σκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων. Το πολύ μικρό μήκος κύματος στην μπάντα των THz επιτρέπει ακριβή μοντελοποίηση με αυτή την προσέγγιση οπτικών ακτίνων.

Εφόσον η συχνοτική εξάρτηση εμφανίζεται στο κανάλι μετάδοσης και τις κεραίες στην μπάντα των THz, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο διάδοσης πολλαπλών ακτίνων ως συνδυασμό πολλών μεμονομένων μικρότερων συχνοτικών ομάδων. Κάθε συχνοτική ομάδα θεωρείται να είναι αρκετά στενή ώστε να έχει επίπεδη συχνοτική απόκριση. Στην i^{th} συχνοτική υπο-ομάδα, η κρουστική απόκριση του στενού εύρους ζώνης καναλιού εκφράζεται ως η

υπέρθεια N_i ακτίνων, μεταξύ των οποίων η n^{th} ακτίνα αποσβένεται ανάλογα με τη συχνότητα $a_{i,n}$. Για οποιοσδήποτε σταθερές θέσεις πομπού και δέκτη και στατικό περιβάλλον, θέτοντας ως τ την καθυστέρηση διάδοσης, η απόκριση του καναλιού του μοντέλου πολλαπλών ακτίνων δίνεται από:

$$h_i(\tau) = \sum_{n=1}^{N_i} a_{i,n} \delta(\tau - \tau_n) \quad (2.1)$$

Η διάδοση από πολλαπλές ακτίνες αποτελείται από απευθείας, ανακλώμενες και σκεδαζόμενες διαδρομές, όπως φαίνονται στην εικόνα 1. Εάν υπάρχουν $N_{Ref}^{(i)}$ ανακλώμενες, $N_{Sca}^{(i)}$ σκεδαζόμενες και $N_{Dif}^{(i)}$ περιθλώμενες ακτίνες στην i^{th} συχνοτική υπο-ομάδα, το μοντέλο του καναλιού πολλαπλών ακτίνων μπορεί να περιγραφεί ως

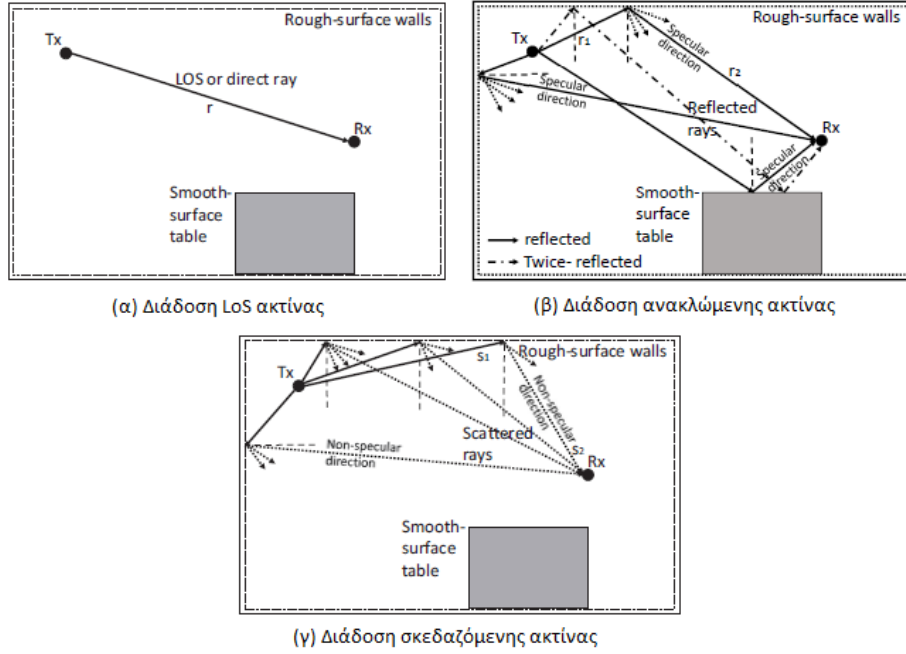
$$h_i(\tau) = a_{LoS}^{(i)} \delta(\tau - \tau_{LoS}) |_{LoS} + \sum_{p=1}^{N_{Ref}^{(i)}} a_{Ref}^{(i,p)} \delta(\tau - \tau_{Ref}^{(p)}) + \sum_{q=1}^{N_{Sca}^{(i)}} a_{Sca}^{(i,q)} \delta(\tau - \tau_{Sca}^{(q)}) + \sum_{u=1}^{N_{Dif}^{(i)}} a_{Dif}^{(i,u)} \delta(\tau - \tau_{Dif}^{(u)}) \quad (2.2)$$

όπου $|_{LoS}$ είναι ο ενδείκτης που ισούται είτε με 1 είτε με 0 για την ύπαρξη απευθείας ακτίνας ή όχι. Για την απευθείας διαδρομή, ο συντελεστής $a_{LoS}^{(i)}$ αναφέρεται στην εξασθένηση, και ο τ_{LoS} αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση. Για την p^{th} ανακλώμενη διαδρομή, $a_{Ref}^{(i,p)}$ είναι η εξασθένηση και $\tau_{Ref}^{(p)}$ η καθυστέρηση. Ομοίως για την q^{th} σκεδαζόμενη και u^{th} περιθλώμενη διαδρομή, η εξασθένηση εκφράζεται ως $a_{Sca}^{(i,q)}$ και $a_{Dif}^{(i,u)}$, ενώ οι καθυστερήσεις ως $\tau_{Sca}^{(q)}$ και $\tau_{Dif}^{(u)}$, αντίστοιχα.

Επικαλούμενοι το θεώρημα Wiener-Khinchin, οι εξασθενίσεις και οι καθυστερήσεις στην i^{th} συχνοτική υπο-ομάδα μπορούν να γραφούν ως

$$\left(a_{LoS}^{(i)}, a_{Ref}^{(i,p)}, a_{Sca}^{(i,q)}, a_{Dif}^{(i,u)} \right)^T = \left(|H_{LoS}(f_i)|, |H_{Ref}^{(p)}(f_i)|, |H_{Sca}^{(q)}(f_i)|, |H_{Dif}^{(u)}(f_i)| \right)^T \quad (2.3)$$

όπου H_{LoS} , $H_{Ref}^{(p)}$, $H_{Sca}^{(q)}$ και $H_{Dif}^{(u)}$ είναι οι συναρτήσεις μεταφοράς για τις απευθείας, τις ανακλώμενες, τις σκεδαζόμενες και τις περιθλώμενες διαδρομές, αντίστοιχα.



Σχήμα 4: Μοντέλα διάδοσης μεταξύ πομπού και δέκτη [7].

2.1 Line-of-Sight Διάδοση

Η συνάρτηση μεταφοράς της απευθείας ακτίνας, H_{Los} , αποτελείται από τη συνάρτηση των απωλειών λόγω διάδοσης, H_{spr} , και τη συνάρτηση απωλειών λόγω μοριακής απορρόφησης, και εκφράζεται ως

$$H_{Los}(f) = H_{spr}(f) \cdot H_{abs}(f) \cdot e^{-j2\pi f \tau_{Los}} \quad (2.4)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς λόγω της απώλειας διάδοσης δίνεται από την εξίσωση (2.5)

$$H_{spr}(f) = \frac{c}{4\pi fr} \quad (2.5)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς των απωλειών λόγω μοριακής απορρόφησης δίνεται έχει τη μορφή

$$H_{Abs}(f) = e^{-\frac{1}{2}k(f)r} \quad (2.6)$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός, r η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, και ο

όρος $\tau_{Los} = \frac{r}{c}$ ισούται με το χρόνο που χρειάζεται η LoS συνιστώσα να φτάσει στο δέκτη. Συγκεκριμένα, k είναι ο συχνοτικά εξαρτώμενος συντελεστής

απορρόφησης του μέσου, και εξαρτάται από τη σύνθεση του μέσου διάδοσης σε μοριακό επίπεδο, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

2.2 Διάδοση Ανακλώμενων Ακτίνων

Εάν θεωρήσουμε R τον συντελεστή ανάκλασης, r_1 την απόσταση μεταξύ πομπού και σημείου ανάκλασης, και r_2 την απόσταση μεταξύ σημείου ανάκλασης και δέκτη, τότε η συνάρτηση μεταφοράς την διάδοσης της ανακλώμενης ακτίνας που δίνεται συναρτήσει της συχνότητας, H_{Ref} , εκφράζεται με τη σχέση

$$H_{ref}(f) = H_{spr}(f) \cdot H_{abs}(f) \cdot e^{-j2\pi f \tau_{ref}} \cdot R(f) \quad (2.7)$$

ή

$$H_{ref}(f) = \frac{c}{4\pi f (r_1 + r_2)} e^{-\frac{1}{2}k(f)(r_1 + r_2)} e^{-j2\pi f \tau_{ref}} R(f) \quad (2.8)$$

όπου $\tau_{ref} = \tau_{Los} + \frac{r_1 + r_2 - r}{c}$ είναι ο χρόνος που χρειάζεται η ανακλώμενη ακτίνα να φτάσει στο δέκτη.

Στην ανωτέρω εξίσωση, οι απώλειες ανάκλασης του ΗΜ κύματος σε μη ομαλή επιφάνεια στη συχνοτική μπάντα των THz χρειάζεται να υπολογισθεί, οι οποίες εξαρτώνται από το υλικό, τη μορφή και την τραχύτητα της επιφάνειας πάνω στην οποία ανακλώνται τα κύματα.

Δίχως βλάβη της γενικότητας, θεωρούμε το Εγκάρσιο Ηλεκτρικό (Transverse Electric-TE) κομμάτι του ΗΜ κύματος (δηλαδή κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης) ενώ το Εγράσιο Μαγνητικό (Transverse Magnetic – TM) (δηλαδή το παράλληλο στο επίπεδο πρόσπτωσης) μπορεί να αναλυθεί με παρόμοιο τρόπο. Χρησιμοποιούμε τη θεωρία του Kirchhoff για υπολογίσουμε τις απώλειες ανάκλασης στην κατοπτρική ανάκλαση. Σύμφωνα με τη θεωρία σκέδασης του Kirchhoff, ο συντελεστής ανάκλασης μιας ανώμαλης επιφάνειας μπορεί να υπολογισθεί πολλαπλασιάζοντας τον συντελεστή ανάκλασης λείας επιφάνειας που προκύπτει από τις εξισώσεις Fresnel, γ_{TE} , με τον *Rayleigh roughness factor*, ρ , ως

$$R(f) = \gamma_{TE}(f) \rho(f) \quad (2.9)$$

Ο συντελεστής ανάκλασης Fresnel για TE πολωμένα κύματα σε μια ομαλή επιφάνεια υπολογίζεται ως εξής:

$$\gamma_{TE}(f) = \frac{\cos(\theta_i) - n_t \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n_t} \sin(\theta_i)\right)^2}}{\cos(\theta_i) + n_t \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n_t} \sin(\theta_i)\right)^2}} \quad (2.10)$$

ή

$$\gamma_{TE}(f) \cong - \left(1 + \frac{-2 \cos(\theta_i)}{\sqrt{n_t^2 - 1}} \right) \cong - \exp \left(\frac{-2 \cos(\theta_i)}{\sqrt{n_t^2 - 1}} \right) \quad (2.11)$$

όπου θ_i είναι η γωνία του προσπίπτοντος κύματος και μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας το νόμο συνημιτόνων και τις αποστάσεις μεταξύ πομπού, δέκτη και σημείου ανάκλασης

$$\theta_i = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - r^2}{2r_1 r_2} \right) \quad (2.12)$$

Ακόμα, το n_t αναφέρεται στο δείκτη διάθλασης, το οποίο ποικίλει με τη συχνότητα και το υλικό του μέσου [5].

Καθώς θεωρούμε τις ανακλώμενες ακτίνες με τις μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, η προσέγγιση Taylor για το συντελεστή ανάκλασης λείας επιφάνειας στην (3.11) προσφέρει καλή ακρίβεια στις THz συχνότητες. Το αρνητικό πρόσημο δείχνει αλλαγή φάσης κατά π που συμβαίνει στην ανάκλαση.

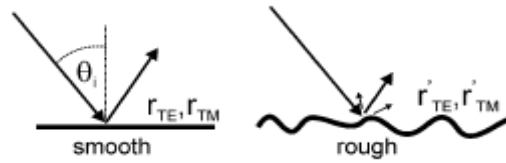
Μια ακόμα στατιστική παράμετρος για την τραχύτητα της επιφάνειας είναι η τυπική απόκλιση ύψους της ανώμαλης επιφάνειας (rough surface height standard deviation), σ , η οποία πολλές φορές θεωρείται να είναι Γκαουσιανή. Αυτό το φαινόμενο χαρακτηρίζεται από έναν Rayleigh factor [8]:

$$\rho(f) = e^{-\frac{g}{2}} = \exp \left(- \frac{\left(\frac{4\pi\sigma \cos \theta_i}{\lambda} \right)^2}{2} \right) = \exp \left(- \frac{8\pi^2 \sigma^2 f^2 \cos^2 \theta_i}{c^2} \right) \quad (2.13)$$

2.3 Διάδοση Σκεδαζόμενων Ακτίνων

Η μείωση της ανακλώμενης ενέργειας στην κατοπτρική κατεύθυνση εξαιτίας της σκέδασης δεν μπορεί να παραλειφθεί όταν υπολογίζουμε τα φαινόμενα διάδοσης με κεραίες υψηλού κέρδους σε περιβάλλοντα με μεγάλο αριθμό ανώμαλων επιφανειών. Στη συχνοτική ομάδα των THz, το μήκος κύματος είναι της τάξης των χιλιοστών ή μικρότερο, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα σκέδαση των ΗΜ κυμάτων. Οι επιπτώσεις που έχει η σκέδαση αυξάνονται με επιφάνειες που εμφανίζουν μεγαλύτερη τραχύτητα. Στην Σχήμα

5 φαίνεται σχηματικά η ανάκλαση ενός κύματος σε ομαλή και μη ομαλή επιφάνεια.

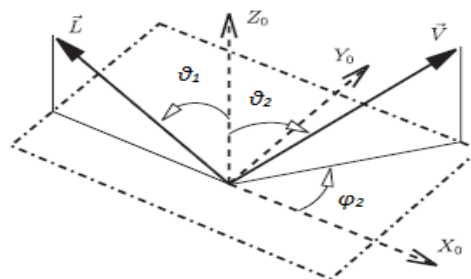


Σχήμα 5: Ανάκλαση σε ομαλή και μη-ομαλή επιφάνεια [8].

Ομοίως με το κατοπτρικό μοντέλο ανάκλασης, θεωρούμε τη σκέδαση σε μια επιφάνεια με Gaussian κατανομή ύψους, όπου δεν υπάρχουν οξείες ανωμαλίες εάν το μήκος αυτοσυσχέτισης, L , είναι μεγαλύτερο από το μήκος κύματος. Θεωρούμε S τον συντελεστή σκέδασης για μια μη λεία επιφάνεια, s_1 την απόσταση μεταξύ του πομπού και του σημείου σκέδασης και s_2 την απόσταση μεταξύ σημείου σκέδασης και δέκτη. Τότε, η συνάρτηση μεταφοράς της διάδοσης της σκεδαζόμενης ακτίνας, H_{sca} , δίνεται από τη σχέση

$$H_{sca}(f) = \frac{c}{4\pi f (s_1 + s_2)} e^{-j2\pi f \tau_{sca} - \frac{1}{2}k(f)(s_1 + s_2)} S(f) \quad (2.14)$$

όπου $\tau_{sca} = \tau_{Los} + \frac{s_1 + s_2 - r}{c}$ είναι ο χρόνος άφιξης της σκεδαζόμενης ακτίνας. Η γεωμετρία σκέδασης θεωρείται στο εφαπτομενικό επίπεδο (η γωνία αζιμουθίου του προσπίπτοντος κύματος φ_1 είναι π), και θ_1 είναι η γωνία που σχηματίζει το προσπίπτον κύμα με την κάθετη στο επίπεδο. Επιπλέον, οι θ_2 και φ_2 περιγράφουν την γωνία που σχηματίζει με την κάθετη στο επίπεδο και τη γωνία αζιμουθίου του σκεδαζόμενου κύματος, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6 φαίνεται η γεωμετρία σκέδασης.



Σχήμα 6: Γεωμετρία σκέδασης σε ένα σύστημα συντεταγμένων [9].

Η κλασική θεωρία του Kirchhoff βασίζεται σε μια υπόθεση μικρής γωνίας, η οποία περιορίζει την ικανότητα της να συμπεριλαμβάνει επιτυχώς μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Αντ' αυτού, ο συντελεστής σκέδασης σε ανώμαλες επιφάνειες σύμφωνα με την τροποποιημένη θεωρία των Beckmann-

Kirchhoff [9] εμφανίζει καλή πειραματική ακρίβεια για τραχείς επιφάνειες σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης και μεγάλες γωνίες σκέδασης, και δίνεται από τη σχέση

$$S(f) = \gamma_{TE}(f) e^{-\frac{g}{2}} \sqrt{\rho_0^2 + \frac{\pi L^2 F^2}{l_x l_y} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! m} e^{-\frac{V_s}{m}}} \quad (2.15)$$

ή

$$S(f) = \gamma_{TE}(f) \sqrt{\frac{1}{e^g}} \sqrt{\rho_0^2 + \frac{\pi L^2 F^2}{l_x l_y} \sum_{m=1}^m \frac{g^m}{m! m} e^{-\frac{V_s}{m}}} \quad (2.16)$$

όπου L είναι το μήκος συσχέτισης της επιφάνειας και F ένα γεωμετρικός παράγοντας [9] που εκφράζεται από την

$$F = \frac{1 + \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3}{\cos \theta_1 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)} \quad (2.17)$$

Χρησιμοποιώντας προσέγγιση Taylor για να απλοποιήσουμε την έκφραση του συντελεστή ανάκλασης, προκύπτει η (2.17)

$$S(f) \cong -\exp\left(\frac{-2 \cos \theta_i}{\sqrt{n_i^2 - 1}}\right) \sqrt{\frac{1}{1 + g + \frac{g^2}{2} + \frac{g^3}{6}}} \sqrt{\rho_0^2 + \frac{\pi \cos \theta_i}{100} \left(g e^{-V_s} + \frac{g^2}{4} e^{-\frac{V_s}{2}} \right)} \quad (2.18)$$

Καθώς αυξάνεται η συχνότητα, ο συντελεστής ανάκλασης Fresnel, γ_{TE} , μειώνεται, ενώ ο αθροιστικός όρος αυξάνεται. Αυτό εξηγεί γιατί ο συντελεστής σκέδασης δεν μειώνεται μονοτονικά με τη συχνότητα.

Ο όρος ρ_0 είναι η βαρύτητα της κατοπτρικής ανακλαστικότητα η οποία εκφράζεται συναρτήσει των θ_1 και θ_2 . Το ρ_0 είναι σχεδόν μηδέν για όλες τις κατευθύνσεις σκέδασης εκτός από ένα πολύ στενό εύρος γύρω από την κατοπτρική κατεύθυνση.

Η σκέδαση συμβαίνει σε μια ορθογώνια επιφάνεια εμβαδού $A = 4XY$, του οποίου οι διαστάσεις είναι $2X$ και $2Y$. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον ορισμό, έχουμε ότι

$$\rho_0 = \sin c(V_x X) \sin c(V_y Y) \quad (2.19)$$

όπου

$$V_x = \frac{2\pi f}{c} (\sin \theta_1 - \sin \theta_2 \cos \theta_3) \quad (2.20)$$

$$V_y = \frac{2\pi f}{c} (-\sin \theta_2 \sin \theta_3) \quad (2.21)$$

Για κατευθύνσεις σκέδασης πολύ κοντά στην κανονική ανάκλαση, έχουμε ότι $\theta_1 \rightarrow \theta_2$ και $\theta_3 \rightarrow 0$, οπότε και $V_x \rightarrow 0$ και $V_y \rightarrow 0$ το οποίο δίνει $\rho_0 = 1$.

Στην πράξη, για όλα τα υλικά που υπάρχουν σε συνθήκες εκτός εργαστηρίου, ειδικά για διηλεκτρικά, έχουμε ότι $\rho_0 < 1$.

Ο όρος g είναι ένας εκθετικός όρος που καθορίζει την σχετική βαρύτητα της κατοπτρικής συνιστώσας και δίνεται από την

$$g = \sigma_{hs}^2 V_z^2 = \sigma \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)^2 \quad (2.22)$$

όπου $V_s = V_{xy} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ [10].

2.4 Διάδοση Περιθλώμενων ακτίνων

Στη μπάντα των THz, τα φαινόμενα περίθλασης είναι αμελητέα για την πλειοψηφία των περιπτώσεων, ειδικά σε εσωτερικά περιβάλλοντα. Η μόνη εξαίρεση είναι η περιοχή κοντά στο προσπίπτον όριο σκίασης (shadow boundary), υπό NloS συνθήκες. Παρόλο που η περίθλαση μπορεί να περιγραφεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας την ενιαία γεωμετρική Θεωρία Περίθλασης (Uniform Theory of Diffraction - UTD), η πολυπλοκότητα αυτής της μεθόδου είναι υψηλή και απαιτεί αριθμητικές μεθόδους για τις απώλειες διαδρομής. Χάριν ευκολίας, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την θεωρία Fresnel για την περίθλαση αιχμηρού αντικειμένου (Knife Edge Diffraction - KED) για να παρέχουμε προσεγγιστικό χαρακτηρισμό της περίθλασης. Συγκεκριμένα, αυτό το μοντέλο λαμβάνει υπόψιν λεπτά περιθλαστικά αντικείμενα και αγνοεί τις παραμέτρους περίθλασης όπως είναι η πόλωση, η αγωγιμότητα και η τραχύτητα της επιφάνειας, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε ανακρίβειες. Έτσι, χρησιμοποιούνται οι συχνοτικά εξαρτώμενοι συντελεστές μ_1, μ_2 και μ_3 για να προσαρμόσουν το Fresnel KED μοντέλο για τις συχνότητες των THz.

Ο συντελεστής περίθλασης, $L(f)$, χαρακτηρίζει την απώλεια που δημιουργείται αθροιστικά με την εξασθένηση της απευθείας συνιστώσας. Ενσωματώνοντας την απώλεια περίθλασης, η συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού της περιθλώμενης ακτίνας, H_{Dif} , δίνεται από την:

$$H_{Dif}(f) = \left(\frac{c}{4\pi f (d_1 + d_2)} \right) e^{-j2\pi f \tau_{Dif} - \frac{1}{2}k(f)(d_1 + d_2)} L(f) \quad (2.23)$$

όπου d_1 είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και σημείου περίθλασης, d_2 η απόσταση μεταξύ σημείου περίθλασης και δέκτη, και $\tau_{Dif} = \tau_{LoS} + \Delta d / c$ ο χρόνος άφιξης της περιθλώμενης ακτίνας. Σε μία κοινή γεωμετρία περίθλασης όπου το ύψος του εμποδίου, h_d , είναι μικρό σχετικά με τις αποστάσεις d_1 και d_2 , το περιθλώμενο σήμα ταξιδεύει μια επιπλέον απόσταση συγκρίσιμη με την απευθείας διαδρομή, η οποία είναι προσεγγιστικά:

$$\Delta d = \frac{h_d^2 (d_1 + d_2)}{2d_1 d_2} \quad (2.24)$$

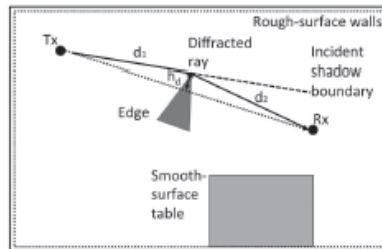
Επιπλέον, η γωνία περίθλασης που βρίσκεται μεταξύ του προσπίπτοντος ορίου σκίασης και της διαδρομής της περιθλώμενης ακτίνας προς τον πομπό υπολογίζεται από την

$$\theta_d = 180 - \cos^{-1}\left(\frac{h_d}{d_1}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{h_d}{d_2}\right) \quad (2.25)$$

Θέτοντας ότι $v(f) = \sqrt{\frac{2f\Delta d}{c}}$, ο συντελεστής περίθλασης $L(f)$ μπορεί να βρεθεί με μια προσέγγιση του ολοκληρώματος Fresnel, ως

$$L(f) = \begin{cases} \mu_1(f) \left(0.5 e^{-0.95v(f)}\right) & 0 < v \leq 1 \\ \mu_2(f) \left(0.4 - \sqrt{0.12 - (0.38 - 0.1v(f))^2}\right) & 1 < v \leq 2.4 \\ \mu_3(f) \left(0.225 / v(f)\right) & v > 2.4 \end{cases} \quad (2.26)$$

όπου οι συχνотικά εξαρτώμενοι παράμετροι μ_1, μ_2 και μ_3 επιλέγονται ώστε να ταιριάζουν καλύτερα με τα εμπειρικά δεδομένα στο [7,11].



Σχήμα 7: Μοντέλο διάδοσης περιθλώμενης ακτίνας [7].

Κεφάλαιο 3

Ατμοσφαιρική Απορρόφηση στα THz

Τα μόρια ενός μέσου διεγείρονται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συγκεκριμένων συχνοτήτων στην μπάντα των Terahertz. Ένα διεγερμένο μόριο δονείται εσωτερικά, δηλαδή τα άτομα του εμφανίζουν μια περιοδική κίνηση ενώ το μόριο σαν σύνολο έχει σταθερές μεταφορικές και περιστροφικές κινήσεις. Ως αποτέλεσμα αυτής της δόνησης, μέρος της ενέργειας του διαδιδόμενου κύματος μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Από τηλεπικοινωνιακής σκοπιάς, η ενέργεια αυτή χάνεται. Οι συχνότητες ταλάντωσης στις οποίες ένα δεδομένο μόριο αντηχεί μπορεί να βρεθεί λύνοντας την εξίσωση του Schrödinger για τη συγκεκριμένη εσωτερική δομή του μορίου. Η απώλεια αυτή μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας τον Beer-Lambert law, ως εξής [3]:

$$\tau(f, d) = \frac{P_0}{P_i} = e^{-k(f)d} \quad (3.1)$$

όπου τ διαπερατότητα του μέσου, δηλαδή το κλάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που μπορεί να περάσει μέσα από το μέσο. Η συνάρτηση μεταφοράς των απωλειών λόγω μοριακής απορρόφησης έχει τη μορφή

$$H_{Abs}(f) = e^{-\frac{1}{2}k(f)r} \quad (3.2)$$

όπου k ο συχνοτικά εξαρτώμενος συντελεστής απορρόφησης του μέσου διάδοσης και r η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής k εξαρτάται από τη σύνθεση του μέσου διάδοσης σε μοριακό επίπεδο. Ο συντελεστής απορρόφησης εκφράζεται από τη σχέση:

$$k(f) = \sum_{i,g} k^{i,g}(f) \quad (3.3)$$

όπου f η συχνότητα του ΗΜ κύματος και $k^{i,g}$ ο συντελεστής απορρόφησης του ισότοπου i του αερίου g . Στον Πίνακα 1 φαίνεται η ποσόστωση των αερίων στην ατμόσφαιρα. Σε έναν κλειστό χώρο, ο αέρας αποτελείται κυρίως από άζωτο (78.1%), οξυγόνο (20.9%) και υδρατμούς (0.1 - 4.0%). Κάθε αέριο έχει διαφορετικά ισότοπα στην μπάντα των Terahertz, δηλαδή μόρια που διαφέρουν μόνο στην ισοτοπική τους σύνθεση. Αξίζει να αναφερθεί ότι, τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην συνολική απορρόφηση σε ένα συνηθισμένο μέσο στην THz μπάντα προέρχεται από τα μόρια των υδρατμών.

ΟΝΟΜΑ ΑΕΡΙΟΥ	ΧΗΜΙΚΟ ΣΥΜΒΟΛΟ	ΠΟΣΟΣΤΟ
Αζωτο	N ₂	78,08%
Οξυγόνο	O ₂	20,95%
Αργό	Ar	0,93%
Διοξείδιο του Άνθρακα	CO ₂	0,0360%
Νέον	Ne	0,0018%
Ήλιο	He	0,0005%
Μεθάνιο	CH ₄	0,00017%
Υδρογόνο	H ₂	0,00005%
Οξείδιο του Αζώτου	N ₂ O	0,00003%
Όζον	O ₃	0,000004%
Νερό (Υδρατμοί)	H ₂ O	0 έως 4%

Πίνακας 1: Ποσόστωση αερίων στην ατμόσφαιρα

3.1 Ατμοσφαιρική Απορρόφηση Βάσει HITRAN

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση του τρόπου υπολογισμού του συντελεστή μοριακής απορρόφησης βασισμένοι στις εξισώσεις του HITRAN [12] αξίζει να αναφερθούμε στις μονάδες μέτρησης. Τα Hz, KHz, MHz κλπ είναι η μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται στον τομέα των τηλεπικοινωνιών για τη συχνότητα. Ωστόσο, οι φασματοσκόπιοι, χρησιμοποιούν κατά κόρον ως μονάδα μέτρησης τον κυματάριθμο, $\nu=1/\lambda=f/c$, όπου f η συχνότητα και c η ταχύτητα του φωτός. Ακόμα, κάποιες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις αλλά και κάποια μεγέθη που λαμβάνονται από το HITRAN δεν είναι στο SI αλλά κυρίως σε cgs για ιστορικούς λόγους. Στον Πίνακα 2 φαίνονται οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται καθώς οι μονάδες μέτρησής τους.

Ο συντελεστής απορρόφησης του ισότοπου i του αερίου g , $k^{i,g}$, σε m^{-1} , για μια μοριακή πυκνότητα όγκου, $Q_{i,g}$, σε $\text{μόρια}/\text{cm}^3$ σε πίεση p και θερμοκρασία T μπορεί να γραφεί ως:

$$k^{i,g}(f) = 100 \frac{p}{p_0} \frac{T_{STP}}{T} Q_{i,g} \sigma^{i,g} \quad (3.4)$$

όπου p_0 και T_{STP} είναι οι STP τιμές και $\sigma^{i,g}$ είναι το absorption cross section του ισότοπου i του αερίου g σε $\text{cm}^2/\text{μόριο}$. Για να το θέσουμε απλά, η συνολική απορρόφηση εξαρτάται από τον αριθμό των μορίων ενός δεδομένου αερίου που βρίσκονται στη διαδρομή του κύματος.

Για ένα δεδομένο μείγμα αερίων, ο συνολικός αριθμός μορίων ανά μονάδα όγκου, $Q_{i,g}$, του ισότοπου i του αερίου g σε $\text{μόρια}/\text{cm}^3$, σε συνθήκες πίεσης p και θερμοκρασίας T , βρίσκεται από τον Ιδανικό Νόμο των Αερίων (Ideal Gas Law):

$$Q^{i,g} = \frac{n}{V} q^{i,g} N_A = \frac{P}{RT} q^{i,g} N_A \quad (3.5)$$

όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των moles του μείγματος αερίων που εξετάζεται, V ο όγκος, $q^{i,g}$ ο λόγος πρόσμιξης του ισότοπου i του αερίου g , N_A ο αριθμός Avogadro και R η σταθερά αερίων. Το absorption cross section σ^i , στην (3.4) μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω στους όρους $S^{i,g}$ και $f(v; v_{ij}, p, T)$, με μονάδες μέτρησης $\text{cm}^{-1}/\text{μόριο} \cdot \text{cm}^{-2}$ και $1/\text{cm}^{-1}$ αντίστοιχα, που είναι η γραμμική ένταση (line intensity) και η συνάρτηση κανονικοποιημένου σχήματος γραμμής (normalized line shape function), ως:

$$\sigma^{i,g}(f) = S^{i,g} f(v; v_{ij}, T, p) \quad (3.6)$$

Για να υπολογίσουμε την συνάρτηση κανονικοποιημένου σχήματος γραμμής f , πρώτα υπολογίζουμε την διεγερμένη θέση του κυματάριθμου ταλάντωσης (shifted position of the transition wavenumber) v_{ij}^* , σε cm^{-1} για το ισότοπο i του αερίου g :

$$v_{ij}^* = v_{ij} + \delta(p_{ref}) p \quad (3.7)$$

Η απορρόφηση από ένα συγκεκριμένο μόριο δεν περιορίζεται σε μία μόνο συχνότητα, αλλά επεκτείνεται σε ένα εύρος συχνοτήτων. Για ένα σύστημα στο οποίο η πίεση είναι πάνω από 0.1 atm, η επέκταση αυτή κυριαρχείται κυρίως από συγκρούσεις μεταξύ των μορίων του ίδιου αερίου. Το μέγεθος της διεύρυνσης εξαρτάται από τα μόρια που εμπλέκονται στις κρούσεις και συνήθως αναφέρεται ως το ημιέυρος Lorentz $\gamma(p, T)$. Μπορούμε να αντλήσουμε αυτή την παράμετρο ως συνάρτηση των συντελεστών διεύρυνσης του αέρα και του ίδιου του ισότοπου i του αερίου g , γ_{air} και γ_{self} αντίστοιχα, ως:

$$\gamma(p, T) = \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^{n_{air}} \left(\gamma_{air}(p_{ref}, T_{ref})(p - p_{self}) + \gamma_{self}(p_{ref}, T_{ref}) p_{self} \right) \quad (3.8)$$

Στα χαμηλότερα επίπεδα της ατμόσφαιρας, κυριαρχεί η διεύρυνση λόγω πίεσης των φασματικών γραμμών και εάν θεωρήσουμε ένα Λορεντζιανό προφίλ (Lorentz profile), τότε η συνάρτηση κανονικοποιημένου σχήματος γραμμής δίνεται από την:

$$f_L(v; v_{ij}, T, p) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma(p, T)}{\gamma(T, p)^2 + (v - v_{ij}^*)^2} \quad (3.9)$$

Σε περιβάλλοντα χαμηλής πίεσης όπως στην άνω ατμόσφαιρα η συνάρτηση σχήματος γραμμής κυριαρχείται από τη διεύρυνση Doppler και θεωρώντας ένα Γκαουσιανό προφίλ (Gaussian profile), τότε έχουμε:

$$f_G(v; v_{ij}, T) = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi \alpha_D^2}} \exp\left(-\frac{(v - v_{ij})^2 \ln 2}{\alpha_D^2}\right) \quad (3.10)$$

Εφόσον βρισκόμαστε στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, η σχέση η οποία θα περιγράφει την συνάρτηση κανονικοποιημένου σχήματος γραμμής είναι η (3.9). Έτσι η (3.6) θα γίνει:

$$\sigma^{i,g}(f) = S^{i,g} f_L(v; v_{ij}, T, p) \quad (3.11)$$

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
$k^{i,g}$	Συντελεστής απορρόφησης του ισότοπου i του αερίου g	m^{-1}
p	Πίεση συστήματος	atm
p_0	Πίεση αναφοράς	atm
T_{STP}	Θερμοκρασία σε STP συνθήκες	273.15 K
T	Θερμοκρασία συστήματος	K
$Q^{i,g}$	συνολικός αριθμός μορίων ανά μονάδα όγκου του ισότοπου i του αερίου g	μόρια/cm ³
$\sigma^{i,g}$	absorption cross section του ισότοπου i του αερίου g	cm ² /μόρια
n	συνολικός αριθμός moles	mol
V	Όγκος	cm ³
N_A	Αριθμός Avogadro	6.022 x 10 ²³ μόρια/mol
$q^{i,g}$	Λόγος ανάμιξης του ισότοπου i του αερίου g	%
R	Σταθερά Αερίων	8.314 x 10 ⁷ erg/K·mol
$S^{i,g}$	Γραμμική ένταση του ισότοπου i του αερίου g	cm ⁻¹ /μόριο·cm ⁻²
f	Συνάρτηση κανονικοποιημένου σχήματος γραμμής	1/cm ⁻¹
ν_{ij}^*	διεγερμένη θέση του κυματάριθμου ταλάντωσης του ισότοπου i του αερίου g	cm ⁻¹

ν_{ij}	κυματάριθμος ταλάντωσης του ισοτόπου i του αερίου g σε συνθήκες αναφοράς	cm^{-1}
δ	Γραμμική αλλαγή πίεσης του ισοτόπου i του αερίου g	$\text{cm}^{-1}/\text{atm}$
γ	Ημιεύρος Lorentz του ισοτόπου i του αερίου g	cm^{-1}
T_{ref}	Θερμοκρασία αναφοράς	296 K
n_{air}	Συντελεστής διεύρυνσης θερμοκρασίας	-
γ_{air}	Συντελεστής διεύρυνσης του αέρα	$\text{cm}^{-1}/\text{atm}$
p_{self}	Μερική πίεση του ισοτόπου i του αερίου g	atm
γ_{self}	Συντελεστής διεύρυνσης του ισοτόπου i του αερίου g	$\text{cm}^{-1}/\text{atm}$
f_L	Λόρεντζ προφίλ της συνάρτησης κανονικοποιημένου σχήματος γραμμής	cm^{-1}
f_G	Γκαούσιαν προφίλ της συνάρτησης κανονικοποιημένου σχήματος γραμμής	cm^{-1}

Πίνακας 2: Παράμετροι και σταθές κατά HITRAN.

3.2 Ατμοσφαιρική Απορρόφηση Σύμφωνα με τους J.M Jornet, I.F. Akyildiz [3]

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται εξισώσεις που περιγράφονται στο [3], οι οποίες στηρίζονται στις εξισώσεις της θεωρίας μεταφοράς ενέργειας λόγω ακτινοβολίας αλλά και στα δεδομένα που λαμβάνονται από τη βάση δεδομένων του HITRAN. Αξίζει να αναφέρουμε ότι σε αυτή την περίπτωση, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3, τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται είναι συχνοτικά, μετριούμενα σε Hz. Και σε αυτή την περίπτωση λοιπόν, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του συντελεστή μοριακής απορρόφησης όπως ορίζεται στην (3.3). Ο όρος $k^{i,g}$ είναι ο συντελεστής απορρόφησης του ισοτόπου i του αερίου g , σε m^{-1} . Για μια μοριακή πυκνότητα όγκου, $Q^{i,g}$, σε μόρια/ m^3 σε πίεση p και θερμοκρασία T μπορεί να γραφεί ως:

$$k^{i,g}(f) = \frac{p}{p_0} \frac{T_{STP}}{T} Q^{i,g} \sigma^{i,g}(f) \quad (3.12)$$

όπου p_0 και T_{STP} είναι οι STP τιμές και $\sigma^{i,g}$ είναι το absorption cross section του ισοτόπου i του αερίου g σε $\text{m}^2/\text{μόριο}$. Η συνολική απορρόφηση εξαρτάται και πάλι από τον αριθμό των μορίων ενός δεδομένου αερίου που βρίσκονται στη διαδρομή του κύματος.

Για ένα δεδομένο μείγμα αερίων, ο συνολικός αριθμός μορίων ανά μονάδα όγκου, $Q^{i,g}$, του ισότοπου i του αερίου g σε μόρια/m³, σε συνθήκες πίεσης p και θερμοκρασίας T , βρίσκεται από τον Ideal Gas Law :

$$Q^{i,g} = \frac{n}{V} q^{i,g} N_A = \frac{P}{RT} q^{i,g} N_A \quad (3.13)$$

όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των moles του μείγματος αερίων που εξετάζεται, V ο όγκος, $q^{i,g}$ ο λόγος πρόσμιξης του ισότοπου i του αερίου g , N_A ο αριθμός Avogadro και R η σταθερά αερίων. Το absorption cross section αναλύεται περαιτέρω από την εξίσωση (3.14), όπου το $S^{i,g}$ όπως και πριν είναι η γραμμική ένταση του ισότοπου i του αερίου g , σε Hz·m²/μόριο, ενώ το $G^{i,g}$ είναι το σχήμα φασματικών γραμμών (spectral line shape), σε Hz⁻¹.

$$\sigma^{i,g}(f) = S^{i,g} G^{i,g}(f) \quad (3.14)$$

Ο όρος $S^{i,g}$ ορίζει την ισχύ της απορρόφησης από ένα συγκεκριμένο είδος μορίων. Το $G^{i,g}$ δίνεται από τη σχέση:

$$G^{i,g}(f) = \frac{f}{f_c^{i,g}} \frac{\tanh\left(\frac{hcf}{2k_B T}\right)}{\tanh\left(\frac{hcf_c^{i,g}}{2k_B T}\right)} F^{i,g}(f) \quad (3.15)$$

όπου f η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, $f_c^{i,g}$ η συχνότητα ταλάντωσης του ισότοπου i του αερίου g όπως δίνεται από την (3.16), h η σταθερά του Planck, c η ταχύτητα του φωτός στο κενό, k_B η σταθερά του Boltzmann και T η θερμοκρασία του συστήματος.

$$f_c^{i,g} = f_{c0}^{i,g} + \delta^{i,g} p / p_0 \quad (3.16)$$

Το $G^{i,g}$ είναι ένας επιπλέον μετασχηματισμός που έχει γίνει στο $F^{i,g}$, το οποίο είναι η Van Vleck-Weisskopf ασύμμετρη μορφή της καμπύλης (asymmetric line shape), για να συμπεριλαμβάνει την απορρόφηση του μέσου (continuum absorption). Το $F^{i,g}$ χρησιμοποιείται για να περιγράψει την μοριακή απορρόφηση και εκφράζεται από την:

$$F^{i,g}(f) = 100c \frac{a_L^{i,g}}{\pi} \frac{f}{f_c^{i,g}} \left[\frac{1}{(f - f_c^{i,g})^2 + (a_L^{i,g})^2} + \frac{1}{(f + f_c^{i,g})^2 + (a_L^{i,g})^2} \right] \quad (3.17)$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό, f η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, $f_c^{i,g}$ η συχνότητα ταλάντωσης του ισότοπου i του αερίου g και $a_L^{i,g}$ ο συντελεστής ημι-εύρους Lorentz, η χρησιμότητα του οποίου περιγράφεται στην παράγραφο 3.1., και εκφράζεται από τη σχέση:

$$a_L^{i,g} = \left[(1 - q^{i,g}) a_0^{air} + q^{i,g} a_0^{i,g} \right] \left(\frac{p}{p_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right)^\gamma \quad (3.18)$$

όπου $q^{i,g}$ ο λόγος πρόσμιξης του ισοτόπου i του αερίου g , a_0^{air} και $a_0^{i,g}$ οι συντελεστές διεύρυνσης του αέρα και του ισοτόπου i του αερίου g αντίστοιχα, γ ο συντελεστής διεύρυνσης θερμοκρασίας και p και p_0 , η πίεση του συστήματος και η πίεση αναφοράς, αντίστοιχα.

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
k_i, g	Συντελεστής απορρόφησης του ισοτόπου i του αερίου g	m^{-1}
p	Πίεση συστήματος	atm
p_0	Πίεση αναφοράς	atm
T_{STP}	Θερμοκρασία σε STP συνθήκες	273.15 K
T	Θερμοκρασία συστήματος	K
$Q^{i,g}$	συνολικός αριθμός μορίων ανά μονάδα όγκου του ισοτόπου i του αερίου g	μόρια/ m^3
$\sigma^{i,g}$	absorption cross section του ισοτόπου i του αερίου g	$m^2/\mu\text{όρια}$
n	συνολικός αριθμός moles	mol
V	Όγκος	m^3
N_A	Αριθμός Avogadro	6.022×10^{23} μόρια/mol
$q^{i,g}$	Λόγος ανάμιξης του ισοτόπου i του αερίου g	%
R	Σταθερά Αερίων	$8.2051 \cdot 10^{-5} m^3 \cdot atm / K / mol$
$S^{i,g}$	Γραμμική ένταση του ισοτόπου i του αερίου g	Hz/μόριο· m^{-2}
$G^{i,g}$	Σχήμα φασματικών γραμμών	Hz ⁻¹
h	Σταθερά Planck	$6.6262 \times 10^{-34} J \cdot s$
c	Ταχύτητα φωτός στο κενό	$2.9979 \times 10^8 m/s$
k_B	Σταθερά Boltzmann	$1.3806 \times 10^{-23} J/K$
$f_c^{i,g}$	συχνότητα ταλάντωσης του ισοτόπου i του αερίου g	Hz
$f_{c0}^{i,g}$	Συχνότητα ταλάντωσης του ισοτόπου i του αερίου g σε συνθήκες αναφοράς	Hz
$\delta^{i,g}$	Γραμμική αλλαγή πίεσης του ισοτόπου i του αερίου g	Hz
$F^{i,g}$	Van Vleck-Weisskopf σχήμα γραμμής του ισοτόπου i του αερίου g	Hz ⁻¹
π	Μαθηματική σταθερά	3.1415
$a_L^{i,g}$	Ημιέυρος Lorentz του ισοτόπου i του αερίου g	Hz

T_0	Θερμοκρασία αναφοράς	296 K
γ	Συντελεστής διεύρυνσης θερμοκρασίας	-
a_o^{air}	Συντελεστής διεύρυνσης του αέρα	Hz
$a_0^{i,g}$	Συντελεστής διεύρυνσης του ισότοπου i του αερίου g	Hz

Πίνακας 3: Παράμετροι και σταθερές κατά Akyildiz.

3.3 Ατμοσφαιρική Απορρόφηση Βάσει ITU [13]

Ένας άλλος τρόπος για να υπολογισθεί η εξασθένηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας έχει μελετηθεί από το ITU χρησιμοποιώντας ένα άθροισμα από μεμονομένες γραμμές απορρόφησης. Το μοντέλο αυτό είναι έγκυρο για συχνοτικό εύρος από 1-1000 GHz, , αλλά εξετάστηκε για λόγους αναφοράς και σύγκρισης των αποτελεσμάτων με αυτά του [3]. Για την εφαρμογή του μοντέλου αυτού είναι απαραίτητη η γνώση των δεδομένων πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας στην περιοχή ενδιαφέροντος. Εάν αυτές οι μεταβλητές δεν είναι γνωστές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός δεδομένων από τα Recommendations ITU-R P.835, ITU-R P. 1510 και ITU-R P. 836.

Η ακριβής εξασθένηση σε συχνότητες έως τα 1000 GHz, εξαιτίας του ξηρού αέρα και των υδρατμών, μπορεί να υπολογισθεί με ακρίβεια για οποιαδήποτε τιμή πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας αθροίζοντας τις μεμονομένες γραμμές συντονισμού από το οξυγόνο και τους υδρατμούς, με κάποιους μικρούς προσθετικούς παράγοντες, οι οποίοι είναι το μη-ταλαντούμενο φάσμα Debye κάτω των 10 GHz, η επαγόμενη λόγω πίεσης εξασθένηση του αζώτου για συχνότητες άνω των 100 GHz και μια απορρόφηση του μέσου λόγω υγρασίας (wet continuum). Ο τελευταίος παράγοντας εισήχθη για να συνυπολογισθεί η πλεονάζουσα απορρόφηση από τους υδρατμούς, εκτός των γραμμών συντονισμού. Κάποια επιπρόσθετα μοριακά είδη, όπως τα ισότοπα του οξυγόνου, το όζον και τα ισότοπά του, δεν συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο αυτό πρόβλεψης. Αυτές οι επιπρόθετες γραμμές, δεν έχουν ιδιαίτερη σημασία σε τυπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, αλλά μπορεί να έχουν την σημασία τους σε μία ξηρή ατμόσφαιρα. Η εξασθένηση λόγω αερίων δίνεται σε dB/km από την:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0.1820 f \left(N_{Oxygen}''(f) + N_{Water}''(f) \right) \quad (3.19)$$

όπου γ_o και γ_w είναι οι εξασθενήσεις σε dB/km εξαιτίας του ξηρού αέρα (οξυγόνο, επαγόμενη από πίεση εξασθένηση αζώτου και μη-ταλαντούμενη Debye εξασθένηση) και υδρατμών, αντίστοιχα, f είναι η συχνότητα σε GHz, και $N_{Oxygen}''(f)$ και $N_{Water}''(f)$ είναι τα φανταστικά μέρη των συχνοτικά-εξαρτώμενων σύνθετων διαθλαστικότητων:

$$N_{Oxygen}''(f) = \sum_{i(oxygen)} S_i F_i + N_D''(f) \quad (3.20)$$

$$N_{Water}''(f) = \sum_{i(WaterVapour)} S_i F_i \quad (3.21)$$

όπου S_i η ισχύς της i^{th} γραμμής του οξυγόνου ή των υδρατμών, F_i είναι ο παράγοντας σχήματος γραμμής του οξυγόνου ή του νερού, ενώ τα αθροίσματα εκτείνονται για όλες τις γραμμές των αερίων. Το $N_D''(f)$ είναι η εξασθένηση μέσου του ξηρού αέρα λόγω της επαγώμενης λόγω πίεσης εξασθένησης του αζώτου και του μη-ταλαντούμενου Debye φάσματος. Η ισχύς γραμμής δίνεται από τις:

$$S_i = a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1-\theta)] \quad (3.22\alpha)$$

$$S_i = b_1 \times 10^{-7} p \theta^{3.5} \exp[b_2(1-\theta)] \quad (3.22\beta)$$

όπου η (3.22α) και (3.22β) είναι για το οξυγόνο και το νερό αντίστοιχα, p η πίεση του ξηρού αέρα σε hPa, e η μερική πίεση των υδρατμών σε hPa (η συνολική βαρομετρική πίεση δίνεται από το άθροισμα των p και e), $\theta=300/T$ και T η θερμοκρασία σε K.

Η μερική πίεση των υδρατμών, e , σε κάποιο υψόμετρο μπορεί να υπολογισθεί από τον ακόλουθο τύπο, χρησιμοποιώντας την πυκνότητα των υδρατμών, ρ , και τη θερμοκρασία, T , σε αυτό το υψόμετρο:

$$e = \frac{\rho T}{216.7} \quad (3.23)$$

Ο παράγοντας σχήματος γραμμής δίνεται από την:

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (3.24)$$

όπου f_i είναι η συχνότητα γραμμών του οξυγόνου ή των υδρατμών και Δf το εύρος των γραμμών, για το οξυγόνο και το νερό αντίστοιχα:

$$\Delta f = a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{(0.8-a_4)} + 1.1e\theta) \quad (3.25\alpha)$$

$$\Delta f = b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) \quad (3.25\beta)$$

Το εύρος γραμμών Δf τροποποιείται για να συμπεριλάβει τον διαχωρισμό κατά Zeeman των γραμμών του οξυγόνου και την διεύρυνση κατά Doppler των γραμμών του νερού, τα οποία δίνονται αντίστοιχα από τις:

$$\Delta f = \sqrt{\Delta f^2 + 2.25 \times 10^{-6}} \quad (3.26\alpha)$$

$$\Delta f = 0.535\Delta f + \sqrt{0.217\Delta f^2 + \frac{2.1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\theta}} \quad (3.26\beta)$$

Το δ είναι ένας διορθωτικός παράγοντας ο οποίος προκύπτει από τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης στις γραμμές του οξυγόνου:

$$\delta = (a_5 + a_6\theta) \times 10^{-4} (p+e)\theta^{0.8} \quad (3.27\alpha)$$

$$\delta = 0 \quad (3.27\beta)$$

Τα φασματοσκοπικά δεδομένα που δίνονται μέσω των μεταβλητών $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ και α_6 , και b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 και b_6 , είναι υπολογισμένα και βρίσκονται στο [13].

Η εξασθένηση μέσου του ξηρού αέρα, $N_D''(f)$, προκύπτει από το μη-ταλαντούμενο φάσμα Debye κάτω των 10 GHz και μια εξασθένηση αζώτου επαγόμενη από την πίεση, σε συχνότητες άνω των 100 GHz και δίνεται από την:

$$N_D''(f) = fp\theta^2 \left[\frac{6.14 \times 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1.4 \times 10^{-12} p\theta^{1.5}}{1 + 1.9 \times 10^{-5} f^{1.5}} \right] \quad (3.28)$$

όπου d είναι η παράμετρος εύρους για το φάσμα Debye:

$$d = 5.6 \times 10^{-4} (p+e)\theta^{0.8} \quad (3.29)$$

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση στο Matlab των προαναφερθέντων μεθόδων υπολογισμού της ατμοσφαιρικής απορρόφησης, καθώς και σύγκριση των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

4.1 Συντελεστής μοριακής απορρόφησης

Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων βασισμένοι στα δεδομένα της βάσης δεδομένων του HITRAN [4], απαραίτητη είναι η απόκτηση πρόσβασης σε αυτά και στη συνέχεια η διαχείριση. Στον Πίνακα 1, φαίνεται η ποσόστωση των αερίων στην ατμόσφαιρα. Παρατηρούμε, ότι παρόλο που η ποσόστωση του νερού είναι χαμηλή συγκριτικά με άλλα αέρια της ατμόσφαιρας, έχει όμως την μεγαλύτερη απορρόφηση, όπως θα δούμε και παρακάτω. Αυτό οφείλεται στις ισχυρές γραμμές απορρόφησης του.

Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων, εισάγονται στο πρόγραμμα MATLAB, μέσω του οποίου θα γίνουν οι προσομοιώσεις μας. Οι μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν, όπως περιγράφονται στις εξισώσεις (2.3) – (2.10), επιλέγονται από το .par αρχείο μέσω κατάλληλης διαδικασίας.

Έχοντας αυτά, μπορούμε να υπολογίσουμε την συνεισφορά κάθε ισότοπου i κάθε αερίου g που βρίσκεται στο μέσο διάδοσης στη συνολική μοριακή απορρόφηση. Το πλήθος των ισότοπων εξαρτάται από το κάθε μεμονομένο αέριο. Στον Πίνακα 3, φαίνονται τα ισότοπα των κυριότερων αερίων που επηρεάζουν την μοριακή απορρόφηση και την ποσότητα στην οποία βρίσκεται το καθένα.

ΤΥΠΟΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ
$^{14}\text{N}_2$	0.992687
$^{14}\text{N}^{15}\text{N}$	0.007478

(α)

ΤΥΠΟΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ
$^{16}\text{O}_2$	0.995262
$^{16}\text{O}^{18}\text{O}$	0.003991
$^{16}\text{O}^{17}\text{O}$	7.422350×10^{-4}

(β)

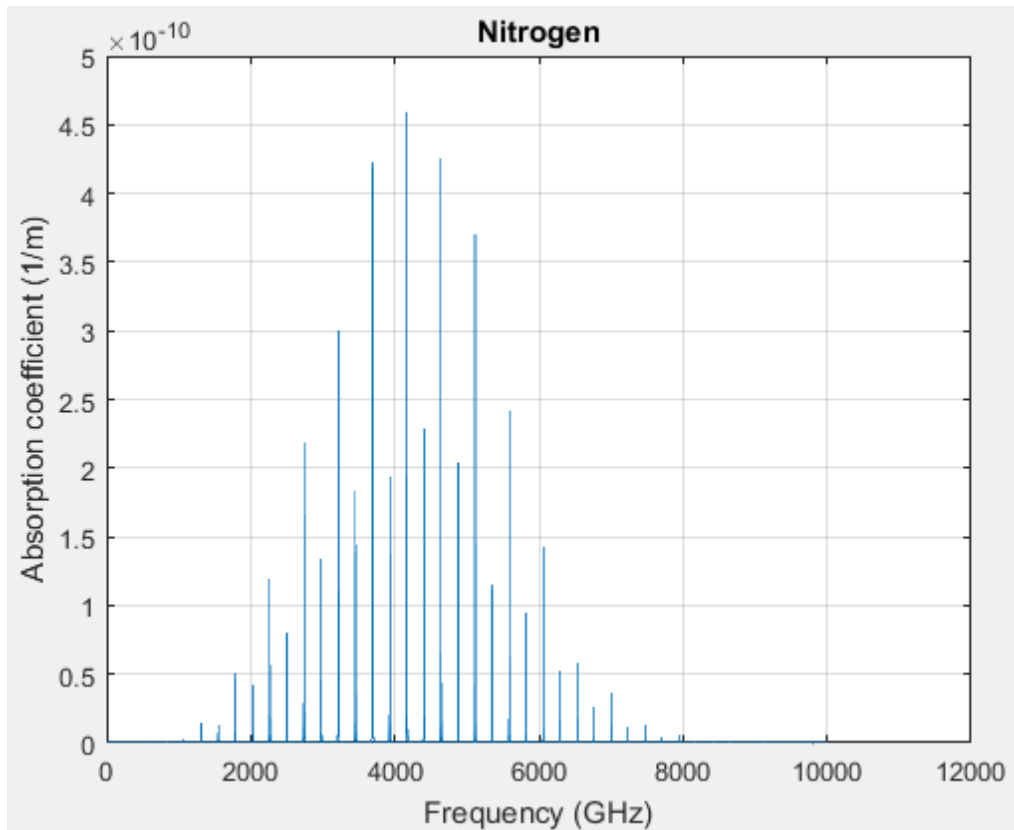
ΤΥΠΟΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ
H_2^{16}O	0.997317
H_2^{18}O	0.002000
H_2^{17}O	3.718840×10^{-4}
HD^{16}O	3.106930×10^{-4}
HD^{18}O	6.230030×10^{-7}
HD^{17}O	1.158530×10^{-7}
D_2^{16}O	2.419700×10^{-8}

(γ)

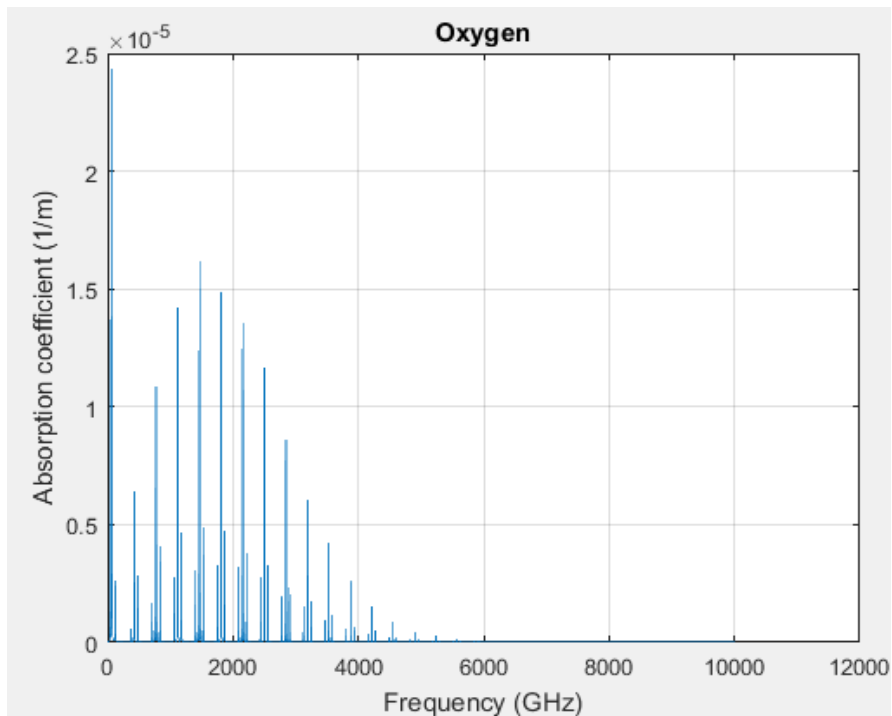
Πίνακας 4: Ισότοπα Αζώτου (α), Οξυγόνου (β) και Νερού (γ) στην ατμόσφαιρα

Στα Σχήματα παρακάτω απεικονίζονται οι συντελεστές απορρόφησης για τα διάφορα ισότοπα του αζώτου (Σχήμα 8), του οξυγόνου (Σχήμα 9) και των υδρατμών (Σχήμα 10 και 11) ως συνάρτηση της συχνότητας διάδοσης, όπως περιγράφονται στην παράγραφο 2.1. Παρατηρούμε ότι παρά την υψηλή

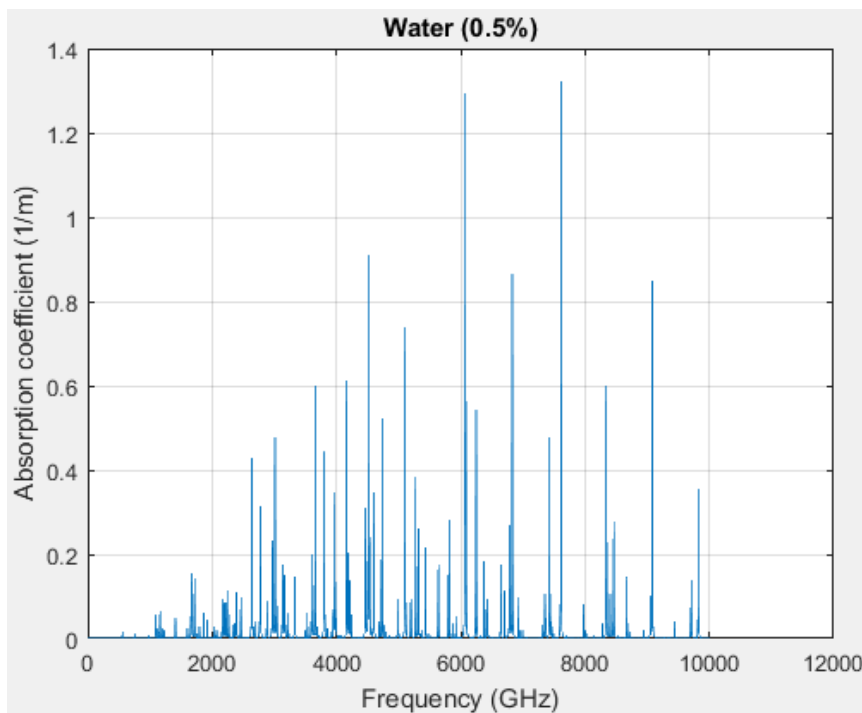
ποσόστωση του αζώτου στο ατμοσφαιρικό μείγμα, η μοριακή απορρόφηση του είναι πολύ χαμηλή συγκριτικά με αυτή του οξυγόνου και του νερού. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί λόγω των λιγότερων ισοτόπων του αζώτου που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σε σύγκριση με τα άλλα δύο αέρια.



Σχήμα 8: Μοριακή απορρόφηση του αζώτου σε σχέση με τη συχνότητα του μεταδιδόμενου κύματος.



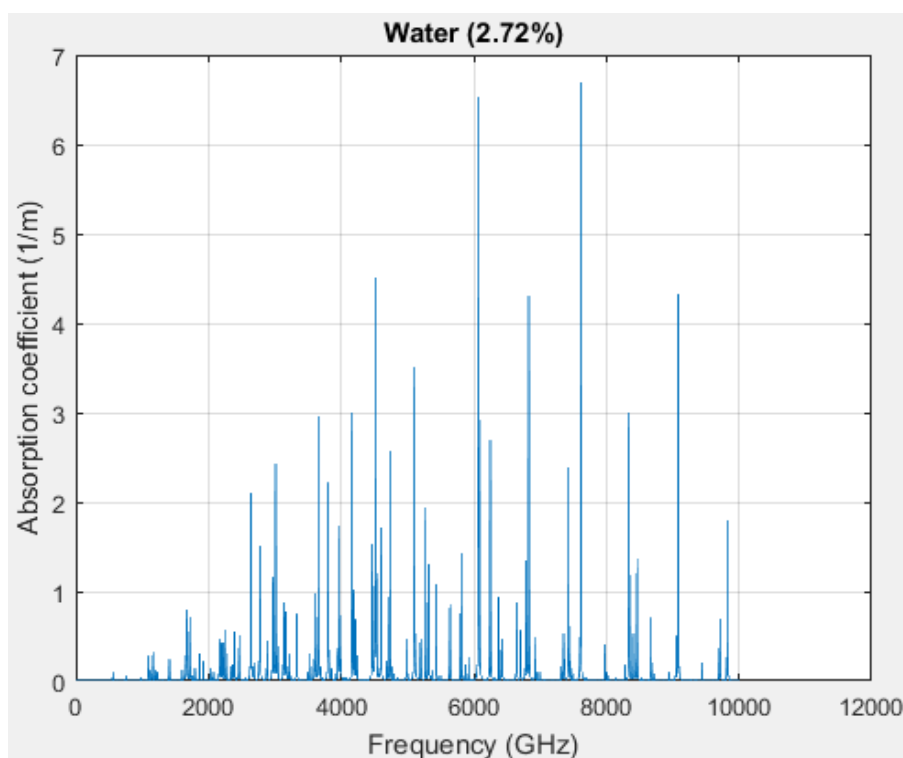
Σχήμα 9: Μοριακή απορρόφηση του οξυγόνου σε σχέση με τη συχνότητα του μεταδιδόμενου κύματος.



Σχήμα 10: Μοριακή απορρόφηση του νερού σε σχέση με τη συχνότητα του μεταδιδόμενου κύματος για ποσότητα υδατμών 0.5%.

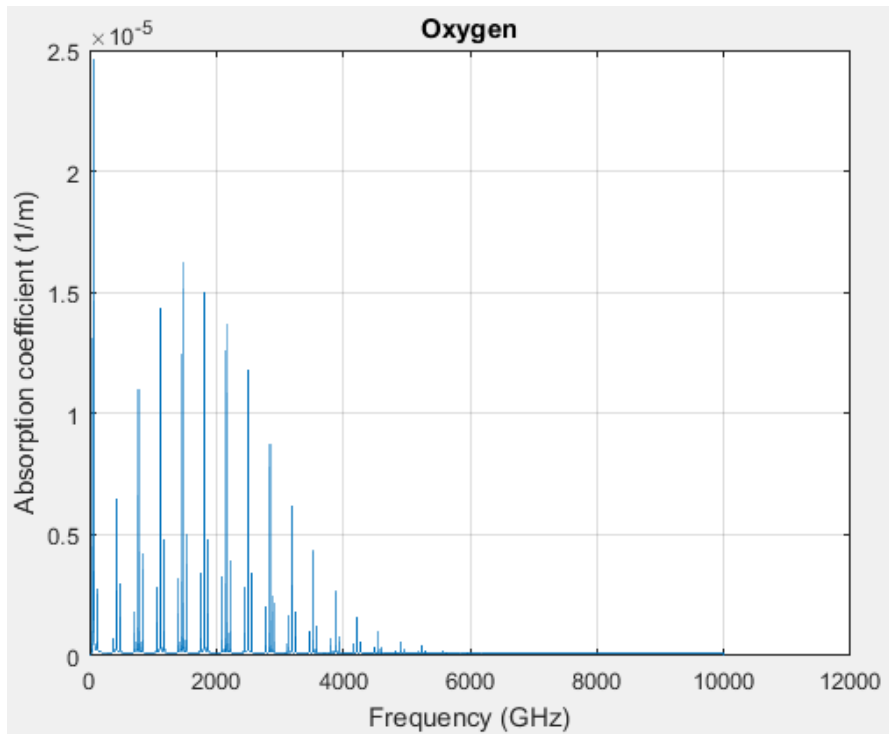
Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη συνεισφορά στη συνολική απορρόφηση είναι από τους υδατμούς, όπου οι συντελεστές είναι περίπου 6 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τους αντίστοιχους του οξυγόνου. Τα Σχήματα 10 και 11

εμφανίζουν το συντελεστή μοριακής απορρόφησης για δύο διαφορετικές συνθήκες παρουσίας υδρατμών. Το πρώτο δείχνει ένα περιβάλλον όπου οι υδρατμοί καταλαμβάνουν το 0.5% της ατμόσφαιρας, δηλαδή η σχετική υγρασία είναι στο 12.5%, ενώ στο δεύτερο οι υδρατμοί καταλαμβάνουν το 2.72%, δηλαδή η σχετική υγρασία φτάνει στο 68%, όσο είναι η ετήσια μέση υγρασία σε μια παραλιακή πόλη. Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής της μοριακής απορρόφησης είναι περίπου πέντε φορές πάνω.

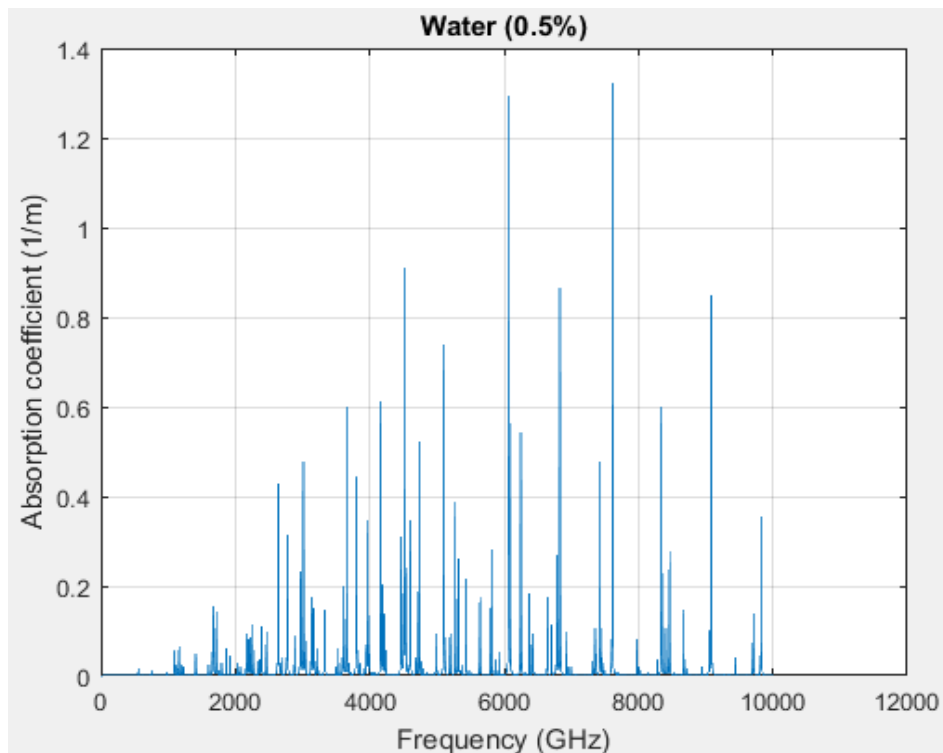


Σχήμα 11: Μοριακή απορρόφηση του οξυγόνου σε σχέση με τη συχνότητα του μεταδιδόμενου κύματος για ποσότητα υδρατμών 0.5%.

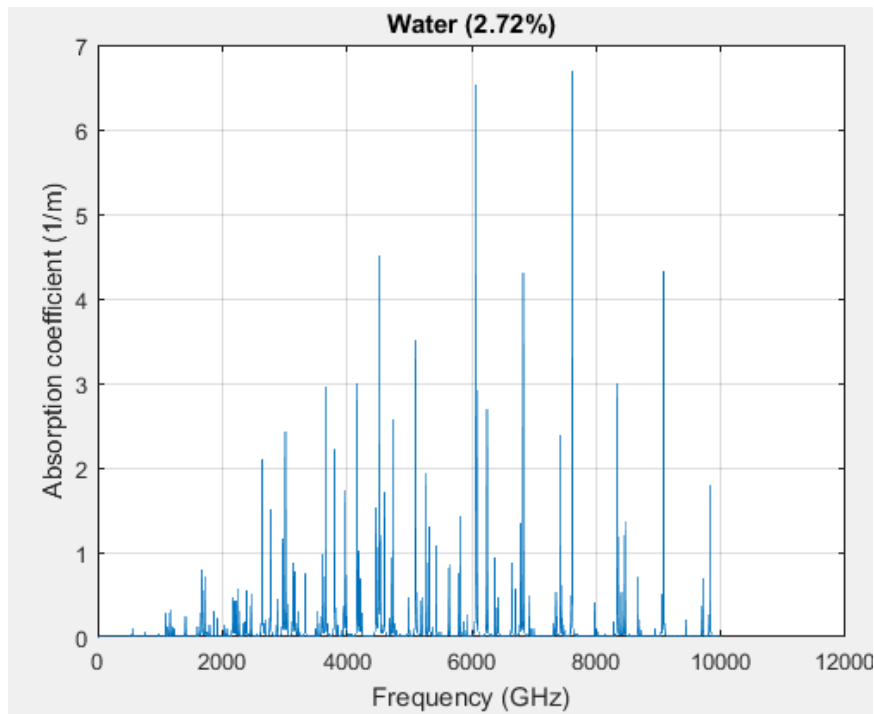
Ακολούθως, εμφανίζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που προκύπτουν από τις εξισώσεις όπως περιγράφονται στην παράγραφο 2.2 του κειμένου μας, δηλαδή σύμφωνα με τους Jornet - Akyildiz. Η βασική αρχή που διέπει τις εξισώσεις των παραγράφων 2.1 και 2.2 είναι η ίδια, η θεωρία μεταφοράς ενέργειας λόγω ακτινοβολίας, ενώ τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται λαμβάνονται από τη βάση δεδομένων του HITRAN. Όπως είναι λογικό λοιπόν, τα σχήματα που ακολουθούν και τα οποία δείχνουν το συντελεστή μοριακής απορρόφησης σε m^{-1} σε σχέση με τη συχνότητα για το οξυγόνο και τους υδρατμούς, έχουν ίδια μορφή και τιμές με τα σχήματα που προηγήθηκαν.



Σχήμα 12: Συντελεστής μοριακής απορρόφησης σε m^{-1} του οξυγόνου σε σχέση με τη συχνότητα.



Σχήμα 13: Συντελεστής μοριακής απορρόφησης σε m^{-1} των υδατιμών ποσότητας 0.5% σε σχέση με τη συχνότητα.

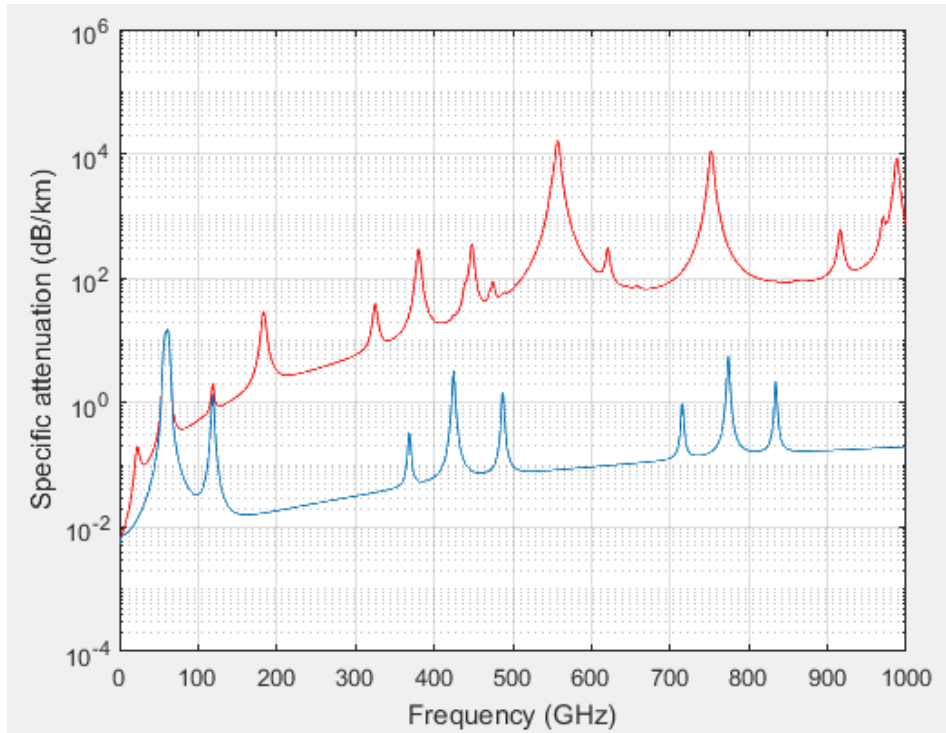


Σχήμα 14: Συντελεστής μοριακής απορρόφησης σε m^{-1} των υδρατμών ποσότητας 2.72% σε σχέση με τη συχνότητα.

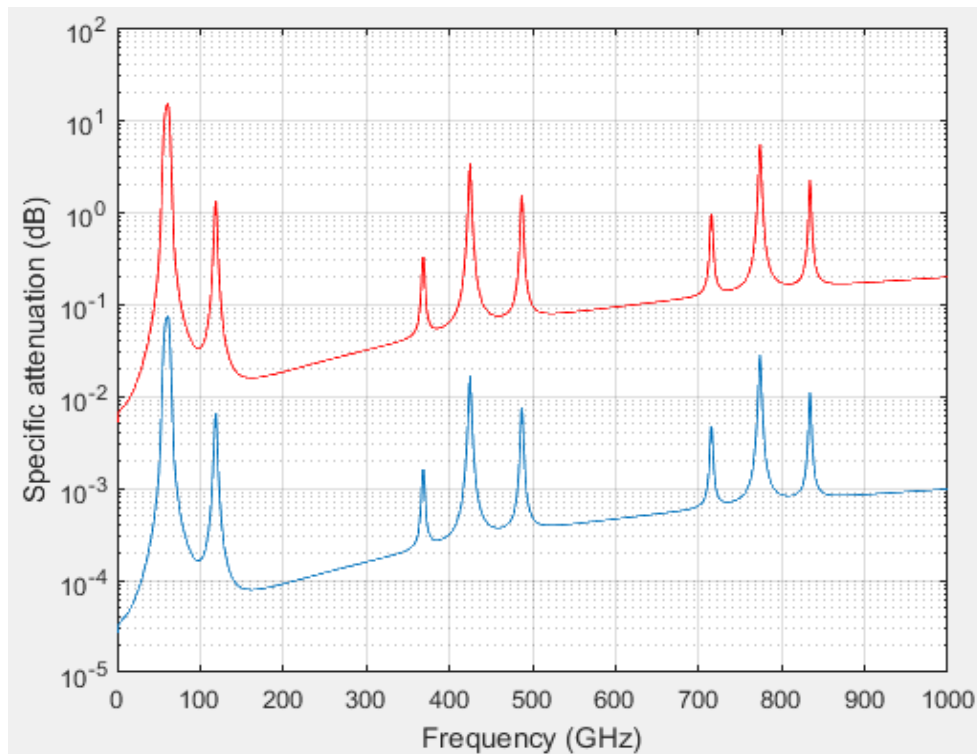
4.2 Εξασθένηση λόγω μοριακής απορρόφησης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα βασισμένα στο μοντέλο του ITU που παρουσιάζουν την ατμοσφαιρική απορρόφηση σε dB, για ξηρή ατμόσφαιρα και για ένα τυπικό ατμοσφαιρικό περιβάλλον, παρουσία υδρατμών. Για τα διαγράμματα που ακολουθούν, οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για θερμοκρασία περιβάλλοντος 15°C , πίεση 101325 Pa και απόσταση εκπομπής το 1km, εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά στη λεζάντα του αντίστοιχου διαγράμματος.

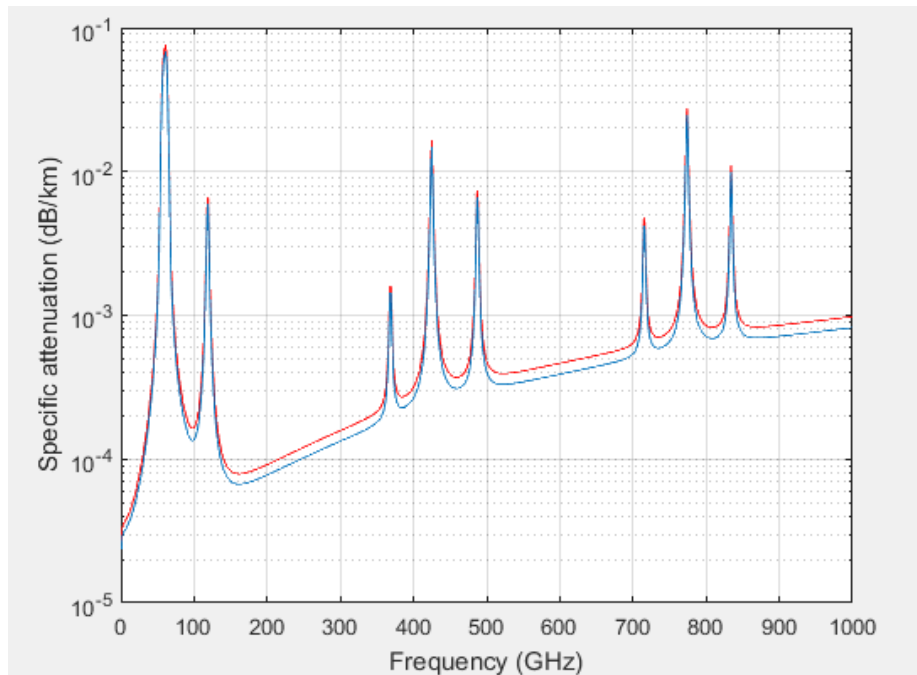
Στο Σχήμα 15, βλέπουμε τη διαφορά εξασθένησης μεταξύ των δύο περιπτώσεων ατμόσφαιρας για απόσταση εκπομπής στο 1km.



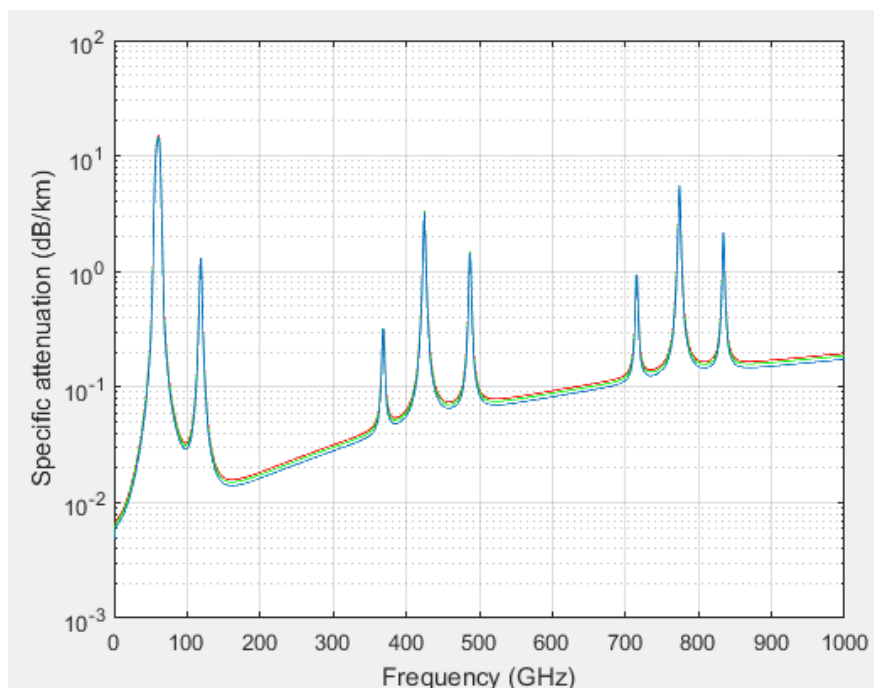
Σχήμα 15: Η εξασθένιση σε ξηρή ατμόσφαιρα (μπλε) και με παρουσία υδρατμών (κόκκινο).



Σχήμα 16: Εξασθένιση σε ξηρή ατμόσφαιρα, σε διαφορετικές αποστάσεις εκπομπής, στα $R = 1000\text{m}$ (κόκκινο) και $R = 5\text{m}$ (μπλε).



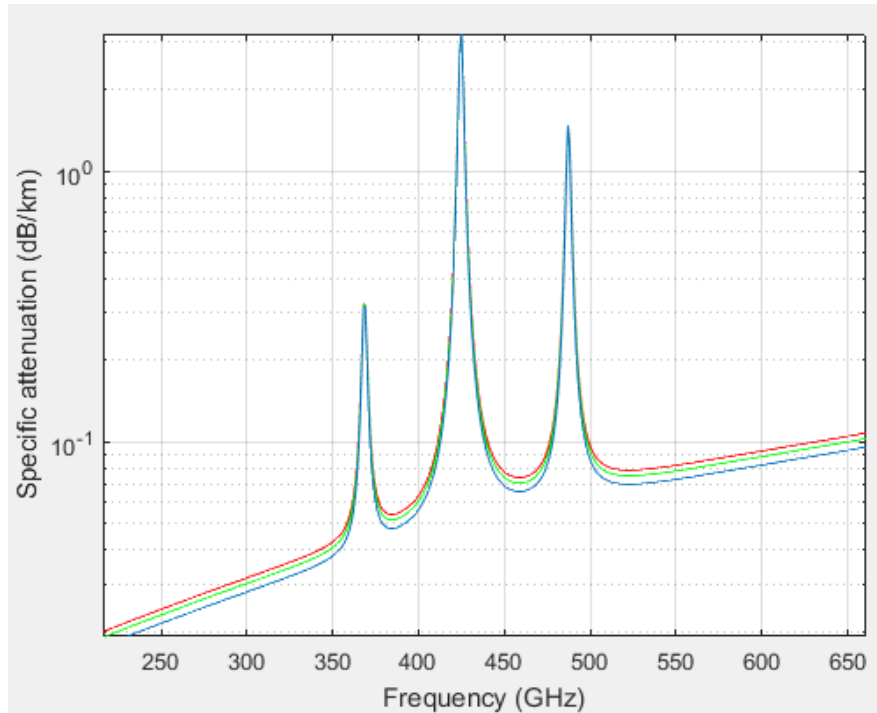
Σχήμα 17: Εξασθένηση σε ξηρή ατμόσφαιρα, για διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, με $T = 15^{\circ}\text{C}$ (κόκκινο) και $T = 30^{\circ}\text{C}$ (μπλε).



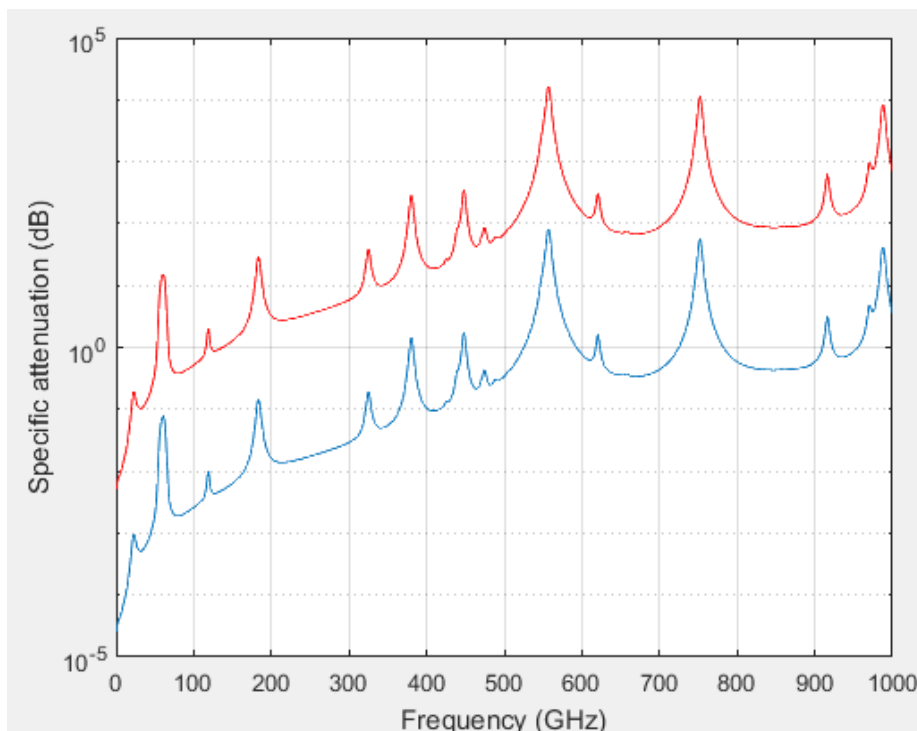
Σχήμα 18α: Εξασθένηση σε ξηρή ατμόσφαιρα σε διαφορετικά υψόμετρα.

Τα Σχήματα 16, 17 και 18 δείχνουν διαφορετικές συνθήκες σε περιβάλλον ξηρής ατμόσφαιρας. Στο Σχήμα 16 μπορούμε να παρατηρήσουμε πως επηρεάζει η απόσταση εκπομπής σε ένα περιβάλλον χωρίς υδρατμούς, όπου η διαφορά είναι 2 τάξεις μεγέθους, ενώ στο Σχήμα 17 βλέπουμε πως η αλλαγή της θερμοκρασίας έχει μικρή επιρροή στην εξασθένηση. Το Σχήμα 18α δείχνει την εξασθένηση για σταθερή θερμοκρασία στους 15°C , για περιβάλλον

ξηρής ατμόσφαιρας για διαφορετικά υψόμετρα, οπότε και διαφορετικές πιέσεις. Η κόκκινη γραμμή δείχνει την εξασθένηση σε πίεση 101325 Pa (επιφάνεια θάλασσας), η πράσινη για πίεση 98945.33 Pa (200m υψόμετρο) και η μπλε για πίεση 95460.84 Pa (500 m υψόμετρο). Παρατηρούμε ότι η πίεση επηρεάζει πολύ λίγο την ατμοσφαιρική εξασθένηση. Στο Σχήμα 18β απεικονίζεται ένα μέρος του φάσματος, για να φανεί καλύτερα η μικρή διαφορά των τιμών.

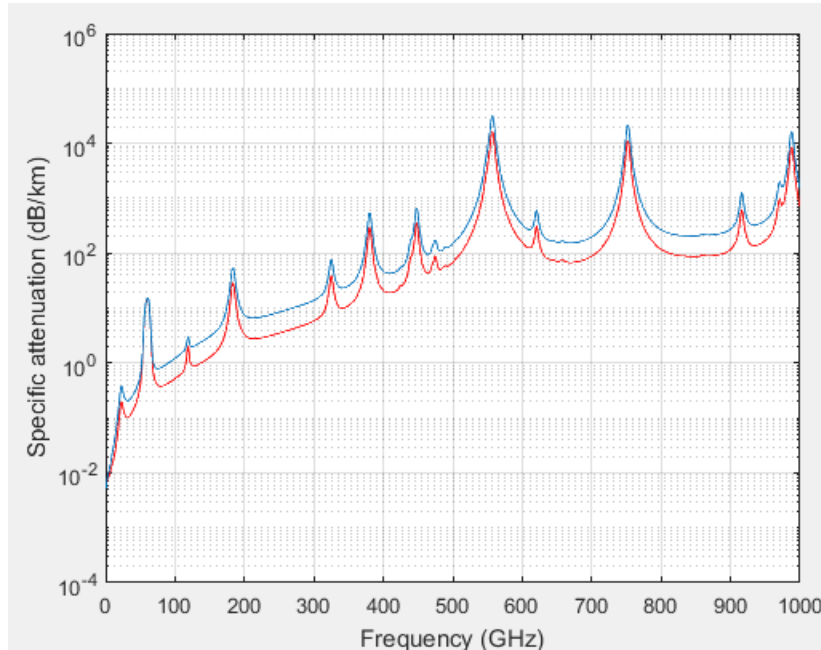


Σχήμα 18β: Εξασθένηση σε ξηρή ατμόσφαιρα σε διαφορετικά υψόμετρα.

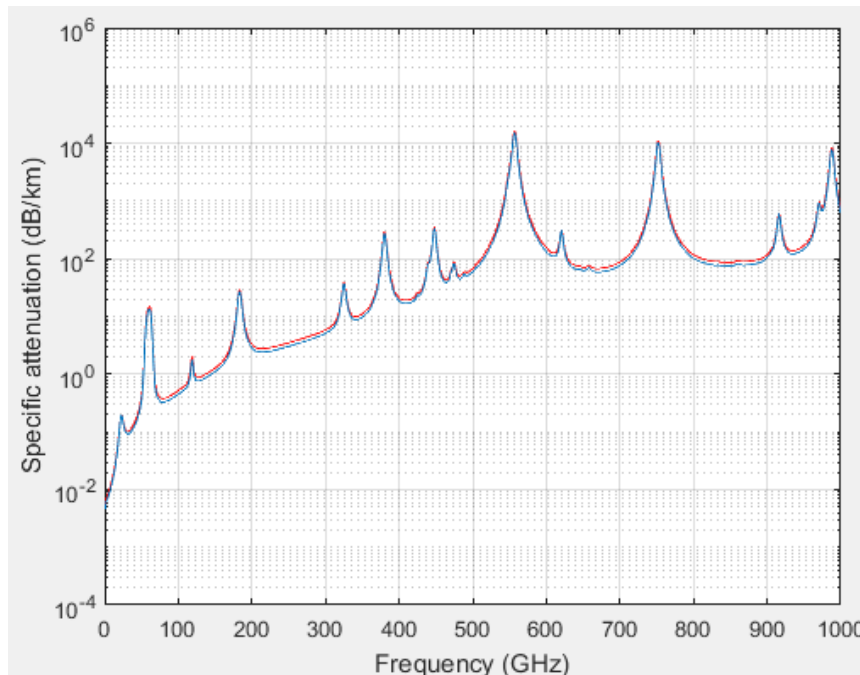


Σχήμα 19: Εξασθένηση σε ατμόσφαιρα παρουσία υδρατμών για διαφορετικές αποστάσεις εκπομπής, $R = 1000m$ (κόκκινο) και $R = 5m$ (μπλε).

Στα Σχήματα 19, 20, 21 και 22 παρουσιάζεται πώς επηρεάζουν οι διαφορετικές συνθήκες την εξασθένηση σε ένα ατμοσφαιρικό περιβάλλον όπου υπάρχουν υδρατμοί. Αρχικά, το σχήμα 19 απεικονίζει σε ένα ατμοσφαιρικό περιβάλλον όπου υπάρχουν υδρατμοί σε πυκνότητα 7.5 g/m^3 , πώς επηρεάζει η απόσταση εκπομπής. Το Σχήμα 20 δείχνει την εξασθένηση σε δύο διαφορετικά περιβάλλοντα, με διαφορετικές πυκνότητες υγρασίας, στα 7.5 g/m^3 και στα 15 g/m^3 .

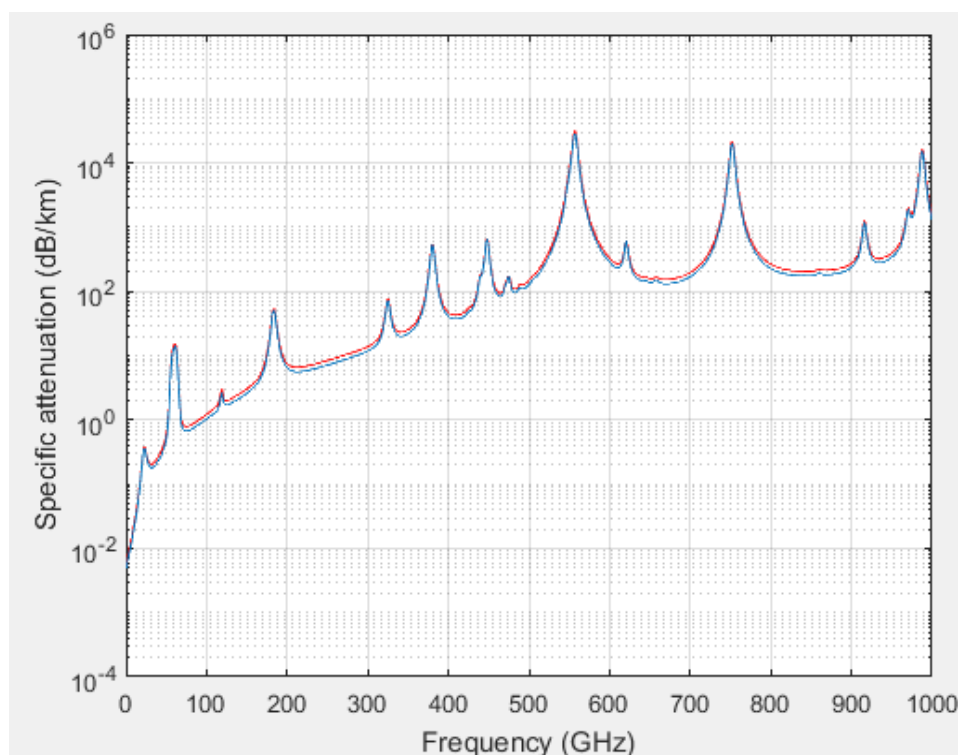


Σχήμα 20: Εξασθένηση σε υγρή ατμόσφαιρα, σε δύο διαφορετικές συνθήκες υγρασίας, με $w = 7.5 \text{ g/m}^3$ (κόκκινο) και $w = 15 \text{ g/m}^3$ (μπλε).



Σχήμα 21: Εξασθένηση σε υγρή ατμόσφαιρα, για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες $T=15^\circ\text{C}$ (κόκκινη) και $T=30^\circ\text{C}$, με $w = 7.5 \text{ g/m}^3$.

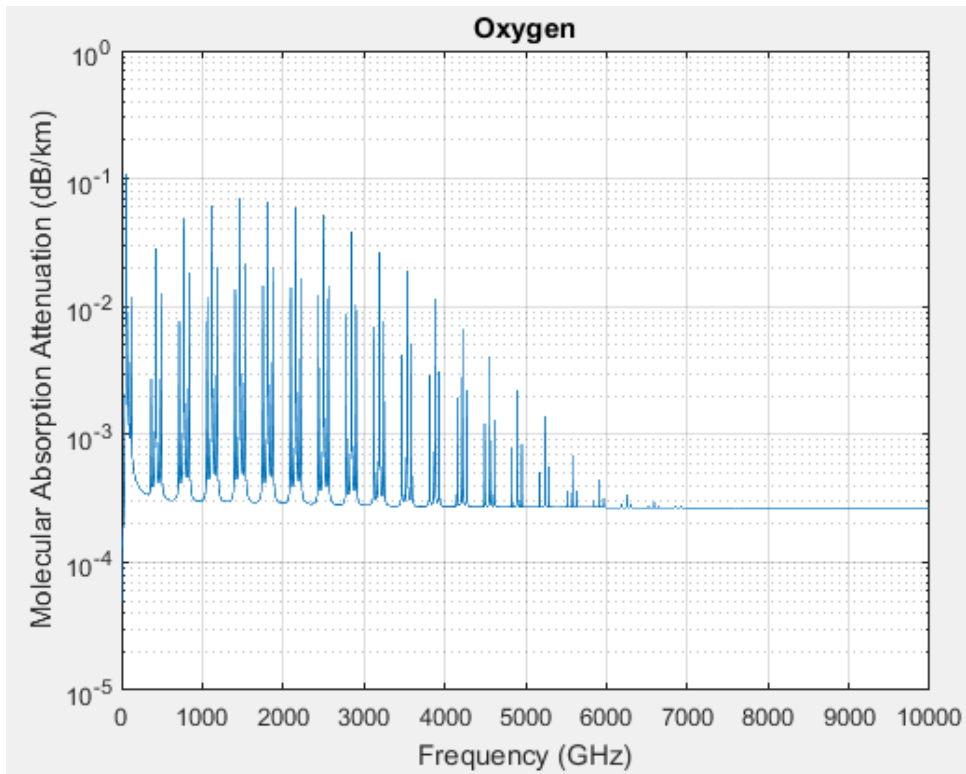
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 21 και 22, η αλλαγή στη θερμοκρασία σε ένα περιβάλλον όπου υπάρχουν υδρατμοί, δεν διαφοροποιεί αισθητά την εξασθένηση ενός σήματος.



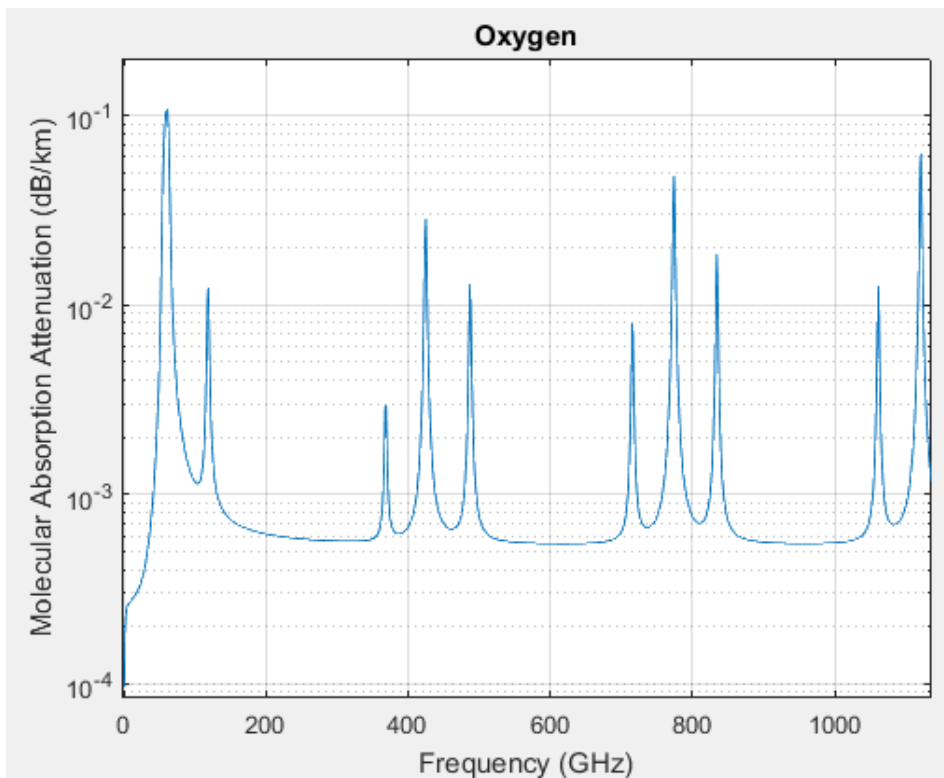
Σχήμα 22: Εξασθένηση σε υγρή ατμόσφαιρα, για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες $T=15^{\circ}\text{C}$ (κόκκινη) και $T=30^{\circ}\text{C}$, με $w = 15 \text{ g/m}^3$.

Τέλος, ακολούθως παρουσιάζονται τα διαγράμματα της συνάρτησης μεταφοράς των απωλειών λόγω μοριακής απορρόφησης σε dB/km συναρτήσεως της συχνότητας για τα μοντέλα που χρησιμοποιούν τη θεωρία μεταφοράς ενέργειας (παράγραφοι 2.1 και 2.2). Τα διαγράμματα αυτά θα βοηθήσουν στην σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το μοντέλο του ITU και της θεωρίας μεταφοράς ενέργειας λόγω ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται στα άλλα δύο μοντέλα υπολογισμού του συντελεστή μοριακής απορρόφησης. Ακόμα, αναφέρουμε ότι έχουν χρησιμοποιηθεί τα διαγράμματα των συναρτήσεων μεταφοράς του μοντέλου όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.2, καθώς όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεν εμφανίζουν διαφορά με τα διαγράμματα της εξασθένησης όπως αυτά προέκυψαν από το μοντέλο των εξισώσεων του HITRAN.

Στο σχήμα 23α φαίνεται η εξασθένηση σε dB/km λόγω μοριακής απορρόφησης εξαιτίας του οξυγόνου σε σχέση με τη συχνότητα. Ένα πιο λεπτομερειακό διάγραμμα στοχευμένο στις συχνότητες μέχρι 1000 GHz, όπως φαίνεται στο σχήμα 23β, θα βοηθήσει στη σύγκριση των δύο μοντέλων.



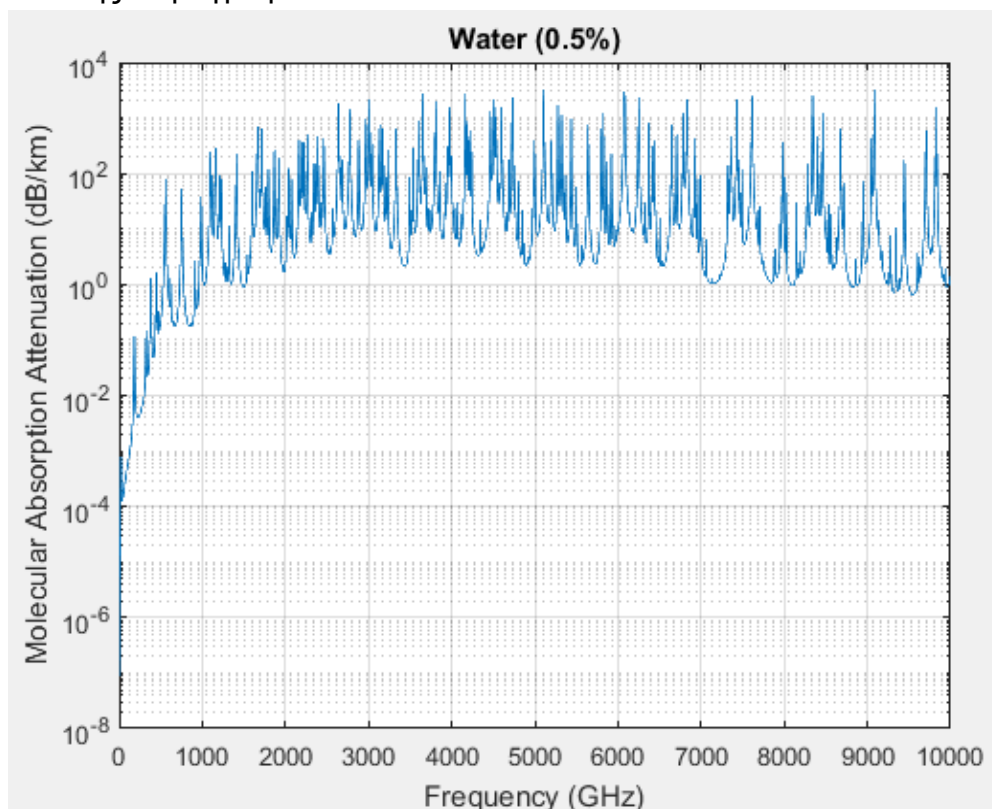
Σχήμα 23α: Εξασθένηση λόγω μοριακής απορρόφησης από το οξυγόνο σε dB/km συναρτήσει της συχνότητας.



Σχήμα 23β: Εξασθένηση λόγω μοριακής απορρόφησης από το οξυγόνο σε dB/km συναρτήσει της συχνότητας.

Κάνοντας τη σύγκριση της μπλε γραμμής του σχήματος 15 με το σχήμα 23β, παρατηρούμε ότι οι ταλαντώσεις εμφανίζονται στις ίδιες συχνότητες και έχουν ίδιο πλάτος, κάτι λογικό καθώς συμβαίνει λόγω της απορρόφησης από τα ισότοπα του οξυγόνου. Ωστόσο, η καμπύλη του σχήματος 15 έχει υψηλότερες τιμές συνολικά. Ξεκινάει με μια εξασθένηση της τάξης του 10^{-2} και ακολουθεί ανοδική πορεία, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει με την καμπύλη του σχήματος 23. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι το μοντέλο του ITU μας δίνει την εξασθένηση σε περιβάλλον ξηρής ατμόσφαιρας. Όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.19), η εξασθένηση αποτελείται από δύο παράγοντες, την εξασθένηση από τα ισότοπα του οξυγόνου και την εξασθένηση από την απορρόφηση που οφείλεται στο μη-ταλαντούμενο Debye φάσμα και στην επαγόμενη λόγω πίεσης απορρόφησης του αζώτου. Ο δεύτερος αυτός παράγοντας δημιουργεί τη διαφορά στο διάγραμμα. Αντίθετα, η εξασθένηση που αναπαρίσταται στο σχήμα 23 λαμβάνει υπόψιν μόνο τα ισότοπα του οξυγόνου.

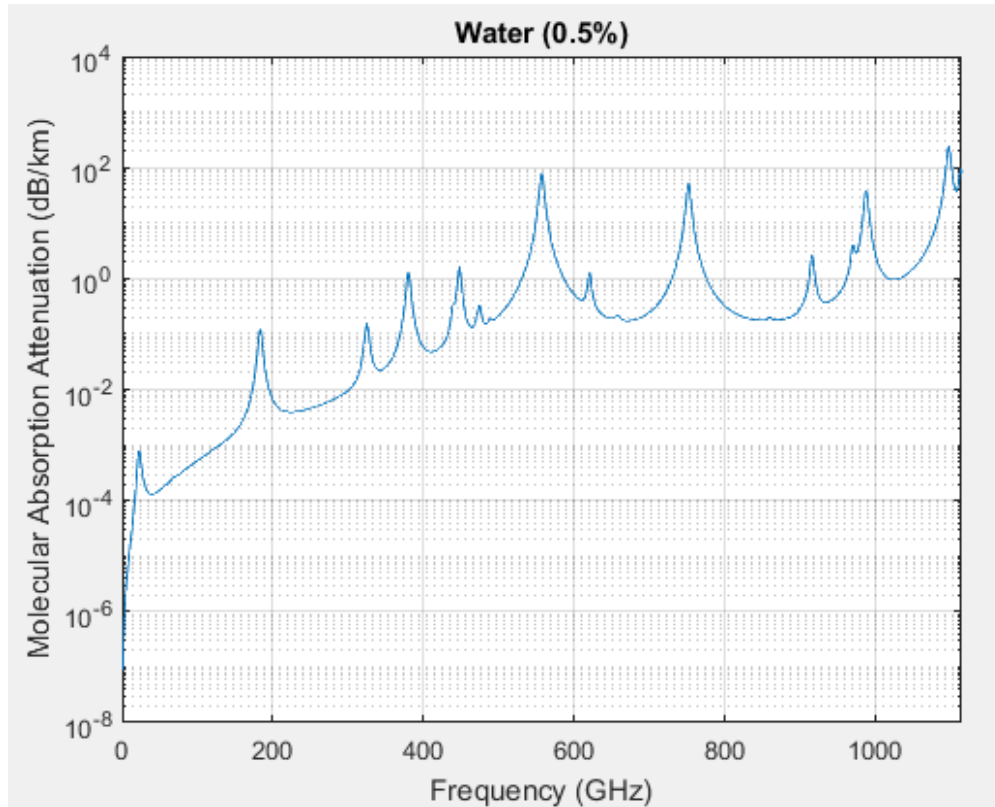
Ακολουθούν τα σχήματα 24α και 24β που δείχνουν την εξασθένηση σε dB/km λόγω μοριακής απορρόφησης από υδρατμούς, υπολογισμένη με το μοντέλο της παραγράφου 2.2.



Σχήμα 24α: Εξασθένηση λόγω μοριακής απορρόφησης από τους υδρατμούς σε dB/km συναρτήσει της συχνότητας.

Η σύγκριση του σχήματος 24β και της κόκκινης καμπύλης του σχήματος 15 θα οδηγήσει στην κατανόηση ότι αποτελούν πανομοιότυπα διαγράμματα. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι το μοντέλο του ITU και η εξίσωση

(2.20) που περιγράφει την εξασθένηση σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον παρουσίας υδρατμών, συνυπολογίζει μόνο την εξασθένηση από τα ισότοπα του νερού. Ταυτόχρονα, η καμπύλη του σχήματος 24β παρουσιάζει την εξασθένηση λόγω απορρόφησης από τους υδρατμούς.



Σχήμα 24β: Εξασθένηση λόγω μοριακής απορρόφησης από τους υδρατμούς σε dB/km συναρτήσει της συχνότητας.

Επίλογος

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας, όπως άλλωστε έχει γίνει γνωστό, είναι η μελέτη της διάδοσης σε συχνότητες THz. Η εκτενής μελέτη και ανάλυση του φάσματος των THz συχνοτήτων μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο στην εκμετάλλευση των συχνοτήτων αυτών, με σκοπό την εξυπηρέτηση των ραγδαία αυξανόμενων απαιτήσεων για πιο γρήγορες και πιο αξιόπιστες ασύρματες επικοινωνίες αλλά και για την επιτέλεση πληθώρας άλλων καινοτόμων εφαρμογών.

Στο πλαίσιο αυτό λοιπόν, ασχολήθηκα με την ανάλυση ενός μοντέλου καναλιού πολλαπλών διαδρομών με χρήση τεχνικών ανίχνευσης ακτίνων το οποίο θα ανταποκρίνεται στις νέες απαιτήσεις που δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης απωλείων μοριακής απορρόφησης και ανάκλασης, πράγματα τα οποία δεν μας είχαν απασχολήσει σε μοντέλα καναλιών επικοινωνίας χαμηλότερων συχνοτήτων.

Σημαντικός παράγοντας, όπως αναφέρθηκε, για την μετάδοση των κυμάτων σε Terahertz συχνότητες αποτελεί η μοριακή απορρόφηση. Σημαντικό κομμάτι της εργασίας λοιπόν αποτελεί η ανάλυση των μοντέλων για τον υπολογισμό του συντελεστή μοριακής απορρόφησης από τα διάφορα μόρια της ατμόσφαιρας. Η θεωρητική ανάλυση των μοντέλων αυτών ακολουθήθηκε από προσομοιώσεις σε περιβάλλον Matlab 2017a. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Παράρτημα Β. Απαραίτητη ήταν και η χρησιμοποίηση των δεδομένων για τα ισότοπα των αερίων της ατμόσφαιρας, τα οποία λήφθηκαν από τη βάση δεδομένων του HITRAN και εισήχθησαν μέσω κατάλληλου προγράμματος στο Matlab. Ακόμα, για την προσομοίωση του μοντέλου ατμοσφαιρικής απορρόφησης όπως αυτό πρωτοτυπήθηκε στο ITU-R P.676-11, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση του Matlab “gaspl”.

Έχοντας αυτά τα εργαλεία, εκτελέσαμε τις προσομοιώσεις μας, τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στο Κεφάλαιο 4. Εκεί μπορούμε να συμπεράνουμε παρατηρώντας τα διαγράμματα που μας δείχνουν τον συντελεστή μοριακής απορρόφησης ότι την σημαντικότερη επίδραση στην μοριακή απορρόφηση ενός σήματος έχουν τα μόρια του νερού. Όσο μεγαλύτερη η συγκέντρωσή τους στην ατμόσφαιρα, τόσο αυξάνει και ο συντελεστής μοριακής απορρόφησης τους. Ακόμα, μπορούμε να δούμε την εξασθένηση λόγω μοριακής απορρόφησης σε dB, όπως προκύπτει από τα διαφορετικά μοντέλα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων χρησιμεύει για να δούμε, αφενός, ότι η εξασθένηση που προκαλείται σε ένα ατμοσφαιρικό περιβάλλον όπου υπάρχουν υδρατμοί είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει σε ένα ξηρό περιβάλλον. Αφετερού, παρατηρούμε ότι η εξασθένηση που δημιουργείται αποκλειστικά από τα μόρια του οξυγόνου διαφέρει από την εξασθένηση από ένα ξηρό ατμοσφαιρικό περιβάλλον, όπου συναντώνται και άλλοι προσθετικοί παράγοντες εξασθένησης.

Τα ζητήματα που χρειάζεται να λυθούν για την αξιοποίηση των THz συχνοτήτων είναι πολυεπίπεδα. Ένα πρώτο βήμα το οποίο θα μπορούσε να γίνει είναι η προσομοίωση του μοντέλου καναλιού πολλαπλών διαδρομών για την δημιουργία μίας εις βάθος ανάλυσης των χαρακτηριστικών του καναλιού, όπως είναι η συχνοεπιλεκτική φύση του καναλιού, το εύρος συνοχής (coherence bandwidth) του καναλιού, η διασπορά καθυστέρησης (delay spread) και η χωρητικότητα του ευρυζωνικού καναλιού.

Ακόμα, επιτακτική είναι η ανάγκη ανάπτυξης καινούργιων αρχιτεκτονικών για τους πομποδέκτες, οι οποίοι θα μπορούν να λειτουργούν σε THz και να εκμεταλλεύονται το διαθέσιμο φάσμα, καθώς και κεραιών που θα επιτρέπουν τη μετάδοση σε Tbps όπως και συστοιχίες αυτών που θα αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της υψηλής εξασθένησης. Όσον αφορά τα διάφορα στρώματα της λίστας πρωτοκόλλου (protocol stack), έδαφος για έρευνα υπάρχει σε όλα τα επίπεδα, όπως το φυσικό στρώμα (physical layer), το link layer, το network layer και το transport layer.

Βιβλιογραφία

- [1] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, and C. Han, "Terahertz band: Next frontier for wireless communications," *Physical Communication (Elsevier) Journal*, vol. 12, pp. 16 – 32, Sept. 2014.
- [2] C. Han, "Physical layer solutions for ultra-broadband wireless communications in the terahertz band", School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology, May 2016
- [3] J.M. Jornet, I.F. Akyildiz, "Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band", *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 10 (10) (2011).
- [4] I.E. Gordon, L.S. Rothman, C. Hill et al., "The HITRAN2016 Molecular Spectroscopic Database", *J Quant Spectrosc Radiat Transfer* (2017).
- [5] R. Piesiewicz, T. Kleine-Ostmann, N. Krumbholz, D. Mittleman, M. Koch, T. Kurner, "Terahertz characterisation of building materials", *IET Electron. Lett.* 41 (18) (2005) 1002–1004.
- [6] R.M. Goody, Y.L. Yung, "Atmospheric Radiation: Theoretical Basis, second ed.", Oxford University Press, 1989.
- [7] C. Han, A.O. Bicen, I.F. Akyildiz, "Multi-Ray Channel Modeling and Wideband Characterization for Wireless Communications in the Terahertz Band", *IEEE Trans. Wirel. Commun.* , Vol. 14, No. 5, May 2015
- [8] R. Piesiewicz et al., "Scattering analysis for the modeling of THz communication systems," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 11, pp. 3002–3009, Nov. 2007.
- [9] H. Ragheb and E. R. Hancock, "The modified Beckmann-Kirchhoff scattering theory for rough surface analysis," *Pattern Recognit.*, vol. 40, no. 7, pp. 2004–2020, 2007.
- [10] C. L. Vernold and J. E. Harvey, "Modified Beckmann-Kirchhoff Scattering Theory for Nonparaxial Angles," in *Proc. SPIE*, 1998, pp. 51–56.
- [11] C. Jansen *et al.*, "Diffuse scattering from rough surfaces in THz communication channels," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 462–472, Nov. 2011.
- [12] Hill, Christian. "HITRANonline." *HITRANonline - Documentation: Units and Definitions*, Retrieved from hitran.org/docs/definitions-and-units/.
- [13] ITU-R (2016), Recommendation ITU-R P.676-11, Attenuation by atmospheric gases, ITU-R Recommendations. ITU.

Παράρτημα Α

Τρόπος λειτουργίας του κώδικα

Το πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει για τη χρησιμοποίηση του κώδικα είναι η απόκτηση από τη βάση δεδομένων του HITRAN των δεδομένων για τα αέρια που μας ενδιαφέρουν. Από το σελίδα www.hitran.org στο διαδίκτυο, πατώντας Data Access -> Line-by-Line επιλέγουμε τα αέρια για τα οποία θέλουμε να αποκτήσουμε τα δεδομένα. Προηγουμένως βέβαια θα πρέπει να έχουμε δημιουργήσει λογαριασμό για να έχουμε το δικαίωμα πρόσβασης στη βάση δεδομένων. Ακόμα θα πρέπει να επιλέξουμε κάθε φορά ένα αέριο, ώστε στο par file που θα κατεβάσουμε να υπάρχουν μόνο τα δεδομένα ενός αερίου οπότε τελικά μέσα από τον κώδικα που παρατίθεται παρακάτω, να υπολογισθεί ο συντελεστής απορρόφησης του κάθε αερίου ξεχωριστά.

Στη συνέχεια, επιλέγουμε τα ισότοπα του αερίου που θέλουμε να συμπεριλάβουμε στα δεδομένα και το εύρος των κυματάριθμων. Μη θέτοντας άνω και κάτω όριο, επιλέγουμε το όλες τις γραμμές των ισοτόπων. Το τελευταίο βήμα είναι το κατέβασμα των δεδομένων που χρειαζόμαστε.

Έχοντας κατεβάσει τα δεδομένα σε ένα par file, χρειάζεται να τα φορτώσουμε στο Matlab. Αυτό γίνεται μέσω της συνάρτησης `importhitran.m` που παρατίθεται πιο κάτω. Αξίζει να αναφέρουμε στο σημείο αυτό ότι την πρώτη φορά που γίνεται φόρτωση της βάσης δεδομένων, δηλαδή του par file, το αποθηκεύουμε σε ένα .mat αρχείο του matlab, όπως φαίνεται παρακάτω. Στη θέση του `'database.par'` βάζουμε το όνομα του αρχείου, όπως το ονομάσαμε κατεβάζοντάς το.

```
file = 'database.par';  
y = importhishitran(file);  
save('kati.mat', 'file')
```

Έτσι, την επόμενη φορά που θα γίνει εκτέλεση του κώδικα, αρκεί η φόρτωση του αρχείου.

```
load ('kati.mat');
```

Έχοντας τα δεδομένα των ισοτόπων των αερίων που επιθυμούμε, χρησιμοποιούμε τους κώδικες που παρατίθενται κατωτέρω για τον υπολογισμό του συντελεστή μοριακής απορρόφησης με βάση τους δύο τρόπους της θεωρίας μεταφοράς ενέργειας λόγω ακτινοβολίας.

Ο κώδικας που βρίσκεται στο `gsplitU.m` μας δίνει διαγράμματα με τη χρήση της `gaspl` για διαφορετικές τιμές των χρησιμοποιηθείσων μεταβλητών.

Παράρτημα Β

Υπολογιστικός Κώδικας

B.1 Εισαγωγή της βάσης δεδομένων του HITRAN σε .mat αρχείο (importhitran.m)

```
function [ lines ] = importhitran( par_file )
%IMPORTHITRAN Imports the HITRAN database.
% lines = IMPORTHITRAN(par_file) imports HITRAN from the file
par_file.
%
% Reads the High-resolution Transmission (HITRAN) database from a
"par"
% file. The par file is a large file (~500 MB) containing line
parameters
% such as transmission wavenumber and line intensity. In the 2008
version
% of the HITRAN database this file is called 'HITRAN08.par'.
%
% Tip: once the database has been read, save it as a MATLAB MAT
file by
% typing:
%     save('HITRAN08.mat', 'lines')
%
% To load the MAT file next time:
%     load('HITRAN08.mat')
%
% It will typically take a few seconds to load the MAT file,
compared to
% minutes or hours to import the HITRAN "par" file.
%
% Part of this function is based on a MATLAB script called
READ_HITRAN2
% by H. Motteler.
%
% References:
%     "HITRAN Database Format 2004-present"
%     Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics
%     http://www.cfa.harvard.edu/hitran/formats.html
%
%     The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database
%     L.S. Rothman and others
%     http://www.cfa.harvard.edu/hitran/docs.html
%
% Iain Robinson, School of Geosciences, University of Edinburgh
% 4th December 2014

% Check that the file (e.g. HITRAN08.par) exists.
if ~exist(par_file, 'file')
    error('The HITRAN database file\n\t%s\nwas not found. This file
is called something like HITRAN08.par', par_file);
end

% Open the file.
[fileID, message] = fopen(par_file, 'r', 'native', 'US-ASCII');
if fileID == -1
```

```

        close(h)
        error('The HITRAN database file\n\t%s\nexists, but could not be
read. The operating system gave the message\n\t%s', par_file,
message);
end

% Define some properties of the file.
recordLength = 160;
recordLengthIncludingLineEndings = recordLength + 2; % Lines end with
CR+LF.

% Check the length of the file.
fseek(fileID, 0, 'eof');
fileSizeInBytes = ftell(fileID);
fseek(fileID, 0, 'bof');

% Work out the number of lines in the file.
numberOfLines = fileSizeInBytes / recordLengthIncludingLineEndings;

% Preallocate arrays to store the (known) number of lines. As this
may take
% some time, show a waitbar on the screen.
h = waitbar(0, sprintf('%d lines in file. Allocating memory...',
numberOfLines));
lines.moleculeNumber = zeros(numberOfLines,1);
lines.isotopologueNumber = zeros(numberOfLines,1);
lines.transitionWavenumber = zeros(numberOfLines,1);
lines.lineIntensity = zeros(numberOfLines,1);
lines.einsteinACoefficient = zeros(numberOfLines,1);
lines.airBroadenedWidth = zeros(numberOfLines,1);
lines.selfBroadenedWidth = zeros(numberOfLines,1);
lines.lowerStateEnergy = zeros(numberOfLines,1);
lines.temperatureDependence = zeros(numberOfLines,1);
lines.pressureShift = zeros(numberOfLines,1);
lines.upperVibrationalQuanta = char( zeros(numberOfLines, 15) );
lines.lowerVibrationalQuanta = char( zeros(numberOfLines, 15) );
lines.upperLocalQuanta = char( zeros(numberOfLines, 15) );
lines.lowerLocalQuanta = char( zeros(numberOfLines, 15) );
lines.errorCodes = char( zeros(numberOfLines, 6) );
lines.referenceCodes = char( zeros(numberOfLines, 12) );
lines.flagForLineMixing = char( zeros(numberOfLines, 1) );
lines.upperStatisticalWeight = zeros(numberOfLines, 1);
lines.lowerStatisticalWeight = zeros(numberOfLines, 1);

waitbar(0, h, 'Loading lines...');
tic % Start a timer.
for n=1:numberOfLines
    lines.moleculeNumber(n,1) = str2double( fread(fileID, 2,
'char=>char') );
    lines.isotopologueNumber(n,1) = str2double( fread(fileID, 1,
'char=>char') );
    lines.transitionWavenumber(n,1) = str2double( fread(fileID, 12,
'char=>char') );
    lines.lineIntensity(n,1) = str2double( fread(fileID, 10,
'char=>char') );
    lines.einsteinACoefficient(n,1) = str2double( fread(fileID, 10,
'char=>char') );
    lines.airBroadenedWidth(n,1) = str2double( fread(fileID, 5,
'char=>char') );

```

```

        lines.selfBroadenedWidth(n,1) = str2double( fread(fileID, 5,
'char=>char') );
        lines.lowerStateEnergy(n,1) = str2double( fread(fileID, 10,
'char=>char') );
        lines.temperatureDependence(n,1) = str2double( fread(fileID, 4,
'char=>char') );
        lines.pressureShift(n,1) = str2double( fread(fileID, 8,
'char=>char') );
        lines.upperVibrationalQuanta(n,:) = fread(fileID, 15,
'char=>char');
        lines.lowerVibrationalQuanta(n,:) = fread(fileID, 15,
'char=>char');
        lines.upperLocalQuanta(n,:) = fread(fileID, 15, 'char=>char');
        lines.lowerLocalQuanta(n,:) = fread(fileID, 15, 'char=>char');
        lines.errorCodes(n,:) = fread(fileID, 6, 'char=>char');
        lines.referenceCodes(n,:) = fread(fileID, 12, 'char=>char');
        lines.flagForLineMixing(n,:) = fread(fileID, 1, 'char=>char');
        lines.upperStatisticalWeight(n,1) = str2double( fread(fileID, 7,
'char=>char') );
        lines.lowerStatisticalWeight(n,1) = str2double( fread(fileID, 7,
'char=>char') );
        if fread(fileID,1) ~= 13
            error('The line endings of the HITRAN par file should be
CR+LF, however the CR was missing.');
```

```

        end
        if fread(fileID,1) ~= 10
            error('The line endings of the HITRAN par file should be
CR+LF, however the LF was missing.');
```

```

        end

        % Update the progress bar after every thousand lines have been
read.
        if mod(n, 1000) == 0
            elapsedTimeInMinutes = toc / 60;
            linesRemaining = numberOfLines - n - 1;
            linesPerMinute = 1000 / elapsedTimeInMinutes;
            minutesRemaining = ceil( linesRemaining / linesPerMinute );
            waitbar(n / numberOfLines, h, sprintf('Loading lines...%d min
remaining.', minutesRemaining) );
            tic % Reset the timer.
        end
    end
end

% Close the waitbar.
close(h);

% Close the file.
fclose(fileID);

```

B.2 Υπολογισμός Συντελεστών Απορρόφησης Βάσει HITRAN

B.2.1 Υπολογισμός Συντελεστή Απορρόφησης για άζωτο (Kcoefficient_HITRANnitro.m)

```
clc;
clear all;
% Φόρτωση του .mat αρχείου που περιέχει τις μεταβλητές του HITRAN
load ('nitrogen.mat');
%Επιλογή από το struct που έχει δημιουργηθεί από το .mat αρχείο, τις
%μεταβλητές που θέλουμε και δημιουργία διανυσμάτων
id(:,1) = y.isotopologueNumber; %Molecular ID του ισότοπου
gAir(:,1) = y.airBroadenedWidth; %Συντελεστής διεύρυνσης του αέρα
gSelf(:,1) = y.selfBroadenedWidth; %Συντελεστής διεύρυνσης του
ισοτόπου
nAir(:,1) = y.temperatureDependence; %Συντελεστής διεύρυνσης
θερμοκρασίας
v0(:,1) = y.transitionWavenumber; %κυματάριθμος ταλάντωσης του
ισοτόπου
d(:,1) = y.pressureShift; %Γραμμική αλλαγή πίεσης του ισότοπου
S(:,1) = y.lineIntensity; %Γραμμική ένταση
%Αρχικοποίηση μεταβλητών
p = 1; %πίεση ατμόσφαιρας
pq = 1013250.1; %πίεση ατμόσφαιρας σε Barye (cgs σύστημα μονάδων)
T = 300; %θερμοκρασία
Tref = 296; %θερμοκρασία αναφοράς
Tstp = 273.15; %θερμοκρασία σε STP συνθήκες
Na = 6.023*1e23; %αριθμός Avogadro
R = 8.3144598*1e7; %Σταθερά αερίων σε cgs
p0 = 1; %πίεση αναφοράς
qnit = 0.78; %ποσοστό αζώτου στην ατμόσφαιρα
c = 2.99792458*1e10;%ταχύτητα του φωτός σε cm/s (cgs σύστημα μονάδων)
%ορισμός διανυσμάτων που κρατούν τα αποτελέσματα
Kall = zeros(10001,1);
Habs = zeros(10001,1);
HABS = zeros(10001,1);

%έναρξη for loop το οποίο υπολογίζει για όλες τις συχνότητες με από 1
GHz
%μέχρι 10 THz με βήμα 1 GHz τον συντελεστή απορρόφησης K και τον
κρατάει
%στο τέλος της κάθε επανάληψης στο Kall(j)
for j = 1:1:10000
    f = j*1e9; %ορισμός της συχνότητας
    v = f/c; %ορισμός του κυματάριθμου που αντιστοιχεί στη συχνότητα
    f
    %ορισμός των διανυσμάτων τα οποία κρατούν τον συντελεστή k που
οφείλεται
    %στα διαφορετικά ισότοπα του αερίου
    k1 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 1
    k2 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 2

    %αρχικοποίηση τοπικών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται εντός του
for
    %loop
    gamma = 0; %ημιεύρος Lorentz
    vij = 0; %shifted position of transition wavenumber
    fL = 0; %normalized line shape function
```

```

sigma = 0; %absorption cross section
Q = 0; %μοριακή πυκνότητα όγκου
K = 0; %συντελεστής απορρόφησης

%για κάθε συχνότητα, υπολογίζεται ο συντελεστής απορρόφησης από
όλα τα
%ισότοπα του αερίου και στο τέλος αθροίζονται για πάρουμε τον
%συντελεστή απορρόφησης που αντιστοιχεί στο αερίο για την
δεδομένη
%συχνότητα
for i=1:length(S)

    %ανάλογα με την τιμή του id, διαλέγουμε μέσω της if τον
κώδικα που
    %αντιστοιχεί στο κάθε ισότοπο. Ανάλογα με το id λοιπόν,
μπαίνουμε
    %στην κατάλληλη περίπτωση.
    if id(i,1) == 1
        q = 0.997317*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου με id
= 1 στην ατμόσφαιρα.
        pself = p*q; %μερική πίεση του ισότοπου στην ατμόσφαιρα
        %υπολογισμός ημιεύρους Lorentz
        gamma = ((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

        %υπολογισμός shifted position of transition wavenumber
        vij = v0(i,1) + d(i,1)*p;

        %υπολογισμός συνάρτησης κανονικοποιημένου σχήματος
γραμμής
        fL = gamma/(pi*( power(gamma,2) + power((v - ( v0(i,1) +
d(i,1)*p)),2) ));

        sigma = S(i,1)*fL; %υπολογισμός absorption cross section

        Q = pq*q*Na/(R*T); %υπολογισμός μοριακής πυκνότητας όγκου

        %εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id =1, το διάνυσμα που
κρατάει
        %τον συντελεστή απορρόφησης του ισότοπου αυτού παίρνει
τιμή,
        %ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
        k1 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
        k2 (i,1) = 0;

    else

        q = 0.007478*qnit; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου με id
= 2 στην ατμόσφαιρα.
        pself = p*q;
        gamma = ((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

        vij = v0(i,1) + d(i,1)*p;

        fL = gamma/(pi*( power(gamma,2) + power((v - ( v0(i,1) +
d(i,1)*p)),2) ));

        sigma = S(i,1)*fL;

```

```

Q = pq*q*Na/(R*T);

%εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 2, το διάνυσμα που
κρατάει
%τον συντελεστή απορρόφησης του ισοτόπου αυτού παίρνει
τιμή,
%ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
k1 (i,1) = 0;
k2 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);

end
% ο συντελεστής απορρόφησης για τη συχνότητα f
υπολογίζεται ως το
% άθροισμα των επιμέρους συντελεστών για τη συχνότητα
αυτή
K = K + k1(i,1) + k2(i,1);
end
Kall(j) = 100*K; %υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης
Habs(j) = exp(Kall(j)*1000/2); %υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς
για
%απόσταση από τον πομπο 1 km

end

HABS = 10*log10(power(Habs,2)); %υπολογισμός της εξασθένησης σε dB

```

B.2.2 Υπολογισμός Συντελεστή Απορρόφησης για οξυγόνο (Kcoefficient_HITRANoxy.m)

```

clc;
clear all;

% Φόρτωση του .mat αρχείου που περιέχει τις μεταβλητές του HITRAN
load('oxygen.mat')

%Επιλογή από το struct που έχει δημιουργηθεί από το .mat αρχείο, τις
%μεταβλητές που θέλουμε και δημιουργία διανυσμάτων
id(:,1) = y1.isotopologueNumber; %Molecular ID του ισοτόπου
gAir(:,1) = y1.airBroadenedWidth; %Συντελεστής διεύρυνσης του αέρα
gSelf(:,1) = y1.selfBroadenedWidth; %Συντελεστής διεύρυνσης του
ισοτόπου
nAir(:,1) = y1.temperatureDependence; %Συντελεστής διεύρυνσης
θερμοκρασίας
v0(:,1) = y1.transitionWavenumber; %κυματάριθμος ταλάντωσης του
ισοτόπου
d(:,1) = y1.pressureShift; %Γραμμική αλλαγή πίεσης του ισοτόπου
S(:,1) = y1.lineIntensity; %Γραμμική ένταση

%Αρχικοποίηση μεταβλητών
p = 1; %πίεση ατμόσφαιρας
pq = 1013250.1; %πίεση ατμόσφαιρας σε Barye (cgs σύστημα μονάδων)

T = 300; %θερμοκρασία
Tref = 296; %θερμοκρασία αναφοράς
Tstp = 273.15; %θερμοκρασία σε STP συνθήκες
Na = 6.023*1e23; %αριθμός Avogadro

```



```

R = 8.3144598*1e7; %Σταθερά αερίων σε cgs
p0 = 1; %πίεση αναφοράς

qoxy = 0.21; %ποσοστό οξυγόνου στην ατμόσφαιρα
c = 2.99792458*1e10; %ταχύτητα του φωτός σε cm/s (cgs σύστημα
μονάδων)
%ορισμός διανυσμάτων που κρατούν τα αποτελέσματα
Kall = zeros(10001,1);
Habs = zeros(10001,1);
HABS = zeros(10001,1);

%έναρξη for loop το οποίο υπολογίζει για όλες τις συχνότητες με από 1
GHz
%μέχρι 10 THz με βήμα 1 GHz τον συντελεστή απορρόφησης K και τον
κρατάει
%στο τέλος της κάθε επανάληψης στο Kall(j)
for j = 1:1:10000

    f = j*1e9; %ορισμός της συχνότητας
    v = f/c; %ορισμός του κυματάριθμου που αντιστοιχεί στη συχνότητα
f

    %ορισμός των διανυσμάτων τα οποία κρατούν τον συντελεστή k που
οφείλεται
    %στα διαφορετικά ισότοπα του αερίου

    k1 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 1
    k2 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 2
    k3 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 3
    %αρχικοποίηση τοπικών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται εντός του
for
    %loop
    gamma = 0; %ημιεύρος Lorentz
    vij = 0; %shifted position of transition wavenumber
    fL = 0; %normalized line shape function
    sigma = 0; %absorption cross section
    Q = 0; %μοριακή πυκνότητα όγκου
    K = 0; %συντελεστής απορρόφησης

    %για κάθε συχνότητα, υπολογίζεται ο συντελεστής απορρόφησης από
όλα τα
    %ισότοπα του αερίου και στο τέλος αθροίζονται για πάρουμε τον
%συντελεστή απορρόφησης που αντιστοιχεί στο αερίο για την
δεδομένη
%συχνότητα
    for i=1:length(S)

        %ανάλογα με την τιμή του id, διαλέγουμε μέσω της if τον
κώδικα που
        %αντιστοιχεί στο κάθε ισότοπο. Ανάλογα με το id λοιπόν,
μπαίνουμε
        %στην κατάλληλη περίπτωση.
        if id(i,1) == 1
            q = 0.995262*qoxy;%ποσοστό πρόσμιξης του ισοτόπου με id =
1 στην ατμόσφαιρα.
            pself = p*q; %μερική πίεση του ισοτόπου στην ατμόσφαιρα

            %υπολογισμός ημιεύρους Lorentz

```

```

        gamma = ((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

        %υπολογισμός shifted position of transition wavenumber
        vij = v0(i,1) + d(i,1)*p;

        %υπολογισμός συνάρτησης κανονικοποιημένου σχήματος
γραμμής
        fL = gamma/(pi*( power(gamma,2) + power((v - ( v0(i,1) +
d(i,1)*p)),2) ));

        sigma = S(i,1)*fL; %υπολογισμός absorption cross section

        Q = pq*q*Na/(R*T); %υπολογισμός μοριακής πυκνότητας όγκου

        %εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id =1, το διάνυσμα που
κρατάει
        %τον συντελεστή απορρόφησης του ισοτόπου αυτού παίρνει
τιμή,
        %ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
        k1 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
        k2 (i,1) = 0;
        k3 (i,1) = 0;

    elseif id(i,1) == 2

        q = 0.003991*qoxy; %ποσοστό πρόσμιξης του ισοτόπου με id
= 2 στην ατμόσφαιρα.
        pself = p*q;
        gamma = ((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

        vij = v0(i,1) + d(i,1)*p;

        fL = power((v/vij),2)*gamma/(pi*( power(gamma,2) +
power((v - ( v0(i,1) + d(i,1)*p)),2) ));

        sigma = S(i,1)*fL;

        Q = pq*q*Na/(R*T);

        %εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 2, το διάνυσμα που
κρατάει
        %τον συντελεστή απορρόφησης του ισοτόπου αυτού παίρνει
τιμή,
        %ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
        k1 (i,1) = 0;
        k2 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
        k3 (i,1) = 0;

    else

        q = 7.422350*1e-4*qoxy; %ποσοστό πρόσμιξης του ισοτόπου
με id = 3 στην ατμόσφαιρα.
        pself = p*q;
        gamma = ((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

```

```

        vij = v0(i,1) + d(i,1)*p;

        fL = power((v/vij),2)*gamma/(pi*( power(gamma,2) +
power((v - ( v0(i,1) + d(i,1)*p)),2) ));

        sigma = S(i,1)*fL;

        Q = pq*q*Na/(R*T);

        %εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 3, το διάνυσμα που
κρατάει
        %τον συντελεστή απορρόφησης του ισοτόπου αυτού παίρνει
τιμή,
        %ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
        k1 (i,1) = 0;
        k2 (i,1) = 0;
        k3 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);

    end

    % ο συντελεστής απορρόφησης για τη συχνότητα f υπολογίζεται
ως το
    % άθροισμα των επιμέρους συντελεστών για τη συχνότητα αυτή
    K = K + k1(i,1) + k2(i,1) + k3(i,1);

end

Kall(j) = 100*K; %υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης
Habs(j) = exp(Kall(j)*1000/2); %υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς
για
    %απόσταση από τον πομπο 1 km

end

HABS = 10*log10(power(Habs,2)); %υπολογισμός της εξασθένησης σε dB

```

B.2.3 Υπολογισμός Συντελεστή Απορρόφησης για υδρατμούς (Kcoefficient_HITRANwat.m)

```

clc;
clear all;

% Φόρτωση του .mat αρχείου που περιέχει τις μεταβλητές του HITRAN
load('water.mat')

%Επιλογή από το struct που έχει δημιουργηθεί από το .mat αρχείο, τις
%μεταβλητές που θέλουμε και δημιουργία διανυσμάτων
id(:,1) = y2.isotopologueNumber; %Molecular ID του ισοτόπου
gAir(:,1) = y2.airBroadenedWidth; %Συντελεστής διεύρυνσης του αέρα
gSelf(:,1) = y2.selfBroadenedWidth; %Συντελεστής διεύρυνσης του
ισοτόπου
nAir(:,1) = y2.temperatureDependence; %Συντελεστής διεύρυνσης
θερμοκρασίας
v0(:,1) = y2.transitionWavenumber; %κυματάριθος ταλάντωσης του
ισοτόπου

```

```

d(:,1) = y2.pressureShift; %Γραμμική αλλαγή πίεσης του ισότοπου
S(:,1) = y2.lineIntensity; %Γραμμική ένταση

%Αρχικοποίηση μεταβλητών
p = 1; %πίεση ατμόσφαιρας
p0 = 1013250.1; %πίεση ατμόσφαιρας σε Barye (cgs σύστημα μονάδων)

T = 300; %θερμοκρασία
Tref = 296; %θερμοκρασία αναφοράς
Tstp = 273.15; %θερμοκρασία σε STP συνθήκες
Na = 6.023*1e23; %αριθμός Avogadro
R = 8.3144598*1e7; %Σταθερά αερίων σε cgs
p0 = 1; %πίεση αναφοράς

qwat = 0.0272; %ποσοστό υδρατμών στην ατμόσφαιρα
c = 2.99792458*1e10; %ταχύτητα του φωτός σε cm/s (cgs σύστημα
μονάδων)

%ορισμός διανυσμάτων που κρατούν τα αποτελέσματα
Kall = zeros(10001,1);
Habs = zeros(10001,1);
HABS = zeros(10001,1);

%έναρξη for loop το οποίο υπολογίζει για όλες τις συχνότητες με από 1
GHz
%μέχρι 10 THz με βήμα 1 GHz τον συντελεστή απορρόφησης K και τον
κρατάει
%στο τέλος της κάθε επανάληψης στο Kall(j)
for j = 1:1:10000
    f = j*1e9; %ορισμός της συχνότητας
    v = f/c; %ορισμός του κυματάριθμου που αντιστοιχεί στη συχνότητα
    f

    %ορισμός των διανυσμάτων τα οποία κρατούν τον συντελεστή k που
οφείλεται
    %στα διαφορετικά ισότοπα του αερίου
    k1 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 1
    k2 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 2
    k3 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 3
    k4 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 4
    k5 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 5
    k6 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 6
    k7 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 7

    %αρχικοποίηση τοπικών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται εντός του
for
    %loop
    gamma = 0; %ημιεύρος Lorentz
    vij = 0; %shifted position of transition wavenumber
    fL = 0; %normalized line shape function
    sigma = 0; %absorption cross section
    Q = 0; %μοριακή πυκνότητα όγκου
    K = 0; %συντελεστής απορρόφησης

    %για κάθε συχνότητα, υπολογίζεται ο συντελεστής απορρόφησης από
όλα τα
    %ισότοπα του αερίου και στο τέλος αθροίζονται για πάρουμε τον
    %συντελεστή απορρόφησης που αντιστοιχεί στο αερίο για την
δεδομένη
    %συχνότητα

```

```

for i=1:length(S)

    %ανάλογα με την τιμή του id, διαλέγουμε μέσω της if τον
    κώδικα που
    %αντιστοιχεί στο κάθε ισότοπο. Ανάλογα με το id λοιπόν,
    μπαίνουμε
    %στην κατάλληλη περίπτωση.
    if id(i,1) == 1
        q = 0.997317*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου με id
= 1 στην ατμόσφαιρα.
        pself = p*q; %μερική πίεση του ισότοπου στην ατμόσφαιρα

        %υπολογισμός ημιεύρους Lorentz
        gamma = ((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

        %υπολογισμός shifted position of transition wavenumber
        vij = v0(i,1) + d(i,1)*p;

        %υπολογισμός συνάρτησης κανονικοποιημένου σχήματος
        γραμμής
        fL = gamma/(pi*( power(gamma,2) + power((v - ( v0(i,1) +
d(i,1)*p)),2) ));

        sigma = S(i,1)*fL; %υπολογισμός absorption cross section

        Q = pq*q*Na/(R*T); %υπολογισμός μοριακής πυκνότητας όγκου

        %εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id =1, το διάνυσμα που
        κρατάει
        %τον συντελεστή απορρόφησης του ισότοπου αυτού παίρνει
        τιμή,
        %ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
        k1 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
        k2 (i,1) = 0;
        k3 (i,1) = 0;
        k4 (i,1) = 0;
        k5 (i,1) = 0;
        k6 (i,1) = 0;
        k7 (i,1) = 0;

    elseif id(i,1) == 2

        q = 0.002000*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου με id
= 2 στην ατμόσφαιρα.
        pself = p*q;
        gamma = ((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

        vij = v0(i,1) + d(i,1)*p;

        fL = gamma/(pi*( power(gamma,2) + power((v - ( v0(i,1) +
d(i,1)*p)),2) ));

        sigma = S(i,1)*fL;

        Q = pq*q*Na/(R*T);

```

```

%εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 2, το διάνυσμα που
κρατάει
%τον συντελεστή απορρόφησης του ισότοπου αυτού παίρνει
τιμή,
%ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
k1 (i,1) = 0;
k2 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
k3 (i,1) = 0;
k4 (i,1) = 0;
k5 (i,1) = 0;
k6 (i,1) = 0;
k7 (i,1) = 0;

elseif id(i,1) == 3

q = 3.718840*10e-4*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου
με id = 3 στην ατμόσφαιρα.
pself = p*q;
gamma = ((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

vij = v0(i,1) + d(i,1)*p;

fL = gamma/(pi*( power(gamma,2) + power((v - ( v0(i,1) +
d(i,1)*p)),2) ));

sigma = S(i,1)*fL;

Q = pq*q*Na/(R*T);

%εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 3, το διάνυσμα που
κρατάει
%τον συντελεστή απορρόφησης του ισότοπου αυτού παίρνει
τιμή,
%ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
k1 (i,1) = 0;
k2 (i,1) = 0;
k3 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
k4 (i,1) = 0;
k5 (i,1) = 0;
k6 (i,1) = 0;
k7 (i,1) = 0;

elseif id(i,1) == 4

q = 3.106930 *10e-4*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου
με id = 4 στην ατμόσφαιρα.
pself = p*q;
gamma = ((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

vij = v0(i,1) + d(i,1)*p;

fL = gamma/(pi*( power(gamma,2) + power((v - ( v0(i,1) +
d(i,1)*p)),2) ));

sigma = S(i,1)*fL;

```

```

Q = pq*q*Na/(R*T);

%εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 4, το διάνυσμα που
κρατάει
%τον συντελεστή απορρόφησης του ισοτόπου αυτού παίρνει
τιμή,
%ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
k1 (i,1) = 0;
k2 (i,1) = 0;
k3 (i,1) = 0;
k4 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
k5 (i,1) = 0;
k6 (i,1) = 0;
k7 (i,1) = 0;

elseif id(i,1) == 5

q = 6.230030*10e-7*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισοτόπου
με id = 5 στην ατμόσφαιρα.
pself = p*q;
gamma = ((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

vij = v0(i,1) + d(i,1)*p;

fL = gamma/(pi*( power(gamma,2) + power((v - ( v0(i,1) +
d(i,1)*p)),2) ));

sigma = S(i,1)*fL;

Q = pq*q*Na/(R*T);

%εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id =1, το διάνυσμα που
κρατάει
%τον συντελεστή απορρόφησης του ισοτόπου αυτού παίρνει
τιμή,
%ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
k1 (i,1) = 0;
k2 (i,1) = 0;
k3 (i,1) = 0;
k4 (i,1) = 0;
k5 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
k6 (i,1) = 0;
k7 (i,1) = 0;

elseif id(i,1) == 6

q = 1.158530*10e-7*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισοτόπου
με id = 6 στην ατμόσφαιρα.
pself = p*q;
gamma = ((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

vij = v0(i,1) + d(i,1)*p;

fL = gamma/(pi*( power(gamma,2) + power((v - ( v0(i,1) +
d(i,1)*p)),2) ));

```

```

sigma = S(i,1)*fL;

Q = pq*q*Na/(R*T);

%εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 6, το διάνυσμα που
κρατάει
%τον συντελεστή απορρόφησης του ισοτόπου αυτού παίρνει
τιμή,
%ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
k1 (i,1) = 0;
k2 (i,1) = 0;
k3 (i,1) = 0;
k4 (i,1) = 0;
k5 (i,1) = 0;
k6 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
k7 (i,1) = 0;

else

q = 2.419700*10e-8*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισοτόπου
με id = 7 στην ατμόσφαιρα.
pself = p*q;
gamma = ((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

vij = v0(i,1) + d(i,1)*p;

fL = gamma/(pi*( power(gamma,2) + power((v - ( v0(i,1) +
d(i,1)*p)),2) ));

sigma = S(i,1)*fL;

Q = pq*q*Na/(R*T);

%εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 7, το διάνυσμα που
κρατάει
%τον συντελεστή απορρόφησης του ισοτόπου αυτού παίρνει
τιμή,
%ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
k1 (i,1) = 0;
k2 (i,1) = 0;
k3 (i,1) = 0;
k4 (i,1) = 0;
k5 (i,1) = 0;
k6 (i,1) = 0;
k7 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);

end
% ο συντελεστής απορρόφησης για τη συχνότητα f υπολογίζεται
ως το
% άθροισμα των επιμέρους συντελεστών για τη συχνότητα αυτή
K = K + k1(i,1) + k2(i,1) + k3(i,1) + k4(i,1) + k5(i,1) +
k6(i,1) + k7(i,1);
end

Kall(j) = 100*K; %υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης
Habs(j) = exp(Kall(j)*1000/2); %υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς
για

```



```

        %απόσταση από τον πομπο 1 km

end

HABS = 10*log10(power(Habs,2)); %υπολογισμός της εξασθένισης σε dB

```

B.3 Υπολογισμός Συντελεστή Απορρόφησης Βάσει Jorner, Akyildiz

B.3.1 Υπολογισμός Συντελεστή Απορρόφησης για υδρατμούς (K_AkyiOxy.m)

```

clc;
clear all;

% Φόρτωση του .mat αρχείου που περιέχει τις μεταβλητές του HITRAN
load('oxygen.mat')

%Επιλογή από το struct που έχει δημιουργηθεί από το .mat αρχείο, τις
%μεταβλητές που θέλουμε και δημιουργία διανυσμάτων
id(:,1) = y1.isotopologueNumber; %Molecular ID του ισοτόπου
gAir(:,1) = y1.airBroadenedWidth; %Συντελεστής διεύρυνσης του αέρα
gSelf(:,1) = y1.selfBroadenedWidth; %Συντελεστής διεύρυνσης του
ισοτόπου
nAir(:,1) = y1.temperatureDependence; %Συντελεστής διεύρυνσης
θερμοκρασίας
v0(:,1) = y1.transitionWavenumber; %κυματάριθμος ταλάντωσης του
ισοτόπου
d(:,1) = y1.pressureShift; %Γραμμική αλλαγή πίεσης του ισοτόπου
S(:,1) = y1.lineIntensity; %Γραμμική ένταση

%Αρχικοποίηση μεταβλητών
p = 1; %πίεση ατμόσφαιρας
T = 300; %θερμοκρασία
Tref = 296; %θερμοκρασία αναφοράς
Tstp = 273.15; %θερμοκρασία σε STP συνθήκες
Na = 6.023*1e23; %αριθμός Avogadro
h = 6.6262*1e-34; %σταθερά Planck
kb = 1.3806*1e-23; %σταθερά boltzmann
R = 8.2051*10; %Σταθερά αερίων
p0 = 1; %πίεση αναφοράς

qoxy = 0.21; %ποσοστό οξυγόνου στην ατμόσφαιρα
c = 2.99792458*1e10; %ταχύτητα του φωτός σε cm/s (cgs σύστημα
μονάδων)
ckan = 2.99792458*1e8; %ταχύτητα φωτός στο SI
%ορισμός διανυσμάτων που κρατούν τα αποτελέσματα
Kall = zeros(10001,1);
Gigall = zeros(10001,1);
Habs = zeros(10001,1);
HABS = zeros(10001,1);

%έναρξη for loop το οποίο υπολογίζει για όλες τις συχνότητες με από 1
GHz
%μέχρι 10 THz με βήμα 1 GHz τον συντελεστή απορρόφησης K και τον
κρατάει
%στο τέλος της κάθε επανάληψης στο Kall(j)

```

```

for j = 1:1:10000

    f = j*1e9; %ορισμός της συχνότητας
    v = f/c; %ορισμός του κυματάριθμου που αντιστοιχεί στη συχνότητα
f

    %ορισμός των διανυσμάτων τα οποία κρατούν τον συντελεστή k που
οφείλεται
    %στα διαφορετικά ισότοπα του αερίου
    k1 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 1
    k2 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 2
    k3 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 3

    %αρχικοποίηση τοπικών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται εντός του
for
    %loop
    gamma = 0; %ημιεύρος Lorentz
    vij = 0; %shifted position of transition wavenumber
    Fig = 0; %σχήμα φασματικών γραμμών
    Gig = 0; %Van Vleck-Weisskopf σχήμα γραμμής
    sigma = 0; %absorption cross section
    Q = 0; %μοριακή πυκνότητα όγκου
    K = 0; %συντελεστής απορρόφησης

    %για κάθε συχνότητα, υπολογίζεται ο συντελεστής απορρόφησης από
όλα τα
    %ισότοπα του αερίου και στο τέλος αθροίζονται για πάρουμε τον
%συντελεστή απορρόφησης που αντιστοιχεί στο αέριο για την
δεδομένη
%συχνότητα
    for i=1:length(S)
        %ανάλογα με την τιμή του id, διαλέγουμε μέσω της if τον
κώδικα που
        %αντιστοιχεί στο κάθε ισότοπο. Ανάλογα με το id λοιπόν,
μπαίνουμε
        %στην κατάλληλη περίπτωση.
        if id(i,1) == 1
            q = 0.995262*qaoy; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου με id =
1 στην ατμόσφαιρα.
            pself = p*q; %μερική πίεση του ισότοπου στην ατμόσφαιρα

            %υπολογισμός ημιεύρους Lorentz. πολλαπλασιάζουμε με c σε
cm/s
            %για να γίνουν οι μονάδες από 1/cm σε Hz
            gamma = c*((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

            %υπολογισμός shifted position of transition wavenumber.
%πολλαπλασιάζουμε με c σε cm/s για να γίνουν οι μονάδες
από 1/cm σε Hz
            vij = c*(v0(i,1) + d(i,1)*p);

            % υπολογισμός Van Vleck-Weisskopf σχήματος γραμμής.
Διαιρούμε
            % με c για να διορθωθούν οι μονάδες
            Fig = 100*ckan*gamma*f*((1/(power(f-
vij,2)+power(gamma,2)))+(1/(power(f+vij,2)+power(gamma,2))))/(pi*vij*
c);

            % υπολογισμός σχήματος φασματικών γραμμών

```

```

        Gig =
(f*tanh((h*ckan*f)/(2*kb*T))*Fig)/(vij*tanh((h*c*vij)/(2*kb*T)));

        sigma = c*S(i,1)*Gig; %υπολογισμός absorption cross
section

        Q = p*q*Na/(R*T); %υπολογισμός μοριακής πυκνότητας όγκου

        %εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id =1, το διάνυσμα που
κρατάει
        %τον συντελεστή απορρόφησης του ισότοπου αυτού παίρνει
τιμή,
        %ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
        k1 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
        k2 (i,1) = 0;
        k3 (i,1) = 0;

    elseif id(i,1) == 2

        q = 0.003991*qoxy; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου με id
= 2 στην ατμόσφαιρα.
        pself = p*q;
        gamma = c*((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

        vij = c*(v0(i,1) + d(i,1)*p);

        Fig = 100*ckan*gamma*f*((1/(power(f-
vij,2)+power(gamma,2)))+(1/(power(f+vij,2)+power(gamma,2))))/(pi*vij*
c);

        Gig =
(f*tanh((h*ckan*f)/(2*kb*T))*Fig)/(vij*tanh((h*c*vij)/(2*kb*T)));

        sigma = c*S(i,1)*Gig;

        Q = p*q*Na/(R*T);

        %εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 2, το διάνυσμα που
κρατάει
        %τον συντελεστή απορρόφησης του ισότοπου αυτού παίρνει
τιμή,
        %ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
        k1 (i,1) = 0;
        k2 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
        k3 (i,1) = 0;

    else

        q = 7.422350*1e-4*qoxy; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου
με id = 3 στην ατμόσφαιρα.
        pself = p*q;
        gamma = c*((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

        vij = c*(v0(i,1) + d(i,1)*p);

```

```

Fig = 100*ckan*gamma*f*((1/(power(f-
vij,2)+power(gamma,2)))+(1/(power(f+vij,2)+power(gamma,2)))/(pi*vij*
c);

Gig =
(f*tanh((h*ckan*f)/(2*kb*T))*Fig)/(vij*tanh((h*c*vij)/(2*kb*T)));

sigma = c*S(i,1)*Gig;

Q = p*q*Na/(R*T);

%εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 3, το διάνυσμα που
κρατάει
%τον συντελεστή απορρόφησης του ισοτόπου αυτού παίρνει
τιμή,
%ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
k1 (i,1) = 0;
k2 (i,1) = 0;
k3 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);

end

% ο συντελεστής απορρόφησης για τη συχνότητα f υπολογίζεται
ως το
% άθροισμα των επιμέρους συντελεστών για τη συχνότητα αυτή
K = K + k1(i,1) + k2(i,1) + k3(i,1);

end

Kall(j) = K; %υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης
Habs(j) = exp(Kall(j)*1000/2); %υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς
για
%απόσταση από τον πομπο 1 km

end

HABS = 10*log10(power(Habs,2)); %υπολογισμός της εξασθένησης σε dB

```

B.3.2 Υπολογισμός Συντελεστή Απορρόφησης για υδρατμούς (K_AkyiWat.m)

```

clc;
clear all;

% Φόρτιση του .mat αρχείου που περιέχει τις μεταβλητές του HITRAN
load('water.mat')

%Επιλογή από το struct που έχει δημιουργηθεί από το .mat αρχείο, τις
%μεταβλητές που θέλουμε και δημιουργία διανυσμάτων
id(:,1) = y2.isotopologueNumber; %Molecular ID του ισοτόπου
gAir(:,1) = y2.airBroadenedWidth; %Συντελεστής διεύρυνσης του αέρα
gSelf(:,1) = y2.selfBroadenedWidth; %Συντελεστής διεύρυνσης του
ισοτόπου
nAir(:,1) = y2.temperatureDependence; %Συντελεστής διεύρυνσης
θερμοκρασίας

```

```

v0(:,1) = y2.transitionWavenumber; %κυματάρριθμος ταλάντωσης του
ισοτόπου
d(:,1) = y2.pressureShift; %Γραμμική αλλαγή πίεσης του ισοτόπου
S(:,1) = y2.lineIntensity; %Γραμμική ένταση
%Αρχικοποίηση μεταβλητών

p = 1; %πίεση ατμόσφαιρας
T = 300; %θερμοκρασία
Tref = 296; %θερμοκρασία αναφοράς
Tstp = 273.15; %θερμοκρασία σε STP συνθήκες
Na = 6.023*1e23; %αριθμός Avogadro
h = 6.6262*1e-34; %σταθερά Planck
kb = 1.3806*1e-23; %σταθερά boltzmann
R = 8.2051*10; %σταθερά αερίων
p0 = 1; %πίεση αναφοράς

qwat = 0.0272; %ποσοστό υδρατμών στην ατμόσφαιρα
c = 2.99792458*1e10; %ταχύτητα του φωτός σε cm/s (cgs σύστημα
μονάδων)
ckan = 2.99792458*1e8; %ταχύτητα φωτός στο SI
%ορισμός διανυσμάτων που κρατούν τα αποτελέσματα
Kall = zeros(10001,1);
Habs = zeros(10001,1);
HABS = zeros(10001,1);

%έναρξη for loop το οποίο υπολογίζει για όλες τις συχνότητες με από 1
GHz
%μέχρι 10 THz με βήμα 1 GHz τον συντελεστή απορρόφησης K και τον
κρατάει
%στο τέλος της κάθε επανάληψης στο Kall(j)
for j = 1:1:10000

    f = j*1e9; %ορισμός της συχνότητας
    v = f/c; %ορισμός του κυματάριθμου που αντιστοιχεί στη συχνότητα
f

    %ορισμός των διανυσμάτων τα οποία κρατούν τον συντελεστή k που
οφείλεται
    %στα διαφορετικά ισότοπα του αερίου
    k1 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 1
    k2 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 2
    k3 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 3
    k4 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 4
    k5 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 5
    k6 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 6
    k7 = zeros(length(S),1); %διάνυσμα για το ισότοπο με id = 7

    %αρχικοποίηση τοπικών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται εντός του
for
    %loop
    gamma = 0; %ημιεύρος Lorentz
    vij = 0; %shifted position of transition wavenumber
    Fig = 0; %σχήμα φασματικών γραμμών
    Gig = 0; %Van Vleck-Weisskopf σχήμα γραμμής
    sigma = 0; %absorption cross section
    Q = 0; %μοριακή πυκνότητα όγκου
    K = 0; %συντελεστής απορρόφησης

    %για κάθε συχνότητα, υπολογίζεται ο συντελεστής απορρόφησης από
όλα τα

```

```

%ισότοπα του αερίου και στο τέλος αθροίζονται για πάρουμε τον
%συντελεστή απορρόφησης που αντιστοιχεί στο αερίο για την
δεδομένη
%συχνότητα
for i=1:length(S)
    %ανάλογα με την τιμή του id, διαλέγουμε μέσω της if τον
κώδικα που
    %αντιστοιχεί στο κάθε ισότοπο. Ανάλογα με το id λοιπόν,
μπαίνουμε
    %στην κατάλληλη περίπτωση.
    if id(i,1) == 1
        q = 0.997317*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου με id
= 1 στην ατμόσφαιρα.
        pself = p*q; %μερική πίεση του ισότοπου στην ατμόσφαιρα

        %υπολογισμός ημιεύρους Lorentz. πολλαπλασιάζουμε με c σε
cm/s
        %για να γίνουν οι μονάδες από 1/cm σε Hz
        gamma = c*((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

        %υπολογισμός shifted position of transition wavenumber.
%πολλαπλασιάζουμε με c σε cm/s για να γίνουν οι μονάδες
από 1/cm σε Hz
        vij = c*(v0(i,1) + d(i,1)*p);

        % υπολογισμός Van Vleck-Weisskopf σχήματος γραμμής.
Διαιρούμε
        % με c για να διορθωθούν οι μονάδες
        Fig = 100*ckan*gamma*f*((1/(power(f-
vij,2)+power(gamma,2)))+(1/(power(f+vij,2)+power(gamma,2))))/(pi*vij*
c);

        % υπολογισμός σχήματος φασματικών γραμμών
        Gig =
(f*tanh((h*ckan*f)/(2*kb*T))*Fig)/(vij*tanh((h*c*vij)/(2*kb*T)));

        sigma = c*S(i,1)*Gig; %υπολογισμός absorption cross
section

        Q = p*q*Na/(R*T); %υπολογισμός μοριακής πυκνότητας όγκου

        %εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id =1, το διάνυσμα που
κρατάει
        %τον συντελεστή απορρόφησης του ισότοπου αυτού παίρνει
τιμή,
        %ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
        k1(i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
        k2(i,1) = 0;
        k3(i,1) = 0;
        k4(i,1) = 0;
        k5(i,1) = 0;
        k6(i,1) = 0;
        k7(i,1) = 0;

    elseif id(i,1) == 2

```

```

        q = 0.002000*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου με id
= 2 στην ατμόσφαιρα.
        pself = p*q;
        gamma = c*((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

        vij = c*(v0(i,1) + d(i,1)*p);

        Fig = 100*ckan*gamma*f*((1/(power(f-
vij,2)+power(gamma,2)))+(1/(power(f+vij,2)+power(gamma,2))))/(pi*vij*
c);

        Gig =
(f*tanh((h*ckan*f)/(2*kb*T))*Fig)/(vij*tanh((h*c*vij)/(2*kb*T)));

        sigma = c*S(i,1)*Gig;

        Q = p*q*Na/(R*T);

%εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 2, το διάνυσμα που
κρατάει
%τον συντελεστή απορρόφησης του ισότοπου αυτού παίρνει
τιμή,
%ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
k1(i,1) = 0;
k2(i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
k3(i,1) = 0;
k4(i,1) = 0;
k5(i,1) = 0;
k6(i,1) = 0;
k7(i,1) = 0;

elseif id(i,1) == 3

        q = 3.718840*10e-4*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου
με id = 3 στην ατμόσφαιρα.
        pself = p*q;
        gamma = c*((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

        vij = c*(v0(i,1) + d(i,1)*p);

        Fig = 100*ckan*gamma*f*((1/(power(f-
vij,2)+power(gamma,2)))+(1/(power(f+vij,2)+power(gamma,2))))/(pi*vij*
c);

        Gig =
(f*tanh((h*ckan*f)/(2*kb*T))*Fig)/(vij*tanh((h*c*vij)/(2*kb*T)));

        sigma = c*S(i,1)*Gig;

        Q = p*q*Na/(R*T);

%εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 3, το διάνυσμα που
κρατάει
%τον συντελεστή απορρόφησης του ισότοπου αυτού παίρνει
τιμή,
%ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0

```

```

k1 (i,1) = 0;
k2 (i,1) = 0;
k3 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
k4 (i,1) = 0;
k5 (i,1) = 0;
k6 (i,1) = 0;
k7 (i,1) = 0;

elseif id(i,1) == 4

    q = 3.106930 *10e-4*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου
με id = 4 στην ατμόσφαιρα.
    pself = p*q;
    gamma = c*((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

    vij = c*(v0(i,1) + d(i,1)*p);

    Fig = 100*ckan*gamma*f*((1/(power(f-
vij,2)+power(gamma,2)))+(1/(power(f+vij,2)+power(gamma,2))))/(pi*vij*
c);

    Gig =
(f*tanh((h*ckan*f)/(2*kb*T))*Fig)/(vij*tanh((h*c*vij)/(2*kb*T)));

    sigma = c*S(i,1)*Gig;

    Q = p*q*Na/(R*T);

    %εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 4, το διάνυσμα που
κρατάει
    %τον συντελεστή απορρόφησης του ισότοπου αυτού παίρνει
τιμή,
    %ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
k1 (i,1) = 0;
k2 (i,1) = 0;
k3 (i,1) = 0;
k4 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
k5 (i,1) = 0;
k6 (i,1) = 0;
k7 (i,1) = 0;

elseif id(i,1) == 5

    q = 6.230030*10e-7*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισότοπου
με id = 5 στην ατμόσφαιρα.
    pself = p*q;
    gamma = c*((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

    vij = c*(v0(i,1) + d(i,1)*p);

    Fig = 100*ckan*gamma*f*((1/(power(f-
vij,2)+power(gamma,2)))+(1/(power(f+vij,2)+power(gamma,2))))/(pi*vij*
c);

    Gig =
(f*tanh((h*ckan*f)/(2*kb*T))*Fig)/(vij*tanh((h*c*vij)/(2*kb*T)));

```



```

sigma = c*S(i,1)*Gig;

Q = p*q*Na/(R*T);

%εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id =1, το διάνυσμα που
κρατάει
%τον συντελεστή απορρόφησης του ισοτόπου αυτού παίρνει
τιμή,
%ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
k1 (i,1) = 0;
k2 (i,1) = 0;
k3 (i,1) = 0;
k4 (i,1) = 0;
k5 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
k6 (i,1) = 0;
k7 (i,1) = 0;

elseif id(i,1) == 6

q = 1.158530*10e-7*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισοτόπου
με id = 6 στην ατμόσφαιρα.
pself = p*q;
gamma = c*((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

vij = c*(v0(i,1) + d(i,1)*p);

Fig = 100*ckan*gamma*f*((1/(power(f-
vij,2)+power(gamma,2)))+(1/(power(f+vij,2)+power(gamma,2))))/(pi*vij*
c);

Gig =
(f*tanh((h*ckan*f)/(2*kb*T))*Fig)/(vij*tanh((h*c*vij)/(2*kb*T)));

sigma = c*S(i,1)*Gig;

Q = p*q*Na/(R*T);

%εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 6, το διάνυσμα που
κρατάει
%τον συντελεστή απορρόφησης του ισοτόπου αυτού παίρνει
τιμή,
%ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
k1 (i,1) = 0;
k2 (i,1) = 0;
k3 (i,1) = 0;
k4 (i,1) = 0;
k5 (i,1) = 0;
k6 (i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);
k7 (i,1) = 0;

else

q = 2.419700*10e-8*qwat; %ποσοστό πρόσμιξης του ισοτόπου
με id = 7 στην ατμόσφαιρα.
pself = p*q;
gamma = c*((p-pself)*gAir(i,1) +
pself*gSelf(i,1))*power((Tref/T),nAir(i,1));

```

```

    vij = c*(v0(i,1) + d(i,1)*p);

    Fig = 100*ckan*gamma*f*((1/(power(f-
vij,2)+power(gamma,2)))+(1/(power(f+vij,2)+power(gamma,2))))/(pi*vij*
c);

    Gig =
(f*tanh((h*ckan*f)/(2*kb*T))*Fig)/(vij*tanh((h*c*vij)/(2*kb*T)));

    sigma = c*S(i,1)*Gig;

    Q = p*q*Na/(R*T);

    %εφόσον είμαστε για το ισότοπο με id = 7, το διάνυσμα που
κρατάει
    %τον συντελεστή απορρόφησης του ισότοπου αυτού παίρνει
τιμή,
    %ενώ τα υπόλοιπα παίρνουν την τιμή 0
    k1(i,1) = 0;
    k2(i,1) = 0;
    k3(i,1) = 0;
    k4(i,1) = 0;
    k5(i,1) = 0;
    k6(i,1) = 0;
    k7(i,1) = p*Tstp*Q*sigma/(p0*T);

    end
    % ο συντελεστής απορρόφησης για τη συχνότητα f υπολογίζεται
ως το
    % άθροισμα των επιμέρους συντελεστών για τη συχνότητα αυτή
    K = K + k1(i,1) + k2(i,1) + k3(i,1) + k4(i,1) + k5(i,1) +
k6(i,1) + k7(i,1);
    end
    Kall(j) = K; %υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης
    Habs(j) = exp(Kall(j)*1000/2); %υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς
για
    %απόσταση από τον πομπο 1 km

end

HABS = 10*log10(power(Habs,2)); %υπολογισμός της εξασθένησης σε dB

```

B.4 Δημιουργία Διαγραμμάτων Ατμοσφαιρικής Απορρόφησης με τη χρήση της συνάρτησης gaspl (gsplitU.m)

```

clc;
clear all;

%ορισμός των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της
%εξασθένησης σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες
%τιμές για την απόσταση
R1 = 1000;
R2 = 5;
%συχνότητα
freq = (1:1000)*1e9;

```

```

%θερμοκρασία
T1 = 15;
T2 = 30;
T3 = 0;
%πίεση
P1 = 101325;
P2 = 99062;
P3 = 95744.38;
%συγκέντρωση υδρατμών
W1 = 7.5;
W2 = 15;
%εξασθένηση για διαφορετικούς συνδυασμούς των παραπάνω μεταβλητών για
%υπολογισμό εξασθένησης σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Ανάλογα με τις
%μεταβλητές που χρησιμοποιούνται, προσομοιώνονται διαφορετικές
συνθήκες
%περιβάλλοντος
L0 = gaspl (R1, freq, T1, P1, 2);
L1 = gaspl (R1, freq, T2, P1, W2);
L2 = gaspl (R1, freq, T3, P1, W2);

%εμφάνιση των αποτελεσμάτων
semilogy (L0, 'r')
hold on
semilogy (L1)
hold on
semilogy (L2)
grid on
xlabel ('Frequency (GHz)')
ylabel ('Specific attenuation (dB/km)')

```