

# Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών  
*Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας*

## Μεταπτυχιακή Διατριβή



Μελέτη Διάδοσης και Αξιολόγηση Διαθεσιμότητας σε Οπτικές  
Ζεύξεις Γης-Δορυφόρου

Παναγιώτης Χαριλάου

Επιβλέπων Καθηγητής  
Χαρίλαος Κουρόγιωργας

Μάιος 2018

# **Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου**

**Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών**

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών  
Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας**

## **Μεταπτυχιακή Διατριβή**

**Μελέτη Διάδοσης και Αξιολόγηση Διαθεσιμότητας σε Οπτικές  
Ζεύξεις Γης-Δορυφόρου**

**Παναγιώτης Χαριλάου**

**Επιβλέπων Καθηγητής  
Χαρίλαος Κουρόγιωργας**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας από τη Σχολή Θετικών και εφαρμοσμένων επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

**Μάιος 2018**



# Περίληψη

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διατριβή εστιάζει στην μελέτη των οπτικών ασύρματων επικοινωνιών - Free Space Optics (FSO) Γής-Γεωστατικού δορυφόρου. Η ανάγκη για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση εύρους ζώνης καθιστούν αναγκαία την μετάδοση σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Και εδώ είναι που καθίσταται αναγκαία η χρησιμοποίηση των οπτικών ασύρματων επικοινωνιών - Free Space Optics (FSO). Τα ασύρματα οπτικά δίκτυα είναι μια τεχνολογία σχετικά καινούργια που πλεονεκτεί σε διάφορους τομείς σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες RF τεχνολογίες. Αν και η συγκεκριμένη τεχνολογία ασύρματης μετάδοσης έχει ήδη μελετηθεί από διεθνείς οργανισμούς προσφέροντας ψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης καθώς και μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων, ωστόσο είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση μετεωρολογικών δεδομένων για τον υπολογισμό της κάλυψης σε σχέση με την απόσβεση εξαιτίας των νεφώσεων, ούτως ώστε να βρεθεί με διάφορες τεχνικές οι οποίες θα μελετηθούν, η βέλτιστη τοποθεσία(ες) εγκατάστασης επίγειων σταθμών βάσης.

Στο [1<sup>ο</sup> κεφάλαιο](#) της διατριβής μας θα πραγματοποιηθεί μια εισαγωγή στο θέμα των οπτικών δορυφορικών επικοινωνιών. Θα γίνει μια εκτενής περιγραφή των πλεονεκτημάτων που μας παρέχουν οι οπτικές επικοινωνίες σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες RF τεχνολογίες, έτσι ώστε να κατανοήσουμε την αναγκαιότητα χρησιμοποίησης των οπτικών ασύρματων επικοινωνιών. Ακολούθως θα πραγματοποιηθεί μια πρώτη μελέτη στο περιβάλλον διάδοσης των ραδιοκυμάτων και θα παρουσιαστούν οι παράγοντες που προκαλούν απόσβεση κατά την διάρκεια της διάδοσης μέσα από την ατμόσφαιρα.

Στο [2<sup>ο</sup> κεφάλαιο](#) της διατριβής μας θα πραγματοποιηθεί προϋπολογισμός ισχύος (Link Budget). Η διαδικασία αυτή είναι σημαντική να πραγματοποιηθεί αφού θα μας δώσει μια πρώτη εκτίμηση της ισχύος που φτάνει στον δέκτη λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές απώλειες οι οποίες μπορούν να εμφανιστούν στο κανάλι μας κατά την διάδοση σε οπτικές συχνότητες ( $L_{FS}$ ,  $L_{ATM}$ ,  $L_{BW}$  κτλ.). Ο προϋπολογισμός μας θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές προ-παραμόρφωσης (PAO). Οι συγκεκριμένες τεχνικές εφαρμόζονται στην πλευρά του επίγειου πομπού, με απώτερο σκοπό να καταφέρουμε να μειώσουμε τον δείκτη σπινθηρισμού καθώς επίσης και τη συνολική απώλεια ζεύξης του οπτικού μας καναλιού στην ανερχόμενη ζεύξη (Uplink). Θα μελετηθούν τρεις τοποθεσίες με διαφορετικά υψόμετρα, καθώς και συγκεκριμένοι τρόποι λειτουργίας N για να διαφανεί πως αυτοί επιδρούν πάνω στο Link budget. Τέλος θα υπολογιστεί μαθηματικά ο προϋπολογισμός ισχύος οπτικής ζεύξης χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα Matlab.

Στο [3<sup>ο</sup> κεφάλαιο](#), παρουσιάζεται η επίδραση του φαινομένου των νεφώσεων πάνω στην ζώνη οπτικών συχνοτήτων, έτσι ώστε να κατανοήσουμε το μέγεθος της συνολικής απόσβεσης που προσθέτουν τα νέφη πάνω στο μεταδιδόμενο σήμα μας. Αρχικά πραγματοποιείται μια εισαγωγή στα χαρακτηριστικά που διακατέχουν το φαινόμενο των νεφών (διαδικασία δημιουργίας, τύποι κτλ.). Ακολούθως μέσα από βιβλιογραφική επισκόπηση παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος με τον οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε την συνολική εξασθένιση που προκαλούν οι νεφώσεις κατά την διάδοση του κύματος μας μέσα στην ατμόσφαιρα.

Στο [4<sup>ο</sup> κεφάλαιο](#) θα ασχοληθούμε με την ανάλυση διάφορων αλγορίθμων, οι οποίοι προτείνονται μέσα από την βιβλιογραφία με απώτερο σκοπό να εξασφαλίσουμε ένα

επιθυμητό ποσοστό κάλυψης του δικτύου μας, χωρίς την επίδραση των νεφώσεων. Θα παρουσιαστούν τρεις διαφορετικοί μέθοδοι με τους οποίους μπορούμε να υπολογίσουμε την συνολική διαθεσιμότητα ενός δικτύου επίγειων οπτικών σταθμών βάσης. Εμείς θα εστιάσουμε κυρίως στην 3ή μέθοδο που θα παρουσιαστεί (χρησιμοποιώντας τη συσχέτιση και τη διαθεσιμότητα μιας τοποθεσίας - site-correlation and single-site availability). Με την συγκεκριμένη μέθοδο η συσχέτιση μεταξύ των επίγειων σταθμών καθώς και η διαθεσιμότητα μιας τοποθεσίας χρησιμοποιείται για την προεπιλογή θέσεων ενδεχόμενων σταθμών εδάφους από την μια πλευρά και για την προεπιλογή ενδεχόμενων βέλτιστων συνδυασμών για τον υπολογισμό ενός βέλτιστου δικτύου από την άλλη πλευρά. Θα παρουσιαστούν τα αριθμητικά αποτελέσματα που εξάγαμε μέσα από το υπολογιστικό πρόγραμμα Matlab, χρησιμοποιώντας την μέθοδο που αναφέραμε και πιο πάνω για 22 διαφορετικές τοποθεσίες στην Γερμανία, έτσι ώστε να επιτύχουμε απαίτηση διαθεσιμότητας  $M \geq 1$ .

Κλείνοντας στο [κεφάλαιο 5](#), θα αναφερθούμε στα συμπεράσματα που προέκυψαν μέσα από την συγκεκριμένη διατριβή, όπως επίσης θα προταθούν τυχόν μελλοντικές βελτιώσεις οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν στον αλγόριθμο που υλοποιήσαμε ([4.6](#)) για να γίνει πιο αποδοτικός καθώς και στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε για τον προϋπολογισμό ισχύος οπτικής άνω ζεύξης.

# Summary

The followed thesis focuses on the research of optical wireless communications – Free Space Optics (FSO). The need for higher transmission rates and continuing increase of bandwidth demand make necessary the transmission of higher frequency bands. This is the point where is necessary the use of optical wireless communications - Free Space Optics (FSO). The wireless optical networks is a relatively new technology which benefits in a number of areas compared to existing RF technologies. Even though, this wireless transmission technology has already been studied by international organizations which offered higher transmission rates and transmission of large data, although is necessary the use of meteorological data to calculate the coverage in relation to damping due to clouds, so that the optimal location(s) of terrestrial base stations can be found by various techniques to be studied.

On the first chapter of the dissertation will make an introduction to the subject of optical satellite communications. Through the chapter, it will take place an extensive description on the benefits of visual communications in relation to existing RF technologies in order to understand the need of use of optical wireless communications. Subsequently, a first study will be carried out in the surrounding dissemination of the radio waves and will present any factor that cause damping during this dissemination through the atmosphere.

Through the second chapter of thesis will take place calculations of power budget (Link Budget). This process is important to implemented in order to have a first estimation of power, which reaches the receiver taking into account all possible losses that can occur in our channel when disseminating to optical frequencies ( $L_{FS}$ ,  $L_{ATM}$ ,  $L_{BW}$  etc.). The above calculations will be performed using pre-distortion techniques (PAO). The particular techniques are applied to the terrestrial transmitter side, aiming to reduce the scintillation index as well as the total loss of optical channel in the ascending link (Uplink). There will be evaluations of three different areas with different altitudes, as well as specific N modes to illustrate how they affect Link budget. Finally, the optical link power budget will be mathematically calculated using the Mat lab computational program.

Chapter three present the effect of the cloud phenomenon of the band of optical frequencies, in order to understand the size of the total damping that the clouds add to our transmitter. Initially, an introduction is made to the characteristics of the cloud phenomenon (creation process, types, etc.). Then, through a bibliographic overview, we present an algorithm by which we can calculate the total attenuation caused by the clouds during the propagation of our wave into the atmosphere.

Chapter four will deal with the analysis of various algorithms proposed through the literature with the ultimate goal of ensuring a desired coverage rate of network without the effects of clouds. There will be presented three different methods which can calculate the overall availability of a terrestrial base station network. Their main focus will be on the 3rd method (using site-correlation and single-site availability). With this method, the correlation between terrestrial stations and the availability of location is used to preselect potential ground stations on the one hand and to preselect possible optimal combinations for calculating an optimal network on the other hand. It will present the numerical results extracted through the matlab computing program, using the method mentioned above for 22 different locations in Germany in order to obtain a  $M \geq 1$  availability requirement.

Finally, to chapter five there will be a reference to the conclusions that have emerge through this dissertation and suggest any future improvements that can be made to the algorithm being implemented (4.6) to make it more efficient, as well as to the survey of the power budget uplink.

## Ευχαριστίες

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Χαρίλαο Κουρόγιωργα για την ευκαιρία που μου έδωσε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, έτσι ώστε να ασχοληθώ με το επιστημονικό πεδίο της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διατριβής. Ακολούθως θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την διαρκείς βοήθεια και καθοδήγηση που μου πρόσφερε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής μου καθώς και για την αμέριστη κατανόηση και εμπιστοσύνη που επέδειξε όλο αυτό το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την διαχρονική συμπαράσταση και αγάπη που επιδεικνύουν όλα αυτά τα χρόνια. Ακολούθως οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην σύντροφο μου για την απεριόριστη υπομονή που επέδειξε και στήριξη σε αυτό το νέο βήμα της ζωής μου.

Τέλος υποχρέωση μου είναι να πω και ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους(ες) μου για την ηθική υποστήριξη και ενθάρρυνση που μου επέδειξαν.



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b> .....	<b>1</b>
1.1	Ζώνες Ραδιοσυχνοτήτων – Οπτικών Συχνοτήτων .....	1
1.2	Τυπικό Δορυφορικό Σύστημα Με Χρήση Οπτικής Ζεύξης .....	4
1.3	Στρώματα Της Ατμόσφαιρας .....	5
1.4	Φαινόμενα Διάδοσης (Τροποσφαιρικά φαινόμενα) .....	6
1.5	Τεχνικές Άμβλυνσης Διαλείψεων - Fade Mitigation Techniques .....	8
<b>2</b>	<b>Προϋπολογισμός Ισχύος Οπτικής Άνω Ζεύξης</b> .....	<b>14</b>
2.1	Εισαγωγή .....	14
2.2	Σημαντικότητα Των Τεχνολογιών ΡΑΟ .....	15
2.3	Δομή Του Δείκτη Διάθλασης .....	15
2.4	Δείκτης Σπινθηρισμού .....	16
2.5	Beam Wander .....	18
2.6	PAA vs, IPA .....	19
2.7	Εφαρμόζοντας Τεχνική προ-παραμόρφωσης (ΡΑΟ) .....	20
2.8	Υλοποίηση Κώδικα Προϋπολογισμού Ισχύος Οπτικής Ζεύξης .....	22
2.8.1	Total Rx Power vs. p - Outage Probability .....	25
2.8.2	Total Rx Power vs. p - Outage Probability Χωρίς ΡΑΟ .....	26
2.8.3	Total Rx Power vs. Elevation Angle .....	28
<b>3</b>	<b>Επίδραση Των Νεφώσεων Στα Ασύρματα Οπτικά Δίκτυα</b> .....	<b>30</b>
3.1	Εισαγωγή .....	30
3.2	Ορισμός .....	30
3.3	Ποσοστό Εμφάνισης Νεφώσεων .....	31
3.4	Τύποι Νεφών .....	32
3.5	Αλγόριθμος Υπολογισμού Απόσβεσης Λόγω Νεφώσεων .....	34
3.5.1	Κατανομή Μεγέθους Σωματιδίων – Particle Size Distribution .....	35
3.5.2	Ταξινόμηση Νεφώσεων .....	36
3.5.3	Αλγόριθμος Ανίχνευσης Νεφώσεων ΤΚΚ .....	36
3.5.3.1	Υπολογισμός Σχετικής Υγρασίας $U_c$ .....	37
3.5.3.2	Υπολογισμός Περιεκτικότητας Υγρού Νερού (LWC) .....	37
3.5.3.3	Χαρακτηρισμός Νεφώσεων Ανάλογα Με Το Περιεχόμενο Τους (LWC – IWC) ...	38

3.5.3.4	Υπολογισμός Συνολικής Απόσβεσης Μέσω Της Θεωρίας Mie .....	40
<b>4</b>	<b>Ανάλυση Διαθεσιμότητας Δικτύου Οπτικών Επίγειων Σταθμών Βάσης....</b>	<b>43</b>
4.1	Εισαγωγή.....	43
4.2	Ορισμός Οπτικού Επίγειου Δικτύου Σταθμών Βάσης - OGS .....	43
4.3	Τύποι Οπτικών Επίγειων Δικτύων Σταθμών Βάσης – OGS .....	44
4.3.1	Ασυσχετίστο (Uncorrelated) Οπτικό Επίγειο Δίκτυο Σταθμών Βάσης .....	44
4.3.1.1	Οπτικό Επίγειο Δίκτυο Σταθμών Βάσης Με Τυχαίες (Arbitrary) Διαθεσιμότητες	45
4.3.1.2	Οπτικό Επίγειο Δίκτυο Σταθμών Βάσης Με Σταθερές (Constant) Διαθεσιμότητες	46
4.3.2	Συσχετισμένο (Correlated) Οπτικό Επίγειο Δίκτυο Σταθμών Βάσης.....	47
4.4	Συλλογή Δεδομένων – Επεξεργασία Δεδομένων .....	48
4.4.1	Υπολογισμός Διαθεσιμότητας Ασυσχετίστου (Uncorrelated) Οπτικού Επίγειου Δικτύου Σταθμών Βάσης.....	49
4.4.2	Υπολογισμός Διαθεσιμότητας Συσχετισμένου (Correlated) Οπτικού Επίγειου Δικτύου Σταθμών Βάσης.....	50
4.5	Μέθοδοι Υπολογισμού Διαθεσιμότητας Δικτύου Επίγειων Οπτικών Σταθμών Βάσης	51
4.5.1	Χρησιμοποιώντας Τη Διαθεσιμότητα Μιας Τοποθεσίας (Single-Site Availability)	51
4.5.2	Με Τον Υπολογισμό Όλων Των Πιθανών Συνδυασμών.....	52
4.5.3	Χρησιμοποιώντας Τη Συσχέτιση Και Τη Διαθεσιμότητα Τοποθεσίας (Using Site-Correlation And Single-Site Availability) .....	52
4.6	Υλοποίηση Κώδικα Υπολογισμού Συνολικής Διαθεσιμότητας Ενός Δικτύου Οπτικών Επίγειων Σταθμών Βάσης Χρησιμοποιώντας Τη Συσχέτιση Και Τη Διαθεσιμότητα Τοποθεσίας (Using Site-Correlation And Single-Site Availability) .....	54
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα – Μελλοντική Έρευνα .....</b>	<b>73</b>
5.1	Συμπεράσματα.....	73
5.2	Εισηγήσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	74
	<b>Παρατήματα.....</b>	<b>1</b>
<b>A</b>	<b>Υλοποίηση Κώδικα Υπολογισμού Συνολικής Διαθεσιμότητας Ενός Δικτύου Οπτικών Επίγειων Σταθμών Βάσης.....</b>	<b>1</b>
A.1	Υλοποίηση Κώδικα Για Την Εύρεση Των Συνδυασμών Των Σταθμών Βάσης Που Αποτελούν Το Δίκτυο Μας.....	1

A.2	Υλοποίηση Κώδικα Για Τον Υπολογισμό Της Συνολικής Διαθεσιμότητας Του Δικτύου Μας.....	4
A.3	Υλοποίηση Κώδικα Για Την Δημιουργία Συνάρτησης Με την Οποία Ανοίγουμε Τα αρχεία NetCDF.....	5
	<b>Βιβλιογραφία</b> .....	6

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Σύμφωνα με το άρθρο του Nicolas Perlot [1] οι τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι πρέπει να ακολουθούν τις εξελίξεις των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα επίγεια δίκτυα και να αυξήσουν τη συνολική τους απόδοση προκειμένου να παραμείνουν ανταγωνιστικοί. Στη σημερινή εποχή οι μεγαλύτεροι ρυθμοί δεδομένων που παρέχουν οι γεωστατικοί δορυφόροι κυμαίνονται στα 70 Gb/s στην Κα ζώνη συχνοτήτων. Για την κάλυψη των μελλοντικών απαιτήσεων των χρηστών σχετικά με το εύρος ζώνης καθώς και το διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης διάφορων εφαρμογών (π.χ. triple play (internet υψηλής ταχύτητας, τηλεόρασης και τηλεφώνου)), οι πάροχοι δορυφορικών επικοινωνιών πρέπει να αναπτύξουν νέες τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες. Η ανάγκη για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση εύρους ζώνης καθιστούν αναγκαία την μετάδοση σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Και εδώ είναι που καθίσταται αναγκαία η χρησιμοποίηση των οπτικών ασύρματων επικοινωνιών - Free Space Optics (FSO).

Τα ασύρματα οπτικά δίκτυα είναι μια τεχνολογία σχετικά καινούργια που πλεονεκτεί σε διάφορους τομείς σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες RF τεχνολογίες. Καταρχάς οι ασύρματες οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιούν μια μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων για τη μετάδοση οπτικού φέροντος και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις ζεύξεις τροφοδοσίας έναντι ή συνεργατικά με τις ζώνες ραδιοσυχνοτήτων (RF) (Δορυφόρος - Gateway χρησιμοποίηση οπτικού φάσματος). Σαν αποτέλεσμα αυτού το φάσμα από τις RF ζεύξεις που παραμένει ελεύθερο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ζεύξη δορυφόρου χρήστη αφού οι ρυθμοί που χρειάζονται είναι μικρότεροι. Λόγω του ότι η ακτίνα φωτός (light beam) που εκπέμπεται στις FSO θεωρείται πολύ στενή, τα συγκεκριμένα συστήματα θεωρούμε πως δεν παρεμβάλουν. Επομένως αφού υπάρχει η δυνατότητα αποφυγής παρεμβολών οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται στις οπτικές ασύρματες επικοινωνίες μπορούν να παραμείνουν μη αδειοδοτημένες σε συγκεκριμένες υπηρεσίες σε αντίθεση με τις ραδιοσυχνότητες. Άρα υπάρχει η δυνατότητα να πετύχουμε πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε σχέση με το ήδη κορεσμένο φάσμα που χρησιμοποιείται στις υπάρχουσες RF τεχνολογίες, καθώς και τους πολύ χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης που υποστηρίζουν, σύμφωνα πάντα με τις ανάγκες του παρόντος αλλά και του μέλλοντος. Επιπλέον λόγω της ιδιότητας οι δέσμες φωτός να είναι στενές, οι οπτικές επικοινωνίες θεωρούνται πιο ασφαλείς σε σχέση με τις RF τεχνολογίες. Για τους πιο πάνω λόγους αλλά και πολλούς άλλους οι οποίοι θα εξεταστούν στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή είναι αναγκαία η μεταφορά από τις RF συχνότητες στις οπτικές.

### 1.1 Ζώνες Ραδιοσυχνοτήτων – Οπτικών Συχνοτήτων

Σημαντικό σε αυτό το σημείο είναι η μελέτη των ραδιοσυχνοτήτων, καθώς και τον οπτικών συχνοτήτων στις οποίες γίνεται η μετάδοση των σημάτων στην ατμόσφαιρα.

Στον πιο κάτω πίνακα [2] παρουσιάζονται οι διάφορες συχνότητες που χρησιμοποιούνται καθώς και άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά.

Ζώνη Συχνοτήτων	Συχνότητα Uplink	Συχνότητα Downlink	Κεραία Τερματικού	Διαθέσιμο Εύρος Ζώνης	Τηλεπικοινωνιακές Υπηρεσίες
Ζώνη L	2 GHz	1 GHz	Μικρή	<100 MHz	<sup>1</sup> MSS, <sup>2</sup> LMSS
Ζώνη S	4 GHz	2 GHz	Μικρή	<100 MHz	MSS, <sup>3</sup> SRS
Ζώνη C	8 GHz	4 GHz	Μεγάλη	800 MHz	<sup>4</sup> FSS
Ζώνη X	12.5 GHz	8 GHz	Μεσαία		<sup>5</sup> FSSMC
Ζώνη Ku	19 GHz	12.5 GHz	Μικρή	1000 MHz	FSS, <sup>6</sup> BSS
Ζώνη K	26.5 GHz	19 GHz	Μικρή	1000 MHz	FSS,BSS
Ζώνη Ka	30 GHz	26.5 GHz	Μικρή	2500 MHz	FSS,BSS

**Πίνακας 1.1:** Ζώνες Ραδιοσυχνοτήτων

Αξίζει να σημειωθεί πως εκτός από τις συγκεκριμένες συχνότητες που παρουσιάζονται πιο πάνω, υπάρχουν και οι λεγόμενες EHF (Extremely High Frequency) συχνότητες, οι οποίες κυμαίνονται από 30-300 GHz. Η συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων χρησιμοποιείται συνήθως στον τομέα της ράδιο-αστρονομίας. Χρησιμοποιούνται επίσης και σε διάφορες στρατιωτικές εφαρμογές όπως: <sup>7</sup>CIWS, <sup>8</sup>ADS, καθώς επίσης και σε εφαρμογές ασφαλείας

<sup>1</sup> MSS: Mobile Satellite Service – Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου

<sup>2</sup> LMSS: Land Mobile Satellite Service – Κινητή υπηρεσία ξηράς μέσω δορυφόρου

<sup>3</sup> SRS: Space Research Service – Υπηρεσία έρευνας του διαστήματος

<sup>4</sup> FSS: Fixed Satellite Service – Σταθερή υπηρεσία μέσω δορυφόρου

<sup>5</sup> FSSMC: Fixed Satellite Military Communication – Σταθερή υπηρεσία μέσω δορυφόρου για στρατιωτικούς σκοπούς

<sup>6</sup> BSS: Broadcast Satellite Service - Υπηρεσία ευρυεκπομπής μέσω δορυφόρου

<sup>7</sup> CIWS: Close In Weapon System - Σύστημα οπλισμού για ανίχνευση και καταστροφή εισερχόμενων βλημάτων μικρής εμβέλειας και εχθρικών αεροσκαφών (συνήθως τοποθετείται πάνω σε φρεγάδες)

<sup>8</sup> ADS: Active Denial System - Οπλικό σύστημα το οποίο εκπέμπει μια δέσμη ακτινοβολίας με μήκος κύματος τα 3 mm το οποίο δεν προκαλεί σωματική βλάβη, αλλά είναι εξαιρετικά οδυνηρό και προκαλεί έντονο πόνο στο ανθρώπινο σώμα.

αεροδρομίων, όπου με ειδικούς σαρωτές μπορεί να ανιχνεύονται διάφορα επικίνδυνα αντικείμενα (όπλα κτλ.) που μεταφέρονται σε ταξιδιωτικές αποσκευές. Στη συγκεκριμένη κατηγορία εντάσσονται οι ζώνες V (40 – 75 GHz), W (75 – 110 GHz) και mm (110 – 300 GHz).

Παρατηρώντας τον πιο πάνω πίνακα (Πίνακα 1.1) βλέπουμε πως αρχικά χρησιμοποιούνται διαφορετικές συχνότητες για το Uplink (επίγειο σταθμό προς δορυφόρο) και downlink (δορυφόρο σε επίγειο σταθμό). Με την συγκεκριμένη μεθοδολογία δημιουργείτε αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των 2 στοιχείων επικοινωνίας και επίσης αποφεύγουμε τις παρεμβολές στον δορυφόρο ή τον επίγειο σταθμό ανεξαρτήτου λειτουργίας (πομπού ή δέκτη). Επίσης προφυλάσσουμε το downlink από τις υψηλότερες αποσβέσεις που υφίσταται η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε υψηλότερες συχνότητες.

Τέλος, είναι σημαντικό να παρουσιαστούν και οι ζώνες των οπτικών συχνοτήτων. Όπως φαίνεται και στον πιο κάτω πίνακα [3] παρουσιάζονται οι διάφορες συχνότητες που χρησιμοποιούνται καθώς και το μήκος κύματος της κάθε μίας αντίστοιχα, όπως επίσης και το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Ζώνη	Q	N	M	L'	L	K	H	J	I <sub>J</sub>	I <sub>S</sub>	R	V	B	U
<b>Κεντρική Συχνότητα [THz]</b>	15	30	63	79	86	136	180	240	330	370	430	560	700	836
<b>Μήκος Κύματος [μm]</b>	20.25	10.1	4.80	3.80	3.50	2.20	1.65	1.25	0.90	0.80	0.70	0.54	0.43	0.36
<b>Διαθέσιμο Εύρος Ζώνης [THz]</b>	15.2	18.2	15.9	14.7	17.3	30.1	33.3	74.7	90.5	115.1	138.1	93.2	164.5	163.6

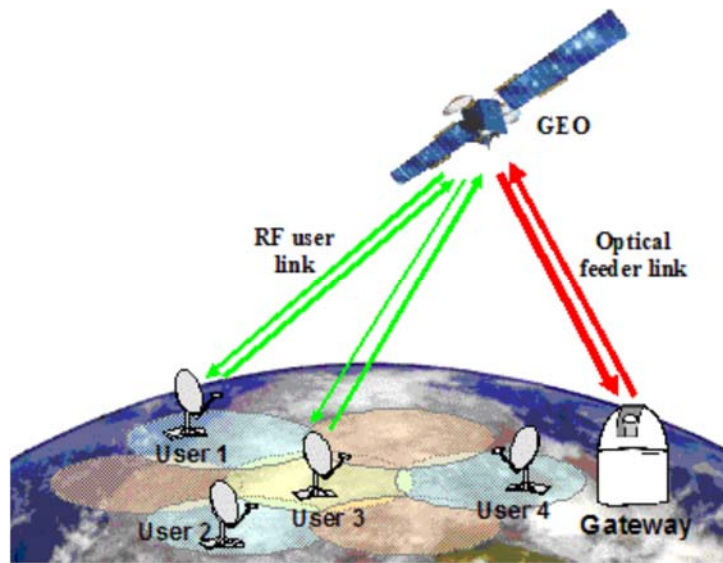
**Πίνακας 1.2:** Ζώνες Οπτικών Συχνοτήτων

## 1.2 Τυπικό Δορυφορικό Σύστημα Με Χρήση Οπτικής Ζεύξης

Στο πιο κάτω σχήμα [1] παρουσιάζεται μια τυπική δομή σύνδεσης μεταξύ των χρηστών, του Gateway με τον γεωστατικό δορυφόρο (GEO). Ο συγκεκριμένος δορυφόρος περιστρέφεται γύρω από τη γη σε ύψος 35,786 km με την ίδια φορά της γης. Λόγω του ότι η περίοδος του δορυφόρου είναι ίση με της γης ο δορυφόρος φαίνεται σαν ένα σταθερό σημείο στον ορίζοντα. Η σημαντικότητα του συγκεκριμένου δορυφόρου, εμπεριέχεται στο γεγονός ότι εξασφαλίζει συνεχή κάλυψη ως αναμεταδότης σε πραγματικό χρόνο για την περιοχή στην οποία είναι ορατός, (γύρω στο 42,4% της γης). Ως εκ τούτου 3 δορυφόροι μπορούν να προσφέρουν πλήρης κάλυψη της επιφάνειας της γης. Πρέπει να σημειωθεί πως εκτός από την γεωστατική τροχιά υπάρχουν ακόμη [4] τρεις τροχιές:

- 1) Ελλειπτικές τροχιές (HEO): Σχηματίζει γωνιά κλίσεις  $63,44^\circ$  ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ο δορυφόρος που θα έχει την συγκεκριμένη τροχιά μπορεί να καλύψει περιοχές με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος για μεγάλο κλάσμα της περιόδους της τροχιάς καθώς αυτός κινείται στο απόγειο.
- 2) Κυκλικές τροχιές μικρού ύψους (LEO): Τυπικό ύψος: 700 – 1000 km, περίοδος: 1.5 ώρα. Σχηματίζει γωνιά κλίσης  $90^\circ$ , και με αυτό τον τρόπο ο δορυφόρος μπορεί να περάσει πάνω από κάθε περιοχή της Γης. Η συγκεκριμένη τροχιά επιλέγεται σε δορυφόρους παρατήρησης.
- 3) Κυκλικές τροχιές μέσου ύψους (MEO): Τυπικό ύψος: 10000 – 20000 km, περίοδος: 6 ώρα. Σχηματίζει γωνιά κλίσης  $50^\circ$ , και υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποιώντας 10 έως 15 δορυφόρους να επιτευχθεί εγγυημένη παγκόσμια κάλυψη για παροχή επικοινωνιών σε πραγματικό χρόνο.

Το σημείο το οποίο πρέπει να προσεχτεί, είναι πως παρουσιάζεται αμφίδρομη ζεύξη τροφοδοσίας μεταξύ δορυφόρου και gateway η οποία αποτελείται από οπτικές δέσμες απελευθερώνοντας έτσι φάσμα (RF) το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω στις συνδέσεις των χρηστών – δορυφόρου αφού δύναται να χρησιμοποιείται μικρότερος ρυθμός δεδομένων.



**Σχήμα 1.1:** Δορυφορικό σύστημα (Bent - Pipe) αποτελούμενο από οπτικές δέσμες

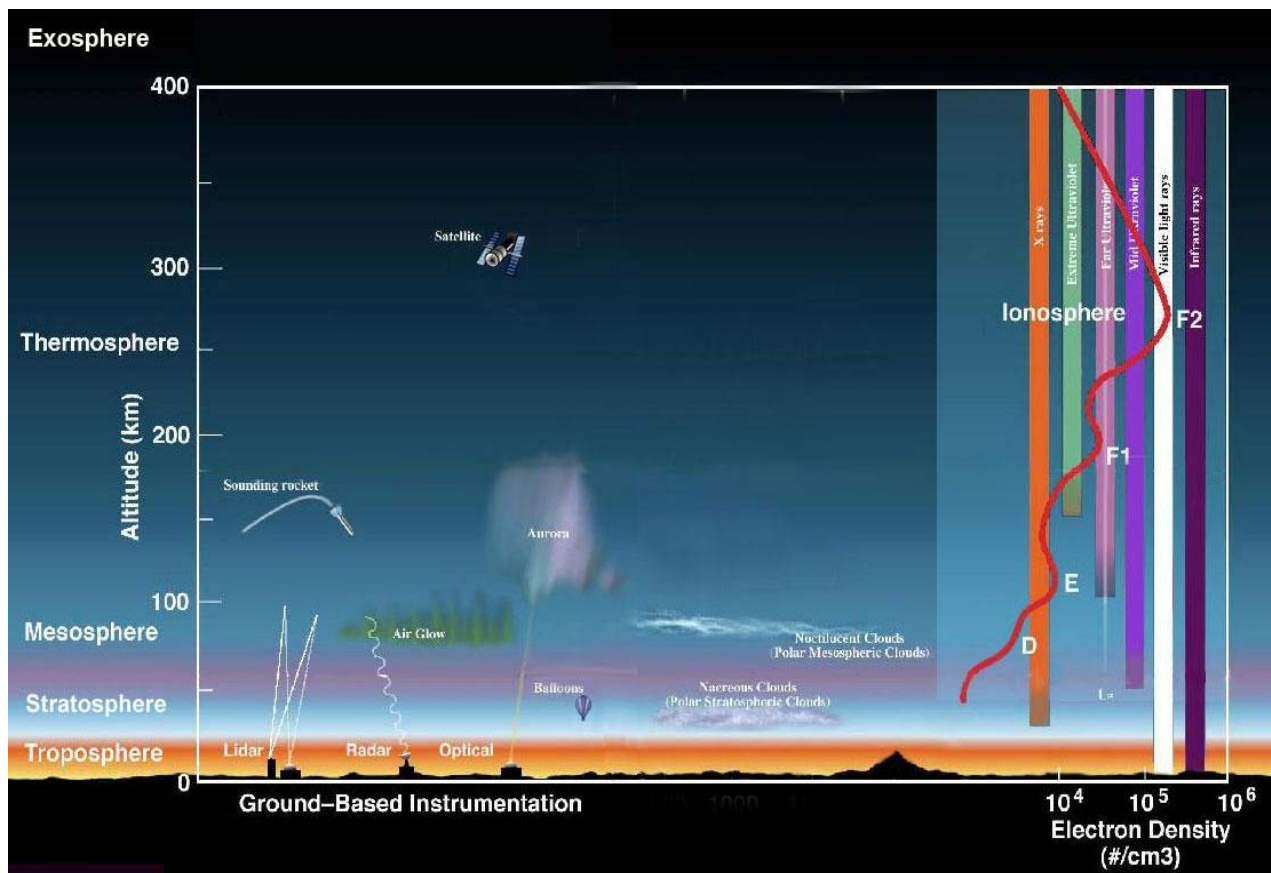
### 1.3 Στρώματα Της Ατμόσφαιρας

Τα στρώματα της ατμόσφαιρας [4] όπως φαίνεται και στο πιο κάτω σχήμα χωρίζονται σε πέντε επίπεδα:

- 1) Τροπόσφαιρα: Χαμηλότερο και πυκνότερο στρώμα που βρίσκεται αμέσως πάνω από την επιφάνεια της γης. Φτάνει τα 18 Km και εμπεριέχει τον κύριο όγκο του αέρα και το μεγαλύτερο μέρος της ατμοσφαιρικής υγρασίας. Το σημαντικότερο στρώμα της ατμόσφαιρας καθώς εδώ δημιουργούνται τα διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα (νέφη, βροχή, ομίχλη, χιόνι κτλ).
- 2) Στρατόσφαιρα: Ύψος από επιφάνεια γης 50 km. Ανώτατο όριο θερμοκρασίας  $-3^{\circ}\text{C}$ . Υψηλή περιεκτικότητα σε όζων
- 3) Μεσόσφαιρα: Ύψος από επιφάνεια γης 90 km. Ψυχρότερη περιοχή της ατμόσφαιρας  $-120^{\circ}\text{C}$ .
- 4) Θερμόσφαιρα: Ύψος από επιφάνεια γης 500 km. Πολύ αραιή ατμόσφαιρα. Θερμότερη περιοχή της ατμόσφαιρας έως  $1100^{\circ}\text{C}$ .
- 5) Εξώσφαιρα - Ιονόσφαιρα: Ανώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας. Ύψος από επιφάνεια γης 1000 km, παύει να υπάρχει ατμόσφαιρα.

Εμείς θα επικεντρωθούμε στο χαμηλότερο στρώμα της γήινης ατμόσφαιρας την τροπόσφαιρα καθώς εδώ δημιουργούνται τα μετεωρολογικά φαινόμενα (σύννεφα, ομίχλη, βροχή, χιόνι, χαλάζι κτλ) και κυρίως τις επιδράσεις των νεφώσεων τις οποίες θα μελετήσουμε στην παρούσα διατριβή.





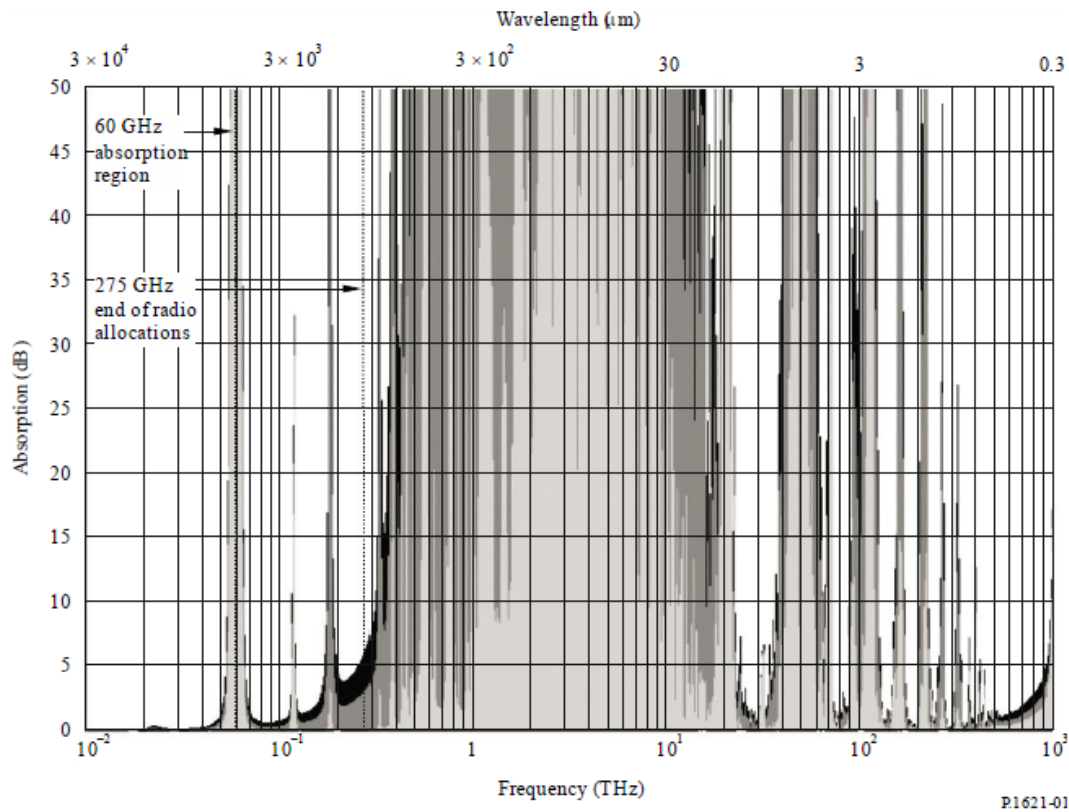
Σχήμα 1.2: Στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας

## 1.4 Φαινόμενα Διάδοσης (Τροποσφαιρικά φαινόμενα):

Αφού μελετήσαμε τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, τώρα είναι αναγκαίο να μελετήσουμε και τα διάφορα φαινόμενα τα οποία θα μας προκαλέσουν μεγάλες απώλειες στο εισερχόμενο οπτικό κύμα μας μέσα από την τροπόσφαιρα. Σύμφωνα με το άρθρο ITU-R P.1621-2 [5] οι κύριοι παράγοντες που προκαλούν τις ατμοσφαιρικές απώλειες είναι οι πιο κάτω:

- 1) Απόσβεση από τα αέρια και τα μόρια της ατμόσφαιρας (μοριακή απορρόφηση) που υπάρχουν κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης, με αποτέλεσμα την απόσβεση της ισχύος του σήματος μας. Η συγκεκριμένη απορρόφηση εξαρτάται από την απόσταση που διανύει το σήμα μέσα στην ατμόσφαιρα. Όσων πιο κοντά βρίσκεσαι σε μια τοποθεσία με υψηλή περιεκτικότητα μορίων νερού (π.χ θάλασσα – υψηλή υγρασία), τόσων μεγάλη απορρόφηση θα έχει το σήμα. Όπως φαίνεται και στο πιο κάτω σχήμα η περιοχή που είναι σκιασμένη με ανοιχτό γκρι χρώμα δείχνει τη σχετικά χαμηλή απορρόφηση που σχετίζεται με μια τοποθεσία που βρίσκεται σε απόσταση 5 χιλιομέτρων από τη στάθμη της θάλασσας σε περιοχή χαμηλής υγρασίας. Η πιο σκοτεινή γκριζα περιοχή παρουσιάζει την πρόσθετη ατμοσφαιρική

απορρόφηση που θα συνέβαινε για μια τοποθεσία που βρίσκεται 2 χιλιόμετρα πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Οι μαύρες περιοχές δείχνουν την περαιτέρω επίδραση της ατμοσφαιρικής απορρόφησης για μια τοποθεσία που βρίσκεται στη στάθμη της θάλασσας.



**Σχήμα 1.3:** Ατμοσφαιρική Απορρόφηση Τριών Διαφορετικών Τοποθεσιών

- 2) Μοριακή Σκέδαση: Το συγκεκριμένο φαινόμενο εμφανίζεται όταν σωματίδια της ατμόσφαιρας αλληλεπιδρούν με το εισερχόμενο οπτικό κύμα μας. Τα συγκεκριμένα σωματίδια έχουν μέγεθος πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και έτσι εμφανίζεται μείωση της ισχύος του σήματος μας. Συνοπτικά υπάρχουν τρεις τύποι σκέδασης:
  - i. Σκέδαση Mie (όταν τα σωματίδια της ατμόσφαιρας έχουν μέγεθος της ίδιας τάξης με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας).
  - ii. Σκέδαση Rayleigh (όταν τα σωματίδια της ατμόσφαιρας έχουν μέγεθος πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας).
  - iii. Σκέδαση ανεξάρτητη από το μήκος κύματος (όταν τα σωματίδια της ατμόσφαιρας έχουν μέγεθος πολύ μεγαλύτερο από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας).
- 3) Σπινθηρισμοί: Καταρχάς πρέπει να τονιστεί πως οι σπινθηρισμοί δημιουργούνται λόγω τροποσφαιρικών στροβιλισμών. Λόγω της χρονικής και χωρικής μεταβολής

του δείκτη διάθλασης, που οφείλονται στις διακυμάνσεις που προκαλούνται στην ατμόσφαιρα, προκαλείται το φαινόμενο του σπινθηρισμού της ισχύος του σήματος και της τυχαίας μεταβολής του μέγιστου της οπτικής δέσμης και εξαρτάται από το μήκος της διαδρομής του σήματος μέσα στην τροπόσφαιρα.

- 4) Απόσβεση λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων: Η βροχόπτωση, χιόνι και χαλάζι εντάσσονται μέσα στις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Οι συγκεκριμένες αποσβέσεις εμφανίζονται κατά τη διάδοση του κύματος διαμέσου βροχής ή χιονόπτωσης ως αποτέλεσμα της υδρομετεωρικής σκέδασης και απορρόφησης. Λόγω του ότι το μέγεθος αυτών είναι μεγαλύτερο ή συγκρίσιμο με το μήκος κύματος προκαλούνε μεγάλες απώλειες στο σήμα
- 5) Εξασθένηση λόγω νεφώσεων: Από τα παραπάνω φαινόμενα που περιγράψαμε θεωρούμε πως τα νέφη αποτελούν τον κυριότερο παράγοντα εξασθένησης και για το λόγο αυτό θα εστιάσουμε στο συγκεκριμένο στη παρούσα διατριβή. Η συγκεκριμένη εξασθένηση παρουσιάζεται κατά την διάρκεια της διέλευσης του σήματος μέσα στην ατμόσφαιρα, και οφείλεται λόγω των σωματιδίων νερού που υπάρχουν στα σύννεφα. Τα μόρια υγρού νερού που σχηματίζουν τα νέφη, έχουν μέγεθος συγκρίσιμο ή μεγαλύτερο από το μήκος κύματος των οπτικών ζεύξεων. Επομένως, η απόσβεση που εισάγουν είναι πολύ υψηλή.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω φαινόμενα επηρεάζουν την ισχύ του διαδιδόμενου σήματος καθώς και το πλάτος του. Συγκεκριμένα η βροχή, χιόνι τα νέφη καθώς και τα ατμοσφαιρικά αέρια προκαλούν απόσβεση στην λαμβανόμενη ισχύς του σήματος, ενώ οι στροβιλισμοί προκαλούν σπινθηρισμούς στο πλάτος του εισερχόμενου κύματος.

## 1.5 Τεχνικές Άμβλυσης Διαλείψεων - Fade Mitigation Techniques

Λόγω του ότι τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, επιφέρουν μεγάλη απόσβεση στην ισχύ του σήματος μας (αρκετά dB για μικρό χρονικό διάστημα) είναι αναγκαία η χρήση τεχνικών άμβλυσης διαλείψεων – Fade Mitigation Techniques [6]. Οι τεχνικές άμβλυσης διαλείψεων μπορούν να χωριστούν στις εξής 3 κατηγορίες:

1. Τεχνικές ελέγχου ισχύος (Power Control)
2. Προσαρμοστικές Τεχνικές μετάδοσης
3. Τεχνικές διαφορικής λήψης

Οι τεχνικές ελέγχου ισχύος και οι προσαρμοστικές τεχνικές μετάδοσης χαρακτηρίζονται από την καλύτερη διάθεση των αχρησιμοποίητων διαθέσιμων πόρων του συστήματος (Adaptive Resource Sharing, ARS), σε αντίθεση με τις τεχνικές διαφορικής λήψης που υιοθετούν τη λογική της επαναδρομολόγησης. Πάμε όμως να δούμε την κάθε τεχνική ξεχωριστά.

#### 1) Τεχνικές ελέγχου ισχύος:

Αναφέρονται στη μεταβολή της εκπεμπόμενης ισχύος του σήματος και στη μεταβολή του κέρδους της κεραίας εκπομπής, για τη βελτίωση του λόγου του σήματος-προς-θόρυβο (C/N). Οι τεχνικές ελέγχου ισχύος μπορεί να διαχωριστούν σε: Έλεγχος της ισχύος της άνω ζεύξης (Up-Link Power Control, ULPC), έλεγχος ισχύος της κάτω ζεύξης (Down-Link Power Control, και η προσαρμογή του διαγράμματος ακτινοβολίας του δορυφορικού αναμεταδότη (On-Board Beam Shaping, OBBS). Στον έλεγχο της ισχύος της άνω ζεύξης η ισχύς εξόδου του επίγειου πομπού προσαρμόζεται στις διαλείψεις άνω ή κάτω ζεύξης (περίπτωση μη αναγεννητικού αναμεταδότη). Στον έλεγχο της ισχύος της κάτω ζεύξης στον οποίο ουσιαστικά γίνεται προσαρμογή της ισχύος εξόδου του δορυφορικού επαναλήπτη. Στην τελευταία τεχνική (προσαρμογή του διαγράμματος ακτινοβολίας του δορυφορικού αναμεταδότη) στην οποία ουσιαστικά μεταβάλλεται το διάγραμμα ακτινοβολίας (κεραία δορυφόρου) έτσι ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις διαθεσιμότητας στην γεωγραφική περιοχή που μας ενδιαφέρει.

#### 2) Προσαρμοστικές Τεχνικές μετάδοσης:

Οι τεχνικές της συγκεκριμένης κατηγορίας ουσιαστικά τροποποιούν την διαδικασία μετάδοσης ή επεξεργασίας των σημάτων από τους κόμβους ενός δορυφορικού δικτύου όταν εμφανίζεται υποβάθμιση της ποιότητας της ζεύξης. Υπάρχουν τρία είδη προσαρμοστικών τεχνικών μετάδοσης: Ιεραρχική Κωδικοποίηση - Hierarchical coding (δημιουργείται σχήμα κωδικοποίησης για την ανίχνευση και διόρθωση λανθασμένων bit, με παρεμβολή πληροφορίας πλεονασμού). Ιεραρχική Διαμόρφωση - Hierarchical modulation (μειώνει το λόγο  $E_b/N_0$  για μια συγκεκριμένη στάθμη λαθών όταν ο λόγος C/N μειώνεται λόγω ατμοσφαιρικών φαινομένων). Μείωση ρυθμού δεδομένων - Data rate reduction (μείωση ρυθμού πληροφορίας όταν παρουσιάζεται εξασθένηση του σήματος λόγω ατμοσφαιρικών φαινομένων).

### 3) Τεχνικές διαφορικής λήψης

Οι συγκεκριμένες τεχνικές αποσκοπούν στην αντιμετώπιση των αποσβέσεων λόγω βροχόπτωσης, αφού οι απώλειες από το συγκεκριμένο φαινόμενο καθιστούν τον κυριότερο παράγοντα υποβάθμισης της διαθεσιμότητας και της επίδοσης μιας δορυφορικής ζεύξης για συχνότητες >10 GHz. Συνολικά υπάρχουν 4 τεχνικές διαφορισμού:

- i. Διαφορική Λήψη Τροχιάς – Orbital Diversity (OD)
- ii. Διαφορική Λήψη Συχνότητας - Frequency Diversity (FD)
- iii. Διαφορική Λήψη Χρόνου – Time Diversity (TD)
- iv. Διαφορική Λήψη Θέσης - Site Diversity (SD)

Πριν την ανάλυση της κάθε τεχνικής ξεχωριστά πρέπει να επισημάνουμε πως η διαφορική λήψη θέσης και η διαφορική λήψη τροχιάς εκμεταλλεύονται τη χωρική δομή της βροχής, ώστε να αποτελέσουν αντίμετρο διαλείψεων κατά της βροχής, ενώ η διαφορική λήψη συχνότητας βασίζεται στη φασματική εξάρτηση της βροχής και η διαφορική λήψη χρόνου στη χρονική εξάρτηση της βροχής.

#### Διαφορική Λήψη Τροχιάς – Orbital Diversity (OD):

Με την συγκεκριμένη τεχνική ένας επίγειος σταθμός βάσης έχει την δυνατότητα να επιλέξει ανάμεσα από 2 δορυφόρους που βρίσκονται ήδη σε τροχιά. Το κόστος υλοποίησης του παραμένει χαμηλό καθώς μόνω ένας σταθμός βάσης χρησιμοποιείται.

#### Διαφορική Λήψη Συχνότητας - Frequency Diversity (FD):

Στην συγκεκριμένη τεχνική διαφορισμού η ζώνη συχνοτήτων του σήματος αλλάζει από ζώνη που παρουσιάζει μεγάλη εξασθένηση, στη ζώνη με τη μικρότερη εξασθένηση, (π.χ αν υπάρχει αρκετή απόσβεση λόγω παρεμβολών μπορούμε να μετακινηθούμε από την RF ζώνη στην οπτική ζώνη συχνοτήτων).

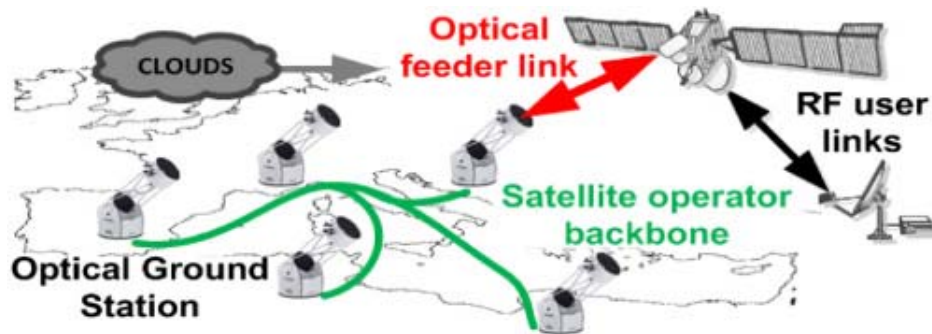
#### Διαφορική Λήψη Χρόνου – Time Diversity (TD):

Στον διαφορισμό χρόνου, πρόσθετα (timeslots) εκχωρούνται στο πλαίσιο TDMA στη ζεύξη που υφίσταται μεγάλη εξασθένηση (π.χ βροχή, χιόνι κτλ). Ακολουθώς αποστέλλεται το ίδιο σήμα αλλά με μικρότερο ρυθμό bit, μειώνοντας, επομένως, το εύρος ζώνης και αυξάνοντας τον λόγο σήματος-προς-θόρυβο.

#### Διαφορική Λήψη Θέσης - Site Diversity (SD)

Στην παρούσα διατριβή θα επικεντρωθούμε στην τεχνική διαφορική λήψης θέσης λόγω του ότι παρέχει το μέγιστο κέρδος. Στην συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότεροι σταθμοί βάσης οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικές περιοχές (ο ένας πολύ μακριά από τον άλλο), έτσι ώστε τα μετεωρολογικά φαινόμενα της κάθε τοποθεσίας να τείνουν να είναι ασυσχέτιστα. Οι επίγειοι σταθμοί συνδέονται μεταξύ τους, έτσι ώστε κάθε

επίγειος σταθμός να μπορεί να υποστηρίξει την κίνηση από έναν άλλο επίγειο σταθμό, που υφίσταται εξασθένηση και είναι σε αποκοπή.



Σχήμα 1.4: Τεχνική Διαφορικής Λήψης Θέσης

Όπως βλέπουμε και από το πιο πάνω σχήμα εφαρμόζεται η τεχνική διαφορικής λήψης θέσης. Η αρχιτεκτονική του συγκεκριμένου συστήματος αποτελείται από:

- Διαστημικό μέρος:

Αποτελείται από έναν ή περισσότερους γεωστατικούς δορυφόρους οι οποίοι επικοινωνούν με τους επίγειους σταθμούς μέσω οπτικού φάσματος καθώς και με τους σταθμούς χρήστη μέσω RF συχνοτήτων.

- Επίγειο μέρος:

Αποτελείται από ένα δίκτυο επίγειο σταθμών βάσης - OGS. Χρησιμοποιείται η τεχνική διαφορική λήψης θέσης, όπου ουσιαστικά υπάρχουν  $X$  ενεργοί σταθμοί βάσης και  $K$  ανενεργοί, έτσι ώστε όταν μια περιοχή που βρίσκεται ένας ενεργός σταθμός βάσης δεν μπορεί να εκπέμψει εξαιτίας ατμοσφαιρικών φαινομένων (νεφώσεις), να αποκοπεί από το σύστημα και να τεθεί σε λειτουργία ένας από τους  $K$  σταθμούς, όπου στην περιοχή που βρίσκεται δεν επηρεάζεται από διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα, έτσι ώστε να διατηρηθεί η υψηλή διαθεσιμότητα του συστήματος. Η αλλαγή αυτή πραγματοποιείται με έναν διακόπτη on/off.

Μέρος χρήστη: Αποτελείται από τα τερματικά των χρηστών τα οποία επικοινωνούν με τον γεωστατικό δορυφόρο στην RF μπάντα συχνοτήτων.

Ένα παράδειγμα τις πιο πάνω αρχιτεκτονικής βλέπουμε στο πιο κάτω σχήμα [1]. Ουσιαστικά είναι μια τοπολογία από 10 επίγειους σταθμούς οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικές τοποθεσίες στην Νότια Ευρώπη. Η ετήσια διαθεσιμότητα του δικτύου, που δίνεται από την πιθανότητα τουλάχιστον ένας σταθμός να μην καλύπτεται από σύννεφα, υπολογίζεται σε 99,89%. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως από τους 10 σταθμούς βάσης οι

8 είναι ενεργοί και οι 2 ανενεργοί. Η σύνδεση μεταξύ των χρηστών και του δορυφόρου γίνεται στην μπάντα Ka, ενώ η σύνδεση μεταξύ των OGS και δορυφόρου σε οπτική μπάντα.



**Σχήμα 1.5:** Δίκτυο Από Επίγειους Σταθμούς Στην Νότια Ευρώπη Χρησιμοποιώντας Την Τεχνική Διαφορικής Λήψης Θέσης

Στην συνέχεια της διατριβής στο κεφάλαιο 2, θα πραγματοποιηθεί προϋπολογισμός ισχύος οπτικής ζεύξης (Optical Link budget) καθώς θα μας δώσει μια πρώτη εκτίμηση της ισχύος που φτάνει στον δέκτη λαμβάνοντας υπόψη όλα τα πιθανά στοιχεία απώλειας που σχετίζονται με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κυμάτων κατά τη διαδικασία εκπομπής και λήψης.

Ακολουθώντας στο κεφάλαιο 3 θα μελετήσουμε τις επιδράσεις των νεφώσεων πάνω στις οπτικές ζεύξεις και πως αυτές αποφέρουν απόσβεση στην λαμβανόμενη ισχύς του σήματος μας.

Μετάπειτα αφού κατανοήσουμε το θεωρητικό υπόβαθρο για το φαινόμενο των νεφώσεων στο κεφάλαιο 3, στο κεφάλαιο 4 θα ασχοληθούμε με την ανάλυση διάφορων αλγορίθμων για τη βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης επίγειων σταθμών, καθώς επίσης θα παρουσιάσουμε τα διάφορα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν, με τη χρήση του προγράμματος Matlab

Κλείνοντας στο κεφάλαιο 5, θα αναφερθούμε στα συμπεράσματα που προέκυψαν μέσα από την συγκεκριμένη διατριβή, όπως επίσης θα προταθούν τυχόν μελλοντικές βελτιώσεις οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν στον αλγόριθμό που υλοποιήσαμε (4.6) για να γίνει πιο αποδοτικός καθώς και στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε προϋπολογισμός ισχύος οπτικής άνω ζεύξης.

# Κεφάλαιο 2

## Προϋπολογισμός Ισχύος Οπτικής Άνω Ζεύξης

### 2.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί ένας προϋπολογισμός ισχύος οπτικής ζεύξης (Link Budget) για δορυφορικές άνω ζεύξεις με και χωρίς τη χρήση της τεχνολογίας προσαρμοζόμενης οπτικής – Adaptive Optics (AO). Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται για τη διόρθωση της εισερχόμενης φάσης του οπτικού κύματος, η οποία παραμορφώνεται από το φαινόμενο του στροβιλισμού.

Στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η πραγματοποίηση ενός προϋπολογισμού ισχύος οπτικής ζεύξης χρησιμοποιώντας τεχνικές προ-παραμόρφωσης (PAO). Οι συγκεκριμένες τεχνικές εφαρμόζονται στην πλευρά του επίγειου πομπού, με απώτερο σκοπό να καταφέρουμε να μειώσουμε τον δείκτη σπινθηρισμού καθώς επίσης και τη συνολική απώλεια ζεύξης του οπτικού μας καναλιού στην ανερχόμενη ζεύξη (Uplink). Θα χρησιμοποιηθούν τρεις τοποθεσίες σε υψόμετρα 300,900,1500 m μακριά από το επίπεδο της θάλασσας λόγω του ότι το οπτικό μας κύμα μπορεί να υποστεί ισχυρή επίδραση από το φαινόμενο του στροβιλισμού λόγω του ότι η ατμόσφαιρα είναι πυκνότερη σε χαμηλότερο υψόμετρο. Ακολουθώς, θα επιλεγούν συγκεκριμένοι τρόποι λειτουργίας N για να διαφανεί πως αυτοί επιδρούν πάνω στο Link budget. Συνοψίζοντας στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν στατιστικά μοντέλα για τα φαινόμενα: IRT (στροβιλισμός του δείκτη διάθλασης) καθώς και το beam wander αφού θεωρούνται από τις κύριες διαταραχές του οπτικού μας καναλιού, καθώς και οι συνθήκες για την εφαρμογή τεχνικών προ-παραμόρφωσης. Τέλος θα υλοποιηθεί ένας προϋπολογισμός ισχύος οπτικής ζεύξης χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα Matlab, υποθέτοντας πως εφαρμόζουμε την τεχνική προ-παραμόρφωσης (PAO), λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές απώλειες οι οποίες μπορούν να εμφανιστούν στο κανάλι μας κατά την διάδοση σε οπτικές συχνότητες όπως:

- a)  $L_{FS}$  (Απώλειες ελεύθερου χώρου)
- b)  $L_{ATM}$  (Απώλειες λόγω ατμοσφαιρικής εξασθένησης)
- c)  $L_{BW}$  (Απώλειες λόγω του Beam wander)
- d)  $L_{SR}$  (Strehl ratio loss)
- e)  $L_{SI}$  (Απώλεια λόγω σπινθηρισμού)



## 2.2 Σημαντικότητα Των Τεχνολογιών ΡΑΟ

Σύμφωνα με το άρθρο του (Svilen Dimitrov, Ricardo Barrios, Balazs Matuz, Gianluigi Liva, Ramon Mata-Calvo, Dirk Giggenbach) [7] κατά την κάτω ζεύξη, το μέγεθος της κλίμακας των παραμορφώσεων φάσης είναι πολύ μεγαλύτερο από το εφικτό μέγεθος ανοίγματος του δορυφορικού τηλεσκοπίου. Επομένως η χωρική φάση στο άνοιγμα δορυφορικής λήψης στον επίγειο σταθμό είναι μάλλον επίπεδη. Παρ' όλα αυτά, σε ένα σενάριο ανερχόμενης ζεύξης, το κυματοειδές ταξίδι αρχικά διαταράσσεται από την ατμόσφαιρα και στη συνέχεια διαδίδεται μέσω ελεύθερου χώρου μέχρι τον δορυφόρο GEO. Έτσι, στο δορυφορικό επίπεδο, το προφίλ λήψης του κυματοειδούς προσανατολισμού διαφέρει από εκείνο μιας καθαρής διάχυτης δέσμης λέιζερ. Έτσι χρησιμοποιώντας τεχνικές προ-παραμόρφωσης Pre-distortion Adaptive Optics (PAO) στο εξερχόμενο οπτικό κύμα στο σταθμό εδάφους, μπορούμε να μετριάσουμε τις συγκεκριμένες παραμορφώσεις. Πιο συγκεκριμένα αυτό θα καταστεί εφικτό χρησιμοποιώντας ένα beacon σήμα στην κάτω ζεύξη το οποίο ουσιαστικά θα ανιχνεύει όλες τις στρεβλώσεις που εισάγονται από το φαινόμενο του στροβιλισμού στην ατμόσφαιρα.

Η απλούστερη μέθοδος ΡΑΟ που μπορεί να υλοποιηθεί είναι η αντιστάθμιση κλίσης των τριών πρώτων χωρικών τρόπων λειτουργίας της πληροφορίας της φάσης του κύματος (Zernike modes). Χρησιμοποιείται ένα beacon κάτω ζεύξης από τον δορυφόρο ως σημείο αναφοράς για την εξερχόμενη δέσμη. Αυτή η μέθοδος μεγιστοποιεί μόνο την λαμβανόμενη ακτινοβολία στο δορυφόρο. Επιπρόσθετο κέρδος μπορεί να επιτευχθεί εάν υψηλότεροι τρόποι λειτουργίας είναι επίσης προ-αντισταθμισμένοι, επειδή οι υψηλότεροι τρόποι είναι υπεύθυνοι για τις παραμορφώσεις φάσης που κυρίως συμβάλλουν στην επίδραση σπινθηρισμού που προκαλείται από το IRT (Index-of-refraction Turbulence).

## 2.3 Δομή Του Δείκτη Διάθλασης

Σε αυτό το σημείο θα ασχοληθούμε με την δομή του δείκτη διάθλασης. Καταρχάς πρέπει να τονιστεί πως η ένταση των διακυμάνσεων του δείκτη διάθλασης που αντιπροσωπεύεται από την παράμετρο  $C_n^2$  σε ( $m^{-2/3}$ ) χαρακτηρίζουν το φαινόμενο του ατμοσφαιρικού στροβιλισμού. Στην περίπτωση που μελετάμε (σύνδεση επίγειου σταθμού με δορυφόρο) η συμπεριφορά του  $C_n^2$  επηρεάζεται κυρίως από τη θερμοκρασία, η οποία αλλάζει κατά μήκος των διαφορετικών στρωμάτων της ατμόσφαιρας της γης, επομένως η παράμετρος της δομής του δείκτη διάθλασης ( $C_n^2$ ) υπολογίζεται συνάρτηση του ύψους  $h$  πάνω από το επίπεδο του εδάφους. Στη μελέτη μας θα χρησιμοποιήσουμε το πιο διαδεδομένο μοντέλο  $C_n^2$  το οποίο είναι το μοντέλο Hufnagel - Valley (HV). Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ημερήσιες και νυχτερινές συνθήκες εξίσου. Όπως αναφέραμε όμως και πιο πάνω λόγω του ότι οι σταθμοί βάσης μας θεωρούμε πως δεν βρίσκονται κοντά στο επίπεδο της θάλασσας θα χρησιμοποιήσουμε μια διαφορετική έκδοση του συγκεκριμένου μοντέλου, ώστε να συμπεριληφθούν οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις του εδάφους. Επομένως, η παράμετρος της δομής του δείκτη διάθλασης εκφράζεται ως εξής [7] :

$$C_n^2(h) = Ae^{-\frac{H_{GS}}{700}} e^{-\frac{(h-H_{GS})}{700}} + 5.94 \times 10^{-53} \left(\frac{u}{27}\right)^2 h^{10} e^{-h/1000} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-h/1500} \quad [1]$$

Όπου:

A:  $10^{-13} \text{ (m}^{-2/3}\text{)}$  η τιμή της δομής του δείκτη διάθλασης στο επίπεδο εδάφους

u:  $21 \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$  η μέση τετραγωνική ρίζα της ταχύτητας του ανέμου

$H_{GS}$ : Υψόμετρο του οπτικού επίγειου σταθμού βάσης (300,900,1500 m)

h: Απόσταση επίγειου σταθμού βάσης από τη μέση στάθμη της θάλασσας

## 2.4 Δείκτης Σπινθηρισμού

Στο παρόν σημείο του κεφαλαίου μας θα μελετήσουμε τον δείκτη σπινθηρισμού (Scintillation index), καθώς και την συχνότητα Greenwood.

Σε μια σύνδεση FSO, αφού το κύμα μας διαδοθεί μέσω της στροβιλισμένης ατμόσφαιρας, η ένταση που βλέπει ο δέκτης είναι μια τυχαία μεταβλητή. Ο δείκτης σπινθηρισμού (SI) χρησιμοποιείται για να ποσοτικοποιήσει της διακυμάνσεις της ακτινοβολίας. Στο κανάλι ανερχόμενης ζεύξης, το SI ορίζεται ως [8]:

$$\sigma_I^2 = \exp \left[ \frac{0.49\sigma_{I_{Bu}}^2}{(1+0.56(1+\Theta)\sigma_{I_{Bu}}^{\frac{12}{5}})^{7/6}} + \frac{0.51\sigma_{I_{Bu}}^2}{(1+0.69\sigma_{I_{Bu}}^{\frac{12}{5}})^{5/6}} \right] - 1 \quad [2]$$

Όπου:

$\Theta$ : Παράμετρος η οποία περιγράφει την ακτίνα της εμπρόσθιας φάσης της δέσμης στο επίπεδο δέκτη και η οποία μπορεί να υπολογιστεί με τις πιο κάτω μαθηματικές εκφράσεις [8]:

$$\Theta = \frac{\theta_0}{\Lambda_0^2 + \theta_0^2} \quad [2.1]$$

Όπου  $\Theta_0$ :

$$\Theta_0 = 1 - \frac{d}{F_0}, F_0 = \infty \quad [2.2]$$

Όπου  $d$  η απόσταση μεταξύ επίγειου σταθμού και δορυφόρου [9] :

$$d \text{ (satellite slant range): } \sqrt{(B \cdot \cos \varepsilon)^2 + r^2} - B \cdot \cos \varepsilon \quad [2.3]$$

Όπου:

$B$  (Ακτίνα Γής): 6371 km

$h$  (Απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και δορυφόρου): 35786 km

$\varepsilon$  (Γωνιά ανύψωσης): 55°

$r$ :  $h + B$

Όπου  $\Lambda_0$  [8]:

$$\Lambda_0 = \frac{2d}{k W_0^2} \quad [2.4]$$

Όπου:

$k$  (κυμματαριθμός):  $2\pi/\lambda$

$W_0$  (Beam radius στο επίπεδο του πομπού):  $D_T/2$

$\sigma_{I_{Bu}}^2$ : Διακύμανση Rytov για ανερχόμενες Gaussian δέσμες, η οποία μπορεί να υπολογιστεί με τις πιο κάτω μαθηματικές εκφράσεις:

$$\sigma_{I_{Bu}}^2 = 8.70 \mu_{3u} k^{7/6} (H - H_{GS})^{5/6} \sec^{11/6}(\zeta) \quad [2.5]$$

Όπου  $\zeta$ :

$\zeta$  (γωνιά ζενίθ): 90° - elevation angle

Όπου  $\mu_{3u}$ :

$$\mu_{3u} = \text{Re} \int_{h_0}^H C_n^2(h) \{ \xi^{5/6} [\Lambda \xi + i(1 - \bar{\Theta} \xi)^{5/6} - \Lambda^{5/6} \xi^{5/3}] \} dh \quad [2.6]$$

Όπου  $\Lambda$ :

$$\Lambda = \frac{\Lambda_0}{\Lambda_0^2 + \Theta_0^2} \quad [2.7]$$

Όπου  $\bar{\Theta}$ :

$$\bar{\Theta} = 1 - \Theta \quad [2.8]$$

Όπου  $\xi$ :

$$\xi = 1 - (h - H_{GS}) / (H - H_{GS}) \quad [2.9]$$

Πρέπει να τονιστεί πως η παράμετρος SI δεν παρέχει καμία πληροφορία σχετικά με τη χρονική συμπεριφορά, καθώς αντιπροσωπεύει την μεταβολή του εισερχόμενου σήματος από την άποψη των μέσων όρων του συνόλου.

## 2.5 Beam Wander

Πριν να ορίσουμε την παράμετρο beam wander, είναι σημαντικό να οριστεί η παράμετρος Fried ( $r_0$ ) καθώς αποτελεί θεμελιώδες λίθο της πιο πάνω παραμέτρου. Συγκεκριμένα μέσω της παραμέτρου Fried μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύς του στροβιλισμού κατά μήκος της διαδρομής του κύματος μας μέσω της ατμόσφαιρα. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως μικρότερες τιμές της παραμέτρου  $r_0$ , αντιστοιχούν σε ισχυρότερες συνθήκες ατμοσφαιρικής IRT. Η παράμετρος Fried δίνεται από [10]:

$$r_0 = \left[ 0.42 \sec(\zeta) k^2 \int_{H_{GS}}^H C_n^2(h) dh \right]^{-3/5} \quad [3]$$

Όπου:

$\lambda$ : Μήκος κύματος

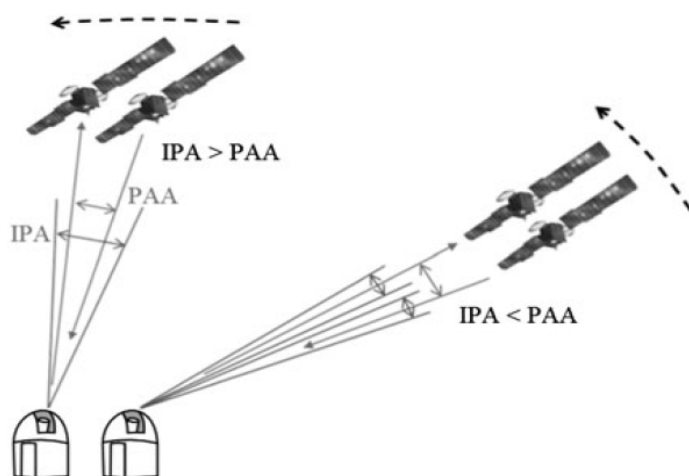
$H$ : Υψόμετρο του δορυφόρου

Ακολούθως, μέσω του beam wander  $\langle r_c^2 \rangle$  μπορούμε να μετρήσουμε τη μέση μετατόπιση της ακτίνας στο δέκτη από την εκκίνηση (σταθμός βάσης). Το συγκεκριμένο φαινόμενο προκαλείται από τις τυχαίες ανομοιογένειες μεγάλης κλίμακας λόγω των διαθλαστικών τους επιδράσεων. Έτσι, το κέντρο της δέσμης μπορεί να παρουσιάσει σημαντικές αποκλίσεις από τον οπτικό άξονα σύνδεσης μετά την διάδοση μέσα από την στροβιλισμένη ατμόσφαιρα. Η παράμετρος  $\langle r_c^2 \rangle$  ορίζεται ως:

$$\langle r_c^2 \rangle = 0.5(H - H_{GS})^2 \sec(\zeta) \left( \frac{\lambda}{2W_0} \right)^2 \left( \frac{2W_0}{r_0} \right)^{5/3} \quad [4]$$

## 2.6 PAA vs IPA

Αφού αναλύσαμε πιο πάνω τα διάφορα φαινόμενα (beam wander, SI κτλ.), σημαντικό σε αυτό το σημείο του κεφαλαίου είναι να παρουσιαστούν οι συνθήκες οι οποίες πρέπει να τηρούνται, έτσι ώστε να μπορούμε να εφαρμόσουμε την τεχνική της προ-παραμόρφωσης (PAO). Γνωρίζουμε από πιο πάνω πως το beam wander προκαλείται από το φαινόμενο του στροβιλισμού. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αντισταθμιστεί με την παρακολούθηση της γωνίας άφιξης (AoA) ενός σήματος αναφοράς από το δορυφόρο και με την αντίστοιχη ένδειξη της εξερχόμενης δέσμης. Επιπλέον, οι τρόποι (modes) της κυματομορφής στον δέκτη μπορούν να προ-παραμορφωθούν μέσω της τεχνολογίας AO που εφαρμόζεται στον πομπό. Αυτή η μέθοδος όμως λειτουργεί μόνο όταν οι οπτικές δέσμες ανερχόμενης ζεύξης και κατερχόμενης ζεύξης μεταδίδονται μέσω του ίδιου όγκου ατμόσφαιρας, επειδή το σήμα κατερχόμενης ζεύξης χρησιμοποιείται ως αναφορά για τη διόρθωση του σήματος ανερχόμενης ζεύξης. Το συγκεκριμένο όμως ισχύει μόνο όταν η γωνιά στρέψης - Point Ahead Angle (PAA) η οποία είναι τυπικά περίπου 18  $\mu\text{rad}$ , είναι μικρότερη από την ισοπλανωτική γωνία - isoplanatic angle (IPA). Το PAA, ουσιαστικά αντιπροσωπεύει τον γωνιακό διαχωρισμό μεταξύ του σήματος ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, λόγω της σχετικής ταχύτητας του δορυφόρου σε σχέση με το επίγειο σταθμό βάσης, ενώ το IPA ορίζει το γωνιακό μέγεθος όπου οι ατμοσφαιρικές παραμορφώσεις μπορούν να θεωρηθούν σταθερές. Στο πιο κάτω σχήμα (Σχήμα 1) παρουσιάζονται 2 σενάρια. Στο πρώτο θεωρούμε υψηλή γωνιά ανύψωσης, όπου το  $\text{IPA} > \text{PAA}$  άρα μπορούμε να εφαρμόσουμε τεχνική PAO, ενώ στο δεύτερο σενάριο θεωρούμε χαμηλή γωνιά ανύψωσης, όπου το  $\text{PAA} > \text{IPA}$ , και έτσι δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε τεχνική PAO.



**Σχήμα 2.1:** Σχέση μεταξύ γωνιών IPA και PAA ανάλογα με την γωνιά ανύψωσης κατά την διάρκεια σύνδεσης δορυφόρου με έναν επίγειο σταθμό βάσης τόσο σε ανερχόμενη αλλά και κατερχόμενη ζεύξη.

Η ισοπλανωτική γωνιά IPA μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως [11]:

$$IPA = \cos^{\frac{8}{5}}(\zeta) \left[ 2.91k^2 \int_{H_{GS}}^H C_n^2(h)(h - H_{GS})^{5/3} dh \right]^{-3/5} \quad [5]$$

## 2.7 Εφαρμόζοντας Τεχνική Προ-Παραμόρφωσης (PAO)

Σε αυτό το σημείο του κεφαλαίου μας θα δούμε μέσω μαθηματικών εξισώσεων και συγκεκριμένα μέσω των πολυωνύμων Zernike πως συνδυάζοντας τα μαζί με τεχνικές (PAO) μας βοηθούν να πετύχουμε καλύτερη ισχύς στον δέκτη.

Καταρχάς η διάδοση των κυμάτων μας μέσα από την στροβιλισμένη ατμόσφαιρα έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία παρεμβολών, οι οποίες ουσιαστικά μεταφράζονται σε παραμορφώσεις φάσης οι οποίες είναι υπεύθυνες για την στοχαστική υποβάθμιση της μεταδιδόμενης ενέργειας. Παραδοσιακά, η φάση ενός οπτικού κύματος που διέρχεται από ένα κυκλικό άνοιγμα αντιπροσωπεύεται από μια άπειρη αθροιστική κατάσταση των τρόπων που συνήθως περιγράφονται από την ορθογώνια βάση που δίνεται από τα πολυώνυμα Zernike. Κάθε λειτουργία Zernike συνδέεται με έναν συντελεστή Zernike, ο οποίος μπορεί να εκτιμηθεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας αλγορίθμους για την επίλυση γραμμικών συστημάτων. Ο λόγος ο οποίος είναι τόσο σημαντικά τα συγκεκριμένα πολυώνυμα οφείλεται στο γεγονός πως καθιστούν την πιο βολική αναπαράσταση της φάσης των κυμάτων, καθώς μπορούν να συσχετιστούν με τις κλασικές εκτροπές στα οπτικά συστήματα. Σαν παράδειγμα ο πρώτος τρόπος λειτουργίας Zernike αντιπροσωπεύει την επίδραση της μέσης τιμής ενός κυκλικού ανοίγματος λήψης. Ακολούθως οι επόμενοι δυο τρόποι λειτουργίας αντιπροσωπεύουν την κάθετη και οριζόντια κλίση του εισερχόμενου κύματος, τα οποία μαζί δίνουν την γωνιά άφιξης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση του φαινομένου του beam wander στην ανερχόμενη ζεύξη. Πρέπει να τονιστεί όμως πως υψηλότεροι τρόποι λειτουργίας δηλαδή υψηλότερες χωρικές συχνότητες, δημιουργούν σπινθηρισμούς. Και εδώ είναι που χρησιμοποιείται η τεχνική προ-παραμόρφωσης (PAO), στην δέσμη λέιζερ της ανερχόμενης ζεύξης, καθώς έτσι μπορούμε να διορθώσουμε φαινόμενα σπινθηρισμού.

Η μαθηματική έκφραση με την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε το  $N_{eff}$ , τον αποτελεσματικό τρόπο λειτουργίας Zernike τον οποίο μπορεί να διορθώσει ένα σύστημα χρησιμοποιώντας την τεχνολογία προσαρμοζόμενης οπτικής - AO, μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως [12]:

$$N_{eff} \approx \left[ N \exp \left\{ - \left( \frac{PAA}{IPA} \right)^{5/3} \right\} \right] \quad [6]$$

Όπου:

$N_{\text{eff}}$ : Τρόποι λειτουργίας Zernikke όπου μπορεί να διορθώσει ένα σύστημα AO

$N$ : Τρόποι λειτουργίας Zernikke όπου προσπαθεί να διορθώσει ένα σύστημα AO

PA: Point Ahead Angle - γωνιά στρέψης λόγω διαφορετικής θέσης δορυφόρου(18  $\mu\text{rad}$ )

IPA: Isoplanatic Angle - ισοπλανητική γωνία

Ακολουθως λόγω του ότι υπάρχει μια αντίστροφη σχέση μεταξύ της διακύμανσης φάσης και της παραμέτρου Fried  $r_0$ , όπου το  $r_0$  μπορεί να αυξηθεί ως συνάρτηση του αριθμού  $N_{\text{eff}}$  των τρόπων λειτουργίας Zernike που διορθώθηκε, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε καινούργια μαθηματική έκφραση για το  $r_0$ , όπου να λαμβάνεται υπόψη και το  $N_{\text{eff}}$ . Η παράμετρος Fried λαμβάνοντας υπόψη και το  $N_{\text{eff}}$  μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως [13]:

$$r_{0,N_{\text{eff}}} = 0.286r_0 \left( \frac{3.44}{C_N} \right)^{3/5} N_{\text{eff}}^{-0.362}; C_N = 0.2944N_{\text{eff}}^{\sqrt{3/2}} \quad [7]$$

Επίσης εκτός από την παράμετρο Fried, πρέπει να υπολογιστή εκ νέου και ο δείκτης σπινθηρισμού Scintillation Index λαμβάνοντας υπόψη το  $N_{\text{eff}}$  (τρόποι λειτουργίας Zernike που διορθώθηκε). Η μαθηματική έκφραση για το δείκτη σπινθηρισμού, λαμβάνοντας υπόψη και το  $N_{\text{eff}}$  φαίνεται πιο κάτω [12]:

$$\sigma_{I_{N_{\text{eff}}}}^2 = \frac{\sigma_I^2}{N_{\text{eff}}} \quad [8]$$

## 2.8 Υλοποίηση Κώδικα Προϋπολογισμού Ισχύος Οπτικής Ζεύξης

Σε αυτή την ενότητα του κεφαλαίου μας θα ασχοληθούμε με τον υπολογισμό του EIRP, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες μαθηματικές εκφράσεις πάνω στο υπολογιστικό πρόγραμμα Matlab. Θα πραγματοποιηθεί υπολογισμός για τρία διαφορετικά υψόμετρα του επίγειου σταθμού βάσης, συγκεκριμένα για  $H_{GS}$ : 1500 m, 900 m, 300 m και θα παρουσιαστεί πως αυτά επηρεάζουν την συνολική ευαισθησία του δέκτη. Η γωνιά ανύψωσης έχει οριστεί στις 55°. Πρέπει να τονιστεί πως στο συγκεκριμένο σενάριο υποθέτουμε πως χρησιμοποιούμε τεχνική προ-παραμόρφωσης (PAO). Θα χρησιμοποιηθεί  $N=3$  για τον αριθμό των τρόπων λειτουργίας Zernikke που πρέπει να προ-παραμορφωθούν.

Σαν πρώτο βήμα θα οριστεί η μαθηματική έκφραση όπου μπορούμε να υπολογίσουμε την ευαισθησία του δέκτη  $PR_{th}$  για μια συγκεκριμένη πιθανότητα διακοπής  $p$  και μια καθορισμένη απόσταση  $d$  (Satellite Slant Range) [7]:

$$PR_{th} = P_T \cdot G_T \cdot \eta_T \cdot L_{ATM} \cdot L_{FS} \cdot L_{SR} \cdot L_{BW} \cdot L_{sith}(p) \cdot G_R \cdot \eta_R \quad [9]$$

Επομένως υπολογίζουμε το κατώφλι της ισχύος του δέκτη για μια συγκεκριμένη πιθανότητα διακοπής  $p$  και συγκεκριμένα  $p = P(PR \leq PR_{th})$ .

Όπου:

- $P_T$  (Ισχύς πομπού): 47 dBm
- $G_T$  (Κέρδος ανοίγματος τηλεσκοπίου πομπού):

$$G_T = \left(\frac{\pi D_T}{\lambda}\right)^2 \quad [10]$$

Όπου:

$D_T$  (Διάμετρος ανοίγματος τηλεσκοπίου πομπού):  $D_T = \lambda \cdot \sqrt{8} / \pi \cdot \theta_T$

$\theta_T$ : 12.95  $\mu$ rad

$\lambda$  (Μήκος κύματος): 1055 nm

- $\eta_T$  (Αποδοτικότητα πομπού): -3 dB
- $L_{ATM}$  (Ατμοσφαιρική εξασθένηση):  $L_{ATM} \text{ antenna} + L_{cloud} \text{ margin}$ : -1 -3 dB: -4 dB
- $L_{FS}$  (Απώλειες ελεύθερου χώρου):

$$L_{FS} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad [11]$$

- $L_{SR}$  (Strehl ratio loss):

$$L_{SR} = [1 + (D_T/r_0)^{5/3}]^{-6/5} \quad [12]$$



Όπου:

$r_0$ : Συνδυασμός Εξ. [3] και [7] αφού χρησιμοποιούμε τεχνική ΡΑΟ

➤  $L_{BW}$  (Απώλειες λόγω Beam wander):

$$L_{BW} = e^{(-G_T \cdot \Theta^2_{BW})} \quad [13]$$

Όπου:

$$\Theta^2_{BW} = \sqrt{\langle r_c^2 \rangle} / d$$

$\langle r_c^2 \rangle$ : Συνδυασμός Εξ. [4] και [7] αφού χρησιμοποιούμε τεχνική ΡΑΟ

➤  $L_{sith}(p)$  (Απώλεια λόγω σπινθηρισμού):

Η απώλεια σπινθηρισμού υπολογίζεται για μια συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασης, και συγκεκριμένα για  $P(L_{si} \geq L_{sith})$

$$L_{sith}(p) = (3.3 - 5.77 \sqrt{\ln(\frac{1}{p})}) \sigma_I^{4/5} \quad [14]$$

Όπου:

$p$  (Πιθανότητα διακοπής): Αντιπροσωπεύει το ποσοστό διαθεσιμότητας του συστήματος μας στο χρόνο, και ορίζεται ως:  $p = P(PR \leq PR_{th})$

$\sigma_I$ : Συνδυασμός Εξ. [2] και [8] αφού χρησιμοποιούμε τεχνική ΡΑΟ

➤  $G_R$  (Κέρδος δέκτη):

$$G_R = \left( \frac{\pi D_R}{\lambda} \right)^2 \quad [15]$$

Όπου:

$D_R$  (Διάμετρος ανοίγματος κεραίας δέκτη): 25 cm

➤  $\eta_R$  (Αποδοτικότητα δέκτη): -3 dB

Υλοποιώντας τις πιο πάνω εξισώσεις στην Matlab, μπορούμε να υπολογίσουμε το κατώφλι της λαμβανόμενης ισχύος για συγκεκριμένη πιθανότητα διακοπής  $p$ . Τα εξαγόμενα αποτέλεσμα φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα για πιθανότητα διακοπής  $p = 0.001$ . Αρχικά παρατηρούμε πως για 1500 m (μεγαλύτερο υψόμετρο του οπτικού επίγειου σταθμού βάσης) η ευαισθησία του δέκτη είναι η μεγαλύτερη σε σχέση με τις 2 άλλες περιπτώσεις (900,300 m). Άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως όσων πιο ψηλά από το επίπεδο της θάλασσας τοποθετούνται οι σταθμοί βάσης μας θα λαμβάνουμε ψηλότερη ισχύς στον δέκτη μας. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα το αναμέναμε αφού όπως εξηγήσαμε και πιο πάνω όσων πιο κοντά βρίσκεται ένας επίγειος σταθμός βάσης στο επίπεδο της θάλασσας ότι το οπτικό μας κύμα μπορεί να υποστεί ισχυρή επίδραση από το φαινόμενο του στροβιλισμού, και συνάμα από το φαινόμενο IRT.

Parameter	Values		
<b>OGS Altitude [m]</b>	1500	900	300
<b>Modes Corrected</b>	3	3	3
<b>Beam Divergence [μrad]</b>	12.95	20.46	33.23
<b>Tx Aperture Diameter [cm]</b>	10.78	6.82	4.2
<b>Tx Power [dBm]</b>	47	47	47
<b>Tx gain [dB]</b>	106.7855	102.8128	98.6003
<b>Rx Aperture Diameter [cm]</b>	25	25	25
<b>Rx gain [dB]</b>	114.0952	114.0952	114.0952
<b>Tx Optical Loss [dB]</b>	-3	-3	-3
<b>Rx Optical Loss [dB]</b>	-3	-3	-3
<b>Atmospheric Attenuation [dB]</b>	-1	-1	-1
<b>Cloud Margin [dB]</b>	-3	-3	-3
<b>L<sub>FS</sub> - Free-Space Loss [dB]</b>	-289.8139	-289.8139	-289.8139
<b>L<sub>SR</sub> - Strehl Ratio Loss [dB]</b>	-0.7627	-0.7877	-0.8116
<b>L<sub>BW</sub> - Beam Wander Loss [dB]</b>	-4.4219	-4.5783	-4.7286
<b>L<sub>sith(p)</sub> - Scintillation Loss [dB]</b>	-0.6169	-0.8141	-1.0600
<b>Scintillation Index</b>	0.0248	0.0351	0.0634
<b>Total Rx Power threshold [dBm]</b>	<b>-37.7347</b>	<b>-42.086</b>	<b>-46.7186</b>

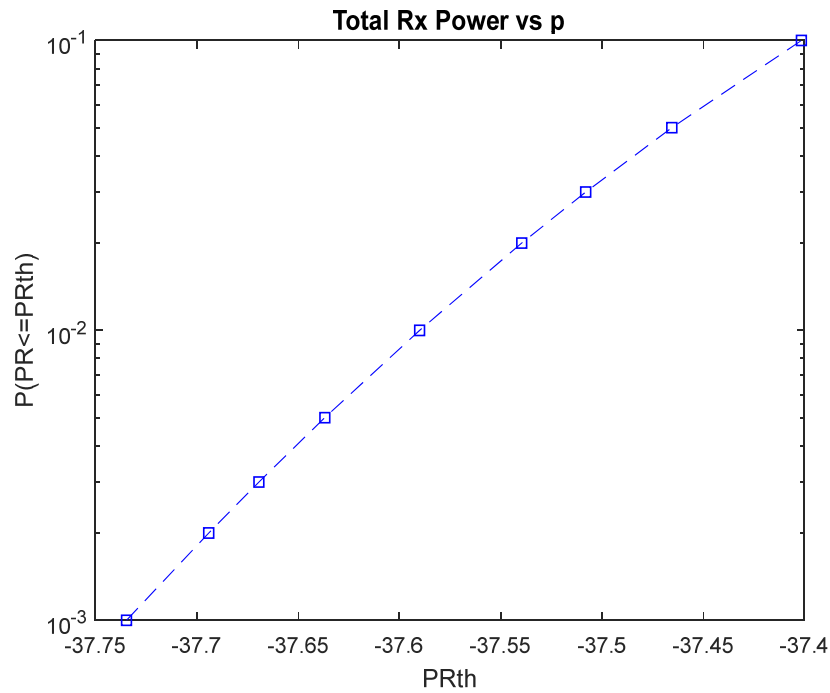
**Πίνακας 2.1:** Προϋπολογισμός ισχύος οπτικής ζεύξης χρησιμοποιώντας τεχνική προ-παραμόρφωσης (PAO)

### 2.8.1 Total Rx Power vs. p - Outage Probability

Σε αυτό το σημείο θα δούμε πως η πιθανότητα  $p$  επηρεάζει την ευαισθησία του δέκτη. Καταρχάς, η συγκεκριμένη πιθανότητα ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το ποσοστό διαθεσιμότητας του συστήματος μας στο χρόνο, και ορίζεται ως:  $P(\text{Pr} \leq \text{Prth})$ . Αντικατοπτρίζει ένα κατώτατο όριο της τιμής της ισχύος μας, ώστε το σύστημα μας να λειτουργεί αποδοτικά ανάλογα με την τιμή του  $p$  που θέτουμε. Για παράδειγμα όταν αναφερόμαστε σε  $p=0.001$ , ουσιαστικά αυτή η πιθανότητα αντικατοπτρίζει πως το σύστημα μας θα είναι διαθέσιμο για το 99.9% του χρόνου. Στο σύστημα μας δοκιμάσαμε τις εξής τιμές  $p$ : [0.001,0.002,0.003,0.005,0.01,0.02,0.03,0.05,0.1]. Για τις συγκεκριμένες τιμές ανάλογα υποθέτουμε πως το σύστημα μας θα είναι διαθέσιμο για: [99.9%,99.8%,99.7%,99.5%,99%,98%,97%,95%,90%] του χρόνου. Πρέπει να τονιστεί πως στο συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέγουμε διάμετρο ανοίγματος τηλεσκοπίου πομπού 10.78 cm. Για τις συγκεκριμένες τιμές, οι τιμές που περνάμε για το Scintillation Loss, καθώς και για την ευαισθησία του δέκτη παρουσιάζονται στο πιο κάτω πίνακα. Πιο κάτω επίσης παρουσιάζεται ένα γράφημα της πιθανότητας  $p$  σε σχέση με την ευαισθησία του δέκτη.

<b>p - Outage Probability</b>	<b>Scintillation Loss [dB]</b>	<b>Total Rx Power threshold [dBm]</b>
0.001	-0.6196	-37.7347
0.002	-0.5763	-37.6941
0.003	-0.5515	-37.6693
0.005	-0.5190	-37.6368
0.01	-0.4722	-37.59
0.02	-0.4218	-37.5396
0.03	-0.3902	-37.508
0.05	-0.3477	-37.4655
0.1	-0.2837	-37.4015

**Πίνακας 2.2:** Outage probability vs. scintillation loss vs. total received power



**Σχήμα 2.2:** Πιθανότητα -  $p$  σε σχέση με την ευαισθησία δέκτη

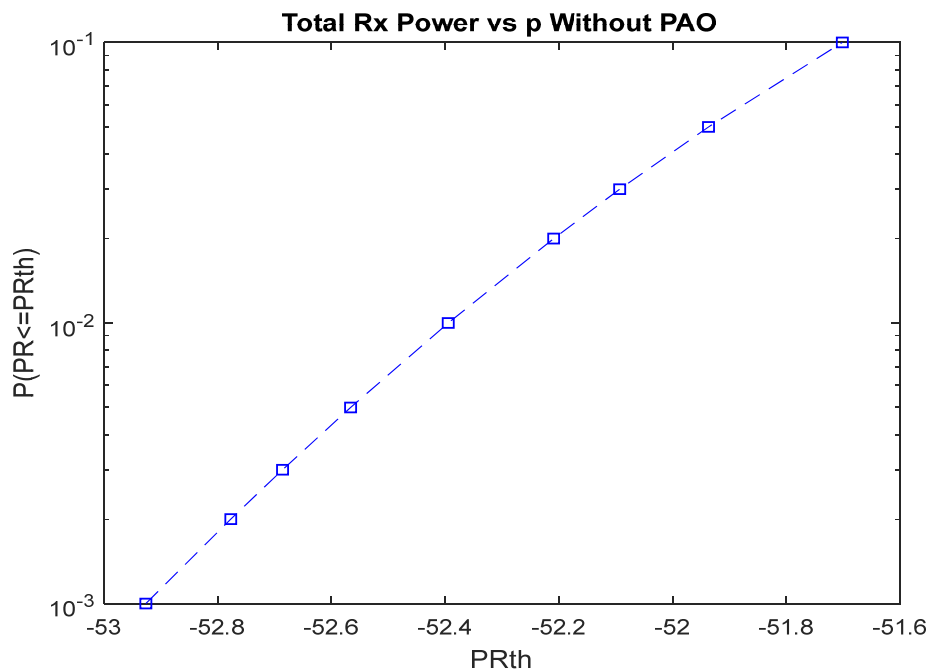
Από τα πιο πάνω παρατηρούμε πως μεταβάλλοντας την πιθανότητα  $p$ , αυξάνεται αναλόγως και η απώλεια λόγω σπινθηρισμού. Όσον αφορά την ευαισθησία του δέκτη παρατηρούμε πως καθώς αυξάνεται η πιθανότητα  $p$ , λαμβάνουμε υψηλότερη ευαισθησία στον δέκτη.

## 2.8.2 Total Rx Power vs. $p$ - Outage Probability Χωρίς PAO

Πιο πάνω μελετήσαμε την επίδραση που προκαλούν διάφορες τιμές της πιθανότητας  $p$  πάνω στην ευαισθησία του δέκτη για διάμετρο ανοίγματος τηλεσκοπίου πομπού,  $D_t$ : 10.78 cm και με την χρήση τεχνικών προ-παραμόρφωσης Σε αυτό το σημείο θα μελετήσουμε για  $D_t$ : 30 cm, και χωρίς την χρήση τεχνικών προ-παραμόρφωσης για να δούμε πως επηρεάζεται η ευαισθησία του δέκτη. Όπως βλέπουμε και πιο κάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που περνάμε για το Scintillation Loss καθώς και για την ευαισθησία του δέκτη, καθώς επίσης και τα γραφήματα της πιθανότητας  $p$  σε σχέση με την ευαισθησία του δέκτη.

$p$ - Outage Probability	Scintillation Loss [dB]	Total Rx Power threshold [dBm]
0.001	-2.2672	-52.9264
0.002	-2.1179	-52.7771
0.003	-2.0268	-52.686
0.005	-1.9072	-52.5664
0.01	-1.7354	-52.3946
0.02	-1.5501	-52.2093
0.03	-1.4340	-52.0932
0.05	-1.2777	-51.9369
0.1	-1.0424	-51.7016

**Πίνακας 2.3:** Outage probability vs. scintillation loss vs. total received power without PAO



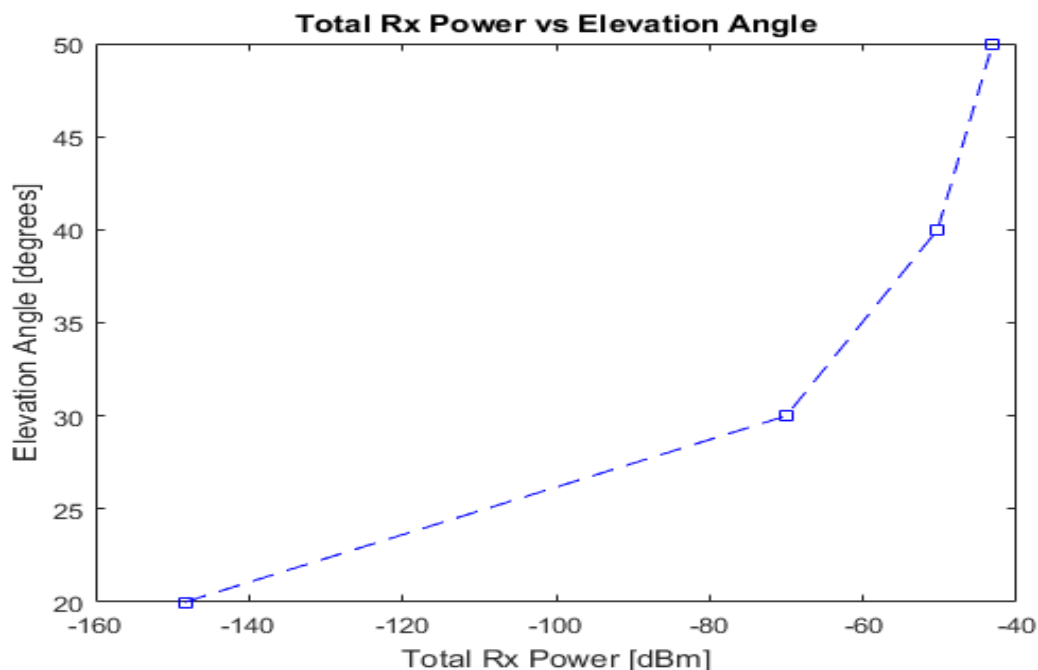
**Σχήμα 2.3:** Πιθανότητα διακοπής -  $p$  σε σχέση με την ευαισθησία του δέκτη χωρίς

### 2.8.3 Total Rx Power vs. Elevation Angle

Σε αυτό το σημείο του κεφαλαίου θα μελετήσουμε την επίδραση που προκαλεί η γωνιά ανύψωσης στην ευαισθησία του δέκτη. Θα δοκιμάσουμε τις εξής γωνιές ανύψωσης: 20°, 30°, 40°, 50°. Όπως φαίνεται και στο γράφημα πιο κάτω, παρατηρούμε πως για γωνιά ανύψωσης ίση με 20°, λαμβάνουμε την χειρίστη ευαισθησία δέκτη και αυτό οφείλεται λόγω του ότι στη συγκεκριμένη γωνιά το σήμα μας δέχεται την περισσότερη επίδραση από την στροβιλισμένη ατμόσφαιρα, γι'αυτό και η απώλεια λόγω του beam wander όπως παρατηρούμε και από το πιο κάτω πίνακα είναι τόσο μεγάλη σε σχέση με τις άλλες τρεις γωνιές ανύψωσης. Σαν γενικό συμπέρασμα μπορούμε να πούμε πως όσων αυξάνεται η γωνιά ανύψωσης η ευαισθησία του δέκτη αυξάνεται καθώς μειώνεται η επίδραση του στροβιλισμού. Η βέλτιστη τιμή της ευαισθησίας του δέκτη που λαμβάνουμε για τις συγκεκριμένες γωνιές ανύψωσης βρίσκεται για γωνιά ανύψωσης: 50°, και ισούται με  $PR_{th}$ : -43.1187 dBm.

Elevation Angle [degrees]	20°	30°	40°	50°
$L_{SR}$ - Strehl Ratio Loss [dB]	-2.5040	-1.8346	-1.4792	-1.2678
$L_{BW}$ - Beam Wander Loss [dB]	-110.9610	-34.7316	-15.8584	-9.0246
$L_{sith(p)}$ - Scintillation Loss [dB]	-3.4445	-1.9034	-1.2914	-0.9846
Total Rx Power threshold [dBm]	<b>-148.3598</b>	<b>-70.0168</b>	<b>-50.303</b>	<b>-43.1187</b>

Πίνακας 2.6: Ευαισθησία Δέκτη Σε Σχέση Με Της Κύριες Απώλειες Του Καναλιού Μας



Σχήμα 2.6: Γωνιά Ανύψωσης Σε Σχέση Με Την Ευαισθησία Του Δέκτη

# Κεφάλαιο 3

## Επίδραση Των Νεφώσεων Στα Ασύρματα Οπτικά Δίκτυα

### 3.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η επίδραση του φαινομένου των νεφώσεων πάνω στην ζώνη οπτικών συχνοτήτων, έτσι ώστε να κατανοήσουμε το μέγεθος της συνολικής απόσβεσης που προσθέτουν τα νέφη πάνω στο μεταδιδόμενο μας σήμα. Θα πραγματοποιηθεί αρχικά μια κατηγοριοποίηση των νεφώσεων ανάλογα με το ύψος τους από την επιφάνεια της γης. Μετέπειτα θα παρουσιαστεί ένας αλγόριθμος για τον υπολογισμό της συνολικής απόσβεσης, ο οποίος βασίζεται σε μετρήσεις RAOBS - radiosonde observations, μετρήσεις ραδιοβολίσεων.

### 3.2 Ορισμός

Τα νέφη είναι "ένα ορατό σύνολο μικρών σταγονιδίων νερού ή σωματιδίων πάγου ή ένα μείγμα και των δύο που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα " [14]. Ως επί το πλείστον τα νέφη σχηματίζονται όταν υγρός θερμός αέρας ανεβαίνει στην ατμόσφαιρα και στη συνέχεια ψύχεται. Στατιστικά το 50% της επιφάνειας της γης καλύπτεται από νέφη σε κάθε δεδομένη στιγμή, γι'αυτό και είναι σημαντική η μελέτη της επίδρασης που επιφέρουν αυτά πάνω στις οπτικές ζεύξεις επικοινωνιών. Οι επιπτώσεις που θα επιφέρουν τα νέφη πάνω στη ζεύξη μας, συνήθως εξαρτώνται από την συχνότητα εμφάνισης των νεφών, καθώς επίσης και από τις φυσικές ιδιότητες τους (μέγεθος σωματιδίων νεφών, αριθμός συγκέντρωσης, καθώς και η φάση αυτών). Πρέπει να τονιστεί πως τα φυσικά χαρακτηριστικά των νεφών δεν θεωρούνται στατικά, καθώς αλλάζουν συνεχώς. Στη συγκεκριμένη εργασία όμως θεωρούμε πως με την ύπαρξη νεφώσεων στη ζεύξη μας το σύστημα μας βρίσκεται σε αποκοπή, γι'αυτό

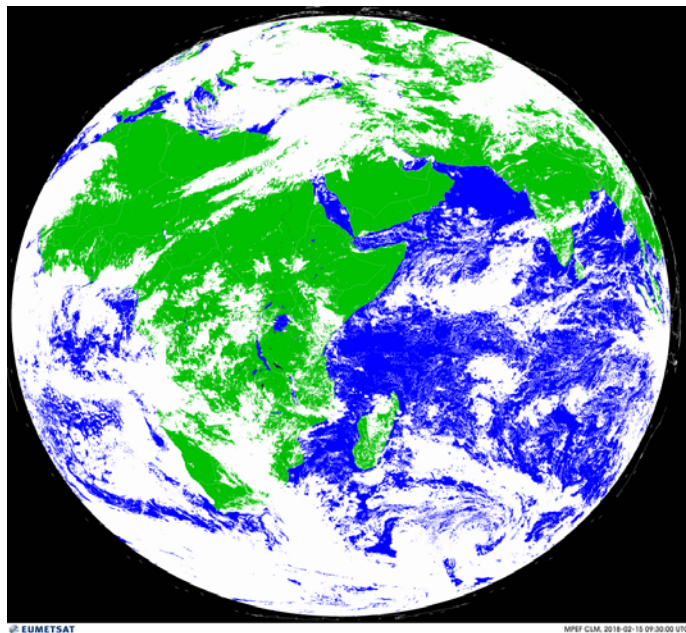
και εμείς θα ασχοληθούμε κυρίως με την μελέτη των πιθανών τοποθεσιών που θα εγκατασταθούν οι σταθμοί βάσης μας έτσι ώστε να επιτύχουμε ένα ποσοστό που μπορεί να τεθεί από έναν πάροχο χωρίς την επίδραση των νεφώσεων.

### 3.3 Ποσοστό Εμφάνισης Νεφώσεων

Μπορούμε να πούμε πως σε κάθε δεδομένη στιγμή η επιφάνεια της γης στατιστικά καλύπτεται σχεδόν 50% από νέφη.

Όπως βλέπουμε και από το πιο κάτω σχήμα, το οποίο ουσιαστικά παρουσιάζει το ποσοστό νεφώσεων παγκοσμίως, οι περιοχές με άσπρο χρώμα (άσπρα pixels) αντιστοιχούν σε περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις νεφώσεων.

Τα πιο πάνω στοιχεία καθώς και αναλυτική στοιχεία πρόβλεψης νεφώσεων διάφορων τοποθεσιών παγκοσμίως μπορούμε να τα δούμε και από την ιστοσελίδα της EUMESAT [15] (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites).



**Σχήμα 3.1:** Παγκόσμιος Χάρτης Κάλυψης Νεφώσεων (15/02/2018 09:30 UTC)



### 3.4 Τύποι Νεφών

Σύμφωνα με το άρθρο του Ahrens [16], τα νέφη μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις τέσσερις πιο κάτω ομάδες ανάλογα με το ύψος της βάσης τους από το επίπεδο του εδάφους. Πρέπει να σημειωθεί όμως πως τα όρια όσων αφορά το ύψος της κάθε ομάδας εξαρτώνται από το γεωγραφικό πλάτος όπως φαίνεται και πιο κάτω.

1. High clouds: Αποτελούνται κυρίως από παγοκρυστάλλους, λόγω του ότι ο συγκεκριμένος τύπος νεφώσεων σχηματίζεται πάνω από τα 6000 μέτρα (μεσαία και χαμηλά γεωγραφικά πλάτη), όπου ο αέρας σε αυτά τα υψόμετρα είναι αρκετά κρύος και "ξηρός".

Τυπικά ύψη ανάλογα με τις περιοχές στις οποίες βρισκόμαστε:

Τροπικό: 6-18 km

Εύκρατο: 5-13 km

Πολικό: 3-8 km

2. Middle clouds: Αποτελούνται κυρίως από σταγονίδια νερού και όταν η θερμοκρασία γίνεται αρκετά χαμηλή μπορεί να σχηματιστούν και παγοκρύσταλλοι. Έχουν βάσεις μεταξύ 2000 και 7000 μέτρων στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη.

Τυπικά ύψη ανάλογα με τις περιοχές στις οποίες βρισκόμαστε:

Τροπικό: 2-8 km

Εύκρατο: 2-7 km

Πολικό: 2-4 km

3. Low clouds: Αποτελούνται συνήθως από σταγονίδια νερού και όταν η θερμοκρασία γίνεται αρκετά χαμηλή μπορεί να περιέχουν σωματίδια πάγου και χιονιού. Το ύψος τους είναι μικρότερο των 2 Km σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη.

Τυπικά ύψη ανάλογα με τις περιοχές στις οποίες βρισκόμαστε:

Τροπικό: 0-2 km

Εύκρατο: 0-2 km

Πολικό: 0-2 km

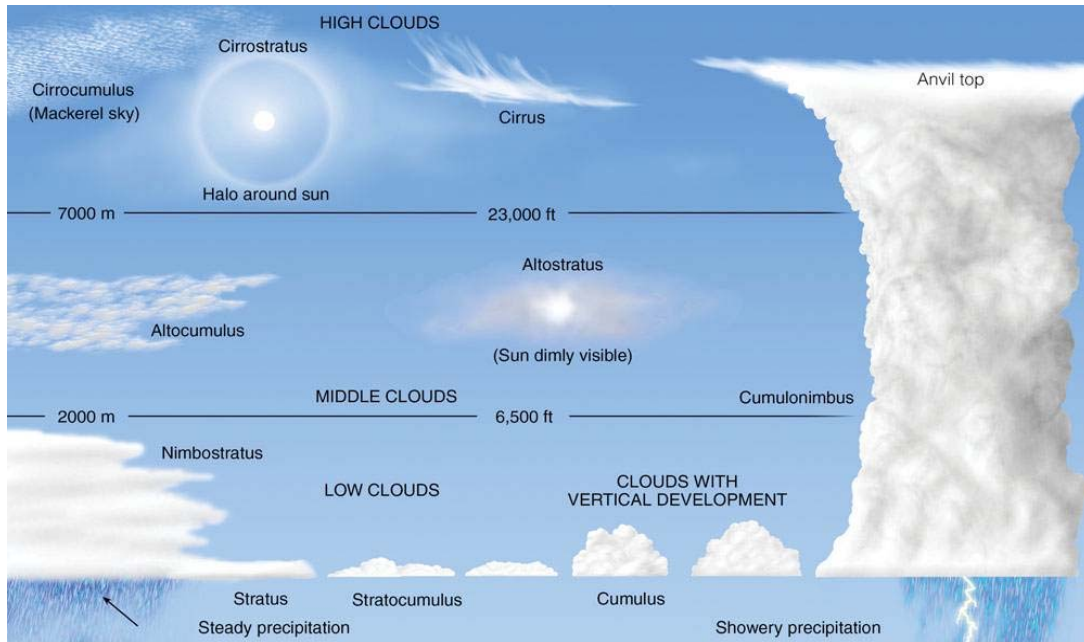
4. Clouds with Vertical Development: Ο συγκεκριμένος τύπος νεφώσεων αποτελείτε από ταραχώδης δομές που παράγονται είτε μέσω θερμικής μεταφοράς ή μετωπικής ανύψωσης, και συνήθως συνδέονται με κατακρημνίσεις.

Οι παραπάνω τέσσερις ομάδες μπορεί να κατηγοριοποιηθούν επιπλέον ανάλογα με την μορφή τους όπως φαίνεται και στον πιο κάτω πίνακα:

<b>Ομάδα</b>	<b>Είδος</b>
<b>High clouds</b>	Cirrus (Ci)
	Cirrostratus (Cs)
	Cirrocumulus (Cc)
<b>Middle clouds</b>	Altostratus (As)
	Alto cumulus (Ac)
<b>Low clouds</b>	Stratus (St)
	Stratocumulus (Sc)
	Nimbostratus (Ns)
<b>Clouds with Vertical Development</b>	Cumulus (Cu)
	Cumulonimbus (Cb)

**Πίνακας 3.1:** Κατηγοριοποίηση νεφώσεων ανάλογα με την ομάδα στην οποία ανήκουν

Κλείνοντας, στο πιο κάτω σχήμα μπορούμε να δούμε μια σχηματική απεικόνιση των βασικότερων τύπων νεφώσεων ανάλογα με το ύψος τους από την επιφάνεια.



**Σχήμα 3.2:** Απεικόνιση των βασικότερων τύπων νεφώσεων ανάλογα με το ύψος τους από την επιφάνεια και την κάθετη ανάπτυξη

### 3.5 Αλγόριθμος Υπολογισμού Απόσβεσης Λόγω Νεφώσεων

Σε αυτό το σημείο του κεφαλαίου μας θα ασχοληθούμε με έναν αλγόριθμο μέσω του οποίου μπορούμε να υπολογίσουμε την συνολική εξασθένιση που προκαλούν οι νεφώσεις κατά την διάδοση του κύματος μας μέσα στην ατμόσφαιρα. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί μετρήσεις RAOBS - radiosonde observations, μετρήσεις ραδιοβολίσεων. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις ουσιαστικά γίνονται με την χρήση μπαλονιών στα οποία δένεται η συσκευή ραδιοβολίδα και τα οποία αφήνονται στην ατμόσφαιρα. Σε ένα συγκεκριμένο ύψος (ανάλογα με το μέγεθος του μπαλονιού) θα εκραγούν λόγω της πολύ μικρής ατμοσφαιρικής πίεσης που επικρατεί δίνοντας σημαντικά ατμοσφαιρικά δεδομένα όπως: (σχετική υγρασία, υψόμετρο, θερμοκρασία, ατμοσφαιρική πίεση κτλ.). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προτείνεται από το στο άρθρο των (Luini, Nebuloni, Carsoni) [17] και ουσιαστικά μπορούμε να τον χωρίσουμε σε πέντε βήματα τα οποία παρουσιάζονται πιο κάτω:

1. Υπολογισμός κατανομής μεγέθους σωματιδίων – Particle Size Distribution (PSD) χρησιμοποιώντας την τροποποιημένη συνάρτηση γάμμα (modified gamma function)
2. Ταξινόμηση νεφώσεων ανάλογα με το πάχος τους καθώς και με τις παραμέτρους (α,β,γ) οι οποίες καθορίζουν το PSD για κάθε τύπο νεφώσεων.
3. Χρησιμοποίηση αλγορίθμου ανίχνευσης νεφώσεων TKK (Teknillinen korkeakoulu - Helsinki University of Technology). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ουσιαστικά χωρίζεται σε τέσσερις υπό-διαδικασίες και οι οποίες είναι οι ακόλουθες:
  - 3.1 Υπολογισμός σχετικής υγρασίας  $U_c$
  - 3.2 Υπολογισμός περιεκτικότητας υγρού νερού στα νέφη (LWC)
  - 3.3 Μέσω του  $p_w(T)$  μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τα νέφη υγρού νερού ή πάγου
  - 3.4 Τέλος μέσω της θεωρίας Mie υπολογίζουμε την συνολική απόσβεση

Στην συνέχεια του κεφαλαίου μας θα αναλυθούν εκτενώς τα βήματα του πιο πάνω αλγορίθμου, μέσω μαθηματικών εξισώσεων αλλά και επεξηγήσεων και ακολούθως θα παρουσιαστούν και αποτελέσματα εφαρμογής του σε συγκεκριμένες τοποθεσίες στην Ευρώπη.

### 3.5.1 Κατανομή Μεγέθους Σωματιδίων – Particle Size Distribution

Το μέγεθος των σωματιδίων κάθε ατμοσφαιρικού πληθυσμού κατανέμεται σε ένα φάσμα (σωματιδιακή κατανομή) ή κοινώς γνωστό Κατανομή μεγέθους σωματιδίων - Particle Size Distribution (PSD). Μέσω μαθηματικής έκφρασης και συγκεκριμένα μέσω της τροποποιημένης συνάρτησης γάμμα μπορεί να αναπαρασταθεί το PSD διάφορων ατμοσφαιρικών σωματιδίων:

$$n(r) = gr^a \exp(-br^\gamma) \quad [1]$$

Όπου:

Οι παράμετροι α,β,γ ρυθμίζουν το σχήμα και το πλάτος της κατανομής γύρω από το μέγιστο της. Το g είναι ανάλογο της περιεκτικότητας υγρού νερού – Liquid Water Content (LWC). Το  $n(r) dr$  είναι ο αριθμός των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου αέρα με ακτίνα που περιλαμβάνεται μεταξύ r και r + dr.

### 3.5.2 Ταξινόμηση Νεφώσεων

Λόγω του ότι τα διάφορα PSD επιδρούν διαφορετικά στα κύματα διάδοσης μας, είναι αναγκαία η ταξινόμηση των νεφώσεων σε ομάδες, το καθένα με το σχετικό PSD και πάχος ΔΗ. Πρέπει να τονιστεί πως οι παράμετροι της [Εξ.\[1\]](#) (α,β,γ) καθορίζουν το PSD για κάθε τύπο σύννεφου. Όσον αφορά το πάχος ΔΗ, ο υπολογισμός του πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της βάσης δεδομένων του ραδιολογικού συστήματος (FERAS) της Fondazione Ugo Bordoni (FUB) - Ευρωπαϊκού Διαστημικού Οργανισμού (ESA). Στο πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές ΔΗ που επιλέχτηκαν στην συγκεκριμένη εργασία καθώς και οι παράμετροι (α,β,γ) για τους εξής τύπους νεφών: stratus – nimbostratus (Low clouds) cumulus και cumulonimbus (Clouds with Vertical Development).

Cloud Type	ΔΗ (Km)	α	β	γ
Stratus	<0.7	6	0.6	1
Nimbostratus	0.7 – 1.4	4	0.425	1
Cumulus	1.4 - 3	5 - 6	0.5	0.3 – 0.5
Cumulonimbus	>3	5 - 6	0.5	0.3 – 0.5

**Πίνακας 3.2:** Ταξινόμηση Νεφώσεων ανάλογα με τις παραμέτρους (α,β,γ) του PSD και το πάχος ΔΗ

### 3.5.3 Αλγόριθμος Ανίχνευσης Νεφώσεων ΤΚΚ

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προτάθηκε αρχικά από τους (Salonen και Urrala) με κύριο σκοπό την εκτίμηση της εξασθένησης λόγω των νεφώσεων στην περιοχή συχνοτήτων από 10 έως 300 GHz. Στην συγκεκριμένη εργασία ως είσοδοι στον αλγόριθμο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα διάρκειας 7 ετών από διάφορες τοποθεσίες της Ευρώπης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα κατακόρυφα προφίλ της θερμοκρασίας, της πίεσης και της σχετικής υγρασίας με απώτερο σκοπό να προβλεφθεί η πραγματική τιμή της απώλειας διάδοσης λόγω νεφώσεων. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χωρίζεται σε τέσσερις υπό - διαδικασίες οι οποίες θα περιγραφούν αναλυτικά πιο κάτω.

### 3.5.3.1 Υπολογισμός Σχετικής Υγρασίας $U_c$

Με την συγκεκριμένη διαδικασία μπορούμε να υπολογίσουμε νέφη σε επίπεδα ύψους, όπου η σχετική υγρασία υπερβαίνει ένα κρίσιμο κατώτατο όριο  $U_c$ , το οποίο ορίζεται ως:

$$U_c = 1 - \alpha\sigma(1-\sigma)[1+\beta(\sigma-0.5)] \quad [2]$$

Όπου:

$\alpha=1$  και  $\beta = \sqrt{3}$  και  $\sigma$ , ανάλογα είναι ο λόγος μεταξύ της πίεσης στο επίπεδο ύψους και στο επίπεδο του εδάφους που θεωρούμε. Το σημαντικό σημείο το οποίο πρέπει να προσεχτεί είναι πως, εάν η μετρούμενη υγρασία είναι υψηλότερη από την κρίσιμη τιμή ( $U_c$ ) για το ίδιο επίπεδο πίεσης, θεωρείται ότι το στρώμα που μελετούμε βρίσκεται μέσα σε ένα νέφος.

### 3.5.3.2 Υπολογισμός Περιεκτικότητας Υγρού Νερού (LWC)

Σημαντικό σε αυτό το σημείο είναι να υπολογίσουμε την περιεκτικότητα υγρού νερού – Liquid Water Content (LWC), με απλά λόγια την μάζα του νερού σε ένα νέφος ανά μονάδα όγκου αέρα. Η εκτίμηση της LWC σε κάθε επίπεδο προκύπτει από τη θερμοκρασία του αέρα  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) στο στρώμα και από την απόσταση του στρώματος από τη βάση νέφους  $h_c$  (m), σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\text{LWC} = \begin{cases} w_0 (1+cT) \left(\frac{h_c}{h_r}\right) p_w(T) & T \geq 0^{\circ}\text{C} \\ w_0 e^{cT} \left(\frac{h_c}{h_r}\right) p_w(T) & T \leq 0^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad [3]$$

$$w_0 = 0.17 \text{ (g/m}^3\text{)}, c = 0.04 \text{ (}^{\circ}\text{C}^{-1}\text{)} \text{ και } h_r = 1500 \text{ (m)}$$

### 3.5.3.3 Χαρακτηρισμός Νεφώσεων Ανάλογα Με Το Περιεχόμενο Τους( LWC – IWC)

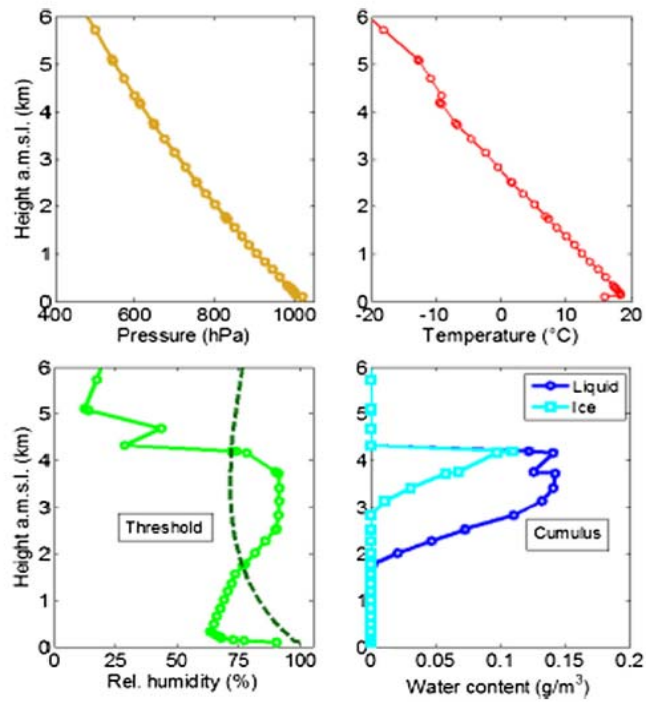
Σημαντικό σε αυτό το σημείο είναι η δυνατότητα που μας δίνει ο συγκεκριμένος αλγόριθμος μέσω της παρακάτω εξίσωσης, να μπορούμε να χαρακτηρίσουμε ένα οποιοδήποτε νέφος σε σχέση με την περιεκτικότητά του, δηλ (περιεκτικότητα υγρού νερού - LWC ή περιεκτικότητα παγωμένου νερού - IWC).

$$pw(T) = \begin{cases} 1 & T \geq 0^{\circ}C \\ 1+T/20 & -20^{\circ}C < T \leq 0^{\circ}C \\ 0 & T \leq -20^{\circ}C \end{cases} \quad [4]$$

Όπου:

Σύμφωνα και με την πιο πάνω έκφραση τα σωματίδια υγρού και πάγου νερού συνυπάρχουν όταν  $-20^{\circ}C \leq T \leq 0^{\circ}C$ , ενώ υπάρχουν μόνο σύννεφα που περιέχουν μόνο υγρό ή πάγο όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από  $0^{\circ}C$  ή χαμηλότερη από  $-20$  αντίστοιχα.

Στο πιο κάτω σχήμα παρουσιάζονται τα κατακόρυφα προφίλ δειγμάτων που εξάγονται από τη βάση δεδομένων RAOBS (συγκεκριμένα από το αεροδρόμιο Linate/ Μιλάνο της Ιταλίας) καθώς επίσης και το κατώτατο όριο υγρασίας UC. Επίσης παρουσιάζονται τα προφίλ της περιεκτικότητας υγρού νερού - LWC και παγωμένου νερού - IWC που προκύπτουν από τον αλγόριθμο TKK. Παρατηρώντας το πιο κάτω σχήμα ένα σύννεφο cumulus ταυτίζεται με ύψος βάσης και κορυφής στα 2 και 4,2 χλμ, αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.3:** Κατακόρυφα προφίλ (πίεσης, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας) που εξάγονται από μετρήσεις RAOBS που πραγματοποιήθηκαν στο αεροδρόμιο Linate/Μιλάνο. Επίσης παρουσιάζονται τα προφίλ της περιεκτικότητας υγρού νερού και παγωμένου νερού που προκύπτουν από τον αλγόριθμο TKK.



### 3.5.3.4 Υπολογισμός Συνολικής Απόσβεσης Μέσω Της θεωρίας Mie

Η θεωρία μονής (απλής) σκέδασης εφαρμόζεται συνήθως για τον υπολογισμό της εξασθένησης του νέφους από το PSD. Καθώς τα σταγονίδια εντός των νεφών είναι βασικά σφαιρικού σχήματος, οι ιδιότητες σκέδασης τους μπορούν να υπολογιστούν μέσω της θεωρίας Mie. Οι συνεισφορές μεμονωμένων σωματιδίων προστίθενται για να βρεθούν οι απώλειες που οφείλονται σε ολόκληρο τον πληθυσμό σταγονιδίων σύννεφων στη διαδρομή διάδοσης. Η θεωρία Mie ισχύει για τα σφαιρικά σταγονίδια, η οποία είναι η περίπτωση περιεκτικότητας υγρών νερού (LWC) νεφών. Η συνολική εξασθένηση υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$A_v \text{ (dB)} = 4.34 \sum_k \Delta h_{k\gamma_{l,k}} = 4.34 \sum_k \Delta h_k \int \sigma(r)n(r)dr \quad [5]$$

Όπου:

$\gamma_{l,k}$  είναι η εξασθένηση ανά μονάδα μήκους του k-ου στρώματος υγρού νέφους,  $\Delta h_k$  είναι η κατακόρυφη έκταση του στρώματος, και  $\sigma(r)$  είναι η απόσβεση της διατομή Mie για σφαίρα ακτίνας  $r$  και  $n(r)$  είναι το αντίστοιχο PSD. Το σχήμα PSD θεωρείται σταθερό σε όλο το σύννεφο (αλλά εξαρτάται από το τύπο του νέφους σύμφωνα με τον [πίνακα 3.2](#)), ενώ η συγκέντρωση σωματιδίων (δηλ. η παράμετρος  $g$  στην [Εξ.\[1\]](#)) είναι ανάλογη με το LWC κάθε στρώματος.

Όσον αφορά τα νέφη πάγου (νέφη με περιεκτικότητα παγωμένου νερού - IWC), χρησιμοποιείτε μια απλή σχέση μεταξύ του IWC (σε  $g/m^3$ ) και της εξασθένησης ανά μονάδα μήκους  $\gamma_{l,k}$ , η οποία διατηρεί το οπτικό όριο και αντιπροσωπεύει ένα μέσο όρος για τους διάφορους τύπους κρυσταλλικού σχήματος.

$$\gamma_{l,k} \text{ (dB/Km)} = 40.26 \cdot (IWCk)^{0.68} \quad [6]$$

Έτσι αντικαθιστώντας την [Εξ.\[6\]](#) στην [Εξ.\[5\]](#) μπορεί να υπολογιστεί η συνολική εξασθένηση που προκαλείτε από νέφη πάγου.

Στον [πίνακα 3.3](#) παρουσιάζεται για κάθε έναν από τους τύπους νεφών που εξετάστηκαν η συχνότητα εμφάνισης (συνυπολογίζεται η παρουσία νεφών), οι μέσες τιμές της περιεκτικότητας υγρού νερού -LWC και η σχετική εξασθένηση για κύμα με μήκος κύματος  $1,55 \mu m$ .

<b>Cloud Type</b>	<b>Frequency of occurrence (%)</b>	<b>LWC (mm)</b>	<b>Cloud attenuation (dB)</b>
Stratus	57.0	0.004	3.5
Nimbostratus	19.5	0.039	23.5
Cumulus	14.8	0.162	95.5
Cumulonimbus	8.6	0.475	280.2

**Πίνακας 3.3:** Συχνότητα εμφάνισης, μέσες τιμές LWC και εξασθένηση για διάφορους τύπους νεφώσεων που επιλέχτηκαν

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο κατανοήσαμε το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με το φαινόμενο των νεφώσεων καθώς και πως αυτές προκαλούν απόσβεση στο σήμα μας. Αφού είδαμε πόσο υψηλό ποσοστό απόσβεσης προσθέτουν τα νέφη στη ζεύξη μας, θα θεωρήσουμε πως με την παρουσία τούς και μόνων το δίκτυο μας θα βρίσκεται σε αποκοπή.

Στο Κεφάλαιο 4, θα ασχοληθούμε με την ανάλυση της διαθεσιμότητας των επίγειων οπτικών σταθμών βάσης μιας συγκεκριμένης έκτασης. Συγκεκριμένα μέσα από διάφορους αλγόριθμους οι οποίοι προτείνονται μέσα από την βιβλιογραφία θα προσπαθήσουμε να επιτύχουμε ένα συγκεκριμένο ποσοστό διαθεσιμότητας χωρίς την επίδραση των νεφώσεων.

# Κεφάλαιο 4

## Ανάλυση Διαθεσιμότητας Δικτύου Επίγειων Οπτικών Σταθμών Βάσης

### 4.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την ανάλυση διάφορων αλγορίθμων οι οποίοι προτείνονται μέσα από την βιβλιογραφία με απώτερο σκοπό να εξασφαλίσουμε ένα επιθυμητό ποσοστό κάλυψης του δικτύου μας, χωρίς την επίδραση των νεφώσεων. Αρχικά, θα παρουσιαστούν οι 2 τύποι δικτύων (συσχετισμένα, ασυσχέτιστα), έτσι ώστε να διαφανεί και η διαφορά των 2 αυτών δικτύων. Μετέπειτα θα επεξηγηθεί η διαδικασία με την οποία γίνεται η συλλογή δεδομένων και πως αυτά μπορούν να ανακτηθούν για περαιτέρω επεξεργασία. Ακολούθως θα επεξηγηθεί πως υπολογίζουμε την συνολική διαθεσιμότητα για κάθε τύπο δικτύου που αναφέραμε πιο πάνω. Στην συνέχεια, μέσα από την κατανόηση των πιο πάνω, θα αναλυθούν τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες με τις οποίους μπορούμε να υπολογίσουμε την συνολική διαθεσιμότητα ενός δικτύου επίγειων οπτικών σταθμών βάσης. Στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου μας θα πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις της μεθοδολογίας [4.5.3](#) χρησιμοποιώντας την Matlab έτσι ώστε μέσα από τα αποτελέσματα τα οποία θα εξαχθούν να διαφανεί η λειτουργικότητα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας.

### 4.2 Ορισμός Οπτικού Επίγειου Δικτύου Σταθμών Βάσης - OGS

Αρχικά θα γίνει μια ανάλυση των διάφορων σημαντικών παραμέτρων, ορολογιών που αφορούν ένα οπτικό επίγειο δίκτυο σταθμών βάσης, έτσι ώστε να γίνουν κατανοητά για την μετέπειτα μελέτη.

Ένας τυπικός ορισμός δικτύου περιλαμβάνει:

- **N:** Ο συνολικός αριθμός των σταθμών στο δίκτυο
- **M:** Απαίτηση διαθεσιμότητας, (δηλ. Ο μικρότερος αριθμός επίγειων σταθμών που θα είναι διαθέσιμοι ανά πάσα στιγμή)
- **a:** Ο αριθμός των επίγειων σταθμών που είναι πράγματι διαθέσιμη σε μια δεδομένη χρονική στιγμή
- **A:** Συνδυασμένη διαθεσιμότητα ( $M$  out-of- $N$ )
- **LOP** (Link Outage Probability): Πιθανότητα διακοπής σύνδεσης

Για παράδειγμα ένα οπτικό επίγειο δίκτυο αποτελείται από 8 ενεργούς σταθμούς ( $N = 8$ ), και υπάρχει μια απαίτηση διαθεσιμότητας τουλάχιστον 2 να είναι διαθέσιμη ανά πάσα στιγμή ( $M=2$ ). Στο τέλος, η διαθεσιμότητα  $A$  προκύπτει από το  $N$  και το  $M$ . Είναι σημαντικό να τονιστεί πως ο αριθμός των επίγειων σταθμών ο οποίος θα είναι πράγματι διαθέσιμος σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία του δικτύου μας, καθώς αυτός θα μας εξασφαλίσει την διαθεσιμότητα που ζητάμε. Ο συγκεκριμένος αριθμός θα υπολογιστεί κατά την υλοποίηση αλγορίθμου εύρεσης βέλτιστης τοποθεσίας των επίγειων σταθμών βάσης, που θα μελετήσουμε στην συνέχεια.

## 4.3 Τύποι Οπτικών Επίγειων Δικτύων Σταθμών Βάσης – OGS

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν οι 2 κύριοι τύποι των οπτικών επίγειων σταθμών βάσης που προτείνονται στο άρθρο των Christian Fuchs and Florian Moll [18] σε σχέση πάντα με την συσχέτιση των τοποθεσιών στις οποίες βρίσκονται οι σταθμοί βάσης. Πρέπει να τονιστεί πως με τον όρο “συσχέτιση τοποθεσιών”, εννοούμε την συσχέτιση των καιρικών φαινομένων της κάθε τοποθεσίας.

### 4.3.1 Ασυσχετίστο (Uncorrelated) Οπτικό Επίγειο Δίκτυο Σταθμών Βάσης

Σε αυτό τον τύπο δικτύου θεωρούμε πως οι τοποθεσίες στις οποίες βρίσκονται οι επίγειοι σταθμοί βάσης μας δεν έχουν καμία συσχέτιση μεταξύ τους (πολύ μακριά ο ένας από τον άλλο), έτσι τα μετεωρολογικά φαινόμενα της κάθε τοποθεσίας είναι ασυσχετίστα. Ο συγκεκριμένος τύπος δικτύου χωρίζεται σε 2 κατηγορίες:

- Οπτικά Επίγεια Δίκτυα Σταθμών Βάσης Με Τυχαίες Διαθεσιμότητες
- Οπτικά Επίγεια Δίκτυα Σταθμών Βάσης Με Σταθερές Διαθεσιμότητες

#### 4.3.1.1 Οπτικό Επίγειο Δίκτυο Σταθμών Βάσης Με Τυχαίες (Arbitrary) Διαθεσιμότητες

Στην συγκεκριμένη περίπτωση υποθέτουμε πως τα καιρικά φαινόμενα μεταξύ των OGS που σχηματίζουν το δίκτυο είναι ασυσχέτιστα. Έτσι η συνδυασμένη διαθεσιμότητα (A) οποιουδήποτε δεδομένου δικτύου μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά με βάση στατιστικά στοιχεία διαθεσιμότητας μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας. Η μακροπρόθεσμη διαθεσιμότητα μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας ενός OGS είναι εύκολα προσβάσιμη, αφού βασίζεται είτε σε τοπικές προγνώσεις καιρού είτε σε δορυφορικά δεδομένα. Ωστόσο, το μειονέκτημα της χρήσης αυτών των πηγών δεδομένων είναι ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η συσχέτιση μεταξύ των τοποθεσιών όλων των OGSs.

➤ Ο υπολογισμός της συνδυασμένης διαθεσιμότητας (A), παρουσιάζεται πιο κάτω:

$$A = 1 - P(0) - P(1) - \dots - P(M-1) \quad [1]$$

Όπου:

$P(a)$  είναι η πιθανότητα ότι οι  $a$  σταθμοί είναι διαθέσιμοι σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Πρέπει να τονιστεί πως με τον όρο  $p(i)$  θεωρείται η διαθεσιμότητα ενός επίγειου σταθμού με δείκτη  $i$ , και  $q_i = 1 - p_i$  θεωρείται η μη διαθεσιμότητα του.

Η πιθανότητα  $P(0)$  είναι η πιθανότητα ότι κανένας σταθμός δεν είναι διαθέσιμος, (δηλ. η ύπαρξη συννεφιασμένων συνθηκών σε όλους τους σταθμούς εδάφους, σχετίζεται με όλες τις μη διαθεσιμότητες  $q_i$ ), και υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$P(0) = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_N \quad [2]$$

Η πιθανότητα  $P(1)$  είναι η πιθανότητα ότι είναι διαθέσιμος ακριβώς ένας σταθμός. Όπως φαίνεται ο υπολογισμός του  $P(a)$  για τυχαίες τιμές του  $a$ , είναι περίπλοκος καθώς όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί διαθεσιμότητας και μη πρέπει να αξιολογηθούν. Ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών  $N_{\text{comb}}$  δίνεται από τον διωνυμικό συντελεστή  $N$  σε  $a$ . Αξιολογώντας όλους τους συνδυασμούς  $N_{\text{comb}}$ , η πιθανότητα να έχουμε ακριβώς έναν από τους τέσσερις σταθμούς ( $N=4$ ) διαθέσιμο μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$P(1) = p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 + \dots + p_4 \cdot q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \quad [3]$$

Αυτές οι πιθανότητες ( $P(0)$ ,  $P(1)$  κ.ο.κ) αφαιρούνται από το ένα (δηλ.100%), με αποτέλεσμα την πιθανότητα να είναι διαθέσιμοι τουλάχιστον  $M$  σταθμοί.

Τέλος, εάν θέλουμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα να υπάρχει τουλάχιστον ένας διαθέσιμος σταθμός εδάφους, αφαιρούμε από το ένα (δηλ.100%) όλες τις μη διαθεσιμότητες των N σταθμών, όπως φαίνεται και πιο κάτω :

$$P(1) = 1 - P(0) \quad [4]$$

#### 4.3.1.2 Οπτικό Επίγειο Δίκτυο Σταθμών Βάσης Με Σταθερές (Constant) Διαθεσιμότητες

Σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε πως η πιθανότητα να είναι διαθέσιμοι οι σταθμοί μας σε μια δεδομένη στιγμή είναι σταθερή (δηλ. οι επίγειοι σταθμοί έχουν ίσες διαθεσιμότητες σε όλες τις τοποθεσίες). Όπως φαίνεται η συγκεκριμένη περίπτωση είναι απίθανο να ισχύει στην πραγματικότητα, καθώς αποκλείεται να υπάρχουν ίσες διαθεσιμότητες για όλους τους σταθμούς. Μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ανώτερο όριο της διαθεσιμότητας του δικτύου χωρίς την επίδραση των καιρικών συσχετίσεων μεταξύ των τοποθεσιών.

Σε αυτή την περίπτωση η πιθανότητα να έχουμε ακριβώς έναν από τους τέσσερις σταθμούς (N=4) διαθέσιμο μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$P(1) = 4 \cdot p \cdot q^3 \quad [5]$$

Έτσι για N σταθμούς έχουμε:

$$P(a,N) = \binom{N}{a} \cdot p^a \cdot q^{N-a} \quad [6]$$

Όπου:

N: Συνολικός αριθμός των σταθμών στο δίκτυο

a: Ο αριθμός των επίγειων σταθμών που είναι πράγματι διαθέσιμη

Ο υπολογισμός της συνδυασμένης διαθεσιμότητας (A), φαίνεται πιο κάτω:

$$A = 1 - \sum_{a=0}^{M-1} \binom{N}{a} \cdot p^a \cdot q^{N-a} \quad [7]$$

Η πιθανότητα διακοπής σύνδεσης - LOP μπορεί να υπολογιστεί:

$$LOP = 1 - A = \sum_{a=0}^{M-1} \binom{N}{a} \cdot p^a \cdot q^{N-a} \quad [8]$$

### 4.3.2 Συσχετισμένο (Correlated) Οπτικό Επίγειο Δίκτυο Σταθμών Βάσης

Σε αυτό τον τύπο δικτύου θεωρούμε πως οι τοποθεσίες στις οποίες βρίσκονται οι επίγειοι σταθμοί βάσης μας συσχετίζονται μεταξύ τους (συσχέτιση των καιρικών φαινομένων της κάθε τοποθεσίας). Είναι αντιληπτό πως από την στιγμή που λαμβάνεται υπόψη η συσχέτιση, η εκτίμηση της διαθεσιμότητας του συνδυασμένου δικτύου γίνεται πιο δύσκολη σε σχέση με τις πιο πάνω περιπτώσεις.

Σαν πρώτο στάδιο πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής συσχέτισης  $r_{ik}$  του κάθε σταθμού για όλους τους  $N$  σταθμούς. Υπολογίζοντας όλους τους συντελεστές συσχέτισης  $r_{ik}$  των  $N$  σταθμών δημιουργείτε ένας ορθογώνιος πίνακας (πίνακας συσχέτισης) διαστάσεων  $(N \times N)$ . Ο συγκεκριμένος πίνακας έχει τις εξής ιδιότητες:

- Ο συντελεστής συσχέτισης ενός σταθμού με τον εαυτό του είναι 1, (δηλ,  $r_{i,k} = 1$  για  $i = k$ )
- Ο πίνακας είναι συμμετρικός, (άρα  $r_{ik} = r_{ki}$ )

Ένα παράδειγμα του συγκεκριμένου πίνακα φαίνεται στο πιο κάτω πίνακα:

$i,k$	1	2	3	.....	N
1	1	$r_{1,2}$	$r_{1,3}$	.....	$r_{1,N}$
2	$r_{2,1}$	1	$r_{2,3}$	.....	$r_{2,N}$
3	$r_{3,1}$	$r_{3,2}$	1	.....	$r_{3,N}$
.....	.....	.....	.....	.....	.....
N	$r_{N,1}$	$r_{N,2}$	$r_{N,3}$	.....	1

**Πίνακας 4.1:** Πίνακας συσχέτισης διαστάσεων  $N \times N$

Ακολούθως, ορίζουμε τη μέση συσχέτιση ενός δικτύου  $\bar{r}_s$  ως τη μέση τιμή των στοιχείων στο άνω τρίγωνο του πίνακα συσχέτισης, με  $\binom{N}{2}$  να είναι ο αριθμός των στοιχείων στο άνω τρίγωνο του πίνακα:

$$\overline{r_s} = \frac{1}{\binom{N}{2}} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N r_{i,k} \quad [9]$$

Επιπλέον, ορίζουμε το άθροισμα σε κάθε στήλη χωρίς  $i = k$  του πίνακα συσχέτισης ως η μέση συσχέτιση ενός μοναδικού σταθμού:

$$\overline{r_i} = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{k=1}^{N, k \neq i} r_{i,k} \quad [10]$$

## 4.4 Συλλογή Δεδομένων - Επεξεργασία Δεδομένων

Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε ένας δορυφόρος MSG (Meteosat Second Generation) GEO για την συλλογή δορυφορικών δεδομένων, λόγω της υψηλής χρονικής και χωρικής ανάλυσης. Πάνω στο δορυφόρο τοποθετήθηκε μια ειδική κάμερα - SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) [19], η οποία έχει την δυνατότητα να αποκτά εικόνες με ανάλυση  $3712 \times 3712$  pixel, ανά 15 λεπτά και χωρική ανάλυση 3 χιλιομέτρων στην κατεύθυνση NADIR.

Ακολουθώντας μέσω του MSGCLMK (Meteosat Second Generation Cloud Mask), μπορούμε να ανακτήσουμε τα δεδομένα για τα νέφη σε δυαδική μορφή (δηλ. δίνονται τιμές για συννεφιασμένες / ή μη συννεφιασμένες συνθήκες) σε επίπεδο pixel. Για παράδειγμα υποθέτουμε ότι ένα "συννεφιασμένο pixel" και ένα "pixel χωρίς την επίδραση νεφών" πως αντιστοιχούν σε ένα νέφος που έχει μια εξασθένιση που αντιστοίχως δεν μπορεί να ξεπεραστεί και να ξεπεραστεί κατά την διάρκεια ενός προϋπολογισμού ζεύξης.

Η διάρκεια της συλλογής των δεδομένων στο άρθρο που μελετήσαμε [18] ήταν πέντε έτη (2008-2012), κατά τα οποία λαμβανόταν δείγμα ανά διάστημα 15 λεπτών. Στην διατριβή μας, όμως λόγω του περιορισμένου χρονικού ορίου που είχαμε, εμείς δοκιμάσαμε για 1 ημέρα (συγκεκριμένα 4 δείγματα).

Όπως είναι αντιληπτό λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων τα οποία έχουν συλλεχτεί για το σύνολο των πέντε ετών, καθώς και λόγω της μεγάλης χρονικής και χωρικής ανάλυσης των διαθέσιμων εικόνων, απαιτείται η επεξεργασία τους για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Για να μειωθεί ο απαιτούμενος χρόνος, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν έχουν τύχει μιας προεπεξεργασίας - preprocessing δημιουργώντας μια βάση δεδομένων με μια ποσότητα  $N_{ab}$  πιθανών τοποθεσιών OGS εντός της ορατότητας του δορυφόρου MSG. Οι περιοχές έχουν επιλεγεί σύμφωνα με κριτήρια όπως, η διαθέσιμη υποδομή και η πολιτική σταθερότητα.



Ακολούθως, για κάθε OGS δημιουργήθηκε ένα διάνυσμα  $C_i$  με δυαδικά δεδομένα που αντιπροσωπεύουν την κατάσταση μιας περιοχής σχετικά με την ύπαρξη νεφώσεων (0 - χωρίς νέφη, 1 - με νέφη).  $C_j$  είναι ο δείκτης των σημείων δεδομένων  $j$ , και  $N_{\text{samples}}$  είναι ο αριθμός των διαθέσιμων σημείων δεδομένων. Το διάνυσμα  $C_i$  φαίνεται πιο κάτω:

$$C_i = [C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_{N_{\text{samples}}}] \quad [11]$$

Με την συγκεκριμένη μέθοδο επιτεύχθηκε μεγάλη μείωση των δεδομένων και απλούστερη αξιολόγηση.

Περαιτέρω, αφού δημιουργήσαμε το διάνυσμα  $C_i$ , ορίζουμε ένα πίνακα  $C$ , στον οποίο κάθε σειρά του διατηρεί τα δεδομένα σχετικά με την ύπαρξη νεφώσεων ενός OGS στο δίκτυο:

$$C = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_N \end{pmatrix} \quad [12]$$

Αφού είδαμε στο παρών υποκεφάλαιο πως μπορούμε να μειώσουμε τον απαιτούμενο χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων που συλλέχθηκαν, μέσω της μεθόδου προεπεξεργασίας, σε αυτό το σημείο θα δούμε πως μπορούμε να υπολογίσουμε την διαθεσιμότητα ασυσχέτιστου (Uncorrelated) οπτικού επίγειου δικτύου σταθμών βάσης καθώς και για συσχετισμένο (Correlated) οπτικό επίγειο δίκτυο σταθμών βάσης μέσα από μαθηματικές εκφράσεις, τις οποίες προτείνει στο άρθρο του ο Fuchs [18].

#### **4.4.1 Υπολογισμός Διαθεσιμότητας Ασυσχέτιστου (Uncorrelated) Οπτικού Επίγειου Δικτύου Σταθμών Βάσης**

Για να υπολογίσουμε τη διαθεσιμότητα του δικτύου μας χωρίς να λάβετε υπόψη η συσχέτιση μεταξύ των τοποθεσιών, πρέπει να υπολογίζεται η διαθεσιμότητα κάθε σταθμού ξεχωριστά. Έτσι η συνδυασμένη (μη συσχετισμένη) διαθεσιμότητα μπορεί στη συνέχεια να υπολογιστεί με την [Εξ.\[4\]](#).

Η μη διαθεσιμότητα ενός σταθμού μπορεί να υπολογιστεί με την άθροιση όλων των στοιχείων του διανύσματος  $C_{ij}$  για αυτόν τον σταθμό και με διαίρεση του αποτελέσματος μέσω του αριθμού των διαθέσιμων δειγμάτων για τον σταθμό όπως φαίνεται και πιο κάτω:

$$q_i = \frac{1}{N_{samples}} \sum_{j=1}^{N_{samples}} C_{ij} \quad [13]$$

Συνδυάζοντας την έκφραση  $p_i = 1 - q_i$  με την [Εξ. \[4\]](#), η πιθανότητα ότι τουλάχιστον ένας σταθμός είναι διαθέσιμος στο δίκτυο  $S$  μπορεί να γραφτεί ως:

$$P(1) = 1 - \prod_i^S \frac{1}{N_{samples}} \sum_{j=1}^{N_{samples}} C_{ij} \quad [14]$$

#### 4.4.2 Υπολογισμός Διαθεσιμότητας Συσχετισμένου (Correlated) Οπτικού Επίγειου Δικτύου Σταθμών Βάσης

Για να υπολογίσουμε τη διαθεσιμότητα του δικτύου μας λαμβάνοντας υπόψη την συσχέτιση μεταξύ των τοποθεσιών, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί ο αριθμός των διαθέσιμων σταθμών  $a_j$  για κάθε  $j$ . Αυτό θα γίνει αθροίζοντας αρχικά όλα τα σημεία δεδομένων για κάθε δείγμα χρόνου  $j$ , ώστε να υπολογίσουμε τους μη διαθέσιμους σταθμούς. Ακολούθως θα αφαιρέσουμε το αποτέλεσμα αυτό από τον αριθμό των σταθμών στο δίκτυο  $N$  όπως φαίνεται και πιο κάτω:

$$a_j = N - \sum_{i \in S} C_{ij} \quad [15]$$

Στη συνέχεια πρέπει να λάβουμε υπόψη και την απαίτηση διαθεσιμότητας  $-M$  για κάθε  $j$  όπως φαίνεται και πιο κάτω:

$$a_j^* = \begin{cases} 1 & a_j \geq M \\ 0 & a_j < M \end{cases} \quad [16]$$

Η συνολική συσχετισμένη διαθεσιμότητα του δικτύου μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$A = \frac{1}{N_{samples}} \sum_{j=1}^{N_{samples}} a_j^* \quad [17]$$

## 4.5 Μέθοδοι Υπολογισμού Διαθεσιμότητας Δικτύου Επίγειων Οπτικών Σταθμών Βάσης

Σε αυτό το σημείο θα επεξηγηθούν και θα αναλυθούν τρεις διαφορετικοί μέθοδοι με τους οποίους μπορούμε να υπολογίσουμε την συνολική διαθεσιμότητα ενός δικτύου επίγειων οπτικών σταθμών βάσης. Οι τρεις μέθοδοι που θα αναλυθούν διαφέρουν σε σχέση με το ότι σε μια από τις τρεις δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας η συσχέτιση των επίγειων σταθμών βάσης που αποτελούν το δίκτυο μας, καθώς και το ότι μπορεί να βρίσκονται σε κοντινές τοποθεσίες και έτσι να υπάρχει συσχέτιση των καιρικών φαινομένων των δυο αυτών τοποθεσιών. Πάμε όμως να δούμε αναλυτικά την κάθε μεθοδολογία ξεχωριστά.

### 4.5.1 Χρησιμοποιώντας Τη Διαθεσιμότητα Μιας Τοποθεσίας (Single-Site Availability)

Στην συγκεκριμένη μέθοδο υπολογίζετε η διαθεσιμότητα όλων των σταθμών εντός της διαθέσιμης βάσης δεδομένων και ακολούθως επιλέγονται τυχαία οι σταθμοί με τις υψηλότερες διαθεσιμότητες. Στην συγκεκριμένη μέθοδο είναι φανερό πως δεν λαμβάνεται υπόψη η συσχέτιση καθώς και το ότι μπορεί δύο σταθμοί να τοποθετηθούν σε κοντινή απόσταση, πράγμα που θα είχε ως αποτέλεσμα μειωμένη διαθεσιμότητα λόγω των συσχετίσεων των καιρικών συνθηκών και στις δύο περιοχές.

Για τον υπολογισμό της συνολικής διαθεσιμότητας με την συγκεκριμένη μεθοδολογία, θα χρησιμοποιήσουμε την [Εξ.\[4\]](#) (υπολογίζουμε την πιθανότητα να υπάρχει τουλάχιστον ένας διαθέσιμος σταθμός εδάφους), χρησιμοποιώντας όμως πρώτα την [Εξ.\[2\]](#) (πιθανότητα ότι κανένας σταθμός του δικτύου μας δεν είναι διαθέσιμος). Συνοψίζοντας ο υπολογισμός της συνδυασμένης διαθεσιμότητας (A) θα ισούται με:

$$A = P(1) = 1 - P(0)$$

#### 4.5.2 Με Τον Υπολογισμό Όλων Των Πιθανών Συνδυασμών

Αυτή η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τη συσχέτιση. Δεδομένης της προσέγγισης της προεπεξεργασίας και έχοντας ένα μειωμένο σύνολο C (δεδομένα σχετικά με την ύπαρξη νεφώσεων), ένα δίκτυο m-out-of-n μπορεί να βελτιστοποιηθεί με τη δημιουργία ενός vector  $v_j$  σύμφωνα με την [Εξ.\[16\]](#) για κάθε πιθανό συνδυασμό και μετέπειτα μεγιστοποίηση του αποτελέσματος. Αυτή η προσέγγιση λειτουργεί καλά για μικρά δίκτυα και μικρές βάσεις δεδομένων τοποθεσιών. Για μεγάλες βάσεις δεδομένων η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι αναποτελεσματική και χρονοβόρα, καθώς πρέπει να δοκιμαστούν πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί  $N_{comb}$ .

#### 4.5.3 Χρησιμοποιώντας Τη Συσχέτιση Και Τη Διαθεσιμότητα Τοποθεσίας (Using Site-Correlation And Single-Site Availability)

Με τη μέθοδο 3, η συσχέτιση μεταξύ των επίγειων σταθμών καθώς και η διαθεσιμότητα μιας τοποθεσίας χρησιμοποιείται για την προεπιλογή θέσεων ενδεχόμενων σταθμών εδάφους από την μια πλευρά και για την προεπιλογή ενδεχόμενων βέλτιστων συνδυασμών για τον υπολογισμό ενός βέλτιστου δικτύου από την άλλη πλευρά.

Για την προεπιλογή της τοποθεσίας των σταθμών εδάφους, χρησιμοποιούμε τον μέσο συντελεστή συσχέτισης των σταθμών  $\bar{r}_i$  που ορίζεται στην [Εξ.\[10\]](#) και το πολλαπλασιάζουμε με την μη διαθεσιμότητα  $q_i$  του σταθμού όπως ορίζεται στην [Εξ.\[13\]](#). Ορίζουμε το αποτέλεσμα ως παράμετρος νεφώτητας  $r_{qi}$ :

$$r_{qi} = \bar{r}_i \cdot q_i \quad [18]$$

Οι τοποθεσίες σταθμών εδάφους με μικρό  $r_{qi}$  έχουν μικρή συσχέτιση με άλλες τοποθεσίες και χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης νεφώσεων. Αν και αυτό μειώνει δραματικά την απαιτούμενη υπολογιστική προσπάθεια σε σύγκριση με τη μέθοδο βελτιστοποίησης 2, καθώς ο αριθμός σταθμών μειώνεται τα σημεία δεδομένων  $N_{samples}$  είναι αρκετά.

Για να μειωθεί περαιτέρω η υπολογιστική προσπάθεια, προεπιλέγονται ενδεχόμενοι βέλτιστοι συνδυασμοί θέσεων σταθμών. Για αυτό, πολλαπλασιάζουμε τη μέση συσχέτιση  $\bar{r}_S$  του δικτύου [Εξ.\[9\]](#) με την μη συσχετισμένη μη διαθεσιμότητα δικτύου [Εξ.\[2\]](#) όπως φαίνεται και πιο κάτω:

$$r_{q,S} = \bar{r}_S \cdot \prod_{i \in S} q_i \quad [19]$$

Με αυτή τη μέτρηση, επιλέγουμε τις  $N_q$  μικρότερες τιμές των  $r_{q,S}$  και έτσι των  $N_q$  καλύτερων συνδυασμών.

Τέλος, η διαθεσιμότητα δικτύου όλων των εναπομενόντων συνδυασμών  $N_q$  μπορεί να υπολογιστεί και ο συνδυασμός με την υψηλότερη διαθεσιμότητα θεωρείται ότι είναι ο καλύτερο OGS δίκτυο.

Συνοψίζοντας για να υπολογίσουμε τη συνολική διαθεσιμότητα ( $A$ ) ενός δικτύου οπτικών σταθμών βάσης με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία θα εκτελέσουμε τα πιο κάτω βήματα:

1. Υπολογισμός της [Εξ.\[18\]](#) για όλους τους σταθμούς. Για τον υπολογισμό της [Εξ.\[18\]](#) πρέπει να υπολογίσουμε την [Εξ.\[10\]](#) και την [Εξ.\[13\]](#) με  $N_{db} = 22$
2. Προεπιλέγουμε από τους 22 σταθμούς τους σταθμούς  $N_r = 14,15$  ή 16 με το χαμηλότερο  $r_{q,i}$  από την [Εξ.\[18\]](#)
3. Δημιουργούμε από τους σταθμούς  $N_r$  όλους τους συνδυασμούς με αριθμό σταθμών ανά συνδυασμό ( $N_{q,tot}$ ) λαμβάνοντας υπόψη τους προεπιλεγμένους αριθμούς σταθμών και τον αριθμό των σταθμών που απαιτούνται για το δίκτυο
4. Υπολογίζουμε το  $r_{q,s}$  [Εξ.\[19\]](#) για όλους τους συνδυασμούς  $N_{q,tot}$
5. Επιλέγουμε τους 10 συνδυασμούς  $N_q$  με το χαμηλότερο  $r_{q,s}$
6. Για τους συνδυασμούς  $N_q$  υπολογίζουμε από τα time series της μάσκας νέφους τη διαθεσιμότητα από την [Εξ.\[17\]](#). Για τον υπολογισμό της [Εξ.\[17\]](#) πρέπει να υπολογίσουμε την [Εξ.\[16\]](#) και την [Εξ.\[15\]](#), με απαίτηση διαθεσιμότητας  $M=1$

Ως είσοδοι στον αλγόριθμο που υλοποιήσαμε χρειαζόμαστε τα ακόλουθα δεδομένα:

- Αρχικά εισάγουμε το πλήθος των πιθανών τοποθεσιών που βρίσκονται εγκατεστημένοι οι πιθανοί σταθμοί δικτύου μας,(στην προκειμένη περίπτωση  $N_{db}=22$ )
- Ακολούθως καθορίζουμε την απαίτηση διαθεσιμότητας του δικτύου μας,(στην προκειμένη περίπτωση  $M=1$ )
- Στην συνέχεια καθορίζουμε το πλήθος των σταθμών που θα χρησιμοποιηθούν ( $N_{q,tot}$ ) (στην προκειμένη περίπτωση δοκιμάστηκαν από 3 μέχρι 12)
- Μετέπειτα μέσω της συνάρτησης που δημιουργήσαμε εισάγουμε τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρειαζόμαστε και συγκεκριμένα μέσω των αρχείων NetCDF που περιέχουν τα δεδομένα μας από την μάσκα νέφους του δορυφόρου μας (MSGCLMK (Meteosat Second Generation Cloud Mask)).

Ως έξοδοι στον αλγόριθμο παίρνουμε τα πιο κάτω:

- Υπολογίζουμε τους 10 συνδυασμούς  $N_q$  με το χαμηλότερο  $r_{q,s}$
- Για τους 10 συνδυασμούς που υπολογίσαμε, υπολογίζουμε από τα time series της μάσκας νέφους τη διαθεσιμότητα του δικτύου μας. Ο συνδυασμός με την υψηλότερη διαθεσιμότητα είναι και αυτός που επιλέγεται για την τοποθέτηση των σταθμών μας

## 4.6 Υλοποίηση Κώδικα Υπολογισμού Συνολικής Διαθεσιμότητας Ενός Δικτύου Οπτικών Επίγειων Σταθμών Βάσης Χρησιμοποιώντας Τη Συσχέτιση Και Τη Διαθεσιμότητα Τοποθεσίας (Using Site-Correlation And Single-Site Availability)

Σε αυτό το σημείο του κεφαλαίου μας θα πραγματοποιηθεί προσομοίωση τις συγκεκριμένης μεθοδολογίας χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα Matlab. Προεπιλέχτηκαν 22 πιθανές τοποθεσίες οι οποίες έχουν τύχει προεπεξεργασίας για το λόγω που αναλύεται και στο υποκεφάλαιο [4.4](#) του κεφαλαίου μας. Οι συγκεκριμένες τοποθεσίες βρίσκονται στη Γερμανία, και οι ακριβείς συντεταγμένες της κάθε τοποθεσίας (Latitude,Longitude) που έχουν προεπιλεγεί, καθώς και οι διαθεσιμότητες της κάθε τοποθεσίας παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

<b>i</b>	<b>Name Of The City</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b><math>p_i</math></b>
1	Berlin	52.52	13.40	31.6
2	Oberpfaffenhofen	48.08	11.28	31.2
3	Weilheim	47.88	11.08	33.1
4	Zugspitze	47.42	10.98	36.8
5	Wendelstein	47.7	12.01	33.2
6	Hohenpeißenberg	47.8	11	34.1
7	Lindenberg (Brandenburg)	52.20	14.13	30.2
8	Potsdam	52.40	13.06	31.3
9	Effelsberg (Bonn)	50.53	6.88	26.1
10	Königstuhl (Heidelberg)	49.4	8.72	30.3
11	Wetzell	49.14	12.88	31.2
12	Hanburg-Bergedorf	53.48	10.24	28.1
13	Neustrelitz	53.35	13.05	29.4
14	Frankfurt (Main)	50.03	8.57	30.5
15	Watzmann (Mountain)	47.56	12.92	30.1
16	Großer Arber (Mountain)	49.11	13.13	29.9
17	Fichtelberg (Ore Mountains)	50.22	12.95	26.1
18	Emden	53.37	7.20	29.8
19	Greifswald	54.08	13.38	27.8
20	Kap Arkona (Rügen island)	54.68	13.44	30.7
21	Feldberg (Black Forest)	47.87	8.00	30.1
22	Hohe Acht (Eifel)	50.39	7.01	25.1

**Πίνακας 4.2:** 22 Πιθανές Τοποθεσίες Που Προεπιλέχτηκαν

Τα βήματα για την συγκεκριμένη μεθοδολογία με την οποία υλοποιήθηκε ο κώδικας μας παρουσιάζονται και στο πιο πάνω υποκεφάλαιο. Αναλυτική περιγραφή του κώδικα μας σε περιβάλλον matlab παρουσιάζεται στο [Παράρτημα A.1](#) και [A.2](#). Πρέπει να τονιστεί πως χρειάστηκε να δημιουργήσουμε επιπλέον μια συνάρτηση, ([Παράρτημα A.3](#)) έτσι ώστε να μπορούμε να ανοίξουμε τα NetCDF αρχεία, τα οποία περιέχουν τα δεδομένα μας από την μάσκα νέφους του δορυφόρου μας (MSGCLMK (Meteosat Second Generation Cloud Mask)). Για κάθε κατάσταση σχετικά με την ύπαρξη νεφώσεων αντιπροσωπεύονται και μια τιμή, η οποία φαίνεται και στο πιο κάτω πίνακα. Στον αλγόριθμο μας όμως όπως αναφέρεται και στο υποκεφάλαιο [4.4](#) το 0 αντιπροσωπεύει την κατάσταση χωρίς νέφη και το 1 με νέφη. Έτσι και εμείς στον κώδικα μας το 1 από την μάσκα νέφους (Clear sky over land) θα μετατραπεί σε 0 και αντίστοιχα το 2 (Cloud) σε 1.

Parameter	Value	Meaning
Cloud Mask	0	Clear sky over water
	1	Clear sky over land
	2	Cloud
	3	No data

**Πίνακας 4.3:** Δεδομένα Μάσκας Νέφους

Ένα άλλο σημαντικό σημείο κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου μας ήταν η εύρεση του συντελεστή συσχέτισης  $r_{ik}$  του κάθε σταθμού για όλους τους  $N$  σταθμούς. Ο συγκεκριμένος συντελεστής υπολογίστηκε με τη χρήση της haversine φόρμουλας [20], κάνοντας χρήση του latitude και longitude του κάθε σταθμού, όπως φαίνεται πιο κάτω:

$$d = 2r \arcsin \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2 \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \quad [18]$$

Όπου:

$d$ : Απόσταση μεταξύ των ζητούμενων σταθμού

$r$ : Ακτίνα γης (6371 m)

$\varphi_1, \varphi_2$ : Latitude του σταθμού 1 και του σταθμού 2

$\lambda_1, \lambda_2$ : Longitude του σταθμού 1 και του σταθμού 2

Αφού αναλύσαμε τα σημαντικότερα σημεία τα οποία έπρεπε να προσέξουμε κατά την υλοποίηση του κώδικα μας, σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα τα οποία εξάγαμε για το δίκτυο μας. Αρχικά θα πραγματοποιήσουμε προσομοιώσεις για τους πρώτους  $N_i=14$  σταθμούς με το χαμηλότερο  $r_{gi}$ , ακολούθως για 15 και μετέπειτα για 16

σταθμούς. Ταυτόχρονα για κάθε  $N_r$  σταθμούς θα δημιουργήσουμε τούς ακόλουθους συνδυασμούς  $N_q_{tot}=(3,4,5,6,7,8,9,10,11,12)$ . Ο αριθμός  $N_q_{tot}$  ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το πλήθος των σταθμών του δικτύου που θα χρησιμοποιηθούν. Στην συνέχεια για κάθε περίπτωση  $N_r=(14,15,16)$  και  $N_q_{tot}=(3,4,5,6,7,8,9,10,11,12)$  υπολογίζουμε τους 10  $N_q$  συνδυασμούς με το χαμηλότερο  $r_{q,s}$ . Τέλος ανακτώντας τα δεδομένα της μάσκας νέφους από τα αρχεία NetCDF (4 αρχεία σύνολο), υπολογίζουμε την συνολική διαθεσιμότητα του δικτύου μας. Πάμε όμως να δούμε αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε περίπτωση. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως, οι αριθμοί που παρουσιάζονται στους πίνακες αντιστοιχούν στις τοποθεσίες του δικτύου μας που παρουσιάζονται στον [Πίνακα 4 2](#).

- Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε  $N_r=14$  σταθμούς με το χαμηλότερο  $r_{q,i}$ , και μεταβάλλουμε το πλήθος των σταθμών  $N_q_{tot}=\text{από } 3..12$ .

#### **$N_q_{tot}=3$**

Η συνολική διαθεσιμότητα  $A$  για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

Αύξων αριθμός (A/A) συνδυασμών	1ος επιλεγμένος σταθμός	2ος επιλεγμένος σταθμός	3ος επιλεγμένος σταθμός
1	9	18	21
2	9	18	22
3	9	18	12
4	9	18	14
5	9	18	10
6	9	18	15
7	9	18	20
8	9	18	4
9	9	18	5
10	9	18	6

**Πίνακας 4.4:**  $N_q$  combinations για  $N_r =14$ ,  $N_q_{tot}= 3$



**N<sub>q</sub>\_tot=4**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλεγμένος σταθμός	2ος επιλεγμένος σταθμός	3ος επιλεγμένος σταθμός	4ος επιλεγμένος σταθμός
1	9	18	21	22
2	9	18	21	12
3	9	18	21	14
4	9	18	21	10
5	9	18	21	15
6	9	18	21	20
7	9	18	21	4
8	9	18	21	5
9	9	18	21	6
10	9	18	21	2

**Πίνακας 4.5:** N<sub>q</sub> combinations για Nr =14, N<sub>q</sub>\_tot= 4

**N<sub>q</sub>\_tot=5**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθμός	2ος επιλ. σταθμός	3ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός
1	9	18	21	22	12
2	9	18	21	22	14
3	9	18	21	22	10
4	9	18	21	22	15
5	9	18	21	22	20
6	9	18	21	22	4
7	9	18	21	22	5
8	9	18	21	22	6
9	9	18	21	22	2
10	9	18	21	22	3

**Πίνακας 4.6:** N<sub>q</sub> combinations για Nr =14, N<sub>q</sub>\_tot= 5

**Nq\_tot=6**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθμός	2ος επιλ. σταθμός	3ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός	5ος επιλ. σταθμός	6ος επιλ. σταθμός
1	9	18	21	22	12	14
2	9	18	21	22	12	10
3	9	18	21	22	12	15
4	9	18	21	22	12	20
5	9	18	21	22	12	4
6	9	18	21	22	12	5
7	9	18	21	22	12	6
8	9	18	21	22	12	2
9	9	18	21	22	12	3
10	9	18	21	22	14	10

**Πίνακας 4.7:** Nq combinations για Nr =14, Nq\_tot= 6

**Nq\_tot=7**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθμός	2ος επιλ. σταθμός	3ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός	5ος επιλ. σταθμός	6ος επιλ. σταθμός	7ος επιλ. σταθμός
1	9	18	21	22	12	14	10
2	9	18	21	22	12	14	15
3	9	18	21	22	12	14	20
4	9	18	21	22	12	14	4
5	9	18	21	22	12	14	5
6	9	18	21	22	12	14	6
7	9	18	21	22	12	14	2
8	9	18	21	22	12	14	3
9	9	18	21	22	12	10	15
10	9	18	21	22	14	10	20

**Πίνακας 4.8:** Nq combinations για Nr =14, Nq\_tot= 7

**Nq\_tot=8**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθμός	2ος επιλ. σταθμός	3ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός	5ος επιλ. σταθμός	6ος επιλ. σταθμός	7ος επιλ. σταθμός	8ος επιλ. σταθμός
1	9	18	21	22	12	14	10	15
2	9	18	21	22	12	14	10	20
3	9	18	21	22	12	14	10	4
4	9	18	21	22	12	14	10	5
5	9	18	21	22	12	14	10	6
6	9	18	21	22	12	14	10	2
7	9	18	21	22	12	14	10	3
8	9	18	21	22	12	14	10	20
9	9	18	21	22	12	14	15	4
10	9	18	21	22	14	14	15	5

**Πίνακας 4.9:** Nq combinations για Nr =14, Nq\_tot= 8

**Nq\_tot=9**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμ ών	1ος επιλ. σταθμ ός	2ος επιλ. σταθμ ός	3ος επιλ. σταθμ ός	4ος επιλ. σταθμ ός	5ος επιλ. σταθμ ός	6ος επιλ. σταθμ ός	7ος επιλ. σταθμ ός	8ος επιλ. σταθμ ός	9ος επιλ. σταθμ ός
1	9	18	21	22	12	14	10	15	20
2	9	18	21	22	12	14	10	15	4
3	9	18	21	22	12	14	10	15	5
4	9	18	21	22	12	14	10	15	6
5	9	18	21	22	12	14	10	15	2
6	9	18	21	22	12	14	10	15	3
7	9	18	21	22	12	14	10	20	4
8	9	18	21	22	12	14	10	20	5
9	9	18	21	22	12	14	10	20	6
10	9	18	21	22	14	14	10	20	2

**Πίνακας 4.10:** Nq combinations για Nr =14, Nq\_tot= 9

### Nq\_tot=10

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασ μών	1ος επιλ. σταθ μός	2ος επιλ. σταθ μός	3ος επιλ. σταθ μός	4ος επιλ. σταθ μός	5ος επιλ. σταθ μός	6ος επιλ. σταθ μός	7ος επιλ. σταθ μός	8ος επιλ. σταθ μός	9ος επιλ. σταθ μός	10ος επιλ. σταθ μός
1	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4
2	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5
3	9	18	21	22	12	14	10	15	20	6
4	9	18	21	22	12	14	10	15	20	2
5	9	18	21	22	12	14	10	15	20	3
6	9	18	21	22	12	14	10	15	4	5
7	9	18	21	22	12	14	10	15	4	6
8	9	18	21	22	12	14	10	15	4	2
9	9	18	21	22	12	14	10	15	4	3
10	9	18	21	22	14	14	10	15	5	6

Πίνακας 4.11: Nq combinations για Nr =14, Nq\_tot= 10

### Nq\_tot=11

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυα σμών	1ος επιλ. σταθ μός	2ος επιλ. σταθ μός	3ος επιλ. σταθ μός	4ος επιλ. σταθ μός	5ος επιλ. σταθ μός	6ος επιλ. σταθ μός	7ος επιλ. σταθ μός	8ος επιλ. σταθ μός	9ος επιλ. σταθ μός	10ος επιλ. σταθ μός	11ος επιλ. σταθ μός
1	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5
2	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	6
3	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	2
4	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	3
5	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	6
6	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	2
7	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	3
8	9	18	21	22	12	14	10	15	20	6	2
9	9	18	21	22	12	14	10	15	20	6	3
10	9	18	21	22	14	14	10	15	20	2	3

Πίνακας 4.12: Nq combinations για Nr =14, Nq\_tot= 11

**Nq\_tot=12**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυ ασμών	1ος επιλ. στα θμός	2ος επιλ. στα θμός	3ος επιλ. στα θμός	4ος επιλ. στα θμός	5ος επιλ. στα θμός	6ος επιλ. στα θμός	7ος επιλ. στα θμός	8ος επιλ. στα θμός	9ος επιλ. στα θμός	10ος επιλ. στα θμός	11ος επιλ. στα θμός	12ος επιλ. στα θμός
1	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5	6
2	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5	2
3	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5	3
4	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	6	2
5	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	6	3
6	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	2	3
7	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	6	2
8	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	6	3
9	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	2	3
10	9	18	21	22	14	14	10	15	20	6	2	3

**Πίνακας 4.13:** Nq combinations για Nr =14, Nq\_tot= 12

- Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε  $N_r=15$  σταθμούς με το χαμηλότερο  $r_i$ , και μεταβάλλουμε το πλήθος των σταθμών  $N_{q\_tot}$  από 3..12.

### **$N_{q\_tot}=3$**

Η συνολική διαθεσιμότητα  $A$  για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

Αύξων αριθμός (A/A) συνδυασμών	1ος επιλεγμένος σταθμός	2ος επιλεγμένος σταθμός	3ος επιλεγμένος σταθμός
1	9	18	21
2	9	18	22
3	9	18	12
4	9	18	14
5	9	18	10
6	9	18	15
7	9	18	20
8	9	18	4
9	9	18	5
10	9	18	6

**Πίνακας 4.14:**  $N_q$  combinations για  $N_r =15$ ,  $N_{q\_tot}= 3$

### **$N_{q\_tot}=4$**

Η συνολική διαθεσιμότητα  $A$  για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλεγμένος σταθμός	2ος επιλεγμένος σταθμός	3ος επιλεγμένος σταθμός	4ος επιλεγμένος σταθμός
1	9	18	21	22
2	9	18	21	12
3	9	18	21	14
4	9	18	21	10
5	9	18	21	15
6	9	18	21	20
7	9	18	21	4
8	9	18	21	5
9	9	18	21	6
10	9	18	21	2

**Πίνακας 4.15:**  $N_q$  combinations για  $N_r =15$ ,  $N_{q\_tot}= 4$

**Nq\_tot=5**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθμός	2ος επιλ. σταθμός	3ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός
1	9	18	21	22	12
2	9	18	21	22	14
3	9	18	21	22	10
4	9	18	21	22	15
5	9	18	21	22	20
6	9	18	21	22	4
7	9	18	21	22	5
8	9	18	21	22	6
9	9	18	21	22	2
10	9	18	21	22	3

**Πίνακας 4.16:** Nq combinations για Nr =15, Nq\_tot= 5

**Nq\_tot=6**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθμός	2ος επιλ. σταθμός	3ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός	5ος επιλ. σταθμός	6ος επιλ. σταθμός
1	9	18	21	22	12	14
2	9	18	21	22	12	10
3	9	18	21	22	12	15
4	9	18	21	22	12	20
5	9	18	21	22	12	4
6	9	18	21	22	12	5
7	9	18	21	22	12	6
8	9	18	21	22	12	2
9	9	18	21	22	12	3
10	9	18	21	22	12	19

**Πίνακας 4.17:** Nq combinations για Nr =15, Nq\_tot= 6

**N<sub>q</sub>\_tot=7**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθμός	2ος επιλ. σταθμός	3ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός	5ος επιλ. σταθμός	6ος επιλ. σταθμός	7ος επιλ. σταθμός
1	9	18	21	22	12	14	10
2	9	18	21	22	12	14	15
3	9	18	21	22	12	14	20
4	9	18	21	22	12	14	4
5	9	18	21	22	12	14	5
6	9	18	21	22	12	14	6
7	9	18	21	22	12	14	2
8	9	18	21	22	12	14	3
9	9	18	21	22	12	14	19
10	9	18	21	22	12	10	15

**Πίνακας 4.18:** N<sub>q</sub> combinations για N<sub>r</sub> =15, N<sub>q</sub>\_tot= 7

**N<sub>q</sub>\_tot=8**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθμός	2ος επιλ. σταθμός	3ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός	5ος επιλ. σταθμός	6ος επιλ. σταθμός	7ος επιλ. σταθμός	8ος επιλ. σταθμός
1	9	18	21	22	12	14	10	15
2	9	18	21	22	12	14	10	20
3	9	18	21	22	12	14	10	4
4	9	18	21	22	12	14	10	5
5	9	18	21	22	12	14	10	6
6	9	18	21	22	12	14	10	2
7	9	18	21	22	12	14	10	3
8	9	18	21	22	12	14	10	19
9	9	18	21	22	12	14	15	20
10	9	18	21	22	14	14	15	4

**Πίνακας 4.19:** N<sub>q</sub> combinations για N<sub>r</sub> =15, N<sub>q</sub>\_tot= 8



**Nq\_tot=9**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμ ών	1ος επιλ. σταθμ ός	2ος επιλ. σταθμ ός	3ος επιλ. σταθμ ός	4ος επιλ. σταθμ ός	5ος επιλ. σταθμ ός	6ος επιλ. σταθμ ός	7ος επιλ. σταθμ ός	8ος επιλ. σταθμ ός	9ος επιλ. σταθμ ός
1	9	18	21	22	12	14	10	15	20
2	9	18	21	22	12	14	10	15	4
3	9	18	21	22	12	14	10	15	5
4	9	18	21	22	12	14	10	15	6
5	9	18	21	22	12	14	10	15	2
6	9	18	21	22	12	14	10	15	3
7	9	18	21	22	12	14	10	15	19
8	9	18	21	22	12	14	10	20	4
9	9	18	21	22	12	14	10	20	5
10	9	18	21	22	14	14	10	20	6

**Πίνακας 4.20:** Nq combinations για Nr =15, Nq\_tot= 9

**Nq\_tot=10**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασ μών	1ος επιλ. σταθ μός	2ος επιλ. σταθ μός	3ος επιλ. σταθ μός	4ος επιλ. σταθ μός	5ος επιλ. σταθ μός	6ος επιλ. σταθ μός	7ος επιλ. σταθ μός	8ος επιλ. σταθ μός	9ος επιλ. σταθ μός	10ος επιλ. σταθ μός
1	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4
2	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5
3	9	18	21	22	12	14	10	15	20	6
4	9	18	21	22	12	14	10	15	20	2
5	9	18	21	22	12	14	10	15	20	3
6	9	18	21	22	12	14	10	15	20	19
7	9	18	21	22	12	14	10	15	4	5
8	9	18	21	22	12	14	10	15	4	6
9	9	18	21	22	12	14	10	15	4	2
10	9	18	21	22	14	14	10	15	4	3

**Πίνακας 4.21:** Nq combinations για Nr =15, Nq\_tot= 10

**Nq\_tot=11**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθ μός	2ος επιλ. σταθ μός	3ος επιλ. σταθ μός	4ος επιλ. σταθ μός	5ος επιλ. σταθ μός	6ος επιλ. σταθ μός	7ος επιλ. σταθ μός	8ος επιλ. σταθ μός	9ος επιλ. σταθ μός	10ος επιλ. σταθ μός	11ος επιλ. σταθ μός
1	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5
2	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	6
3	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	2
4	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	3
5	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	19
6	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	6
7	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	3
8	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	3
9	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	19
10	9	18	21	22	14	14	10	15	20	6	2

**Πίνακας 4.22:** Nq combinations για Nr =15, Nq\_tot= 11

**Nq\_tot=12**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθ μός	2ος επιλ. σταθ μός	3ος επιλ. σταθ μός	4ος επιλ. σταθ μός	5ος επιλ. σταθ μός	6ος επιλ. σταθ μός	7ος επιλ. σταθ μός	8ος επιλ. σταθ μός	9ος επιλ. σταθ μός	10ος επιλ. σταθ μός	11ος επιλ. σταθ μός	12ος επιλ. σταθ μός
1	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5	6
2	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5	2
3	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5	3
4	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5	19
5	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	6	2
6	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	6	3
7	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	6	19
8	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	2	3
9	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	2	19
10	9	18	21	22	14	14	10	15	20	6	3	19

**Πίνακας 4.23:** Nq combinations για Nr =15, Nq\_tot= 12

- Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε  $N_r=16$  σταθμούς με το χαμηλότερο  $r_{q_i}$ , και μεταβάλλουμε το πλήθος των σταθμών  $N_{q\_tot}$  από 3..12.

### **$N_{q\_tot}=3$**

Η συνολική διαθεσιμότητα  $A$  για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

Αύξων αριθμός (A/A) συνδυασμών	1ος επιλεγμένος σταθμός	2ος επιλεγμένος σταθμός	3ος επιλεγμένος σταθμός
1	9	18	21
2	9	18	22
3	9	18	12
4	9	18	14
5	9	18	10
6	9	18	15
7	9	18	20
8	9	18	4
9	9	18	5
10	9	18	6

**Πίνακας 4.24:**  $N_q$  combinations για  $N_r = 16$ ,  $N_{q\_tot} = 3$

### **$N_{q\_tot}=4$**

Η συνολική διαθεσιμότητα  $A$  για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλεγμένος σταθμός	2ος επιλεγμένος σταθμός	3ος επιλεγμένος σταθμός	4ος επιλεγμένος σταθμός
1	9	18	21	22
2	9	18	21	12
3	9	18	21	14
4	9	18	21	10
5	9	18	21	15
6	9	18	21	20
7	9	18	21	4
8	9	18	21	5
9	9	18	21	6
10	9	18	21	2

**Πίνακας 4.25:**  $N_q$  combinations για  $N_r = 16$ ,  $N_{q\_tot} = 4$

**Nq\_tot=5**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθμός	2ος επιλ. σταθμός	3ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός
1	9	18	21	22	12
2	9	18	21	22	14
3	9	18	21	22	10
4	9	18	21	22	15
5	9	18	21	22	20
6	9	18	21	22	4
7	9	18	21	22	5
8	9	18	21	22	6
9	9	18	21	22	2
10	9	18	21	22	3

**Πίνακας 4.26:** Nq combinations για Nr =16, Nq\_tot= 5

**Nq\_tot=6**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθμός	2ος επιλ. σταθμός	3ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός	5ος επιλ. σταθμός	6ος επιλ. σταθμός
1	9	18	21	22	12	14
2	9	18	21	22	12	10
3	9	18	21	22	12	15
4	9	18	21	22	12	20
5	9	18	21	22	12	4
6	9	18	21	22	12	5
7	9	18	21	22	12	6
8	9	18	21	22	12	2
9	9	18	21	22	12	3
10	9	18	21	22	12	19

**Πίνακας 4.27:** Nq combinations για Nr =16, Nq\_tot= 6

**Nq\_tot=7**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθμός	2ος επιλ. σταθμός	3ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός	5ος επιλ. σταθμός	6ος επιλ. σταθμός	7ος επιλ. σταθμός
1	9	18	21	22	12	14	10
2	9	18	21	22	12	14	15
3	9	18	21	22	12	14	20
4	9	18	21	22	12	14	4
5	9	18	21	22	12	14	5
6	9	18	21	22	12	14	6
7	9	18	21	22	12	14	2
8	9	18	21	22	12	14	3
9	9	18	21	22	12	14	19
10	9	18	21	22	12	14	7

**Πίνακας 4.28:** Nq combinations για Nr =16, Nq\_tot= 7

**Nq\_tot=8**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθμός	2ος επιλ. σταθμός	3ος επιλ. σταθμός	4ος επιλ. σταθμός	5ος επιλ. σταθμός	6ος επιλ. σταθμός	7ος επιλ. σταθμός	8ος επιλ. σταθμός
1	9	18	21	22	12	14	10	15
2	9	18	21	22	12	14	10	20
3	9	18	21	22	12	14	10	4
4	9	18	21	22	12	14	10	5
5	9	18	21	22	12	14	10	6
6	9	18	21	22	12	14	10	2
7	9	18	21	22	12	14	10	3
8	9	18	21	22	12	14	10	19
9	9	18	21	22	12	14	10	7
10	9	18	21	22	14	14	15	20

**Πίνακας 4.29:** Nq combinations για Nr =16, Nq\_tot= 8

**N<sub>q\_tot</sub>=9**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμ ών	1ος επιλ. σταθμ ός	2ος επιλ. σταθμ ός	3ος επιλ. σταθμ ός	4ος επιλ. σταθμ ός	5ος επιλ. σταθμ ός	6ος επιλ. σταθμ ός	7ος επιλ. σταθμ ός	8ος επιλ. σταθμ ός	9ος επιλ. σταθμ ός
1	9	18	21	22	12	14	10	15	20
2	9	18	21	22	12	14	10	15	4
3	9	18	21	22	12	14	10	15	5
4	9	18	21	22	12	14	10	15	6
5	9	18	21	22	12	14	10	15	2
6	9	18	21	22	12	14	10	15	3
7	9	18	21	22	12	14	10	15	19
8	9	18	21	22	12	14	10	15	7
9	9	18	21	22	12	14	10	20	4
10	9	18	21	22	14	14	10	20	5

**Πίνακας 4.30:** N<sub>q</sub> combinations για Nr =16, N<sub>q\_tot</sub>= 9

**N<sub>q\_tot</sub>=10**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασ μών	1ος επιλ. σταθ μός	2ος επιλ. σταθ μός	3ος επιλ. σταθ μός	4ος επιλ. σταθ μός	5ος επιλ. σταθ μός	6ος επιλ. σταθ μός	7ος επιλ. σταθ μός	8ος επιλ. σταθ μός	9ος επιλ. σταθ μός	10ος επιλ. σταθ μός
1	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4
2	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5
3	9	18	21	22	12	14	10	15	20	6
4	9	18	21	22	12	14	10	15	20	2
5	9	18	21	22	12	14	10	15	20	3
6	9	18	21	22	12	14	10	15	20	19
7	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5
8	9	18	21	22	12	14	10	15	4	7
9	9	18	21	22	12	14	10	15	4	5
10	9	18	21	22	14	14	10	15	4	6

**Πίνακας 4.31:** N<sub>q</sub> combinations για Nr =16, N<sub>q\_tot</sub>= 10

**Nq\_tot=11**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθ μός	2ος επιλ. σταθ μός	3ος επιλ. σταθ μός	4ος επιλ. σταθ μός	5ος επιλ. σταθ μός	6ος επιλ. σταθ μός	7ος επιλ. σταθ μός	8ος επιλ. σταθ μός	9ος επιλ. σταθ μός	10ος επιλ. σταθ μός	11ος επιλ. σταθ μός
1	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5
2	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	6
3	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	2
4	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	3
5	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	19
6	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	7
7	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	6
8	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	2
9	9	18	21	22	12	14	10	15	20	5	3
10	9	18	21	22	14	14	10	15	20	5	19

**Πίνακας 4.32:** Nq combinations για Nr =16, Nq\_tot= 11

**Nq\_tot=12**

Η συνολική διαθεσιμότητα A για τους παρακάτω συνδυασμούς ισούται με: 1

(A/A) συνδυασμών	1ος επιλ. σταθ μός	2ος επιλ. σταθ μός	3ος επιλ. σταθ μός	4ος επιλ. σταθ μός	5ος επιλ. σταθ μός	6ος επιλ. σταθ μός	7ος επιλ. σταθ μός	8ος επιλ. σταθ μός	9ος επιλ. σταθ μός	10ος επιλ. σταθ μός	11ος επιλ. σταθ μός	12ος επιλ. σταθ μός
1	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5	6
2	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5	2
3	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5	3
4	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5	19
5	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	5	7
6	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	6	2
7	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	6	3
8	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	6	19
9	9	18	21	22	12	14	10	15	20	4	6	7
10	9	18	21	22	14	14	10	15	20	4	2	3

**Πίνακας 4.33:** Nq combinations για Nr =16, Nq\_tot= 12

### **Παρατηρήσεις:**

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα και για τρία  $N_r$  (14,15,16) που χρησιμοποιήθηκαν μπορούμε να πούμε πως κάθε φορά που αυξάναμε το  $N_q$ \_tot προστίθεται και ένας καινούργιος σταθμός στους  $N_q$  συνδυασμούς μας. Για παράδειγμα για  $N_r = 14$  και  $N_q$ \_tot = 4 προστίθεται ο σταθμός 2 στους συνδυασμούς, ενώ για  $N_q$ \_tot = 3 δεν υπήρχε. Όσον αφορά την διαθεσιμότητα (A) και στα 9  $N_q$ \_tot (3...12) που δοκιμάστηκαν καθώς και στα 3  $N_r$ =(14,15,16) παραμένει 1. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται στο γεγονός ότι οι καιρικές συνθήκες στη Γερμανία δεν επιτρέπουν επαρκή αντίθεση μεταξύ των τοποθεσιών των επίγειων σταθμών.

Επίσης θα αναμέναμε πως μεταβάλλοντας το  $N_q$  και κρατώντας σταθερό το  $N_r$  η συγκεκριμένη μέθοδος θα ήταν ευαίσθητη στον αριθμό των προεπιλεγμένων συνδυασμών  $N_q$ . Από τα αποτελέσματα μας, όμως δεν φαίνονται οι συγκεκριμένες παρατηρήσεις. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο περιορισμένο αριθμό αρχείων NetCDF που τρέξαμε τα οποία περιέχουν τα δεδομένα μας από την μάσκα νέφους του δορυφόρου μας.



# Κεφάλαιο 5

## Συμπεράσματα – Μελλοντική Έρευνα

### 5.1 Συμπεράσματα

Όπως παρατηρήσαμε και στην συγκεκριμένη διατριβή οι οπτικές δορυφορικές επικοινωνίες αποτελούν λύση στην κάλυψη των μελλοντικών απαιτήσεων των χρηστών σχετικά με το εύρος ζώνης καθώς και το διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης διάφορων εφαρμογών, με τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν έναντι των ραδιοσυχνοτήτων (ψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης, μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων, πιο ασφαλής κτλ.). Παρόλα όμως τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν, στο [κεφάλαιο 2](#) είδαμε το ποσοστό επίδρασης που είχε πάνω στην λαμβανόμενη ισχύς το φαινόμενο του στροβιλισμού (κυρίως το IRT - Index-of-refraction Turbulence) και το beam-wander τα οποία θεωρούνται από τις κύριες διαταραχές στο οπτικό μας κανάλι. Επίσης είδαμε την επίπτωση που είχαμε με το φαινόμενο του σπινθηρισμού. Μια εφικτή λύση στα πιο πάνω είναι η χρήση τεχνικών προ-παραμόρφωσης (PAO) συνδυάζοντας της με τη χρήση πολυωνύμων Zernike. Ο λόγος ο οποίος είναι τόσο σημαντικά τα συγκεκριμένα πολυώνυμα οφείλεται στο γεγονός πως καθιστούν την πιο βολική αναπαράσταση της φάση των κυμάτων, καθώς μπορούν να συσχετιστούν με τις κλασικές εκτροπές στα οπτικά συστήματα. Σαν παράδειγμα ο πρώτος τρόπος λειτουργίας Zernike αντιπροσωπεύει την επίδραση της μέσης τιμής ενός κυκλικού ανοίγματος λήψης. Ακολουθώντας οι επόμενοι δυο τρόποι λειτουργίας αντιπροσωπεύουν την κάθετη και οριζόντια κλίση του εισερχόμενου κύματος, τα οποία μαζί δίνουν την γωνιά άφιξης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση του φαινομένου του beam wander στην ανερχόμενη ζεύξη. Πρέπει να τονιστεί όμως πως υψηλότεροι τρόποι λειτουργίας δηλαδή υψηλότερες χωρικές συχνότητες, δημιουργούν σπινθηρισμούς. Και εδώ είναι που χρησιμοποιείται η τεχνική προ-παραμόρφωσης (PAO), στην δέσμη λέιζερ της ανερχόμενης ζεύξης, καθώς έτσι μπορούμε να διορθώσουμε φαινόμενα σπινθηρισμού.

Ακολούθως παρατηρήσαμε πως οι οπτικές δορυφορικές επικοινωνίες είναι πολύ ευαίσθητες στα καιρικά φαινόμενα και ειδικότερα στα νέφη. Στο [κεφάλαιο 3](#) παρουσιάστηκε η επίδραση του συγκεκριμένου φαινομένου καθώς και το μέγεθος της συνολικής απόσβεσης που προσθέτουν τα νέφη πάνω στο μεταδιδόμενο μας σήμα μέσω του αλγόριθμου που αναφέρθηκε.

Κλείνοντας, στο [κεφάλαιο 4](#) μέσω του κώδικα που υλοποιήσαμε για τον υπολογισμό της συνολικής διαθεσιμότητας ενός δικτύου 22 οπτικών επίγειων σταθμών βάσης οι οποίοι βρίσκονταν στην Γερμανία πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις  $N_r=14,15,16$  με τους ακόλουθους συνδυασμούς  $N_q_{tot}=(3,4,5,6,7,8,9,10,11,12)$  για κάθε  $N_r$ . Τέλος υπολογίσαμε τους 10  $N_q$  συνδυασμούς με το χαμηλότερο  $g_{q,s}$  και ανακτώντας τα δεδομένα από τα αρχεία μας (NetCDF) υπολογίσαμε την συνολική διαθεσιμότητα του κάθε δικτύου. Σαν γενικό συμπέρασμα αναμέναμε πως η διαθεσιμότητα  $A$  θα για κάθε συνδυασμό που δοκιμάστηκε δεν θα παρέμεινε ίδια ( $A=1$ ). Αυτό ουσιαστικά μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι οι καιρικές συνθήκες στη Γερμανία δεν επιτρέπουν επαρκή αντίθεση μεταξύ των τοποθεσιών των επίγειων σταθμών.

## 5.2 Μελλοντική Έρευνα

Όσον αφορά για μελλοντική έρευνα θα μπορούσε στο [κεφάλαιο 2](#) όπου πραγματοποιήθηκε ο προϋπολογισμός ισχύος να χρησιμοποιήσουμε υψηλότερους τρόπους λειτουργίας Zernikke (πχ  $N=100$ ) για να διαφανεί καλύτερα η επίδραση τους. Επίσης θα μπορούσαμε να δοκιμάσουμε για διάφορες τιμές διαμέτρου ανοίγματος τηλεσκοπίου πομπού  $D_t$  και όχι μόνο για 30 cm που δοκιμάσαμε. Τέλος θα μπορούσαν να δοκιμαστούν περισσότερα υψόμετρα στα οποία βρίσκονται οι οπτικοί επίγειοι σταθμοί βάσης.

Ακολούθως στο [κεφάλαιο 4](#) θα μπορούσαν να δοκιμαστούν περισσότερα NetCDF αρχεία και όχι μόνο για μια μέρα, έτσι ώστε να εξαχθούν πιο ακριβής αποτελέσματα. Επίσης εισήγηση για μελλοντική έρευνα είναι η δοκιμή περισσότερων από 22 σταθμών που δοκιμάστηκαν, καθώς και το εύρος του δικτύου σε έκταση θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερο (πχ Πανευρωπαϊκό).

# Παράρτημα Α

## Υλοποίηση Κώδικα Υπολογισμού Συνολικής Διαθεσιμότητας Ενός Δικτύου Οπτικών Επίγειων Σταθμών Βάσης

### A.1 Υλοποίηση Κώδικα για την εύρεση των συνδυασμών των σταθμών βάσης που αποτελούν το δίκτυο μας

```
clear all
N=22; % συνολικός αριθμός σταθμών στο δίκτυο

radius=6371; % ακτίνα γης
M=1; % απαίτηση διαθεσιμότητας
Data=xlsread('lat-lon.xlsx'); % εντολή με την οποία διαβάζουμε το συγκεκριμένο
αρχείο το οποίο περιέχει τα lat. και lon. των 22 τοποθεσιών

Lat1=Data(:,1); % αντιστοίχιση της πρώτης στήλης του αρχείου στα Lat.

Lon1=Data(:,2); % αντιστοίχιση της πρώτης στήλης του αρχείου στα Lon.

Lat=Lat1.*pi./180; % μετατροπή από μοίρες σε ακτίνια των Lat.

Lon=Lon1.*pi./180; % μετατροπή από μοίρες σε ακτίνια των Lon.

% Υπολογισμός Αποστάσεων Χρησιμοποιώντας την haversine φόρμουλα

for i=1:N
```

```

        d1(i,:)=(sin((Lat(i)-
Lat)./2)).^2+cos(Lat(i)).*cos(Lat).*((sin((Lon(i)-Lon)./2)).^2);

        %end
    end
    d=radius*2*atan2(sqrt(d1),sqrt(1-d1));
    xlswrite('Lat_Lon.xlsx',d); %αποθήκευση των αποστάσεων που προέκυψαν από την
    haversine formula (22x22 πίνακας)

    Sum_d=zeros(1,N);

    %υπολογισμός αθροίσματος όλου του πίνακα
    for i=1:N
        dtemp=0.35*exp(-d(i,)./7.8)+0.65*exp(-d(i,)./225.3);
        Sum_d(i)=Sum_d(i)+sum(dtemp);
    end

    xlswrite('SUMMMMMM.xlsx',Sum_d);
    save('SUMMM.mat','Sum_d')

    r_dot=(1/(N-1))*Sum_d; %Υπολογισμός  $\bar{r}$ 

    xlswrite('R_DOT.xlsx',r_dot);

    Nfiles=4; %τα συνολικά NetCDF αρχεία τα οποία θα διαβάσουμε

    for i=1:N %διαβάζεις όλους τους σταθμούς
        data111=['clm_',num2str(i),'.csv'];

        for j=1:Nfiles %διαβάζεις όλα τα αρχεία
            hr=0;
            filename=['W_XX-EUMETSAT
Darmstadt,SING+LEV+SAT,MSG2+CLM_C_EUMG_20101208',num2str(hr,'%02d'),num2str((
j-1)*15,'%02d'),'00.nc']
            %εντολή με την οποία θέλω να διαβάζω μόνο τα συγκεκριμένα αρχεία που
            αρχίζουν από(20101208) και τελειώνουν σε 00 και ανά δεκαπεντάλεπτο

            clm(j)=read_clm(filename,Lat(i),Lon(i)); %συνάρτηση με την οποία μπορώ να
            ανοίξω τα αρχεία NetCDF

            end
            dlmwrite(data111,clm)
            CLM_SAVE(i,:)=clm;
        end
    end

    dlmwrite('CLM_SAVE.csv',CLM_SAVE)

    Sum_C=zeros(1,N);
    clm=CLM_SAVE;
    Q_C = 0;
    cij=zeros(N,Nfiles);
    for i=1:N

```

```

% for j=1:Nfiles

    ctemp_t=clm(i,:);
    pp=find(ctemp_t==3)

    ctemp_t(pp)=[];
    if not(isempty(ctemp_t))

        ctemp_t(ctemp_t==1)=0; %no cloud
        ctemp_t(ctemp_t==2)=1; %cloud

        cij(i,:)=ctemp_t;

        Q_C(i)=mean(ctemp_t);
    else
        Q_C(i)= 1;
    end
% end
end

RQi=r_dot.*Q_C; %Υπολογισμός rqi

%%RQI vector 1xN (Nx1)

[Rnew,Isort_tot] = sort(RQi);
Isort=Isort_tot(1:15); %%δείκτες σταθμών (Προεπιλέγουμε από τους 22 σταθμούς
τους 15 σταθμούς με το χαμηλότερο rqi)

Comb=nchoosek(Isort,12); %%δείκτες σταθμών για όλους τους πιθανούς
συνδυασμούς (δημιουργία δωδεκάδων)

for ii=1:size(Comb,1) %%αφορά σε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς
comb_1=Comb(ii,:); %%δείκτες σταθμών για το συνδυασμό με αριθμό ii

%υπολογισμός αθροίσματος για τα comb_1
d_new=0.35*exp(-d(comb_1,comb_1)/7.8)+0.65*exp(-d(comb_1,comb_1)/225.3);
Qrs=1;
Sumrs=0;
for i=1:size(comb_1,2)-1 %% αφορά τους σταθμούς που είναι στο comb_1 i->
ο stathmos me index comb_1(i)
    for j= i+1:size(comb_1,2);
        Sumrs=Sumrs+d_new(i,j);
    end
Qrs=Qrs*Q_C(comb_1(i));

end
Qrs=Qrs*Q_C(comb_1(end));

```

```

    factor=factorial(12)/(factorial(10)*factorial(2)); %υπολογισμός factorial
    που υπάρχει στον τύπο του  $\bar{r}_s$ 

    rs=1/factor*Sumrs; %υπολογισμός  $\bar{r}_s$ 

    rqs(ii)=rs*Qrs; %υπολογισμός rq,s
end

[Rnew2,Isort_tot2] = sort(rqs);%ταξινομούμαι τους σταθμούς μας σε φθίνουσα
σειρά
Isort2=Isort_tot2(1:10);%επιλέγουμε τους 10 σταθμούς με το χαμηλότερο rq,s

Comb_final=Comb(Isort2,:)% εμφάνιση των 10 συνδυασμών που δημιουργήθηκαν
(δωδεκάδες)

```

## A.2 Υλοποίηση Κώδικα Για Τον Υπολογισμό Της Συνολικής Διαθεσιμότητας Του Δικτύου Μας

```

%κώδικας για τον υπολογισμό της συνολικής διαθεσιμότητας του δικτύου μας
for ii=1:size(Comb_final,1)
    sumCij=zeros(4,1);
    for i=1:Nfiles
        for j=1:size(Comb_final,2)
            sumCij(i)=sumCij(i)+cij(Comb_final(ii,j),i); %άθροισμα όλων των
στοιχείων του cij (no cloud - 0) για κάθε αρχείο
        end
    end
    for i=1:Nfiles
        aj(i)= N - sumCij(i); %υπολογισμός του aj για κάθε αρχείο
    end
    dlmwrite('sumcil_.csv',sumCij);

    dlmwrite('aj_.csv',aj);

    for i=1:Nfiles
        if ge(aj(i),M) %εάν το aj > M=1
            aj(i)=1; %το aj = 1
        else
            aj(i)=0; %αλλιώς το aj = 0
        end
    end

    A(ii) = mean(aj); %υπολογισμός συνολικής διαθεσιμότητας A του δικτύου
End

```

## A.3 Υλοποίηση Κώδικα Για Την Δημιουργία Συνάρτησης Με την Οποία Ανοίγουμε Τα αρχεία NetCDF

```
function clm=read_clm(file_name,latitude,longitude)
% % input: file_name: the name of the netcdf file
% % latitude; the latitude of the station
% % longitude: the longitude of the station
ncid=netcdf.open(file_name,'nc_nowrite');
lat=double(netcdf.getVar(ncid,1));
lon=double(netcdf.getVar(ncid,2));
clmask=double(netcdf.getVar(ncid,0));

P = [longitude,latitude];

RE = 6371; % Radius of Earth

% Convert the array of lat/lon coordinates to Cartesian vectors
% NOTE: sph2cart expects radians
% NOTE: use radius 1, so we don't have to normalize the vectors
[X,Y,Z] = sph2cart( lon*pi/180, lat*pi/180, 1);

% Same for your point of interest
[xP,yP,zP] = sph2cart(P(1)*pi/180, P(2)*pi/180, 1);

% The minimum distance, and the linear index where that distance was found
% NOTE: force the dot product into the interval [-1 +1]. This prevents
% slight overshoots due to numerical artifacts
dotProd = xP*X(:) + yP*Y(:) + zP*Z(:);
[minDist, index] = min( RE*acos( min(max(-1,dotProd),1) ) );

% Convert that linear index to 2D subscripts
[ii,jj] = ind2sub(size(lon), index);
clm=clmask(ii,jj);
return
```

# Βιβλιογραφία

- [1] Nicolas PERLOT, Thomas DREISCHER, Carl M. WEINERT, Josep PERDIGUES, "Optical GEO Feeder Link Design," in *Future Network & Mobile Summit 2012*, Berlin, 2012, p. 8.
- [2] Wikimedia Foundation, Inc. (2016, October) Wikipedia. [Online]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Radio\\_spectrum](https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum)
- [3] ITU-R, "Prediction methods required for the design of Earth-space system," in *RECOMMENDATION ITU-R P.1622*, 2003, p. 11.
- [4] Δημοσθένης Βουγιούκας, *Δορυφορικές Επικοινωνίες*, 1st ed. Αθήνα, Ελλάδα: Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγράμματα Και Βοηθήματα, 2015.
- [5] ITU-R, "Propagation data required for the design of Earth-space systems operating between 20 THz and 375 THz," in *RECOMMENDATION ITU-R P.1621-2*, Geneva, 2015, p. 15.
- [6] ATHANASIOS D. PANAGOPOULOS, PANTELIS-DANIEL M. ARAPOGLOU, PANAYOTIS G. COTTIS, "Satellite communications at KU, KA, and V bands: Propagation impairments and mitigation techniques," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 6, no. 3, p. 14, April 2004.
- [7] Svilen Dimitrov, Ricardo Barrios, Balazs Matuz, Gianluigi Liva, Ramon Mata-Calvo, Dirk Giggenbach, "Digital modulation and coding for satellite optical feeder links," *INTERNATIONAL JOURNAL OF SATELLITE COMMUNICATIONS AND NETWORKING*, vol. 34, no. 5, pp. 625-644, November 2016.
- [8] Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips, Bellingham, USA/Washington: SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2005, ch. 12.9.
- [9] RF & Wireless Vendors and Resources. (2012) RF Wireless World. [Online]. <http://www.rfwireless-world.com/calculators/satellite-slant-range-calculator.html>
- [10] David L. Fried, "Anisoplanatism in adaptive optics," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 72, no. 1, pp. 52-61, 1982.
- [11] Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips, Bellingham, USA/Washington: SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2005, ch. 12.4.3.
- [12] Robert K. Tyson, "Adaptive optics and ground-to-space laser communications," *Applied Optics*, vol. 35, no. 19, pp. 3640-3646, 1996.



- [13] Manuel P. Cagigal, Vidal F. Canales, "Generalized Fried parameter after adaptive optics partial wave-front compensation," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 17, no. 5, pp. 903-910, 2000.
- [14] E.M. Feigelson, Ed., *Radiation in a Cloudy Atmosphere*, 1st ed. Netherlands: Springer Netherlands, 1984.
- [15] (1986) EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites). [Online]. <https://www.eumetsat.int/website/home/index.html>
- [16] C. Donald Ahrens, *Meteorology Today: AN INTRODUCTION TO WEATHER, CLIMATE, AND THE ENVIRONMENT*, Ninth ed., Jake Warde, Ed. Belmont, USA: Brooks/Cole, 2009.
- [17] Lorenzo Luini, Roberto Nebuloni, Carlo Capson, "Effectiveness of multisite diversity schemes to support," *Optical Engineering*, vol. 53, pp. 026104-1 - 026104-6, February 2014.
- [18] Christian Fuchs, Florian Moll, "Ground Station Network Optimization for Space-to-Ground Optical Communication Links," *Optical Communication Network*, vol. 7, no. 12, pp. 1148-1158, December 2015.
- [19] M. Derrien, H. Le Gléau, "SAFNWC/MSG SEVIRI clou products," in *Proc. of EUMETSAT Meteorological Satellite*, Weimar, 2003, pp. 191-198.
- [20] Wikimedia Foundation, Inc. (2017, March) Wikipedia. [Online]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Haversine\\_formula](https://en.wikipedia.org/wiki/Haversine_formula)
- [21] Svilen Dimitrov, Ricardo Barrios, Balazs Matuz, Gianluigi Liva, Ramon Mata-Calvo, Dirk Giggenbach, "Digital modulation and coding for satellite optical feeder links," *INTERNATIONAL JOURNAL OF SATELLITE COMMUNICATIONS AND NETWORKING*, vol. 34, no. 5, pp. 625-644, November 2016.