



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ  
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ ΕΤΟΥΣ 2018-19  
ΣΧΕΔΙΑΣΗ & ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ (SYSTEMS ENGINEERING)

(ΠΔ 96 / 2015 / ΦΕΚ 163Α' / 20.08.2014)



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

# ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη και προσομοίωση Κεραίας τύπου  
Μικροταινίας για υποστήριξη καναλιού  
επικοινωνίας Αέρος – Εδάφους για μη  
Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAV'S)

*Στρωματιάς Η. Τρηγόριος*  
*ΑΜ: 2015018015*

Ιανουάριος 2019



Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του Γρηγορίου Η. Στρωματιά εγκρίνεται:

### **ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Ειρήνη Σ. Καρανάσιου**

**(Επιβλέπουσα)**

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Σ.Σ.Ε  
Τομέα Μαθηματικών & Επιστημών  
Μηχανικού.

**Νικόλαος Ι. Δάρας**

Κοσμήτορας ΣΣΕ

Καθηγητής Τομέα Μαθηματικών &  
Επιστημών Μηχανικού.

**Στέλιος Τσαφαράκης**

Επίκουρος Καθηγητής Πολυτεχνείου  
Κρήτης, Σχολής Μηχανικών Παραγωγής &  
Διοίκησης.



.....  
Στρωματιάς Η. Γρηγόριος

Copyright © Στρωματιάς Η.Γρηγόριος, 2019.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ιδρύματος.

Αφιερώνεται  
στους γονείς μου &  
στην Ελίνα

# Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στη σχεδίαση και προσομοίωση κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) για υποστήριξη καναλιού Αέρος – Εδάφους (Air to Ground - AG) και χρήση σε σύστημα μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων (Unmanned Air Vehicles – UAV's). Ο σχεδιασμός και η προσομοίωση των χαρακτηριστικών και της λειτουργίας τυπωμένων κεραίων τύπου μικροταινίας (patch antennas), αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένων μελετών που βασίζονται σε εμπειρία πολλών δεκαετιών. Επιπλέον, η χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών (H/Y), για την επίλυση των εξισώσεων πεδίου με αριθμητικές μεθόδους, έχει εξελιχθεί σημαντικά παράλληλα με την ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη δυνατότητα στο σύγχρονο σχεδιαστή, για λεπτομερή ανάλυση των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων (επιδόσεων) που παρουσιάζουν οι τυπωμένες κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas), πριν τη διαδικασία κατασκευής και πραγματικής εφαρμογής τους επί των συστημάτων λήψης/μετάδοσης σημάτων επικοινωνίας.

Οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) καθίστανται ιδανικές επιλογές ως βάση επικοινωνίας επί συσκευών με περιορισμένες γεωμετρικές διαστάσεις, προσφέροντας σταθερή μηχανική στήριξη τους, χωρίς να απαιτούν την παρουσία τμημάτων που αλλοιώνουν την αεροδυναμική συμπεριφορά του ιπτάμενου οχήματος. Οι επιδόσεις σε συνδυασμό με το εύρος ζώνης που παρέχουν, τις καθιστά ιδανικές επιλογές για φορητά συστήματα.

Στο Κεφάλαιο 1 της εργασίας, παρουσιάζεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή εξέλιξης των τυπωμένων κεραίων τύπου μικροταινίας (patch antennas), καθώς και οι γενικότερες αρχές λειτουργίας τους. Επιπλέον, παρουσιάζονται βασικές σχεδιαστικές αρχές με χρήση προγράμματος προσομοίωσης για την ηλεκτρομαγνητική επίλυση του προβλήματος με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το Κεφάλαιο 2 επικεντρώνεται στην τεχνολογία των μη επανδρωμένων ιπταμένων οχημάτων και των απαιτήσεων επικοινωνίας που αυτά έχουν. Το Κεφάλαιο 3 παρουσιάζει την τυπωμένη κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna), όπως σχεδιάσθηκε και αναλύθηκε σε περιβάλλον ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η ανάλυση των χαρακτηριστικών και επιδόσεων σχεδιασμού που εξήχθησαν μετά τη διαδικασία προσομοιώσεων.

Τέλος, η εργασία ολοκληρώνεται, με την παρουσίαση των γενικότερων συμπερασμάτων από την επιλογή τυπωμένων κεραίων τύπου μικροταινίας (patch antennas) για τη διασφάλιση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας και ελέγχου για μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα, καθώς και τις μελλοντικές τάσεις και απαιτήσεις για την επικοινωνία τους με σταθμούς ελέγχου – βάσης.

Λέξεις - κλειδιά

Τυπωμένη Κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna), μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα, Κανάλι Αέρος – Εδάφους, προσομοίωση μέσω H/Y, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, προδιαγραφές λειτουργίας και εύρος ζώνης,

κατανάλωση ισχύος, επικοινωνία με σταθμό βάσης, πρωτόκολλα και απαιτήσεις  
συχνότητας, επίγειοι σταθμοί βάσης

# Abstract

The scope of the present thesis is the design and simulation of a patch antenna used for the Air to Ground – AG communication channel of Unmanned Air Vehicles – UAVs. The design and simulation of the performance of patch antennas has evolved through recent years. Advanced simulation environments allow fast and accurate numerical solutions of field equations, offering a variety of methods and techniques. Patch antennas designers take advantage of simulation capabilities, in order to analyze and verify designs before realization and integration to communication systems.

Patch antennas constitute an ideal solution for communication when related with limited geometrical dimensions, especially for systems and vehicles that forbid use of moving and expanded mechanical structures. The latter is a primal choice factor for UAVs. Efficient communication characteristics combined with low power consumption levels for required bandwidth, make setups with patch antennas ideal choices for portable systems.

Chapter 1 of the present thesis comprises a short historical introduction of patch antennas, as well as general operation characteristics and capabilities. Following the design principles for patch antennas modeling simulation and analysis environments, used for the model development and solution of field equations are presented. Chapter 2 introduces current technical basis of UAVs, focusing on communications and structure requirements. The designed patch antenna is analyzed and simulated using a 3D electromagnetic simulator based on the finite elements method in chapter 3. The outcome simulation results are further evaluated and analyzed in Chapter 4, in order to verify objectives and design requirements for UAVs.

Finally, general conclusions through the design process of the patch antenna related to the required communication Air to Ground channel for UAVs are derived, as these have been evaluated for covering current and future communication requirements with earth base stations.

## Key words

Patch antenna, Unmanned Air Vehicles (UAVs), Air to Ground channel (AG), simulation using digital computers, antenna field equations, specifications for operation, communication bandwidth, power consumption, base station communications, protocols for frequency management, earth base stations



# Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτριά μου Δρ. Καρανάσιου Ειρήνη τόσο για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε αναθέτοντάς μου την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας, όσο και για την άριστη συνεργασία μας για την επιτυχημένη ολοκλήρωσή της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τα κοντινά μου πρόσωπα, που με την αμέριστη υποστήριξη και εμπιστοσύνη που μου έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου συνέβαλλαν αποφασιστικά στην επίτευξη αυτού του στόχου.





# Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	5
Abstract	6
Ευχαριστίες	8
Περιεχόμενα	9
Κατάλογος σχημάτων	13
Κατάλογος πινάκων	15
Κατάλογος Συντομογραφιών	16
1 Εισαγωγή	- 19 -
1.1 Κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna)– Ιστορική Αναδρομή ...	- 19 -
1.2 Χαρακτηριστικά των Κεραιών Τύπου Μικροταινίας (patch antenna) – Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα	- 23 -
1.2.1 Πλεονεκτήματα	- 24 -
1.2.2 Μειονεκτήματα	- 26 -
1.3 Εφαρμογές Κεραιών Τύπου Μικροταινίας (patch antennas)	- 28 -
1.4 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Κεραιών Τύπου Μικροταινίας (patch antennas).....	- 29 -
1.4.1 Μέθοδοι Ανάλυσης.....	- 30 -
1.5 Σχεδιασμός Κεραιών τύπου Μικροταινίας (patch antenna)	- 31 -
1.5.1 Το μοντέλο Μετάδοσης Γραμμής Μεταφοράς (Transmission Line Model)	- 32 -
1.5.2 Το μοντέλο Συντονισμένης Κοιλότητας (Cavity Model)	- 32 -
1.5.3 Μέθοδος με χρήση Ολοκληρωτικών Εξισώσεων στο πεδίο της συχνότητας (Spectral Domain Integral Equation Method).....	- 32 -
1.5.4 Μέθοδος Χωρικού Πλέγματος με χρήση Ολοκληρωτικών Εξισώσεων (Spatial Domain Integral Equation Method).....	- 33 -
1.5.5 Μέθοδος των Πεπερασμένων Χρονικών Διαφορών. (Finite Difference Time Domain Method)	- 33 -
1.5.6 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. (Finite Elements Method)	- 33 -
1.5.7 Οι εξισώσεις Maxwell προς επίλυση	- 34 -
1.5.8 Αναλυτική επίλυση των εξισώσεων του ορθογωνικού patch.....	- 34 -
1.6 Η επίδραση του σχήματος της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antennas) στην λειτουργία	- 36 -
1.7 Σύνθετη Αντίσταση και Απόδοση Ακτινοβολίας για Κεραίες τύπου Μικροταινίας (patch antennas) απλού επιπέδου.....	- 38 -
1.8 Μέθοδοι Διέγερσης Κεραιών Τύπου Μικροταινίας (patch antennas)	- 42 -
1.8.1 Τροφοδότηση από το άκρο (edge-fed)	- 42 -
1.8.2 Τροφοδότηση με συνδετήρα (probe-fed)	- 45 -
1.8.3 Τροφοδότηση από διατομή (aperture-coupled)	- 46 -
1.8.4 Τροφοδότηση με ζεύξη (proximity-coupled)	- 49 -
1.9 Μέθοδοι Σχεδιασμού Κεραιών Τύπου Μικροταινίας (patch antenna)-	51 -
1.10 Συμπεράσματα	- 52 -
2 Μη επανδρωμένα ιπτάμενα Οχήματα – UAVs και Κανάλια Επικοινωνίας Αέρος – Εδάφους – Air to Ground	- 54 -
2.1 Εισαγωγή	- 54 -

2.1.1	Ιστορική Αναδρομή των Καναλιών επικοινωνίας.....	- 56 -
2.1.2	Χαρακτηριστικά των Καναλιών AG.....	- 57 -
2.2	Χαρακτηριστικά του Καναλιού Μετάδοσης AG Επικοινωνίας για UAVs.-	58 -
2.2.1	Σύγκριση του UAV AG καναλιού με το κλασικό επίγειο κανάλι.....	- 59 -
2.2.2	Ζώνες Συχνοτήτων Λειτουργίας για την διάδοση του AG καναλιού από UAV .....	- 60 -
2.2.3	Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά για την διάδοση του AG καναλιού από UAV.-	60 -
2.2.4	Καθορισμός Κεραίας για την διάδοση του AG καναλιού από UAV...-	61 -
2.2.5	Φαινόμενο Doppler .....	- 62 -
2.3	Μετρήσεις επί AG καναλιών για UAVs .....	- 63 -
2.3.1	Παράμετροι των μετρήσεων στο AG κανάλι .....	- 63 -
2.3.2	Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κατά την επιβολή μετρήσεων στο AG κανάλι.-	66 -
2.3.3	Σενάρια μετρήσεων στο AG κανάλι .....	- 67 -
2.3.3	Κυματομορφές των σημάτων μέτρησης στο AG κανάλι.....	- 68 -
2.4	Μετρήσεις διάδοσης επί AG καναλιών για UAVs .....	- 70 -
2.4.1	Απώλειες Διάδοσης. (Path Loss – PL) / Σκίαση (Shadowing).....	- 70 -
2.4.2	Διασπορά καθυστέρησης. (Delay Dispersion).....	- 73 -
2.4.3	Κυριαρχία του Παράγοντα Απόσβεσης Στενής Ζώνης. Ο Ricean K- παράγοντας.....	- 73 -
2.4.4	Εξάπλωση του φαινομένου Doppler .....	- 74 -
2.4.5	Μετρήσεις για τον καθορισμό στατιστικών στοιχείων του καναλιού	- 74 -
2.5	Μοντέλα για διάδοση στο AG κανάλι.....	- 75 -
2.6	Συμπεράσματα .....	- 76 -
3	Σχεδιασμός Κεραίας τύπου patch για την υποστήριξη AG καναλιού επί UAV	- 78 -
3.1	Εισαγωγή .....	- 78 -
3.2	Το περιβάλλον ανάλυσης και προσομοιώσεων HFSS® .....	- 80 -
3.3	Προδιαγραφές Σχεδιασμού της Κεραίας Τύπου Μικροταινίας (patch antenna) .....	- 84 -
3.4	Σχεδιασμός της Κεραίας Τύπου Μικροταινίας (patch antenna) .....	- 85 -
3.4.1	Υλικό υποστρώματος [107] .....	- 87 -
3.4.2	Γεωμετρικές Διαστάσεις Κεραίας Τύπου Μικροταινίας (patch antennas).....	- 90 -
3.4.3	Χαρακτηριστικά του Άκρου Τροφοδότησης .....	- 93 -
3.4.4	Επιλογή πλέγματος και συνοριακών συνθηκών για την επίλυση.....	- 93 -
3.4.5	Ανάλυση στο Πεδίο Συχνότητας.....	- 93 -
3.4.6	Αριθμητικά Αποτελέσματα Επίλυσης.....	- 94 -
4	Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο περιβάλλον HFSS®.....	- 99 -
4.1	Προσομοίωση στο περιβάλλον HFSS® .....	- 99 -
4.2	Διαγράμματα Επίλυσης Τερματικού .....	- 100 -
4.3	Διαγράμματα Μακράν Πεδίου .....	- 103 -
4.4	Διαγράμματα Εγγύς Πεδίου.....	- 108 -
4.5	Συμπεράσματα από την ανάλυση της κεραίας τύπου patch .....	- 112 -
5	Γενικά συμπεράσματα .....	- 114 -
5.1	Συμπεράσματα από την υποστήριξη AG καναλιού.....	- 114 -
5.2	Επιλογές Κεραιών για την υποστήριξη AG καναλιών επί των UAVs.-	117

5.3	Μελλοντικές Επεκτάσεις στην χρήση UAV ως τηλεπικοινωνιακών κόμβων κορμού δικτύου.....	- 118 -
	Βιβλιογραφία .....	- 120 -

# Κατάλογος Σχημάτων

**Σχήμα 1: Τυπική μορφή μιας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) [102]**

Σχήμα 2: Κεραία τύπου μικροταινίας (patch antennas) ορθογωνικής και κυκλικής επιφάνειας [102]

Σχήμα 3: Κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) για επικοινωνία κινητών συσκευών με σταθμό βάσης

Σχήμα 4: Γενική μορφή

Σχήμα 5: Οι πεδιακές εξισώσεις Maxwell σε ολοκληρωτική και σημειακή μορφή

Σχήμα 6: Πλάγια όψη και κάτοψη της ορθογωνικής επιφάνειας του patch

Σχήμα 7: Βασικά γεωμετρικά σχήματα κεραίων τύπου μικροταινίας (patch antenna)

Σχήμα 8: Διεγχειρόμενα πεδία σε ένα ορθογωνική

Σχήμα 9: Δείκτες Επιδόσεων για κεραία απλού επιπέδου (α) Σχέση σύνθετης Αντίστασης με Εύρος Συχνοτήτων Λειτουργίας (b) Κατευθυντικότητα (c) Απόδοση δημιουργίας κύματος επιφανείας

Σχήμα 10: Διάγραμμα Ακτινοβολίας

Σχήμα 11: Τροφοδότηση κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) από το άκρο (edge-fed)

Σχήμα 12: Ισοδύναμο κύκλωμα για την τροφοδότηση μιας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) από το άκρο

Σχήμα 13: Τροφοδότηση κεραίας τύπου patch μικροταινίας (patch antenna) με χρήση συνδετήρα (probe-fed)

Σχήμα 14: Ισοδύναμο κύκλωμα για την τροφοδότηση μιας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) με συνδετήρα

Σχήμα 15: Τροφοδότηση κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antennas) με χρήση διατομής (aperture-coupled)

Σχήμα 16: Ισοδύναμο κύκλωμα για την τροφοδότηση

Σχήμα 17: Τροφοδότηση κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) με ζεύξη

Σχήμα 18: Ισοδύναμο κύκλωμα για την τροφοδότηση μιας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) - ζεύξη

Σχήμα 19: Τυπικό μοντέλο διάδοσης Air to Ground (AG) καναλιού για κάλυψη με UAV

Σχήμα 20: Σενάρια μετρήσεων για διάδοση στο κανάλι AG με χρήση UAV

Σχήμα 21: Σήματα διάδοσης: (a) Σήμα Chirp (b) RF Gaussian παλμός με κεντρική συχνότητα 1 MHz και εύρος συχνοτήτων 60% (c) Ψευδοτυχαία ακολουθία συμβόλων (d) OFDM σήμα με 64 υπο-φέροντα (sub-carriers) 16 σύμβολα και 6 πλότους

Σχήμα 22: Επίπεδα μεταβολής ισχύος σε συνθήκη LOS εξαιτίας της πολλαπλής όδευσης σήματος από ανακλάσεις στην επιφάνεια της γης. Η ισχύς είναι κανονικοποιημένη προς την απώλεια διάδοσης ελευθέρου χώρου

Σχήμα 23: Χαρακτηρισμός μοντέλων AG καναλιών υποστηριζόμενα μέσω UAV

Σχήμα 24: Παρουσίαση του HFSS®

Σχήμα 25: Ο Adaptive Mesh Algorithm του HFSS®

Σχήμα 26: Τέλεια Ηλεκτρικές και Μαγνητικές Επιφάνειες

Σχήμα 27: Σύγκριση Πραγματικά μετρούμενων τιμών και αποτελέσματα προσομοίωσης με το HFSS®

Σχήμα 28: Σχηματικό μοντέλο της ορθογωνικής

Σχήμα 29: Διάγραμμα μεταβολής της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού υποστρώματος συναρτήσει της θερμοκρασίας

Σχήμα 30: Διάγραμμα μεταβολής της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού υποστρώματος συναρτήσει της συχνότητας

Σχήμα 31: Επιλογές επίλυσης και ανάλυσης αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Σχήμα 32: Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης ισχύος  $S$  της κεραίας συναρτήσει της συχνότητας

Σχήμα 33: Διάγραμμα αγωγιμότητας  $Y$  της κεραίας συναρτήσει της συχνότητας

Σχήμα 34: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης  $Z$  της κεραίας συναρτήσει της συχνότητας

Σχήμα 35: Διάγραμμα λόγου στασίμων κυμάτων VSWR της κεραίας συναρτήσει της συχνότητας

Σχήμα 36: 3D Διάγραμμα Εντάσεως Ηλεκτρικού Πεδίου της κεραίας

Σχήμα 37: Διάγραμμα Κέρδους της κεραίας συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  ( $\varphi=0^\circ$ )

Σχήμα 38: Διάγραμμα Κέρδους της κεραίας συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  ( $\varphi=90^\circ$ )

Σχήμα 39: Πολικό Διάγραμμα Κέρδους της κεραίας συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  ( $\varphi=0^\circ$  και  $90^\circ$ )

Σχήμα 40: Τριοδιάστατη άποψη του κέρδους της κεραίας με τοποθέτηση των λοβών επί της επιφάνειας

Σχήμα 41: Διάγραμμα Κατευθυντικότητας της κεραίας συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  ( $\varphi=0^\circ$ )

Σχήμα 42: Πολικό Διάγραμμα Κατευθυντικότητας της κεραίας συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  ( $\varphi=0^\circ$  και  $90^\circ$ )

Σχήμα 43: 3D Διάγραμμα Εντάσεως Ηλεκτρικού Πεδίου της κεραίας

Σχήμα 44: 3D Διάγραμμα Εντάσεως Ηλεκτρικού Πεδίου της κεραίας με έμφαση στην επιφάνεια (λογαριθμική κλίμακα)

Σχήμα 45: 3D Διάγραμμα Εντάσεως Μαγνητικού Πεδίου της κεραίας

Σχήμα 46: 3D Διάγραμμα Εντάσεως Μαγνητικού Πεδίου της κεραίας με έμφαση στην επιφάνεια (λογαριθμική κλίμακα)

Σχήμα 47: 3D Διάγραμμα Χωρικής Πυκνότητας Ρεύματος της κεραίας

Σχήμα 48: 3D Διάγραμμα Χωρικής Πυκνότητας Ρεύματος της κεραίας με έμφαση στην επιφάνεια (λογαριθμική κλίμακα)

Σχήμα 49: 3D Διάγραμμα του πραγματικού μέρους του διανύσματος Poynting της κεραίας



# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Πίνακας σημαντικών μετρήσεων επί AG καναλιών σε υπάμενες συσκευές

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά διάδοσης του AG καναλιού για διαφορετικά σενάρια

**Πίνακας 3: Προδιαγραφές για την σχεδιαζόμενη κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna) υποστήριξης AG καναλιού επί UAV**

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά του διηλεκτρικού υλικού υποστρώματος Rogers RO 4000

Πίνακας 5: Προσφερόμενα διηλεκτρικά υποστρώματα κατασκευής από την βιβλιοθήκη του HFSS®

Πίνακας 6: Αναλυτικοί υπολογισμοί για τις διαστάσεις ορθογωνικής κεραίας τύπου patch

Πίνακας 7: Γεωμετρικές Διαστάσεις της ορθογωνικής κεραίας τύπου patch από το σχεδιαστικό παράθυρο του HFSS®

Πίνακας 8: Καθορισμός ζώνης συχνοτήτων ανάλυσης

Πίνακας 9: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Terminal Solution Data Report

Πίνακας 10: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Modal Solution Data Report

Πίνακας 11: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Fields Report

Πίνακας 12: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Far Fields Report

Πίνακας 13: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Emission Test Report

**Πίνακας 14: Πίνακας σύνδεσης του VSWR, του συντελεστή ανάκλασης (S11), και της ανακλώμενης ισχύος από την κεραία**

# Πίνακας Συντομογραφιών

Ακρωνύμιο	Ερμηνεία
AA	Air-to-air
AG	Air-to-ground
AWGN	Additive white Gaussian noise
BER	Bit error rate
BPSK	Binary phase shift keying
BW	Bandwidth
CDF	Cumulative distribution function
CFO	Carrier frequency offset
CIR	Channel impulse response
CNPC	Control and non-payload communications
CSI	Channel state information
CTF	Channel transfer function
CW	Continuous wave
DPP	Doppler power profile
DS	Doppler spread
DSB-AM	Double sideband amplitude modulation
DS-SS	Direct sequence spread spectrum
EMI	ElectroMagnetic Interference
EMC	ElectroMagnetic Compatibility
FAA	Federal aviation administration
FEM	Finite Element Method
FMBC	Filter bank multicarrier
FMCW	Frequency modulated continuous wave
GA	Ground-to-air
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPS	Global positioning system
GS	Ground station
GSM	Global system for mobile communication
HAP	High altitude platform
HSPA	High Speed Packet Access Network
ICI	Inter-carrier interference
IS-GBSCM	Irregular shaped geometric based stochastic channel model
LAP	Lower altitude platform
LDACS	L-band digital aeronautical communications
LOS	Line-of-sight
LTE	Long term evolution
MIMO	Multiple-input-multiple-output
MISO	Multiple-input-single-output
MMIC	Microwave Monolithic Integrated Circuits
Mod. Sig.	Modulated signal
MPC	Multipath component
MSK	Minimum shift keying
NGSCM	Non-geometric channel model
NLOS	Non-line-of-sight
OEIC	Opto-Electronic Integrated Circuits
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing

OLOS	Obstructed line-of-sight
PAPR	Peak to average power ratio
PDP	Power delay profile
PG	Path gain
PL	Path loss
PLE	Path loss exponent
PRN	Pseudo-random number
PSD	Power spectral density
RF	Radio frequency
RMS-DS	Root mean square-delay spread
RS-GBSCM	Regular shaped geometric based stochastic channel model
RSS	Received signal strength
RSSI	Received signal strength indicator
RTT	Round trip time
RX	Receiver
SDMA	Space-division multiple access
SIMO	Single-input-multiple-output
SISO	Single-input-single-output
SNR	Signal-to-noise-ratio
TDL	Tap-delay-line
TDMA	Time division multiple access
TE	Transverse Electric
TEM	Transverse ElectroMagnetic
TM	Transverse Magnetic
TOA	Time-of-arrival
TX	Transmitter
UAS	Unmanned aerial systems
UAV	Unmanned aerial vehicle
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
UWB	Ultra-wideband
VHF	Very high frequency
WiFi	Wireless Fidelity
WSS	Wide sense stationary



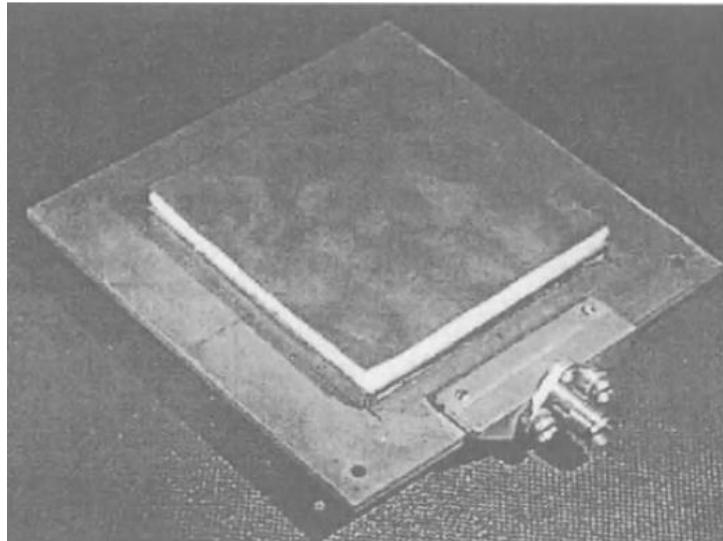
# 1 Εισαγωγή

## *1.1 Κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna)– Ιστορική Αναδρομή*

Οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas), έχουν εξελιχθεί ως οι πιο ευέλικτες λύσεις για πάρα πολλά συστήματα που χρειάζονται ασύρματη επικοινωνία. Οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) συγκαταλέγονται στην κατηγορία των τυπωμένων κυκλωμάτων – ακτινοβολητών, αξιοποιώντας τεχνολογίες και τεχνικές τυπωμένων κυκλωμάτων για την ανάπτυξη και την τροφοδοσία των δομών τους. Όπως όλες οι προσφερόμενες κατηγορίες τυπωμένων κυκλωμάτων, οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) είναι οι περισσότερο δημοφιλείς, ευέλικτες και εύκολα προσαρμόσιμες ανάλογα με τον τύπο της εφαρμογής για τον οποίο προορίζονται. Αυτό προκύπτει, κυρίως, από τα χαρακτηριστικά, τα οποία οι τελευταίες προσφέρουν, μέσα στα οποία περιλαμβάνονται, η ευκολία ολοκλήρωσης (εκτύπωσης), ο πολύ καλός έλεγχος της ακτινοβολούμενης ισχύος που προσφέρουν, καθώς και το χαμηλό κόστος για την κατασκευή τους ως πρωτότυπα ή σε μαζική παραγωγή κλίμακας.

Η λέξη patch για τον προσδιορισμό τους, ανακύπτει από το σχήμα της αγωγίμης επιφάνειας που αυτές χρησιμοποιούν και το οποίο κατά τα πρώτα χρόνια σχεδιασμού τους, αποτελούσε ορθογωνική ή κυκλική επιφάνεια. Αυτό το σχήμα ήταν επιλέξιμο, διότι διευκόλυνε την επίλυση των εξισώσεων του ακτινοβολητή στις αρχικές φάσεις σχεδιασμού τους, όπου τα μοντέλα και η χρήση των Η/Υ δεν ήταν διαδεδομένα. Οι τυπωμένες κεραίες βασίζουν τη λειτουργία τους στην αρχή συντονισμού, σε αντίθεση με τις κεραίες οδεύοντος κύματος, και για τον λόγο αυτό, χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερες αποδοτικές σε ένα στενό και αυστηρά καθορισμένο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας. Με την πάροδο των ετών και την εξέλιξη των τεχνικών σχεδιασμού, οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) επιτυγχάνουν ανάλογες επιδόσεις με κεραίες οδεύοντος κύματος, συνδυάζοντας την απλότητα της γεωμετρίας λειτουργίας τους με την ηλεκτρομαγνητική απόδοση ενός ακτινοβολητή.

Η ανάπτυξη των κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antenna) έχει βασιστεί στις έρευνες που έχουν διεξαχθεί στα τελευταία 40 χρόνια από εταιρείες, οργανισμούς τηλεπικοινωνιών και ερευνητικά ιδρύματα – πανεπιστήμια, σε όλο τον κόσμο.



Σχήμα 1: Τυπική μορφή μιας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) [102]

Τα παραπάνω επιτεύγματα και οι λύσεις για το σχεδιασμό τυπωμένων κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antenna) θα μπορούσαν να επιτευχθούν μόνο μετά από την συνεισφορά ενός τόσο μεγάλου αριθμού ερευνητών που καταπιάστηκαν στα τελευταία χρόνια με την λειτουργία των εν λόγω ακτινοβολητών. Ένας σημαντικός λόγος για τον οποίο τόσο πολλοί φορείς έστρεψαν την προσοχή και την έρευνα στις κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas), είναι το χαμηλό κόστος παραγωγής τους. Το τελευταίο χαρακτηριστικό μείωσε επίσης σημαντικά το απαιτούμενο κόστος έρευνας και ανάπτυξης πρωτοτύπων, δικαιολογώντας την παραπάνω μεγάλη στροφή και κατεύθυνση της έρευνας στο χώρο των κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antennas).

Σημαντικά ερευνητικά ιδρύματα και φορείς που θα πρέπει να αναφερθούν στην ανάπτυξη των κεραιών αυτών, είναι το Πανεπιστήμιο της Μασαχουσέτης (MIT), το Πολυτεχνείο της Ζυρίχης (ETH), η αεροπορική βάση Hanscom, το τμήμα ΑεροΔιαστήματος των Εργαστηρίων Bell (Bell Labs), καθώς και το πανεπιστήμιο του Birmingham. Η ανάπτυξη των κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antenna) αφορά μία χρονική περίοδο, η οποία εκτείνεται από το 1970 έως το 2000.

#### 1970:

Κατά τη δεκαετία του 1970, οι πρώτες σημαντικές συνεισφορές στο χώρο ανάπτυξης των τυπωμένων κεραιών άρχισαν να διαφαίνονται. Κατά την περίοδο αυτή, αναπτύχθηκαν δύο τεχνικές για την τροφοδότησή τους. Η πρώτη τροφοδοτούσε το άκρο της κεραίας (edge-fed patch), ενώ η δεύτερη χρησιμοποιούσε ειδικό τμήμα συνδετήρα (probe) τροφοδότησης (probe-fed patch) [1]. Οι παραπάνω δύο τεχνικές τροφοδοσίας όρισαν τους προδρόμους της τεχνολογίας των κεραιών αυτών, συμβάλλοντας στη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών που τις καθιέρωσαν μετέπειτα. Μετά την επίλυση του αρχικού προβλήματος τροφοδοσίας, οι ερευνητές στράφηκαν προς την υιοθέτηση διαφορετικών σχημάτων τυπώματος πέρα των κλασικών ορθογωνικών και κυκλικών, καθώς και σε συνδυασμούς τυπωμένων στοιχειοκεραιών, κατασκευάζοντας πρωτότυπα τα οποία ήταν συμπαγή και μικρά σε διαστάσεις,

ικανά να φιλοξενηθούν ακόμη και επί κινουμένων οχημάτων [2]. Τα εύρη ζώνης (bandwidth) που αυτές οι κεραίες προσέφεραν, ήταν εξαιρετικά συντονιστικά, τυπικά 1 – 2% της συχνότητας λειτουργίας τους. Σε μία από τις πρώτες προσπάθειες συγκαταλέγονται και οι έρευνες για επέκταση του εύρους ζώνης συντονισμού, χρησιμοποιώντας συνδυασμούς επάλληλων στρώσεων (stacking patches), χωρίς όμως αυτές οι αρχικές προσπάθειες να καταλήξουν σε μεγάλη επιτυχία για το συγκεκριμένο θέμα μέχρι και τη δεκαετία του 1980 [3].

Ένα από τα σημαντικά προβλήματα για το σχεδιασμό εκείνης της εποχής, ήταν ο ακριβής προσδιορισμός της σύνθετης αντίστασης που αυτές οι κεραίες εμφάνιζαν. Αυτό οφειλόταν, εν μέρει, στη λειτουργία συντονισμού τους και στο υλικό επί του οποίου οι τυπωμένες κεραίες τοποθετούνταν κατά την εκτύπωσή τους. Παρά τις όποιες δυσκολίες υπήρχαν, στην μελέτη των τυπωμένων κεραιών, αντιμετωπίστηκαν επιτυχώς από τους ερευνητές εκείνη την περίοδο και εισήχθησαν δύο μοντέλα. Το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς (transmission line model) και το μοντέλο της συντονισμένης κοιλότητας (cavity model). Παρά το γεγονός ότι και τα δύο αυτά μοντέλα δεν προσέφεραν σημαντική ακρίβεια κατά τους αναλυτικούς υπολογισμούς, άρχισε σιγά-σιγά να εισάγεται μία θεωρητική βάση, η οποία θα επέτρεπε περαιτέρω ανάλυση της λειτουργίας τους.

#### 1980:

Οι κυριότερες συνεισφορές στη συνεχιζόμενη ανάπτυξη των κεραιών τύπου patch κατά τη δεκαετία του 1980, προήλθαν από το χώρο των βιομηχανικών κατασκευής αμυντικών συστημάτων. Κατά την περίοδο αυτή εντοπίστηκε και καθορίστηκε με ακρίβεια σε αριθμητικό επίπεδο, ο συντονιστικός χαρακτήρας των και η σύνθετη αντίσταση που εμφάνιζαν σε καθορισμένες συχνότητες λειτουργίας. Ο συντονιστικός χαρακτήρας και για τους δύο τύπους τροφοδοσίας, αποτελούσε την αιτία για την μη αποδοχή των επιδόσεων των κεραιών σε αυτήν την αρχική φάση. Εν μέρει όμως η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης τους μπορούσε να προβλεφθεί και να αναλυθεί από την θεωρία κυκλωμάτων. Καθώς και οι δύο τύποι της τροφοδοσίας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν καθαρά επαγωγικοί, αυτό είχε ως αποτέλεσμα ώστε η επαγωγική συμπεριφορά να κυριαρχεί στην απόκριση συχνότητας των τυπωμένων κεραιών τύπου patch για τις χαμηλές συχνότητες κάτω από την ζώνη συντονισμού. Δεδομένου ότι η λειτουργία της συγκεκριμένης κεραίας είναι καθαρά συντονιστική, η αντιδραστική τους συμπεριφορά θα έπρεπε να κρατηθεί σε σχεδόν μηδενικά επίπεδα, συνδυάζοντας τον επαγωγικό τους χαρακτήρα με αντίστοιχα χωρητικά φαινόμενα, έτσι ώστε αυτά τα δύο φαινόμενα να αλληλοαναιρεθούν. Το αυξανόμενο επαγωγικό στοιχείο μείωνε το ενεργό πάχος της κεραίας, γεγονός το οποίο είχε άμεση επίδραση στο εύρος συχνότητων λειτουργίας της κεραίας.

Κατά την περίοδο αυτή, δύο νέες τεχνικές για την τροφοδοσία της κεραίας τύπου patch ανακαλύφθηκαν. Η μέθοδος τροφοδοσίας με διατομή (aperture coupled patch) [4] και η τροφοδοσία ζεύξης (proximity coupled patch) [5]. Η πρώτη μέθοδος είναι κυρίως χωρητική και για τον λόγο αυτό επιτυγχάνει μεγαλύτερο εύρος ζώνης συντονισμού. Η τροφοδοσία μέσω διατομής είναι μαγνητικά ισοδύναμη με τις διαδικασίες τροφοδοσίας στο άκρο είτε μέσω συνδετήρα. Επομένως, οι αρχικές επιδόσεις και αυτών των κεραιών έμοιαζαν σε εύρος συχνότητων με τις προηγούμενες. Στην συνέχεια όμως αποδείχθηκε ότι η ασυνέχεια ρευμάτων στην τροφοδοσία ήταν το αίτιο για την επίτευξη μεγαλύτερης ζώνης συχνότητων λειτουργίας.

Συγχρόνως σε ό,τι αφορά στις δυνατότητες των υπολογιστικών

συστημάτων, υπήρχαν στην τρέχουσα δεκαετία σημαντικές βελτιώσεις, οι οποίες έδρασαν καθοριστικά στην ανάπτυξη προγραμμάτων προσομοίωσης και ανάλυσης (σε πολλούς σχεδιαστικούς χώρους αλλά και για τις κεραίες). Οι Τεχνικές Ολοκληρωτικών Εξισώσεων (Integral Equations) χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης κατά την δεκαετία του 1980 [6],[7], εισάγοντας μοντέλα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των τυπωμένων κεραιών, προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό της σύνθετης αντίστασης της κεραίας. Τα εργαλεία αυτά όμως, δεν ήταν ικανά για την ανάλυση πολύπλοκων σχημάτων όταν αυτά διαφοροποιούνταν σημαντικά από τις κλασικές κωνικές μορφές των επιφανειών.

Τα μοντέλα αυτά με την σειρά τους, εισήγαγαν πίνακες μεγάλων διαστάσεων για τον προσδιορισμό των αναλυτικών λύσεων πεδίου. Όμως συνέβαλαν στον εντοπισμό φαινομένων μείωσης της απόδοσης για συστοιχίες κεραιών (scan blindness phenomenon), όπου η παρεχόμενη ισχύς στην κεραία παγιδεύεται στην συστοιχία και δεν ακτινοβολείται [8],[9].

Την περίοδο αυτή, μελετήθηκαν εκτενώς συστοιχίες (arrays) κεραιών τύπου patch. Στόχος της χρήσης των συστοιχιών κεραιών τύπου patch ήταν η παραγωγή κυκλικών πολώσεων [10] καθώς και άλλων πολώσεων ειδικού τύπου. Επίσης ανακαλύφθηκε η δυνατότητα του συνδυασμού των κεραιών τύπου patch με μικροκυματικά στοιχεία [11],[12],[13]. Η βελτίωση του εύρους συχνοτήτων λειτουργίας ήρθε με την χρήση συζευγμένων κεραιών τύπου patch (stack patches) [14],[15],[16]. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε τροφοδοσία η οποία αξιοποιούσε δύο αγωγίμες επιφάνειες και την παρεχόμενη ενδιάμεση σχισμή για την τροφοδότηση της κεραίας. Αυτό που έγινε σαφές από την μελέτη κατά την δεκαετία του '80 ήταν ότι για καλύτερες επιδόσεις χρειαζόνταν πιο πολύπλοκα σχήματα και γεωμετρίες.

#### 1990:

Κατά την δεκαετία του '90 ξεκίνησε η είσοδος των τυπωμένων κεραιών σε εμπορικά προϊόντα. Μία κυρίαρχη εφαρμογή ήταν οι κινητές επικοινωνίες (mobile communications) που αφορούσαν σε τερματικούς σταθμούς εκπομπής. Από το σημείο αυτό και στην συνέχεια, οι εμπορικές ανάγκες άρχισαν να κατευθύνουν την έρευνα και την ανάπτυξη στο πεδίο των τυπωμένων κεραιών τύπου patch.

Κατά την δεκαετία αυτή αναπτύχθηκαν πιο εξελιγμένα πακέτα προσομοίωσης για την παραγωγή πιο αξιόπιστων και ακριβών αριθμητικών αποτελεσμάτων για την μελέτη τους. Η τεχνική των Ολοκληρωτικών Εξισώσεων ήταν αρκετά γρήγορη τώρα, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί ως βασικό εργαλείο σχεδίασης και ανάλυσης. Επίσης, η Τεχνική των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου (Finite Difference Time Domain) [17] και η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Elements Method) [18] αναπτύχθηκαν για την ανάλυση προβλημάτων με κεραίες τύπου patch, προσφέροντας την επιπλέον δυνατότητα εκτός από την προσφερόμενη ανάλυση για την κεραία, της συμπερίληψης του χώρου που πλαισιώνει τον ακτινοβολητή. Το τελευταίο συνέβαλε σημαντικά στην ακρίβεια του προσδιορισμού των αναλυτικών αυτών μεθόδων.

Στην δεκαετία αυτή μελετήθηκαν περαιτέρω τεχνικές για τη βελτίωση του εύρους ζώνης. Έτσι επιτεύχθηκαν σχεδιασμοί οι οποίοι επέκτειναν το εύρος ζώνης κατά μία οκτάβα (67% βελτίωση) [19]. Επίσης, κατά την περίοδο αυτή διερευνήθηκε το πως τα αποδοτικά σχήματα κεραιών τύπου patch εμφανίζουν



μειωμένα φαινόμενα εκπομπής κυμάτων από την επιφάνειά τους. Ερευνήθηκε επίσης η χρήση ΜΜΙC τεχνολογιών (Monolithic microwave integrated circuit) για την κατασκευή τυπωμένων κεραιών. Σημαντική ήταν και η μελέτη κεραιών που μπορούσαν να λειτουργήσουν σε περισσότερες από μία συχνότητες συντονισμού. Μελετήθηκαν επίσης κεραιές με μεγαλύτερα κέρδη, κάνοντας χρήση συστοιχιών και ανακλαστήρων. Αυτά τα συστήματα αξιοποιούσαν την χρήση ανακλαστήρων και τεχνολογίας τυπωμένων κυκλωμάτων για την κατανομή της φάσης επί του ακτινοβολητή.

Ένας ακόμη σημαντικός χώρος έρευνας ήταν η δυνατότητα για μείωση των διαστάσεων μίας κεραιάς τύπου patch. Η χρήση των κεραιών τύπου patch για συχνότητες μικρότερες των 2 GHz θέτει ένα όριο στις διαστάσεις σμίκρυνσης των κεραιών αυτού του τύπου. Ένα σημαντικό ακόμη θέμα το οποίο ανέκυψε από την σμίκρυνση των διαστάσεων, ήταν η διατήρηση των επιπέδων απόδοσης των τυπωμάτων τύπου patch.

2000:

Κατά την διάρκεια της δεκαετίας αυτής επιτεύχθηκε περαιτέρω βελτίωση στο εύρος ζώνης λειτουργίας. Επίσης με χρήση κεραιών τύπου patch υλοποιήθηκαν εφαρμογές για ζεύξη χωρικής ισχύος (spatial power combiner), καθώς και λύσεις με κεραιές υψηλού κέρδους οι οποίες είχαν ελαχιστοποιημένες απώλειες στις γραμμές τροφοδότησης τους. Η χρήση Φωτονικών Διακένων (Photonic Band gaps -PBG) μελετήθηκε με στόχο την αύξηση των επιπέδων ακτινοβολίας

Το σημαντικότερο όμως κατά την συγκεκριμένη δεκαετία ήταν ότι είχαν διασαφηνιστεί όλοι οι μηχανισμοί λειτουργίας των κεραιών τύπου Patch.

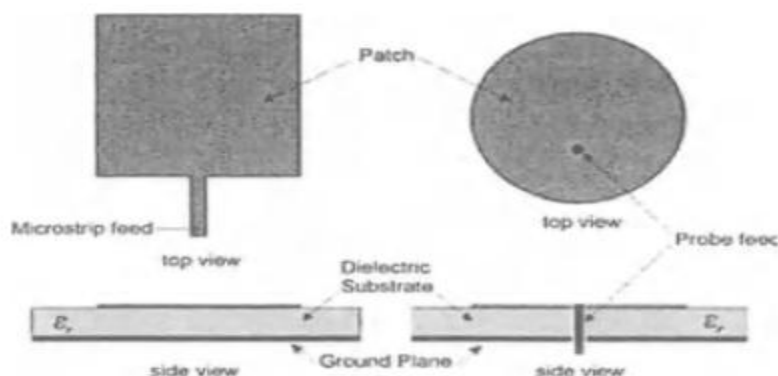
## ***1.2 Χαρακτηριστικά των Κεραιών Τύπου Μικροταινίας (patch antenna) – Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα***

Όπως κάθε τεχνολογία έτσι και η τεχνολογία των κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antennas) διαθέτει εγγενώς χαρακτηριστικά που οδηγούν σε πλεονεκτήματα καθώς και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία μειώνουν τις αντίστοιχες επιδόσεις, λειτουργώντας ως μειονεκτήματα για τον σχεδιασμό ενός ακτινοβολητή βασισμένου στην συγκεκριμένη τεχνολογία. Προφανώς, δεδομένης της έρευνας στον αντίστοιχο τομέα ανάπτυξης, τα μειονεκτήματα αποτελούν ένα δυναμικό πεδίο που υπόκειται σε διαρκείς μεταβολές με βάση την εξέλιξη των τεχνικών σχεδιασμού και ανάπτυξης για κεραιές τύπου μικροταινίας (patch antennas). Αναλυτικότερα, τα πλεονεκτήματα από την χρήση κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antennas) αφορούν στους παρακάτω τομείς:

### 1.2.1 Πλεονεκτήματα

#### Μέγεθος και προφίλ:

Είναι λογικό ότι το μέγεθος (σε όγκο) μιας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antennas) είναι σημαντικά μικρότερο σε σχέση με υλοποιήσεις άλλου ή ανάλογου τύπου σε επιδόσεις, ακτινοβολητών. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται δύο υλοποιήσεις για κεραία τύπου μικροταινίας (patch antennas) με ορθογωνικό και κυκλικό διαμέτρημα επιφάνειας.



Σχήμα 2: Κεραία τύπου μικροταινίας (patch antennas) ορθογωνικής και κυκλικής επιφάνειας [102]

Το προηγούμενο σχήμα δείχνει μια κεραία τύπου patch ορθογωνικής και ένα αντίστοιχο κυκλικής επιφάνειας. Η συντονιζόμενη επιφάνεια για την ορθογωνική κεραία τύπου patch είναι μήκους  $L$  και πλάτους  $W$  το οποίο φαίνεται να συνδέεται σε ένα γειωμένο υπόστρωμα, με διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$ , και ύψος  $d$ . Η υλοποίηση μονού επιπέδου χρησιμοποιεί υπόστρωμα με διαστάσεις μικρότερες του  $0.05\lambda_0$ , όπου  $\lambda_0$  είναι το μήκος κύματος που αντιστοιχεί σε συχνότητα διάδοσης στον ελεύθερο χώρο. Μία πολυεπίπεδη υλοποίηση της αντίστοιχης κεραίας (stacked patch) έχει ένα συνδυαζόμενο επίπεδο με πάχος όχι περισσότερο από  $0.1 \lambda_0$ . Έτσι μία κεραία τύπου patch με μεταβλητό πάχος μπορεί να τοποθετηθεί επί του υποστρώματος, λειτουργώντας σε μεταβλητές συχνότητες (σε αντίθεση με ένα κλασικό δίπολο). Κατά συνέπεια ο όγκος που απαιτείται από μία κεραία τύπου patch είναι μικρότερος από τις περισσότερες κεραίες άλλου τύπου και προφίλ. Το ελάχιστο πάχος του υλικού υποστρώματος που απαιτείται για την λειτουργία της κεραίας επιτρέπει έτσι ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί επί της επιφάνειας διαφόρων αντικειμένων, όπως οι επιφάνειες ιπτάμενων αντικειμένων, υπολογιστών, κλπ.

#### Ευκολία στην κατασκευή, εκτυπωμένη ολοκλήρωση και χαμηλό κόστος:

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η κεραία τύπου patch μπορεί να κατασκευασθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές ανάλογες με αυτές της ολοκλήρωσης για την κατασκευή τυπωμένων κυκλωμάτων, οι οποίες οδηγούν σε χαμηλά συνεπαγόμενα κόστη παραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω κόστη θεωρούνταν αρκετά υψηλά για τις παραδοσιακές εταιρείες κατασκευής κεραιών, οι οποίες δεν χρησιμοποιούν τεχνικές εκτυπωμένων κυκλωμάτων. Επίσης στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται επιφάνειες για την κατασκευή patch χωρίς υποστρώματα (air-filled patches), κλασικές τεχνικές κατεργασίας μετάλλων

μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Για μια τυπωμένη κεραία (Patch antenna) η οποία τροφοδοτείται στο άκρο (edge-fed), είναι δυνατή αυτοτελώς η κατασκευή της με χρήση μίας και μόνο διεργασίας τυπώματος. Οι κεραίες τύπου patch μπορούν να συνδεθούν εύκολα με τα άκρα τροφοδότησής τους, σε αντίθεση με τις κλασικές κεραίες και τις κεραίες κυματοδηγούς. Επομένως, οι κεραίες τύπου patch μπορούν εύκολα να υλοποιηθούν συμπεριλαμβάνοντας τα άκρα τροφοδοσίας τους, παράγοντας με αυτόν τον τρόπο το συνολικό κύκλωμα λειτουργίας. Η τεχνική κατασκευής τους διασφαλίζει ότι σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να υπάρξει αστοχία που να επηρεάσει την λειτουργία και τις επιδόσεις της κεραίας. Επομένως οι τεχνικές εκτύπωσης, σε συνδυασμό με τα φύλλα διηλεκτρικού που απαιτούνται για την κατασκευή μιας κεραίας, τύπου patch είναι οι κύριοι λόγοι που συντελούν στο χαμηλό κόστος παραγωγής τους. Κατά το παρελθόν και στις αρχικές φάσεις ανάπτυξης των κεραιών αυτών, τα υλικά αυτά θεωρούνταν ακριβά, ενώ κατά τα τελευταία χρόνια έχουν φθηνώνει σημαντικά συμβάλλοντας έτσι περαιτέρω στην μείωση του κόστους κατασκευής. Μέσα στα υλικά υποστρώματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτύπωση μιας κεραίας τύπου patch είναι και το FR4 που χρησιμοποιείται ως βάση για τις τυπωμένες πλακέτες, εφόσον η συχνότητα λειτουργίας της κεραίας δεν ξεπερνά το 1 GHz. Στην περίπτωση που μεγαλύτερες συχνότητες λειτουργίας απαιτούνται, η χρήση του παραπάνω υλικού δεν ενδείκνυται δεδομένου ότι οδηγεί σε μεγάλες απώλειες μέσω του διηλεκτρικού του.

#### Ευκολία στην κατασκευή συστοιχιών – κεραιών τύπου patch

Οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) θεωρούνται ως ακτινοβολητές μέσου κέρδους (τυπικά μικρότερα από 8 dBi), και για αυτό στην περίπτωση που απαιτούνται εφαρμογές με μεγαλύτερο κέρδος, συνδυασμός των κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antennas) σε συστοιχία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λύση. Η διαδικασία σχηματισμού συστοιχιών με χρήση κεραιών τύπου patch αποτελεί μία σχετικά εύκολη διαδικασία. Αυτό οφείλεται κυρίως στο δίκτυο τροφοδοσίας για μία απλή κεραία τύπου patch η οποία είναι μέλος μιας συστοιχίας. Η τροφοδοσία διανέμεται χρησιμοποιώντας τεχνικές κατασκευής τυπωμένων κυκλωμάτων, με πολλαπλές γραμμές επί των ακμών των κεραιών τύπου patch που χρειάζεται να τροφοδοτηθούν. Δεδομένου ότι οι κεραίες τύπου patch αποτελούν κεραίες πρακτικά δύο διαστάσεων (αμελώντας το πάχος τους), το δίκτυο διανομής των γραμμών τροφοδοσίας μπορεί να διοχετευθεί σε όλα τα στοιχεία της συστοιχίας χρησιμοποιώντας μόνο την μία επιφάνεια της κατασκευής, αφήνοντας ως τμήμα ακτινοβολήσης την αντίθετη πλευρά από αυτήν που διοχετεύτηκε το σήμα τροφοδοσίας. Η τελική διασύνδεση των γραμμών τροφοδοσίας προς την είσοδο του στοιχείου της κεραίας patch μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Με χρήση probes (συνδετήρων), σχισμών ή ακόμη και εκμεταλλευόμενη την ηλεκτρομαγνητική ζεύξη χωρίς σύνδεση. Έτσι σε αντίθεση με τις κωνικές κεραίες (horns) ή τις κεραίες με ενσύρματες διασυνδέσεις όπου το δίκτυο διασυνδέσεων για την διανομή της τροφοδοσίας είναι τριοδιάστατο, και εξαιρετικά πολύπλοκο καθώς το μέγεθος της στοιχειοκεραίας αυξάνει, το κόστος για την ανάπτυξη μιας συστοιχίας από κεραίες τύπου Patch δεν αυξάνεται σημαντικά περισσότερο από ότι απαιτείται για την κατασκευή ενός και μόνο στοιχείου.

### Επιδόσεις:

Οι κεραίες τύπου patch αποτελούν σχετικά αποδοτικούς ακτινοβολητές. Αυτό μπορεί να τεκμηριωθεί από την χρήση ενός και μόνο γεγονότος, δεδομένου ότι από την φυσική αρχή λειτουργίας τους αποτελούν ακτινοβολητές που λειτουργούν με συντονισμό. Οι ακτινοβολητές συντονισμού αποτελούν κατά παράδοση τις πιο αποδοτικές μορφές κεραιών συγκρινόμενοι με τους παραδοσιακούς ακτινοβολητές οδεύοντος κύματος. Οι κεραίες τύπου patch συγκρινόμενες με άλλους ακτινοβολητές που βασίζουν την λειτουργία τους επίσης σε συντονισμό, αποδίδουν σε λογικά επίπεδα. Το κατά πόσον, εξαρτάται από τις συνθήκες κατασκευής τους. Τρεις είναι κατά τεκμήριο οι μηχανισμοί που αφορούν στην τεχνολογία τυπωμένων κυκλωμάτων που οδηγούν σε μειωμένες επιδόσεις:

- Απώλειες αγωγιμότητας επιφανείας
- Απώλειες διηλεκτρικού υποστρώματος
- Απώλειες όδευσης κύματος στην επιφάνεια

Και οι τρεις παράγοντες εξαρτώνται από την ποιότητα των υλικών και έτσι καλή εκλογή υλικού μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση των επιδόσεων τους. Η απόδοση μιας κεραίας τύπου patch εξαρτάται επίσης από την μέθοδο τροφοδοσίας. Προφανώς οι τεχνικές με απευθείας διασύνδεση είναι πιο αποδοτικές από τις τεχνικές με μη απευθείας διασύνδεση.

### **1.2.2 Μειονεκτήματα**

#### Μεταβολή Σύνθετης Αντίστασης – Εύρος Συχνοτήτων:

Στην συμβατική της μορφή, η σύνθετη αντίσταση μίας κεραίας τύπου patch στην ζώνη συντονισμού είναι μικρή. Η ζώνη συντονισμού είναι μόλις ένα μικρό ποσοστό της συχνότητας λειτουργίας της κεραίας. Αυτό οφείλεται κυρίως σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι ο καθαρά συντονιστικός χαρακτήρας αυτών των κεραιών (οπότε η επίτευξη συντονισμού μπορεί να γίνει μόνο σε μία μικρή ζώνη από τις συχνότητες λειτουργίας), ενώ ο δεύτερος παράγοντας είναι το σχετικά μικρό πάχος της διάταξης το οποίο τυπικά δεν ξεπερνά το  $0.05\lambda_0$ , όπου  $\lambda_0$  το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στην συχνότητα λειτουργίας της κεραίας. Επομένως εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης για την λειτουργία τους δεν θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν κεραίες τύπου patch. Όμως όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπάρχουν αρκετές διεργασίες οι οποίες έχουν με επιτυχία αναπτυχθεί από τις δεκαετίες μελετών των κεραιών τύπου patch, για να ξεπεραστεί το πρόβλημα του εύρους ζώνης.

### Λιέγερση κυμάτων επιφανείας:

Εξαιτίας του υλικού υποστρώματος, οι κλασικές κεραίες τύπου patch επάγουν ένα  $TM_0$  ρυθμό κύματος (με μόνη εξαίρεση την περίπτωση στην οποία το υλικό υποστρώματος είναι αέρας). Αυτός ο επαγόμενος ρυθμός μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απόδοσης (το ποσοστό εξαρτάται από το υλικό υποστρώματος), καθώς επίσης και σε ζευξη του κύματος επιφανείας με άλλα τμήματα της κεραίας και της τροφοδότησης. Τα κύματα επιφανείας μπορεί να υποστούν διαθλάσεις από την πεπερασμένη έκταση του γειωμένου υποστρώματος, δημιουργώντας αυξημένα δια-πολωτικά επίπεδα καθώς και μεταβολή (scalping) του παραγόμενου τύπου πόλωσης της ακτινοβολίας. Από την πλευρά του δικτύου τροφοδοσίας στην περίπτωση που θεωρούμε μία κεραία δύο πολωτικών επιπέδων, το επαγόμενο επιφανειακό κύμα μπορεί να μειώσει την απομόνωση μεταξύ των διαφορετικών τύπων πόλωσης όπως τροφοδοτούνται, μειώνοντας συνολικά την απόδοση της κεραίας. Αρκετές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί οι οποίες χειρίζονται αυτό το εγγενές πρόβλημα.

### Μέγεθος:

Το μέγεθος μίας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antennas) patch παρουσιάζεται τόσο στα πλεονεκτήματα όσο και στα μειονεκτήματα αυτής της κεραίας, ακριβώς επειδή ακόμη και το μέγεθος αυτής της κεραίας μπορεί να είναι μεγάλο για κάποιες ειδικές εφαρμογές. Αυτές οι εφαρμογές σχετίζονται με την βιομηχανία ασύρματων προϊόντων και ειδικότερα στην ανάπτυξη συσκευών μικρής κλίμακας (hand-held) οι οποίες λειτουργούν σε συχνότητες μικρότερες των 2 GHz. Καθώς μία κεραία τύπου patch αποτελεί μία κεραία συντονισμού, θα πρέπει να έχει μήκος συγκρίσιμο με το μισό του μήκους κύματος που σχετίζεται με την συχνότητα λειτουργίας. Φυσικά για μικροκυματικές συχνότητες και για μικρούς όγκους που απαιτούνται σε συσκευές χειρός δεν υπάρχει μία απλή λύση για αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιώντας την τεχνολογία κατασκευής κεραιών τύπου patch. Με την πάροδο των ετών αρκετές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται για εμπορικές εφαρμογές και συσκευές κινητών κυρίως επικοινωνιών.

### Ισχύς Ακτινοβολίας:

Αν και οι επιδόσεις ακτινοβολίας είναι αρκετά καλές σε λογικά επίπεδα, καθώς και η δημιουργία διπλών επιπέδων πόλωσης είναι σχετικά πιο εύκολη με άλλους τύπους κεραιών, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η τεχνολογία κατασκευής κεραιών τύπου patch δεν αποδίδει αρκετά καλά για την ικανοποίηση των απαιτήσεων ενός συστήματος. Για παράδειγμα, εάν απαιτούνται πλευρικοί λοβοί της τάξης των 50 db για μία συστοιχία από κεραίες τύπου patch, είναι πολύ δύσκολο να ικανοποιηθεί αυτή η απαίτηση εξαιτίας ακριβώς της ίδιας της φύσης της κεραίας. Δεδομένου ότι οι κεραίες τύπου patch αποτελούν κεραίες συντονισμού και καθώς αυτές διεγείρονται για την παραγωγή των κυμάτων επιφανείας τους, δημιουργούνται προβλήματα στον έλεγχο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας τους. Τέτοιου τύπου απαιτήσεις όμως προέρχονται συνήθως από στρατιωτικά συστήματα και για τον λόγο αυτό δεν απαιτούνται λύσεις από κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas).

### ***1.3 Εφαρμογές Κεραιών Τύπου Μικροταινίας (patch antennas)***

Οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) σε διαφορετικές μορφές χρησιμοποιούνται σε μία πληθώρα εφαρμογών. Αρχικά οι εφαρμογές που έκαναν χρήση κεραιών τύπου patch ήταν περιορισμένες, ενώ στην συνέχεια με την πάροδο των ετών, την εξέλιξη των τεχνικών και μεθόδων, οι κεραίες αυτές καλύπτουν σήμερα ένα σημαντικό πλήθος από εφαρμογές, όπως:

- Ραντάρ (καθορισμένης συχνότητας για εφαρμογές κλίμακας ανίχνευσης χαμηλού κόστους)
- Πυραυλικά συστήματα (έλεγχος – πλοήγηση – επικοινωνία)
- Συστήματα τηλεμετρίας
- Αεροσκάφη (έλεγχος – πλοήγηση – επικοινωνία)
- Δορυφορικές Επικοινωνίες
- Επικοινωνίες Κινητών με Σταθμούς Βάσης
- Επικοινωνία με κινητές συσκευές (handsets)

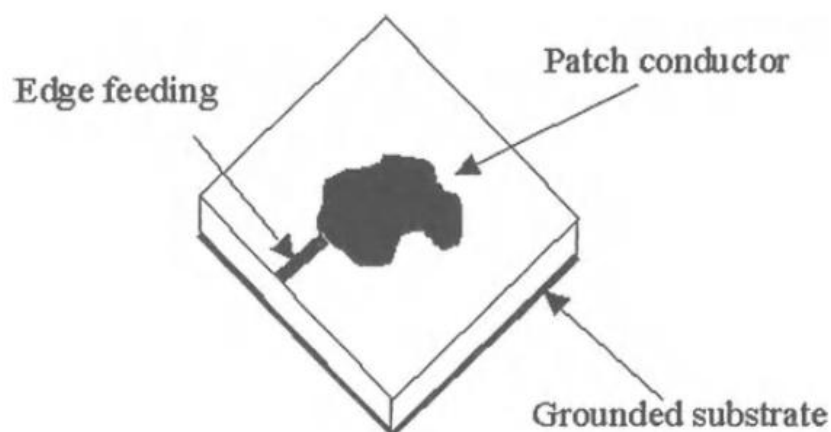


Σχήμα 3: Κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) για επικοινωνία κινητών συσκευών με σταθμό βάσης [102]

## 1.4 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Κεραιών Τύπου Μικροταινίας (patch antennas)

Όπως είδαμε και στην προηγούμενη παράγραφο οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) αποτελούν βασικές διατάξεις οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα σημαντικό μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Παρά την άμεση σύνδεση των κεραιών τύπου patch με τα τυπωμένα κυκλώματα, αυτές οι κεραίες αποτελούν συστήματα συντονισμού τα οποία δεν είναι εύκολα προς χειρισμό, όταν προσπαθούμε να βελτιώσουμε την γενικότερη απόδοση τους επιτυγχάνοντας τις ηλεκτρικές και μηχανικές απαιτήσεις ενός συνολικού συστήματος στο οποίο αποτελούν τμήματα του. Ακόμη και στην απλούστερή τους μορφή, δηλαδή, σε απλή γεωμετρία ενός επιπέδου το να προβλεφθεί και να καθορισθεί η απόδοση μίας κεραιάς τύπου patch δεν είναι καθόλου εύκολο. Για τον λόγο αυτό κατά προσέγγιση μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας απλές τεχνικές, δίνοντας σημαντική πληροφορία για τον τρόπο με τον οποίο μία κεραία τύπου patch λειτουργεί. Φυσικά, καθώς τα σχήματα και οι γεωμετρίες των κεραιών τύπου patch γίνονται πιο σύνθετα, αυτές οι μέθοδοι προσέγγισης έχουν περιορισμένη χρήση.

Ένα γενικό σχηματικό διάγραμμα μίας κεραιάς τύπου patch δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4: Γενική μορφή κεραιάς τύπου μικροταινίας (patch antenna) [102]

Στην εικόνα, ένας τυχαίου σχήματος αγωγός εντάσσεται με άκρο τροφοδότησης επί μιας γειωμένης διηλεκτρικής επιφάνειας. Μία κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna) αποτελεί έναν ακτινοβολητή συντονιστικού τύπου και για τον λόγο αυτό μία από τις διαστάσεις του θα πρέπει να είναι πολλαπλάσια της ποσότητας  $\lambda/2$  όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος για την καθορισμένη συχνότητα, λαμβάνοντας υπόψη τον περιβάλλοντα χώρο και το υπόλοιπο τυπωμένο κύκλωμα. Η συντονιζόμενη διάσταση εξαρτάται από το σχήμα του αγωγού – επιφάνεια. Στην συνέχεια θα γίνει προφανές ότι οι ιδιότητες του υποστρώματος, δηλαδή, η διηλεκτρική του σταθερά  $\epsilon_r$ , καθώς και το ύψος της διάταξης θα διαδραματίσουν το σημαντικότερο ρόλο για τις επιδόσεις της κεραιάς τύπου μικροταινίας (patch antenna).

Απλοποιώντας την λειτουργία της παραπάνω διάταξης, όταν εφαρμοσθεί ένα δυναμικό στο άκρο τροφοδότησης του ακτινοβολητή, ένα ρεύμα (καλούμενο ρυθμός), θα διεγερθεί επί της επιφάνειας και κάθετα ηλεκτρικά πεδία θα δημιουργηθούν ανάμεσα στην αγωγίμη επιφάνεια και στο γειωμένο επίπεδο κάτω

από την επιφάνεια. Επειδή οι σχισμές ανάμεσα στα άκρα της αγωγίμης επιφάνειας και το γειωμένο επίπεδο, απέχουν μεταξύ τους  $\lambda/2$ , το ακτινοβολούμενο πεδίο θα υπερτερεί σε συμφωνία, παράγοντας μία συντονιστικής υφής επαγόμενη ακτινοβολία. Η απόδοση της ακτινοβολούμενης ισχύος θα εξαρτηθεί από το υλικό που χρησιμοποιείται, καθώς ο περιορισμός των πεδίων θα καθορισθεί από την διηλεκτρική σταθερά του υλικού υποστρώματος και από το ύψος της κεραίας.

Θεωρώντας ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα όταν το σημείο τροφοδοσίας είναι κοντά στο ανοιχτό άκρο της αγωγίμης επιφάνειας ένα υψηλό επίπεδο τάσης και ένα σχετικά μικρό ρεύμα από το άκρο τροφοδοσίας, καταλήγουν σε μία υψηλή σύνθετη αντίσταση για την διάταξη. Όταν το σημείο τροφοδότησης της κεραίας είναι στο κέντρο της αγωγίμης επιφάνειας, η σύνθετη αντίσταση εισόδου της διάταξης είναι σχεδόν μηδενική καθώς το δυναμικό έχει σχεδόν ελάχιστη τιμή (απέχοντας  $\lambda/4$  από το ανοιχτό άκρο του κυκλώματος), και το ρεύμα που δημιουργείται θα είναι μέγιστο παρουσιάζοντας μία χαμηλή αντίσταση για το σημείο τροφοδοσίας. Κατά συνέπεια θα μεταβιβάζεται η μέγιστη ισχύς στην κεραία. Από αυτό γίνεται κατανοητό ότι το σημείο τροφοδοσίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει την σύνθετη αντίσταση εισόδου που εμφανίζει η κεραία.

#### 1.4.1 Μέθοδοι Ανάλυσης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) αποτελούν σχετικά δύσκολους ακτινοβολητές όταν πρόκειται να αναλυθούν. Από κλασική προσέγγιση αποτελούν κεραίες συντονισμού οι οποίες τοποθετούνται επί μη ομογενών περιβαλλόντων. Με την πάροδο των ετών έχουν αναπτυχθεί αρκετές αναλυτικές/αριθμητικές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση του ακτινοβολητή. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να ομαδοποιηθούν είτε ως προσεγγιστικές τεχνικές είτε ως αναλύσεις πλήρους κύματος (full-wave analysis). Οι προσεγγιστικές τεχνικές, όπως η μέθοδος μοντέλου της γραμμής μεταφοράς (transmission line model) ή το μοντέλο της κοιλότητας συντονισμού (cavity model), χρησιμοποιούν απλοποιημένες παραδοχές για να μειώσουν την πολυπλοκότητα της ανάλυσης της κεραίας. Αυτά τα εργαλεία σχεδιασμού είναι χρήσιμα για να καθορίσουν γενικά τους δείκτες επίδοσης μιας κεραίας τύπου patch και κάτω από δεδομένες συνθήκες, αυτές οι τεχνικές παραμένουν σχετικά ακριβείς. Μία τέτοια συνθήκη είναι ότι το υπόστρωμα είναι σχετικά λεπτό (λιγότερο από  $0.02\lambda$ ). Μία άλλη προϋπόθεση είναι ότι η διηλεκτρική σταθερά είναι σχετικά χαμηλή. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των προσεγγιστικών τεχνικών είναι η ταχύτητα στην ανάλυση για την εξαγωγή συμπερασμάτων και δεικτών επίδοσης, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα αυτών των τεχνικών ως κατευθυντήριες βάσεις σχεδιασμού. Όμως, στην περίπτωση που λίγες επαναλήψεις απαιτηθούν αλλά τα αποτελέσματα – επιδόσεις είναι δύσκολο να ικανοποιηθούν από μία συμβατική κεραία τύπου patch, τότε ο σχεδιαστής δεν θα πρέπει να βασιστεί στα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτές τις προσεγγιστικές τεχνικές.

Οι τεχνικές ανάλυσης πλήρους κύματος, προφανώς δίνουν πιο ακριβή αποτελέσματα καθώς εφαρμόζουν τις εξισώσεις του Maxwell για το πρόβλημα και στην συνέχεια βεβαιώνουν ότι οι συνοριακές συνθήκες που έχουν επιβληθεί στο



σύστημα, ικανοποιούνται. Οι τεχνικές ανάλυσης πλήρους κύματος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω σε δύο υπο-κατηγορίες. Αυτό βασίζεται στον τρόπο επίλυσης των εξισώσεων του Maxwell, δηλαδή, σε διαφορικές και ολοκληρωτικές μορφές αντίστοιχα. Η προσέγγιση των Ολοκληρωτικών Εξισώσεων ως υπο-κατηγορία των μεθόδων ανάλυσης πλήρους κύματος, αποτελεί την πιο ώριμη μέθοδο με μορφοποίηση σε Φασματικό ή Χρονικό πλέγμα (Spectral Domain Formulation – Time Domain Formulation), και έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον για την ανάλυση κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antennas) ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του '80. Με την πάροδο των ετών έχει επιτευχθεί ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών και των πειραματικών εκτιμήσεων, χρησιμοποιώντας και τις δύο προηγούμενες μεθόδους, και ο βαθμός ακρίβειας κυρίως εξαρτάται από τον βαθμό με τον οποίο ο προγραμματιστής του περιβάλλοντος θέλει να αναπαραστήσει την δομή την οποία και αναλύει. Το αρχικό πρόβλημα για χρήση της μεθόδου των Ολοκληρωτικών Εξισώσεων ήταν ο υπερβολικός χρόνος που αυτές απαιτούσαν για να αναλύσουν την κεραία τύπου patch. Όμως η παρεχόμενη ταχύτητα επεξεργασίας από τους σύγχρονους υπολογιστές έχει επιλύσει το παραπάνω πρόβλημα. Αυτήν την στιγμή υπάρχει μία πληθώρα προγραμμάτων ανάλυσης διαθέσιμων στην αγορά, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στις παραπάνω μεθόδους.

Η μέθοδος των διαφορικών εξισώσεων για την τεχνική ανάλυσης πλήρους κύματος, σε κεραιές τύπου patch επίσης έχει χρησιμοποιηθεί από τα τέλη της δεκαετίας του '80. Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite Difference Time Domain) ήταν η πρώτη και στην συνέχεια εφαρμόστηκε η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method). Αρχικά και οι δύο μέθοδοι υπέφεραν από τον μεγάλο υπολογιστικό χρόνο κατά την προσομοίωση, όμως αυτές οι τεχνικές επέτρεπαν μία πιο ρεαλιστική απεικόνιση των συνθηκών περιβάλλοντος για την κεραία τύπου patch. Αυτό γινόταν λαμβάνοντας υπόψη τις εξωτερικές συνθήκες (π.χ. η κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna) εντός κοιλότητας, σε επιφάνεια για handset, κλπ). Επομένως, αυτές οι μέθοδοι ήταν ικανές να επιλύσουν σύνθετα προβλήματα σε αντίθεση με τις ολοκληρωτικές μεθόδους οι οποίες απαιτούσαν κατά προσέγγιση ότι το γειωμένο επίπεδο καθώς και το επίπεδο του διηλεκτρικού υλικού του υποστρώματος εκτείνονταν σε άπειρη έκταση γύρω από την επιφάνεια της κεραιάς.

## 1.5 Σχεδιασμός Κεραιών τύπου Μικροταινίας (*patch antenna*)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των προηγούμενων μεθόδων ανάλυσης κατά τον σχεδιασμό μίας κεραίας τύπου μικροταινίας (*patch antenna*).

### 1.5.1 Το μοντέλο Μετάδοσης Γραμμής Μεταφοράς (Transmission Line Model)

Το μοντέλο Μετάδοσης Γραμμής Μεταφοράς [22],[23], θα πρέπει να θεωρείται ως μία βασική τεχνική ανάλυσης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει χονδρικά αποτελέσματα κατά τον σχεδιασμό μίας κεραίας-τύπου μικροταινίας (*patch antennas*). Το μοντέλο είναι αρκετά απλοποιημένο έτσι ώστε να δώσει ακριβή αριθμητικά αποτελέσματα κατά την διαδικασία εφαρμογής του και κατά συνέπεια τα παραγόμενα αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά της κεραίας αναμένεται να μην είναι ακριβώς τα πραγματικά μετρούμενα. Όταν γίνεται χρήση της παραπάνω μεθόδου ανάλυσης τα αποτελέσματα της, θα πρέπει να λαμβάνονται ως κατευθύνσεις σχεδιασμού, καθώς το παραγόμενο σχεδιαστικό αποτέλεσμα θα χρειάζεται μικρορυθμίσεις που αφορούν στο πάχος της κεραίας, στο πάχος του υποστρώματος καθώς και την γραμμή τροφοδοσίας για να μπορέσει να ικανοποιήσει τις τελικές απαιτήσεις – προδιαγραφές σχεδιασμού.

### 1.5.2 Το μοντέλο Συντονισμένης Κοιλότητας (Cavity Model)

Το μοντέλο Συντονισμένης Κοιλότητας [23],[24], είναι ακόμη πιο εξαρτημένο σε σχέση με το μοντέλο της γραμμής μετάδοσης και κατά συνέπεια τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την εφαρμογή του θα χρειαστούν σίγουρα μεταβολές για να ικανοποιήσουν τις απαιτούμενες τελικές προδιαγραφές σχεδιασμού. Για πάχος υποστρώματος μεγαλύτερο του 0.03λ συστήνεται να μην χρησιμοποιείται καμία από τις παραπάνω προσεγγιστικές μεθόδους καθώς θα καταλήξουν σε λανθασμένες παραδοχές – αποτελέσματα. Επιπλέον, το μοντέλο συντονισμένης κοιλότητας δεν μπορεί να συμπεριλάβει την εξωτερικά εισερχόμενη τροφοδοσία με την μορφή συνδετήρα (*probe*) ενώ μπορεί να συμπεριλάβει στην ανάλυση του τροφοδοσία ηλεκτρομαγνητικής ζεύξης (*non-contact*). Επομένως για το μοντέλο απευθείας ζεύξης της τροφοδοσίας με σύνδεση, το μοντέλο συντονισμένης κοιλότητας θα δυσκολευτεί στην ανάλυση για τον καθορισμό των ρυθμών και των κυμάτων διέγερσης.

### **1.5.3 Μέθοδος με χρήση Ολοκληρωτικών Εξισώσεων στο πεδίο της συχνότητας (Spectral Domain Integral Equation Method)**

Η μέθοδος σχεδιασμού με βάση και χρήση Ολοκληρωτικών Εξισώσεων [25],[26], είναι εξαιρετικά ακριβής και αξιόπιστη κατά τον σχεδιασμό κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antennas), όταν ο περιβάλλον χώρος δεν επιδρά με δύσκολες συνοριακές συνθήκες. Τέτοια περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί το περιορισμένο μέγεθος του υποστρώματος διηλεκτρικού κάτω από την κεραία. Σε τέτοιες περιπτώσεις όπου οι διαστάσεις του διηλεκτρικού γειωμένου υποστρώματος είναι συγκρίσιμες με το μέγεθος της αγωγίμης επιφάνειας τα αποτελέσματα από την διαδικασία ανάλυσης δεν θα είναι και τόσο ακριβή και κατά συνέπεια θα χρειαστούν επιπλέον μεταβολές για να μπορέσει η κεραία να ικανοποιήσει τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

Η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης εμφανίζει εξαιρετική ταχύτητα σύγκλισης όταν το σχήμα των κεραιών είναι κωνικό. Αυτό οφείλεται στην επίλυση επακριβώς των παραγόμενων εξισώσεων πεδίου, δίνοντας έτσι ταχύτητα στους υπολογισμούς. Η μέθοδος συνίσταται ως βάση για την υλοποίηση πολύπλοκων συστημάτων κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antennas).

### **1.5.4 Μέθοδος Χωρικού Πλέγματος με χρήση Ολοκληρωτικών Εξισώσεων (Spatial Domain Integral Equation Method)**

Η μέθοδος σχεδιασμού με Ολοκληρωτικών Εξισώσεων στο πεδίο του χώρου [27] είναι από τις πλέον δημοφιλείς μεθόδους στα μοντέλα ανάλυσης πλήρους κύματος. Η μέθοδος αυτή είναι πιο πολύπλευρη σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο.

### **1.5.5 Μέθοδος των Πεπερασμένων Χρονικών Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου (Finite Difference Time Domain Method)**

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών στο πεδίο του χρόνου [28] μπορεί να αποδειχθεί μία εξαιρετικά ακριβής μέθοδος σχεδιασμού, εφόσον ο σχεδιαστής διαθέτει τον χρόνο για την ακριβή μοντελοποίηση του προβλήματος σχεδιασμού. Η ακρίβεια της μεθόδου βασίζεται στην ικανότητα της να μπορεί να αναλύει τον περιβάλλοντα χώρο και να λαμβάνει υπόψη της την επίδραση του στην λειτουργία της σχεδιαζόμενης κεραιάς. Όταν λοιπόν οι επιβαλλόμενες συνθήκες από τον περιβάλλοντα χώρο απαιτούν ακρίβεια στον σχεδιασμό για την επίδραση τους, η μέθοδος συνίσταται για την παραγωγή αποτελεσμάτων ακριβείας με τίμημα τον απαιτούμενο βέβαια χρόνο που απαιτείται για την διαδικασία της ανάλυσης.

### **1.5.6 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. (Finite Elements Method)**

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων [32] χρησιμοποιείται ως μέθοδος σχεδιασμού κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antennas) από τις πρώτες

δεκαετίες που προέκυψε η ανάγκη σχεδιασμού. Το πακέτο ανάλυσης και προσομοίωσης HFSS® [33] την χρησιμοποιεί ως βάση για την εξαγωγή των απαιτούμενων υπολογισμών. Οι τεχνικές επίλυσης βασίζονται σε διαφορικές εξισώσεις και είναι σαφώς πιο αργές από τις Ολοκληρωτικές Εξισώσεις, αλλά το αποκομιζόμενο όφελος από την διαδικασία επίλυσης είναι σαφώς πολύ σημαντικό, ειδικότερα στην περίπτωση όπου οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) συνδυάζονται με ενεργές συσκευές για την πυροδότηση του πεδίου τους καθώς και όταν χρησιμοποιούν κελύφη - περιβλήματα (στήριξης – τοποθέτησης που επηρεάζουν τα αναπτυσσόμενα πεδία της κεραίας).

### 1.5.7 Οι εξισώσεις Maxwell προς επίλυση

Οι παραπάνω μέθοδοι αριθμητικής επίλυσης που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, καλούνται να επιλύσουν το πεδιακό πρόβλημα των εξισώσεων Maxwell για την κεραία τύπου patch, λαμβάνοντας υπόψη, εκτός από τις γεωμετρικές της διαστάσεις και τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες (γειωμένο υπόστρωμα, σήμα πυροδότησης). Οι εξισώσεις Maxwell σε ολοκληρωτική και σημειακή (διαφορική) μορφή παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:

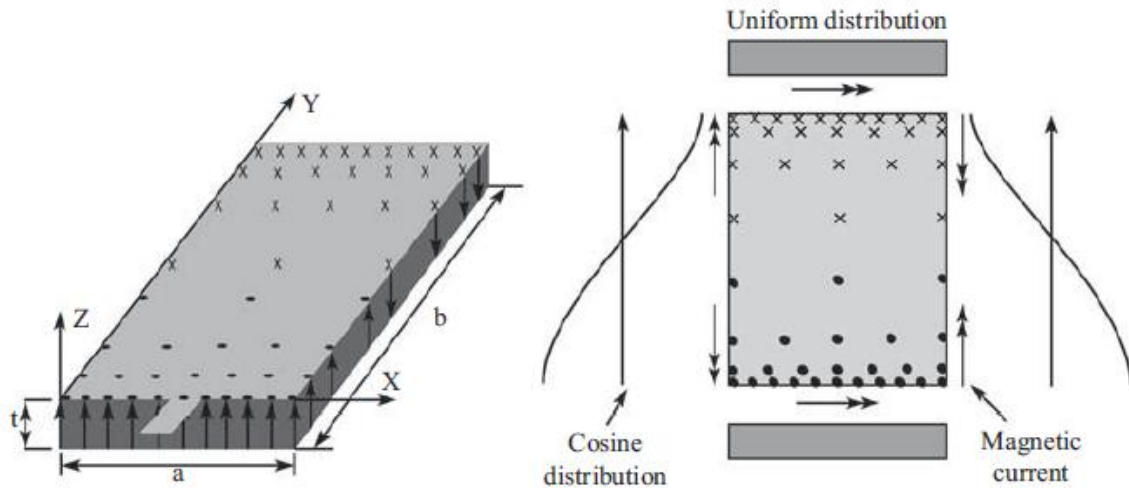
Name	Integral equations	Differential equations
Gauss's law	$\oiint_{\partial\Omega} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = 4\pi \iiint_{\Omega} \rho dV$	$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho$
Gauss's law for magnetism	$\oiint_{\partial\Omega} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
Maxwell–Faraday equation (Faraday's law of induction)	$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{1}{c} \frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
Ampère's circuital law (with Maxwell's addition)	$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \frac{1}{c} \left( 4\pi \iint_{\Sigma} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \right)$	$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \left( 4\pi\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$

Σχήμα 5: Οι πεδιακές εξισώσεις Maxwell σε ολοκληρωτική και σημειακή μορφή

Κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους επίλυσης χρησιμοποιεί κατάλληλα την εφαρμογή αναδρομικών σχέσεων χρησιμοποιώντας την ολοκληρωτική ή την σημειακή μορφή των εξισώσεων. Η διαδικασία επίλυσης γίνεται αριθμητικά αξιοποιώντας την δυνατότητα της χρήσης ΗΥ, καθώς και ειδικών μαθηματικών μεθόδων (παρεμβολής με χρήση πολυωνύμων), στοχεύοντας σε αριθμητική σύγκλιση και ακρίβεια στα παραγόμενα αποτελέσματα. Οι επιλύσεις αποδίδουν αριθμητικά το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται πλησίον και μακράν της κεραίας.

### 1.5.8 Αναλυτική επίλυση των εξισώσεων του ορθογωνικού patch

Στην συνέχεια παρατίθεται σε κλειστή (αναλυτική) μορφή η επίλυση των αναπτυσσόμενων συναρτήσεων για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο για κεραία ορθογωνικής επιφάνειας τύπου patch. Το σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ορθογωνικής επιφάνειας του Patch (σε πλάγια όψη – κάτοψη).



Σχήμα 6: Πλάγια όψη και κάτοψη της ορθογωνικής επιφάνειας του patch

Για την διέγερση της κεραίας θεωρούμε χωρικό ρεύμα της μορφής:

$$\mathbf{J} = \begin{cases} \hat{\mathbf{a}}_z, & c < x < d, y = 0 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases}$$

Για την επίλυση των εξισώσεων Maxwell χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της συντονισμένης κοιλότητας (cavity model). Αρχικά θεωρούμε ηλεκτρικό πεδίο με περιγραφή χωριζόμενων μεταβλητών στην μορφή:

$$E_{z,m} = A_m \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \beta_m (y - b)$$

Το μαγνητικό πεδίο προκύπτει με χρήση του νόμου του Ampere:

$$H_{x,m} = -jA_m \frac{\beta_m}{\omega\mu_0} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \beta_m (y - b)$$

$$H_{y,m} = jA_m \frac{m\pi/a}{\omega\mu_0} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \beta_m (y - b)$$

Οι ιδιοτιμές του προβλήματος δίνονται από την σχέση:

$$\beta_m = \left[ \omega^2 \epsilon \mu_0 - \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 \right]^{1/2}$$

ενώ οι σταθερές  $A_m$  θα προσδιοριστούν με την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών για την επιφάνεια της κεραίας.

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{j \epsilon_{0m} \omega \mu_0}{a \beta_m \sin \beta_m b} \int_c^d \cos \frac{m\pi x'}{a} dx' \\ &= \frac{j 4 \omega \mu_0}{m \pi \beta_m \sin \beta_m b} \sin \frac{m\pi (d-c)}{2a} \cos \frac{m\pi (d+c)}{2a}, m > 0 \\ A_0 &= \frac{j (d-c)}{a} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{1}{\sin (\omega \sqrt{\epsilon \mu_0} b)}, m = 0 \end{aligned}$$

δίνοντας συνολικές περιγραφές των λύσεων για το ηλεκτρικό πεδίο στην μορφή:

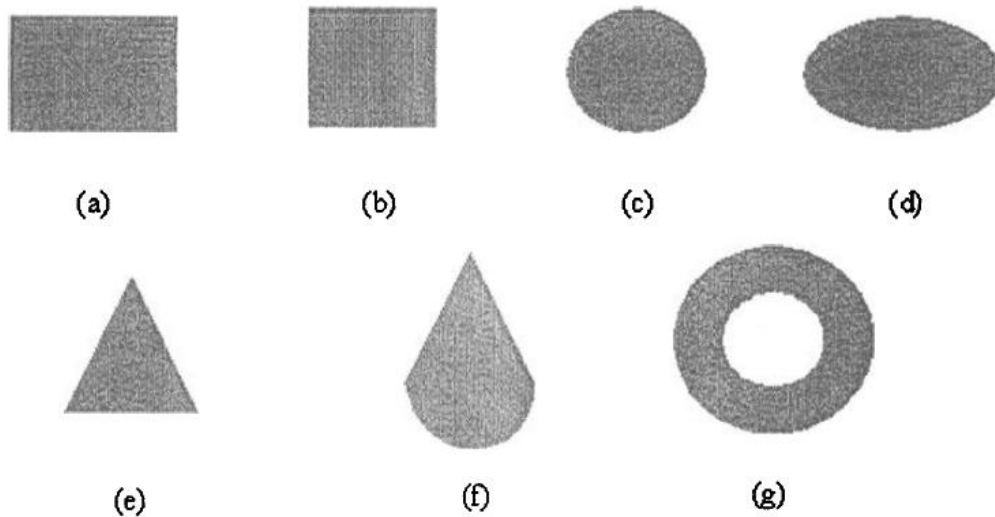
$$\begin{aligned} E_z &= \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \beta_m (y-b) \\ H_x &= \frac{1}{j\omega\mu} \sum_{m=0}^{\infty} A_m \beta_m \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \beta_m (y-b) \\ H_y &= -\frac{1}{j\omega\mu} \sum_{m=0}^{\infty} A_m \frac{m\pi}{a} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \beta_m (y-b) \end{aligned}$$

Από τις παραπάνω αναλυτικές εξισώσεις για την έκφραση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων που αναπτύσσονται επί της επιφάνειας της κεραίας, διαπιστώνουμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο διαθέτει μόνο z-συνιστώσα (κάθετη στην επιφάνεια της κεραίας), ενώ το μαγνητικό πεδίο από τις εξισώσεις Maxwell εμφανίζει συνιστώσες στις κάθετες διευθύνσεις, δηλαδή, στις x και y. Όλες οι υπόλοιπες συνιστώσες πεδίων είναι μηδενικές.

Ανάλογες λύσεις σε κλειστή μορφή μπορούν επίσης να δοθούν στην περίπτωση που η επιφάνεια της κεραίας είναι κυκλική ή τμήμα κύκλου. Καθίσταται προφανές ότι ο αριθμητικός υπολογισμός για τα επαγόμενα πεδία ακόμη και όταν οι περιγραφές των λύσεων είναι σε κλειστή μορφή απαιτεί την χρήση Η/Υ. Επιπλέον θα πρέπει να τονιστεί ότι η αριθμητική επίλυση είναι ο μοναδικός τρόπος για την λύση σύνθετων πεδιακών προβλημάτων, ειδικότερα στην περίπτωση όπου οι γεωμετρικές διαστάσεις είναι μεταβαλλόμενες με μη καθορισμένο μαθηματικό τρόπο, ή/και οι συνοριακές συνθήκες είναι σύνθετες και δύσκολο να επιβληθούν.

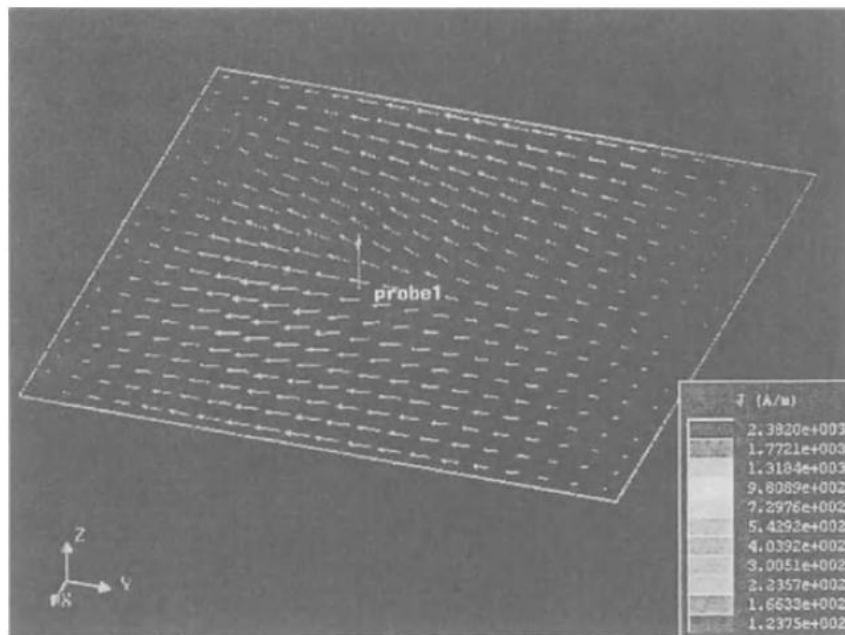
### 1.6 Η επίδραση του σχήματος της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antennas) στην λειτουργία

Με την πάροδο των ετών αρκετές γεωμετρίες και σχήματα έχουν χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antennas). Ένα γενικό σχηματικό διάγραμμα αυτών παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 7: Βασικά γεωμετρικά σχήματα κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antenna) [103]

Τα πιο συνηθισμένα σχήματα για τον σχεδιασμό κεραιών τύπου patch είναι τα ορθογωνικά τα τετραγωνικά καθώς και οι κυκλικές δομές. Για το ορθογωνικό πλαίσιο η κεραία τύπου patch διεγείρεται σε κάποιο σημείο κατά μήκος της διάστασης συντονισμού  $L$ , δημιουργώντας ένα ρυθμό κύματος προς αυτήν την κατεύθυνση. Το σχήμα που παρουσιάζεται στην συνέχεια δείχνει τα αναπτυσσόμενα ρεύματα και τα αντίστοιχα πεδία επί του ορθογωνικού πλαισίου.



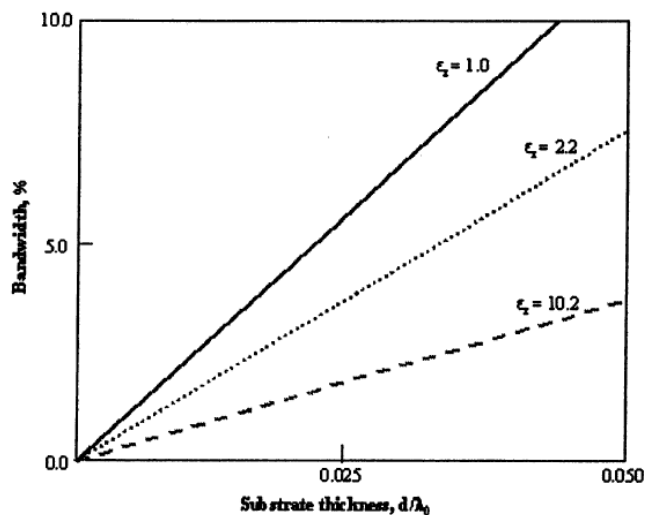
Σχήμα 8: Διεγχειρόμενα πεδία σε ένα ορθογωνική αγωγίμη επιφάνεια[104]

Γενικότερα το μήκος της αγωγίμης επιφάνειας ρυθμίζει την συχνότητα συντονισμού ενώ το πλάτος της αγωγίμης επιφάνειας επιδρά στην τιμή της σύνθετης αντίστασης κατά τον συντονισμό καθώς και το εύρος ζώνης (bandwidth) της κεραίας. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος της αγωγίμης επιφάνειας τόσο μικρότερη καθίσταται η σύνθετη αντίσταση της κεραίας. Η παραπάνω διασύνδεση παραμένει σε ισχύ κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις, όπως είναι το σχετικά λεπτό υπόστρωμα του διηλεκτρικού που χρησιμοποιεί η κεραία. Καθώς το πάχος του υλικού αυξάνει και γίνεται μεγαλύτερο από την τιμή  $0.03\lambda$ , οι παραπάνω σχέσεις δεν είναι αντιστροφes καθώς το σημείο τροφοδοσίας και η κατεύθυνση του μπορούν να μεταβάλλουν δραστικά την απόδοση της κεραίας. Οι κατευθύνσεις του πεδίου που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο σχήμα αφορούν σε γραμμική πόλωση έτσι ώστε να διατηρείται η σχέση κατεύθυνσης του επαγόμενου πεδίου και του διαδιδόμενου ρεύματος επί της αγωγίμης επιφάνειας. Μετακινώντας την θέση τροφοδοσίας της κεραίας από τον άξονα συμμετρίας κατά το πλάτος  $W$ , αφήνει επίσης την διάδοση των ρευμάτων κατά την ίδια κατεύθυνση. Έτσι, κάτω από συντηρητικές προσεγγίσεις στην περίπτωση μίας τετραγωνικής αγωγίμης επιφάνειας όπου το σημείο τροφοδότησης βρίσκεται επί της διαγωνίου του, μπορούν να επαχθούν διπλοί ρυθμοί ως προς την πόλωση για την καθορισμένη συχνότητα λειτουργίας. Γενικότερα από όλα τα σχήματα για τις κεραίες τύπου patch, τα ορθογωνικά πλαίσια τείνουν να εμφανίζουν την υψηλότερη σύνθετη αντίσταση σε σχέση με το παρεχόμενο εύρος ζώνης, εξαιτίας του γεγονότος ότι είναι μεγαλύτερα σε διαστάσεις από τις άλλες γεωμετρίες σχημάτων. Τετραγωνικές αγωγίμες επιφάνειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διέγερση διπλών ή/και κυκλικού τύπου πολώσεων.

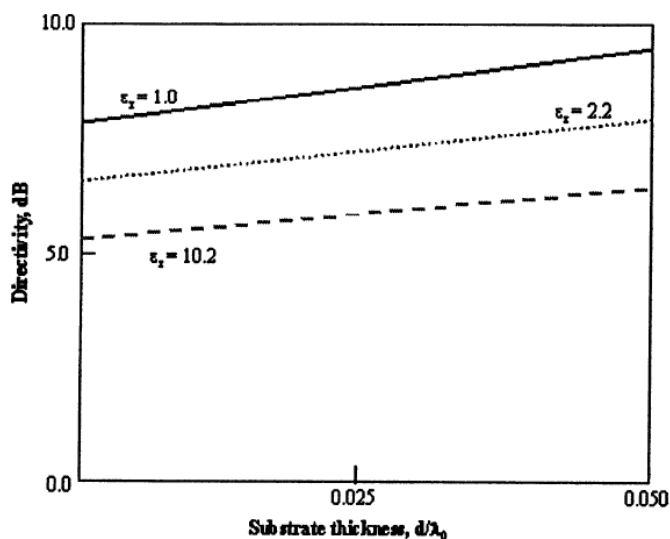


### 1.7 Σύνθετη Αντίσταση και Απόδοση Ακτινοβολίας για Κεραίες τύπου Μικροταινίας (patch antennas) απλού επιπέδου

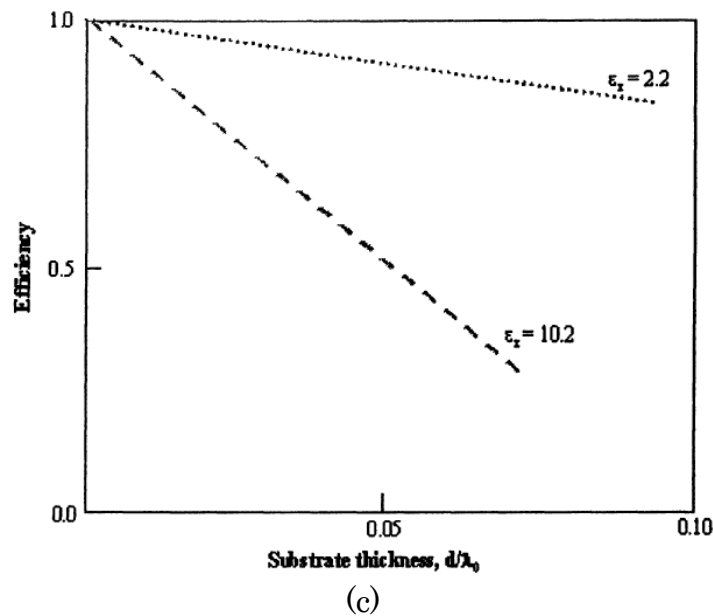
Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται μερικές πολύ σημαντικές τάσεις για την απόδοση ακτινοβολήσης για τις κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) οι οποίες συντίθενται από ένα επίπεδο (διηλεκτρικό). Τα διαγράμματα παρουσιάζουν την απόδοση ακτινοβολίας ως συνάρτηση των ιδιοτήτων του επιπέδου του διηλεκτρικού. Οι δείκτες επίδοσης αντιπροσωπεύουν τις ιδιότητες της κεραίας σε κανονικοποιημένη μορφή, για μία απλή μέθοδο διέγερσης της κεραίας τύπου patch. Τα διαγράμματα που ακολουθούν αφορούν ορθογωνικές αγώγιμες επιφάνειες, αλλά και άλλες γεωμετρικές δομές εμφανίζονται να έχουν παρόμοιες συμπεριφορές και αποδόσεις. Το εύρος ζώνης λειτουργίας (ορίζεται στο διάγραμμα ως 10 db απώλειας επιστροφής – return loss), παρουσιάζεται για διάφορες τιμές του διηλεκτρικού του υποστρώματος καθώς και για μεταβλητά πάχη (σχήμα α).



(a)



(b)



(c)  
 Σχήμα 9: Δείκτες Επιδόσεων για κεραία απλού επιπέδου (a) Σχέση σύνθετης Αντίστασης με Εύρος Συχνοτήτων Λειτουργίας (b) Κατευθυντικότητα (c) Απόδοση δημιουργίας κύματος επιφανείας [102]

Όπως μπορούμε να δούμε από το σχήμα όσο πιο παχύ γίνεται το υλικό υποστρώματος τόσο περισσότερο αυξάνει το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας της κεραίας τύπου patch. Μία σημαντική παρατήρηση από το σχήμα αυτό είναι ότι όσο μικραίνει η διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος τόσο επίσης μεγαλώνει το εύρος ζώνης το οποίο μπορεί να επιτευχθεί από την κεραία. Οι παραπάνω τάσεις του διαγράμματος δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ότι εξακολουθούν να ισχύουν όταν χρησιμοποιηθεί πολύ παχύ υπόστρωμα, εξαιτίας ειδικών χαρακτηριστικών της κεραίας τύπου patch, που θέτουν όριο στην απόδοση ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το πάχος.

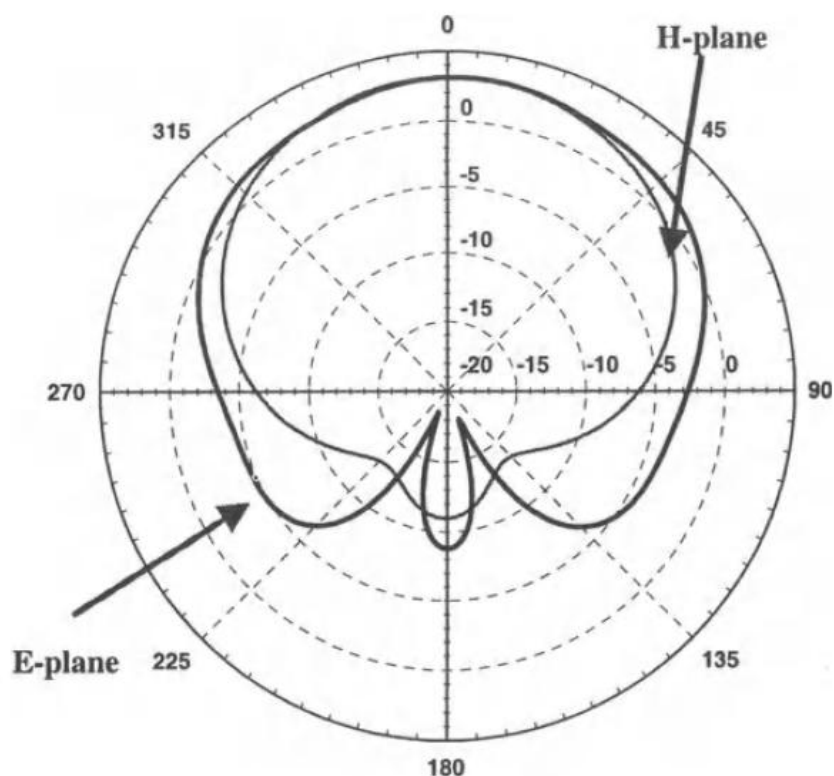
Η κατευθυντικότητα (Directivity) της κεραίας τύπου patch παρουσιάζεται ως συνάρτηση διαφορετικών διηλεκτρικών σταθερών για κανονικοποιημένα πάχη υποστρώματος στο σχήμα (b). Αυτό που παρατηρείται σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι επειδή η κεραία τύπου patch τοποθετείται επί υλικών χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς, απαιτούνται μεγαλύτερες διαστάσεις κεραίας για ικανοποιητικά επίπεδα ακτινοβολίας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η κεραία τύπου patch λειτουργεί συντονιστικά για την παραγωγή κυμάτων μήκους  $\lambda$  όταν κάποια διάσταση της είναι  $\lambda/2$ , οδηγώντας έτσι σε μεγαλύτερη επιφάνεια και κατά συνέπεια μεγαλύτερη κατευθυντικότητα. Η κατευθυντικότητα αυξάνει ελαφρά καθώς το πάχος του υποστρώματος αυξάνει, γεγονός το οποίο συνεπάγεται επίσης αύξηση για τον όγκο της κεραίας.

Τρεις είναι οι παράγοντες που προκαλούν απώλειες σε μία κεραία τύπου patch:

- Απώλειες αγωγιμότητας του υλικού
- Απώλειες του διηλεκτρικού υποστρώματος
- Απώλειες από την δημιουργία των κυμάτων επιφανείας κατά την εκπομπή

Οι δύο πρώτοι από αυτούς τους παράγοντες εξαρτώνται από την ποιότητα του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του υποστρώματος. Ο

τελευταίος παράγοντας οφείλεται κυρίως στα χαρακτηριστικά του υλικού, όπως είναι η διηλεκτρική σταθερά καθώς και το πάχος του υλικού. Τα επιφανειακά κύματα εκπομπής είναι ρυθμοί μετάδοσης (modes of propagation) που υποστηρίζονται από το γειωμένο υλικό που χρησιμοποιείται για την μορφοποίηση της κεραίας τύπου patch. Το σχήμα (c) δείχνει την απόδοση των κυμάτων επιφανείας μίας κεραίας τύπου patch για διαφορετικά διηλεκτρικά ως συνάρτηση του πάχους του υποστρώματος. Όπως γίνεται εμφανές από το σχήμα όσο μεγαλύτερη η διηλεκτρική σταθερά τόσο περισσότερη ισχύς δαπανάται στο κύμα επιφανείας και κατά συνέπεια λιγότερη απόδοση ισχύος ακτινοβολίας παράγεται για την κεραία. Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι δεν παράγονται καθόλου ρυθμοί ακτινοβολίας όταν  $\epsilon_r=1.0$ . Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει τις συνθήκες για πότε κάθε ρυθμός μετάδοσης ενεργοποιείται για μία τυπική κεραία τύπου patch με διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r=2.55$ . Όπως γίνεται εμφανές από το διάγραμμα, για τις πιο πρακτικές εφαρμογές, ο μοναδικός ρυθμός για τα κύματα επιφανείας που ενεργοποιείται είναι ο  $TM_{01}$ , ο οποίος και παραμένει πάντα κύριος ρυθμός με εξαίρεση την περίπτωση όπου  $\epsilon_r=1.0$ .



Σχήμα 10: Διάγραμμα Ακτινοβολίας μιας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) [102]

Από το Σχήμα 9 παρουσιάζεται ένα ουσιαστικό πρόβλημα που αφορά στην ολοκλήρωση μίας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) με χρήση των τεχνολογιών MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuits) και OEIC (Opto-Electronic Integrated Circuits). Οι ανωτέρω τεχνολογίες αποτελούν σημαντικό πλεονέκτημα στην κατασκευή κεραίων τύπου patch. Οι προηγούμενες τεχνολογίες αναπτύχθηκαν για σχετικά υψηλές διηλεκτρικές σταθερές και λεπτά πάχη υλικών (αξίζει να σημειωθεί ότι η διηλεκτρική σταθερά του GaAs (Αρσενικούχου Γαλλίου) και του AlGaInP (Αλουμινίου με προσμίξεις Γαλλίου – Ινδίου και Φωσφόρου) που συνιστούν κοινά υλικά για αυτές τις τεχνολογίες είναι περίπου 13). Κάνοντας χρήση αυτών των τεχνολογιών για την ανάπτυξη μίας

κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna), θα έχει ως αποτέλεσμα να καταλήξει σε μία κεραία με χαμηλές αποδόσεις ως προς το εύρος ζώνης και τις επιδόσεις του διαγράμματος ακτινοβολίας της. Ακόμη και στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες οι οποίες να συνδυάζουν παθητικά μικροκυματικά κυκλώματα όπως φίλτρα και μίκτες, αυτό δημιουργεί επίσης ένα πρόβλημα, δεδομένου ότι χρειάζεται όλα αυτά να τεθούν σε μία συμπαγή μορφή μαζί με την κεραία. Αυτό συνεπάγεται επίσης υλικά με υψηλή διηλεκτρική σταθερά και λεπτά υποστρώματα όπως το υλικό του Al (αλουμίνιο) με διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r=10.2$ . Ευτυχώς όμως υπάρχουν τρόποι για να ξεπεραστεί και αυτό το σχεδιαστικό πρόβλημα.

Ένα τυπικό διάγραμμα για το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο (E και H planes) παρουσιάστηκε στο Σχήμα 10. Όπως παρουσιάζεται από το σχήμα, το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι επεκταμένο και στις δύο κάθετες διευθύνσεις. Τα διαγράμματα για το ηλεκτρικό πεδίο (E-plane), είναι γενικά πιο ευρυγώνια σε σχέση με τα αντίστοιχα για το μαγνητικό (H-planes), εξαιτίας του κύματος επιφανείας και άλλων υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης που ενεργοποιούνται στο άκρο κατάληξης του συστήματος τροφοδότησης ( $\theta=90^\circ$ ).

Βασιζόμενοι στο Σχήμα 9 ένας τυπικός σχεδιασμός για μία κεραία τύπου patch μπορεί να λάβει υπόψη του τα βασικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται. Στην περίπτωση που χρειάζεται να σχεδιασθεί μία κεραία τύπου patch με μεγάλο εύρος ζώνης όπως π.χ. 5% της συχνότητας λειτουργίας τότε το υλικό για την κατασκευή αυτής της κεραίας μπορεί να καθορισθεί από το διάγραμμα στο Σχήμα 9 (a). Μετά την συγκεκριμένη επιλογή η επόμενη φάση αποτελεί η εκλογή της γεωμετρίας για την αγωγή επιφάνεια. Αυτό κυρίως καθορίζεται από τον διαθέσιμο χώρο για την κεραία καθώς και τον τύπο της απαιτούμενης πόλωσης. Συνήθως το κέρδος για την κεραία καθορίζεται πιο μετά δεδομένου ότι το κέρδος μίας κεραίας τύπου patch είναι σχετικά σταθερό και μπορεί εύκολα να αυξηθεί (εφόσον δεν είναι ικανοποιητικό) με χρήση συστοιχιών (arrays). Μετά την επιλογή των παραπάνω η επόμενη φάση είναι ο καθορισμός του τύπου τροφοδότησης για την απόδοση ισχύος από και προς την κεραία.

### ***1.8 Μέθοδοι Διέγερσης Κεραιών Τύπου Μικροταινίας (patch antennas)***

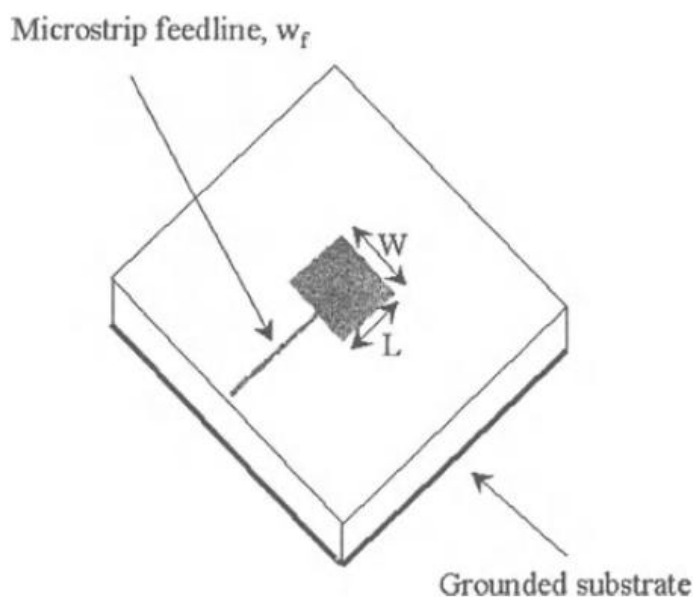
Το επόμενο βήμα μετά την παρουσίαση των λειτουργιών και των παραμέτρων μιας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antennas) είναι να καθορισθεί ο τρόπος με τον οποίο θα τροφοδοτηθεί για την λειτουργία της. Ο τρόπος με τον οποίο τροφοδοτείται με ισχύ μία κεραία τύπου patch θα καθορίσει το εύρος ζώνης και την σύνθετη αντίσταση της, τους ρυθμούς και τις κατευθύνσεις των διεγερόμενων πεδίων, την απόδοση της συνολικής κεραίας, την ευκολία κατασκευής της κεραίας καθώς και την σταθερότητα στην απόδοση της. Υπάρχουν 4 βασικές τεχνικές τροφοδότησης ή διέγερσης μίας κεραίας τύπου patch:

- Τροφοδότηση από το άκρο (edge-fed)
- Τροφοδότηση με συνδετήρα (probe-fed)
- Τροφοδότηση με διατομή (aperture-coupled)
- Τροφοδότηση με ζεύξη (proximity-coupled)

Οι παραπάνω τεχνικές τροφοδότησης μπορούν περαιτέρω να απλοποιηθούν σε κατηγορίες ως άμεσες (edge, probe) και μη επαφής ή H/M ζεύξης (aperture, proximity). Προσφάτως προτείνονται επίσης μερικές νέες τεχνικές τροφοδότησης όπως χρήσης συνδετήρα σχήματος L (L-shape probe). Όμως η παραπάνω τεχνική δεν αποτελεί μία τελείως διαφορετική τεχνική τροφοδότησης εφόσον αποτελεί μία υβριδική τεχνική συνδετήρα (probe) και H/M ζεύξεως (proximity-coupled). Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι ιδιότητες και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτών των μεθόδων.

### 1.8.1 Τροφοδότηση από το άκρο (edge-fed)

Μία από τις πρώτες τεχνικές τροφοδότησης μίας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) είναι η τεχνική τροφοδότησης της από το άκρο [40] ή όπως εναλλακτικά λέγεται τροφοδότηση με γραμμή (microstrip-line fed). Μία σχηματική αναπαράσταση αυτής της τεχνικής παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:

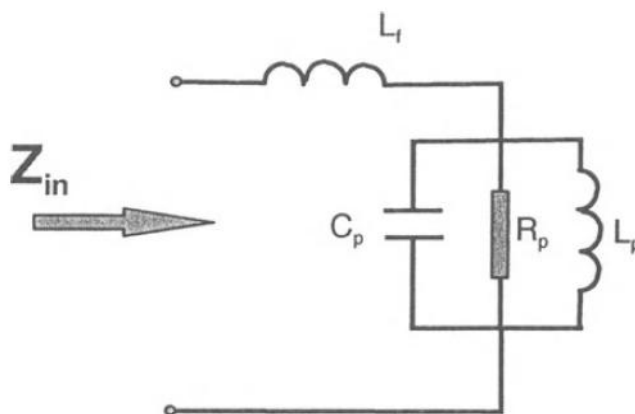


Σχήμα 11: Τροφοδότηση κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) από το άκρο (edge-fed) [104]

Στο παραπάνω σχήμα για την τροφοδότηση της κεραίας τύπου Patch, χρησιμοποιείται μία γραμμή πλάτους  $W_f$  σε απευθείας σύνδεση με την ορθογωνική επιφάνεια του ακτινοβολητή που έχει μήκος  $L$  και πλάτος  $W$  αντίστοιχα. Η αγωγίμη επιφάνεια βρίσκεται τοποθετημένη επί μίας γειωμένης επιφάνειας διηλεκτρικού με πάχος  $d$  και διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$ . Τυπικά η γραμμή τροφοδότησης έρχεται σε επαφή με ένα από τα άκρα της αγωγίμης επιφάνειας, όπως φαίνεται και στο σχήμα, αν και υπάρχουν περιπτώσεις όπου η επαφή βρίσκεται στην πλευρά πλάτους της κεραίας. Καθώς η πηγή διέγερσης βρίσκεται σε απευθείας ηλεκτρική επαφή με την κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna), η ανάλυση για την σύνδεση μπορεί να γίνει με μεθόδους απευθείας ζεύξεως.

Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα για την τροφοδότηση από το άκρο της κεραίας τύπου patch σε σχέση με τις άλλες τεχνικές τροφοδότησης. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας είναι η ευκολία κατασκευής της καθώς η γραμμή τροφοδοσίας και η αγωγίμη περιοχή μπορούν να συνταιριαστούν επί μίας επιφάνειας. Για αυτόν τον λόγο μεγάλα πάνελ από συστοιχίες κεραιών τύπου patch χρησιμοποιούν αυτόν τον τρόπο τροφοδότησης. Επίσης με αυτήν την τεχνική είναι πολύ εύκολο να ελέγξουμε το επίπεδο της σύνθετης αντίστασης εισόδου για το συνολικό σύστημα (γραμμή τροφοδοσίας – κεραία). Απλά τοποθετώντας την τροφοδότηση επί της αγωγίμης επιφάνειας, η σύνθετη αντίσταση που εμφανίζει το σύστημα στον συντονισμό μπορεί να μεταβληθεί από μεγάλες τιμές  $150 - 250\Omega$  εφόσον η σύνδεση έχει γίνει κατά μήκος της γραμμής με την κατεύθυνση ακτινοβολήσης, έως  $1 - 2\Omega$  στην περίπτωση που το σημείο σύνδεσης της πηγής και της αγωγίμης επιφάνειας μετατίθεται προς το κέντρο του.

Το ισοδύναμο κύκλωμα [41] για μία κεραία τύπου patch τροφοδοτούμενο από το άκρο, παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 12: Ισοδύναμο κύκλωμα για την τροφοδότηση μίας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) από το άκρο

Στο παραπάνω κύκλωμα ο συνδυασμός RLC συνιστά την κεραία τύπου patch και το πηνίο ζεύξης αντιπροσωπεύει την τροφοδοσία. Σε περιοχές συχνοτήτων λειτουργίας κάτω από τον συντονισμό, η επαγωγική συμπεριφορά της τροφοδότησης καθορίζει την σύνθετη αντίσταση της κεραίας. Για τον λόγο αυτό όταν το συνολικό φορτίο παριστάνεται σε χάρτη Smith για χαμηλές συχνότητες (κάτω του συντονισμού), η αντίσταση που εμφανίζει δεν είναι μηδενική αλλά καθαρά επαγωγική. Καθώς το πάχος του υλικού υποστρώματος αυξάνει, το επαγωγικό τμήμα της πηγής τροφοδοσίας αυξάνει και έτσι η στάθμη από το βραχυκύκλωμα απέχει κατά πολύ.

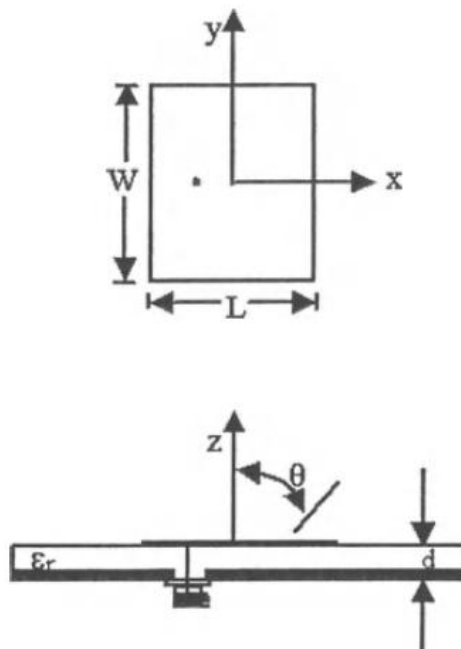
Οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antenna) με τροφοδότηση από το άκρο στην απλούστερη μορφή τους είναι εύκολο να μοντελοποιηθούν στην περίπτωση που το πάχος του υλικού υποστρώματος είναι λεπτό ( $d < 0.0015\lambda$ ). Απλά μοντέλα γραμμών μεταφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν εκτιμήσεις για την σύνθετη αντίσταση εισόδου της κεραίας. Όμως, όπως προαναφέρθηκε, για τις περιπτώσεις όπου παχύτερα υποστρώματα χρησιμοποιούνται, η μοντελοποίηση για την απόδοση δεν είναι τόσο εύκολη. Αυτό οφείλεται στο ότι η κατανομή ρεύματος εμφανίζει ασυνέχειες, οι οποίες συσχετίζονται με τα σημεία επαφής μεταξύ της γραμμής διασύνδεσης και της αγωγίμης επιφάνειας της κεραίας.

Οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) που τροφοδοτούνται από άκρο εμφανίζουν εύρος ζώνης και χαρακτηριστικά κέρδους όπως παρουσιάστηκαν στα διαγράμματα στο Σχήμα 9, δηλαδή, οι κεραίες αυτές εξακολουθούν να έχουν μικρό εύρος ζώνης. Όπως γίνεται εμφανές από το Σχήμα 9, εάν το υπόστρωμα είναι παχύ, υλικό υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς χρησιμοποιείται, αλλά οι επιδόσεις για τα κύματα επιφανείας του ακτινοβολητή δεν είναι ικανοποιητικές. Επιπλέον, αυτή η μορφή τροφοδότησης υποφέρει από εξωτερικές επιδράσεις θορύβων και άλλης ακτινοβολίας. Αυτό οφείλεται στο ότι το δίκτυο τροφοδότησης δεν είναι διαχωρίσιμο από την κεραία και έτσι όποιο υλικό είναι κατάλληλο για την δημιουργία επαγόμενης ακτινοβολίας προς την κεραία θα εξαναγκάσει και το δίκτυο τροφοδοσίας σε επανεκπομπή ακτινοβολίας επίσης.

Καθώς ο μηχανισμός τροφοδοσίας της κεραίας είναι σε απευθείας επαφή η συνολική απόδοση της κεραίας είναι σχετικά υψηλή (σχεδόν 90%) εφόσον οι απώλειες των επαγόμενων κυμάτων επιφανείας του ακτινοβολητή είναι σε χαμηλά επίπεδα. Οι απώλειες αγωγιμότητας του υλικού είναι καθοριστικές για τη γενικότερη επίδοση της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna).

### 1.8.2 Τροφοδότηση με συνδετήρα (probe-fed)

Μία άλλη βασική τεχνική τροφοδότησης η οποία ξεκίνησε να εφαρμόζεται από το 1970 είναι η τεχνική τροφοδότησης με συνδετήρα – probe [40]. Μία σχηματική αναπαράσταση αυτού του τρόπου διασύνδεσης παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 13: Τροφοδότηση κεραίας τύπου patch μικροταινίας (patch antenna) με χρήση συνδετήρα (probe-fed) [104]

Στο σχήμα ένας συνδετήρας με ακτίνα  $r_0$ , εκτείνεται από το γειωμένο επίπεδο και συνδέεται στο αγωγίμο υλικό της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna), συνήθως επικολλάται επ'αυτού. Ο συνδετήρας ή σημείο τροφοδότησης

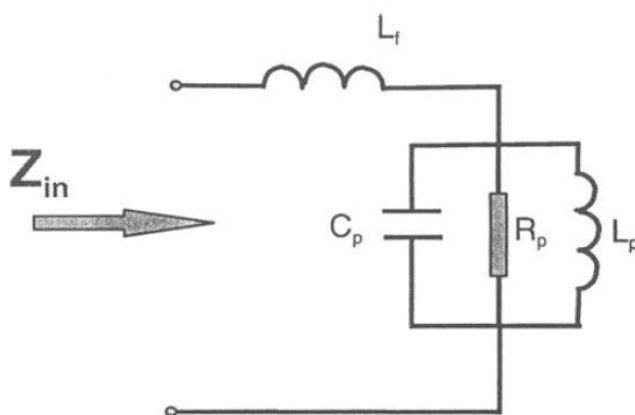
είναι συνήθως το εσωτερικό τμήμα ενός ομοαξονικού καλωδίου. Για αυτόν τον λόγο πολλές φορές η τροφοδοσία αυτού του τύπου καλείται και ομοαξονική τροφοδοσία (coaxial feed). Η θέση τοποθέτησης του συνδετήρα παρέχει και τον έλεγχο για τον καθορισμό της σύνθετης αντίστασης με τον ίδιο τρόπο όπως και στην σύνδεση του άκρου.

Εξ' αιτίας της απευθείας σύνδεσης ανάμεσα στην γραμμή τροφοδότησης και την κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna), η μέθοδος με χρήση συνδετήρα συγκαταλέγεται στις τεχνικές απευθείας (direct) τροφοδοσίας.

Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα κατά την τροφοδότηση με χρήση συνδετήρα. Κατά πρώτον, το δίκτυο τροφοδότησης, όπου ολισθητές φάσης και φίλτρα ίσως υπάρχουν, είναι απομονωμένο από τα στοιχεία που ακτινοβολούν στην κεραία μέσω του γειωμένου υποστρώματος. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει ανεξάρτητη βελτιστοποίηση για κάθε λειτουργικό επίπεδο του συστήματος. Από όλες τις μεθόδους διέγερσης, η μέθοδος με χρήση συνδετήρα είναι η πιο αποτελεσματική καθώς ο μηχανισμός τροφοδότησης είναι σε απευθείας επαφή με την κεραία και το δίκτυο τροφοδότησης παραμένει απομονωμένο από την κεραία, ελαχιστοποιώντας θορυβικά φαινόμενα και επανακτινοβολία μέσω του κυκλώματος τροφοδοσίας. Η υψηλή απόδοση αυτής της μορφής τυπωμένης κεραίας, είναι και ο λόγος που συνηγορεί υπέρ της ύπαρξης της τεχνικής παρά την πολυπλοκότητα που απαιτεί την εισαγωγή του ηλεκτροδίου μέσω τρυπήματος του υλικού. Η επίδοση των κεραιών με αυτόν τον τύπο τροφοδοσίας ανέρχεται σε 96% συγκρινόμενες με τις κεραιές με τροφοδοσία από το άκρο.

Οι κεραιές με αυτήν την τροφοδοσία εμφανίζουν ανάλογα χαρακτηριστικά και επιδόσεις όπως και οι κεραιές που τροφοδοτούνται σε ένα άκρο, όσον αφορά στο εύρος ζώνης το οποίο είναι σχετικά μικρό, ενώ επιπλέον είναι πιο δύσκολες να αναλυθούν. Ο συνδετήρας (probe) που χρησιμοποιείται για την διοχέτευση της ισχύος προς την κεραία, μπορεί να δημιουργήσει τοπικά διαπολωτικά πεδία (high cross-polarized fields) με ισχυρή ένταση, εφόσον πιο παχιά υποστρώματα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή της κεραίας. Επίσης, εξαιτίας του γεγονότος ότι αυτή η κεραία δεν είναι πλέον κεραία ενός επιπέδου εξαιτίας της εισόδου του δικτύωματος τροφοδοσίας είναι σαφώς πιο δύσκολο να κατασκευαστεί.

Το ισοδύναμο κύκλωμα για μία κεραία με τροφοδότηση από συνδετήρα παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 14: Ισοδύναμο κύκλωμα για την τροφοδότηση μίας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) με συνδετήρα

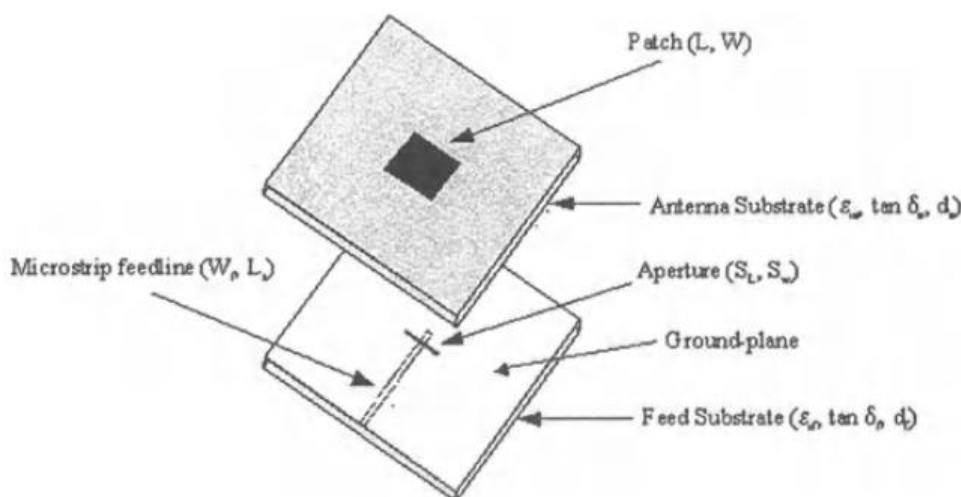
Όπως και στην περίπτωση της τροφοδότησης από το άκρο, και εδώ η τροφοδοσία μοντελοποιείται ως μία σε σειρά επαγωγή. Η επαγωγή γίνεται



μεγαλύτερη καθώς το μήκος του συνδετήρα αυξάνεται. Αυτή η αύξηση είναι και το αίτιο όπου η επαγωγή ορίζει πόσο παχύ θα είναι το υπόστρωμα για μία απευθείας σύνδεση. Πέρα από το όριο 0.06λ είναι δύσκολο να επιτευχθεί συντονισμός στην σύνθετη αντίσταση που δημιουργείται και για τον λόγο αυτό η απόδοση της ακτινοβολούμενης ισχύος μειώνεται.

### 1.8.3 Τροφοδότηση από διατομή (aperture-coupled)

Προσπαθώντας να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα από την απευθείας τροφοδοσία για την κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna), χρησιμοποιήθηκαν οι μηχανισμοί μη-απευθείας σύνδεσης [43]. Η τροφοδότηση της κεραίας με χρήση διατομής αποτελεί έναν μηχανισμό τροφοδότησης μη-απευθείας σύνδεσης που χρησιμοποιήθηκε για την αντιμετώπιση του μικρού εύρους ζώνης καθώς και για την μη υποβάθμιση των παραγόμενων κυμάτων επιφανείας από τον ακτινοβολητή. Ένα σχηματικό διάγραμμα αυτού του μηχανισμού τροφοδότησης παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



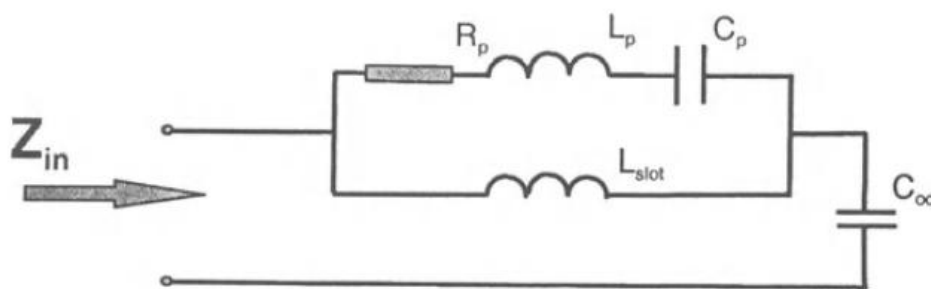
Σχήμα 15: Τροφοδότηση κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antennas) με χρήση διατομής (aperture-coupled) [104]

Σε αυτήν την μέθοδο διαφορετικά υποστρώματα χρησιμοποιούνται για το δικτύωμα τροφοδοσίας και την κεραία. Τα υποστρώματα διαχωρίζονται από ένα γειωμένο επίπεδο και η ζεύξη μεταξύ της τροφοδοσίας, που σε αυτήν την περίπτωση αποτελεί μία επιφανειακή μικροκυματική γραμμή, και την κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna), επιτυγχάνεται μέσω ενός μικρού ανοίγματος στο γειωμένο επίπεδο. Η γραμμή τροφοδοσίας τερματίζεται είτε με ένα ανοιχτοκύκλωμα ή ένα παράλληλο σύνδεσμο βραχυκυκλώματος (ανοιχτοκυκλωμένο ή βραχυκυκλωμένο stub). Οι κεραίες τύπου patch με τροφοδοσία διατομής είναι οι πιο συνηθισμένες κεραίες στην αγορά.

Η τοπολογία διασύνδεσης που περιγράφεται στο προηγούμενο σχήμα εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την απευθείας τροφοδότηση καθώς και άλλες τεχνικές μη-απευθείας τροφοδότησης κεραιών τύπου patch. Κατά

πρώτον, σε αντίθεση με την τροφοδότηση από το άκρο και την ζεύξη πεδίου, είναι δυνατή ανεξάρτητη βελτιστοποίηση του κυκλώματος τροφοδοσίας και της κεραίας τύπου patch σε αυτήν την τεχνική. Τα υποσυστήματα φαινομενικά είναι μη συζευγμένα μεταξύ τους και αυτό αποτελεί μια καλή πρώτη παραδοχή. Έτσι αυτού του τύπου οι κεραίες είναι κατάλληλες για ολοκληρωμένη (τυπωμένη) κατασκευή μαζί με ενεργά στοιχεία. Σε αντίθεση με την μέθοδο τροφοδοσίας με συνδετήρα (probe), δεν απαιτούνται διασυνδέσεις κατακόρυφου τύπου απλοποιώντας κατά τον τρόπο αυτόν την κατασκευαστική διεργασία, προσθέτοντας έτσι στην ομοιομορφία του τυπωμένου κυκλώματος για το συνολικό σύστημα. Και σε αυτόν τον μηχανισμό τροφοδότησης, θέματα ευθυγράμμισης των υποστρωμάτων είναι σημαντικά καθώς απαιτούνται πολυ-επίπεδες κατασκευές για την δημιουργία του τυπωμένου κυκλώματος. Το πολυ-επίπεδο της συγκεκριμένης κεραίας μπορεί όμως να δημιουργήσει άλλα προβλήματα. Η ύπαρξη μικρών ανοιγμάτων ανάμεσα στα διηλεκτρικά υποστρώματα μπορεί να επιδράσει σημαντικά και να μεταβάλλει την σύνθετη αντίσταση της διάταξης, ειδικότερα σε υψηλές συχνότητες λειτουργίας, όπου τα παραπάνω ανοίγματα μεγεθύνονται κατά την ηλεκτρομαγνητική λειτουργία με τα προκύπτοντα πεδία. Επίσης το υλικό που απαιτείται για την διασύνδεση και σταθεροποίηση των υποστρωμάτων (layers) διαδραματίζει ένα σημαντικό ρόλο στην απόδοση της κεραίας. Εάν το υλικό σταθεροποίησης εμφανίζει απώλειες και βρίσκεται κοντά στο άνοιγμα, η απόδοση της κεραίας μειώνεται.

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα [41] για την τροφοδότηση ανοίγματος παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 16: Ισοδύναμο κύκλωμα για την τροφοδότηση μίας κεραίας τύπου patch μέσω διατομής

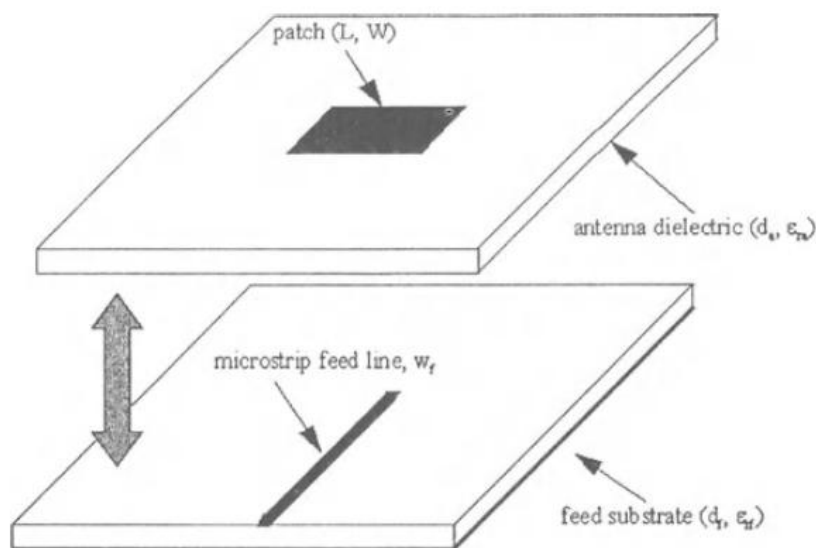
Εδώ η κεραία τύπου patch αποτελεί ένα φορτίο για το άνοιγμα και στην συνέχεια αυτός ο συνδυασμός τερματίζεται με το ανοιχτοκυκλωμένο στέλεχος (stub). Για τον λόγο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα αποτελεί ένα μαγνητικό κύκλωμα ζεύξης που συνδυάζει σύνδεση συνδετήρα και σύνδεση από άκρο, με μερικές όμως ουσιαστικές διαφορές. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος η κεραία τύπου patch με τροφοδοσία διατομής στην αρχική του μορφή εμφανίζει ίδιο εύρος ζώνης και κέρδος, ανάλογο με αυτά των απευθείας συνδέσεων. Όμως, είναι πολύ εύκολο να αυξήσουμε το ενεργό εύρος ζώνης για την κεραία. Η απόδοση αυτού του τύπου της κεραίας είναι ελάχιστα μικρότερη από τις άλλες με διαφορετικό τύπο τροφοδότησης με επίδοση που φτάνει το 85%. Ένα πολύ εμφανές και διακριτό πλεονέκτημα αυτού του τύπου τροφοδότησης είναι η ικανότητα παραγωγής πολύ «καθαρής» ακτινοβολίας από την κεραία, η οποία δεν εμφανίζει επίπεδα στο παραγόμενο πεδίο (cross-polarized εγκάρσια πόλωση levels). Αυτό οφείλεται στο ότι οι κεραίες αυτού του τύπου χρησιμοποιούν ένα πολύ λεπτό άνοιγμα για την τροφοδότηση της κεραίας, περιορίζοντας την δημιουργία δια-πολωτικών ρευμάτων. Μία συνέπεια της

χρήσης διατομής για την τροφοδότηση είναι η αύξηση των διαθλώμενων πεδίων που αλληλεπιδρούν με το πεπερασμένης διάστασης γειωμένο υπόστρωμα της κεραίας.

Οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) με τροφοδοσία διατομής έχουν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας (παραμέτρους) σε σχέση με τις κεραίες με απευθείας τροφοδότηση, και για τον λόγο αυτό διευκολύνουν τον σχεδιαστή ενός ασύρματου συστήματος. Παρά την φαινομενικά πολύπλοκη μορφή της τροφοδοσίας είναι σχετικά εύκολο να μοντελοποιηθεί μία κεραία με τροφοδοσία διατομής ακόμη και όταν για την ανάλυση της χρησιμοποιούνται τεχνικές και μέθοδοι πλήρους κύματος. Για άλλη μια φορά, ο λόγος για αυτό είναι η απουσία ασυνεχειών στα αναπτυσσόμενα ρεύματα επί της κεραίας τύπου patch. Επομένως, σχετικά απλές, ακριβείς και γρήγορες υπολογιστικές τεχνικές για ανάλυση πλήρους κύματος είναι δυνατόν να εφαρμοστούν.

#### 1.8.4 Τροφοδότηση με ζεύξη (proximity-coupled)

Ο τύπος αυτής της σύνδεσης δεδομένου ότι δεν φέρνει σε άμεση επαφή την κεραία και το δίκτυο τροφοδότησης, φτιάχτηκε για να ξεπεράσει τα προβλήματα που δημιουργούν οι άμεσες τεχνικές. Το σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζει την τεχνική σύνδεσης με H/M ζεύξη [42]:

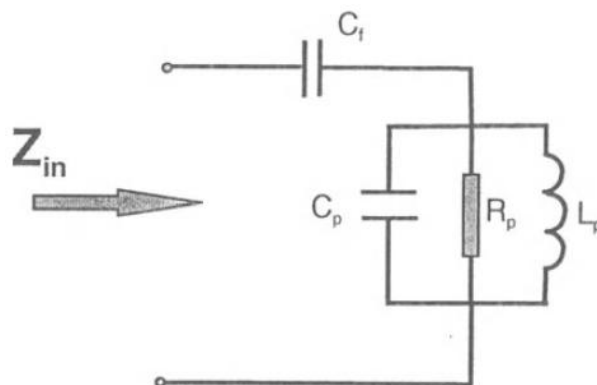


Σχήμα 17: Τροφοδότηση κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) με ζεύξη [104]

Η κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna) αποτελείται από ένα γειωμένο υπόστρωμα όπου μία μικροκυματική γραμμή τροφοδοσίας τερματίζεται σε ανοιχτοκύκλωμα απέναντι από την αγωγίμη επιφάνεια. Πάνω από αυτό το υλικό είναι ένα άλλο υπόστρωμα επί του οποίου τοποθετείται η κεραία τύπου patch στην επάνω επιφάνεια του. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην διάταξη δεν υπάρχει γειωμένο επίπεδο που να διαχωρίζει μεταξύ τους τα δύο διηλεκτρικά υποστρώματα. Η ισχύς από το δίκτυο τροφοδοσίας οδηγείται στην αγωγίμη

επιφάνεια Ηλεκτρομαγνητικά (H/M) καθώς τα δύο αυτά τμήματα δεν βρίσκονται σε απευθείας σύνδεση ή επαφή. Για αυτόν τον λόγο αυτός ο τρόπος τροφοδότησης καλείται και Ηλεκτρομαγνητικός τρόπος ζεύξης.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι ο μηχανισμός ζεύξης της κεραίας με το δίκτυο τροφοδότησης είναι σε φύση καθαρά χωρητικός. Αυτό αποτελεί μία σαφή αντίθεση με την απευθείας σύνδεση η οποία εισάγει μία επαγωγική ζεύξη στα δύο συνδεδεμένα συστήματα. Η διαφορά στην ζεύξη επιδρά στο παρεχόμενο εύρος ζώνης από την κεραία καθώς ο επαγωγικός χαρακτήρας της απευθείας σύνδεσης περιορίζει το πάχος του υλικού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Κατά συνέπεια το εύρος λειτουργίας μίας τέτοιας κεραίας με ζεύξη είναι αυξημένο σε σχέση με τις κεραίες με άμεση επαφή. Ο χωρητικός χαρακτήρας αυτού του τύπου διέγερσης παρουσιάζεται στο ισοδύναμο κύκλωμα για την λειτουργία.



Σχήμα 18: Ισοδύναμο κύκλωμα για την τροφοδότηση μίας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) - ζεύξη

Ένα σημαντικό σημείο είναι ότι καθώς εξετάζουμε την σύνθετη αντίσταση αυτού του τύπου κεραίας σε ένα χάρτη Smith, εξαιτίας του χωρητικού χαρακτήρα της τροφοδοσίας, η πηγή της απόκρισης συχνότητας θα ξεκινά κοντά στο σημείο του ανοιχτοκυκλώματος. Θα είναι χωρητική για συχνότητες κάτω από του συντονισμού και επαγωγική για συχνότητες μεγαλύτερες της συχνότητας συντονισμού, πριν να επιστρέψει στο σημείο περιγραφής της ανοιχτοκύκλωσης στον χάρτη.

Ανάλυση πλήρους κύματος για αυτές τις κεραίες δεν είναι τόσο δύσκολο να εφαρμοστεί εξαιτίας της εξάλειψης των φαινομένων ασυνεχειών ρεύματος ανάμεσα στο δίκτυο τροφοδοσίας και στην αγωγίμη επιφάνεια. Έτσι σε αντίθεση με τις τεχνικές απευθείας σύνδεσης δεν χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κοντά στο σημείο τροφοδοσίας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η τεχνική αναλυτικού υπολογισμού των πεδίων με την μέθοδο με χρήση ολοκληρωτικών εξισώσεων στο πεδίο της συχνότητας, η οποία μπορεί να εφαρμοσθεί και στις δύο τεχνικές απευθείας και μη σύνδεσης, δίνει καλύτερα αποτελέσματα για την περίπτωση της H/M ζεύξης λόγω του ότι δεν αντιμετωπίζει τα προβλήματα των ρευματικών ασυνεχειών που εμφανίζονται στην απευθείας σύνδεση.

Υπάρχουν όμως κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία σε αυτόν τον τύπο τροφοδότησης που χρήζουν προσοχής. Πρώτα απ' όλα τα δίκτυα τροφοδότησης και κεραίας δεν είναι τελειώς H/M ανεξάρτητα καθώς η διοχέτευση της ισχύος απαιτεί ζεύξη με την κεραία για την διάδοση της. Για τον λόγο αυτό οι κεραίες με τροφοδότηση αυτού του είδους μπορούν να υποφέρουν από υψηλά επίπεδα θορύβων και ανεπιθύμητων ζεύξεων από ακτινοβολίες, όχι όμως σε τόσο μεγάλο βαθμό όπως η απευθείας σύνδεσης. Η κεραία είναι μία πολυεπίπεδη

κατασκευή και για τον λόγο αυτό τεχνικές ευθυγράμμισης για την τοποθέτηση των υποστρωμάτων είναι πολύ σημαντικές. Μικρά κενά αέρος μεταξύ του υποστρώματος τροφοδότησης και της αγωγίμης επιφάνειας της κεραίας, μπορούν να επιδράσουν στην ζεύξη της αγωγίμης επιφάνειας και θα πρέπει να δοθεί προσοχή κατά την κατασκευή αυτών των κεραίων.

Η Η/Μ ζεύξη είναι ελαφρώς λιγότερο αποδοτική από την τροφοδότηση με σύνδεση στο άκρο, για δεδομένες ίδιες παραμέτρους για την σχεδίαση. Στην περίπτωση που συγκρίνουμε τα σχεδιαστικά αποτελέσματα με την απευθείας ζεύξη από άκρο, η λύση για την Η/Μ ζεύξη έχει μία αποδοτικότητα της τάξης του 80%. Η απόδοση για μία κεραία με Η/Μ ζεύξη αποτελεί ένα θέμα, όταν παχύτερα υποστρώματα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επέκταση του εύρους ζώνης λειτουργίας.

### ***1.9 Μέθοδοι Σχεδιασμού Κεραίων Τύπου Μικροταινίας (patch antenna)***

Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί η τεχνική σχεδιασμού κεραίων τύπου patch με τροφοδοσία στο άκρο τους. Οι άλλες μέθοδοι τροφοδότησης παραλλάσσουν κατά ένα μικρό τμήμα την αναφερόμενη μεθοδολογία σχεδίασης. Επιπλέον, ο τύπος της κεραίας τύπου patch που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας, έκανε χρήση τεχνικής τροφοδότησης άκρου.

Για κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) με τροφοδότηση από το άκρο, οι οποίες τοποθετούνται επί λεπτών υποστρωμάτων, η διαδικασία σχεδιασμού για αυτές τις κεραίες είναι σχετικά απλή. Χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα υλικά από τις τεχνολογίες ολοκλήρωσης, στόχος είναι η επίτευξη του επιθυμητού εύρους ζώνης για την λειτουργία με βάση τις σχέσεις και τα διαγράμματα από το Σχήμα 9. Συνήθως για την τροφοδότηση της κεραίας μία γραμμή 50 Ω θεωρείται ενδεικτική. Για την επίτευξη της συχνότητας λειτουργίας υπολογίζονται οι διαστάσεις της κεραίας. Μία καλή αρχική εκτίμηση για την διάσταση του μήκους συντονισμού δίνεται από την σχέση:

$$L=\lambda_e/2$$

Όπου  $\lambda_e$  είναι το ενεργό μήκος κύματος το οποίο ορίζεται από την σχέση:

$$\lambda_e=\lambda_0/\epsilon_e$$

όπου  $\epsilon_e = (\epsilon_r+1)/2$ .

Πιθανότατα υπάρχουν και καλύτερες προσεγγίσεις για το  $\epsilon_e$  όμως, καθώς η επιλογή αυτής της διάστασης είναι ένα μόνο αρχικό σημείο εκκίνησης στους μετέπειτα υπολογισμούς, η επιπλέον προσπάθεια που μπορεί να καταβάλλει ένας σχεδιαστής για έναν ακριβέστερο τύπο δεν αξίζει τον δαπανούμενο κόπο.

Δεδομένου ότι μία αρχική εκτίμηση για το μήκος της αγωγίμης επιφάνειας [102] έχει επιτευχθεί με βάση τον προηγούμενο τύπο, το μοντέλο μετάδοσης γραμμής ή το μοντέλο συντονισμένης κοιλότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογισθεί μία εκτίμηση της απόδοσης της κεραίας. Το μήκος μικρορουθμίζεται για να διασφαλίσει την επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας. Για

το ταίριασμα της σύνθετης αντίστασης της κεραίας ο σχεδιαστής διαθέτει δύο επιλογές. Η πρώτη είναι η μεταβολή του πλάτους της αγωγίμης επιφάνειας και η δεύτερη είναι να μεταβάλλει το σημείο τροφοδότησης της κεραίας. Όπως προαναφέρθηκε, καθώς το πλάτος της αγωγίμης επιφάνειας αυξάνεται, η σύνθετη αντίσταση του μειώνεται. Η αντίσταση εισόδου κεραίας τύπου patch με τροφοδοσία από το άκρο μπορεί επίσης να μειωθεί επιμηκύνοντας το μήκος της γραμμής τροφοδότησης και εισάγοντας την σύνδεση βαθύτερα στην αγωγίμη επιφάνεια της κεραίας. Για να μπορεί να γίνει κάτι τέτοιο ένας απλός κανόνας είναι να κρατηθεί η γραμμή τροφοδότησης στο ίδιο πλάτος με το εσωτερικό άκρο της αγωγίμης επιφάνειας για να μπορεί να μετακινηθεί επ'αυτού. Οπότε, είτε το πλάτος αυξηθεί για το άκρο είτε αυτό μετακινηθεί στα ενδότερα προς την αγωγίμη επιφάνεια και τα δύο αποτελούν τεχνικές που προσφέρουν το ίδιο αποτέλεσμα και η επιλογή τους εξαρτάται από άλλα σχεδιαστικά θέματα υπόψη του σχεδιαστή της κεραίας..

Μετά την διαδικασία εφαρμογής των αρχικών προσομοιώσεων, συστήνεται η χρήση προσομοίωσης με μέθοδο πλήρους ανάλυσης κύματος για να δώσει την απαιτούμενη ακρίβεια στους παραγόμενους υπολογισμούς και να παράγει ένα πρωτότυπο έτοιμο για παραγωγή. Εάν οι προδιαγραφές και μετά την εφαρμογή αναλυτικής προσομοίωσης δεν ικανοποιούνται, ο σχεδιαστής έχει την δυνατότητα είτε να επανέλθει στην αρχική φάση σχεδιασμού επανακαθορίζοντας χαρακτηριστικά και γεωμετρίες, εφόσον οι αποκλίσεις είναι μεγάλες, ή εναλλακτικά να εφαρμόσει μικρορυθμίσεις επί του σχεδιασμού οι οποίες μπορούν να επιβληθούν ακόμη και μετά την κατασκευή του πρωτοτύπου.

Για το προσδιορισμό του εύρους ζώνης κατά την φάση σχεδιασμού θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω. Το εύρος ζώνης μίας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) επηρεάζεται σημαντικά από την απόσταση μεταξύ της αγωγίμης επιφάνειας και του γειωμένου υποστρώματος. Καθώς η αγωγή επιφάνεια μετακινείται πιο κοντά προς το γειωμένο επίπεδο λιγότερη ενέργεια ακτινοβολείται και περισσότερη ενέργεια ενταμιεύεται στην αναπτυσσόμενη χωρητικότητα της αγωγίμης επιφάνειας. Έτσι ο συντελεστής ποιότητας  $Q$  της κεραίας αυξάνει. Ένας χονδρικός τύπος εκτίμησης του εύρους ζώνης δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\delta f}{f_{res}} = \frac{Z_o}{2R_{rad}} \frac{d}{w}$$

όπου  $d$  είναι το ύψος της κεραίας πάνω από το γειωμένο επίπεδο,  $w$  είναι το πλάτος της αγωγίμης επιφάνειας,  $Z_o$  η αντίσταση διάδοσης στον κενό χώρο και  $R_{rad}$ , είναι η αντίσταση ακτινοβολήσης της κεραίας- (Patch Antenna). Παρατηρούμε από την προηγούμενη σχέση ότι το εύρος ζώνης της κεραίας τύπου patch είναι ευθέως ανάλογο του ύψους της κεραίας. Θεωρώντας ότι η αντίσταση διάδοσης  $H/M$  στο κενό είναι περίπου  $377 \Omega$ , ενώ μία τυπική αντίσταση μίας κεραίας τύπου patch με τροφοδότηση από το άκρο είναι περίπου γύρω στα  $150 \Omega$  προκύπτει η απλοποιημένη έκφραση για τον προσδιορισμό του εύρους ζώνης:

$$\frac{\delta f}{f_{res}} = 1.2 \frac{d}{w}$$

Ο σχεδιαστής μπορεί να κάνει χρήση της προηγούμενης εμπειρικής σχέσης διασφαλίζοντας μία τάξη μεγέθους για το εύρος ζώνης της κεραίας τύπου patch.

### ***1.10 Συμπεράσματα***

Από την παρουσίαση της τεχνολογίας των κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antenna) παρατηρούμε ότι πρόκειται για σύνθετες διατάξεις με ειδικά χαρακτηριστικά [102]. Για την επίτευξη του απαιτούμενου εύρους ζώνης και των χαρακτηριστικών του διαγράμματος ακτινοβολίας απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός ο οποίος μπορεί να βασιστεί σε εμπειρική βάση. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων από τις αρχικές φάσεις του σχεδιασμού μίας κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) προκύπτει στην συνέχεια, με χρήση των τεχνικών ανάλυσης πλήρους κύματος. Οι τεχνικές αυτές λόγω των αριθμητικών υπολογισμών είναι υποβοηθούμενες σε μέγιστο βαθμό από Η/Υ και περιβάλλοντα ανάλυσης.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι ιδιαιτερότητες των καναλιών επικοινωνίας που διαμορφώνονται από την σύνδεση των ιπτάμενων συσκευών με τα δίκτυα επικοινωνιών μέσω χρήσεων κεραιών. Οι κατευθύνσεις επικοινωνίας αφορούν τόσο από πλευράς UAV προς την επίγεια διασύνδεση κορμού αλλά και αντίστροφα. Για τον λόγο αυτό, τα κανάλια της επικοινωνίας καλούνται AG (Air to Ground communication channels). Για τα AG κανάλια στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις που θέτουν για την διασφάλιση απρόσκοπτης επικοινωνίας (ελέγχου και δεδομένων). Η ανάγκη τόσο περιγραφής αλλά και μοντελοποίησης τους, θέτει ένα σημαντικό αριθμό παραμέτρων, οι οποίες κατά μεγάλο μέρος πρέπει να καλυφθούν μέσω των εκλογών των κεραιών επικοινωνίας.

# 2

## Μη επανδρωμένα ιπτάμενα Οχήματα – UAVs και Κανάλια Επικοινωνίας Αέρος – Εδάφους – Air to Ground

### 2.1 Εισαγωγή

Στα τελευταία χρόνια υπάρχει μία ραγδαία αύξηση στην χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων (Unmanned Air Vehicles – UAVs), ειδικότερα μικρής κλίμακας συσκευές, δεδομένου ότι οι τιμές στην αγορά είναι προσεγγίσιμες στο ευρύ κοινό. Επιπλέον λόγοι για την εμφάνισή τους, είναι η τεχνολογική επιτευξιμότητα αυτών των συσκευών καθώς και η ευκολία χειρισμού τους από τον χρήστη. Υπάρχουσες και μελλοντικές εφαρμογές χρήσης των UAVs περιλαμβάνουν την επιτήρηση και παρακολούθηση γεωγραφικών περιοχών/τομέων, επιχειρήσεις διάσωσης, διανομή αγαθών και εμπορευμάτων, λειτουργία ως κόμβων για τηλεπικοινωνιακή διασύνδεση, κλπ. Επιπρόσθετα, οι τεχνολογίες των UAVs προσδοκούνται ως βάση κορμού για την τεχνολογία 5G τηλεπικοινωνιακών δικτύων καθώς και για τις επόμενες εξελικτικές αναβαθμίσεις της. Για να μπορούν τα UAVs να προσφέρουν αυτού του είδους τις υπηρεσίες, είναι υποχρεωτική η διασύνδεση τους μέσω τηλεπικοινωνιακών καναλιών για τον έλεγχο της λειτουργίας τους, καθώς και καναλιών για την μετάδοση δεδομένων μέσω αυτών. Τα προσφερόμενα κανάλια μέσω των UAVs θα αποτελέσουν κόμβους για την μετάδοση και λήψη δεδομένων, συνεισφέροντας στην δομή των κόμβων ενός ασύρματου δικτύου (ad hoc). Οι περισσότερες τεχνολογίες μέσω καναλιών για την μετάδοση δεδομένων και ελέγχου, έχουν προσομοιωθεί ικανοποιητικά για σχεδόν όλο το πλήθος αυτών που προσφέρουν με χρήση επίγειων σταθμών βάσης. Τα προσφερόμενα κανάλια από τα UAVs χρειάζονται επιπλέον της μοντελοποίησης για την κατάδειξη του εύρους ζώνης που απαιτείται για την προσφορά των υπηρεσιών, επιπλέον διαδικασίες



προσομοίωσης για την κατάδειξη των χαρακτηριστικών τους (αποσβέσεις, μετάδοση, κλπ), με στόχο να εντοπιστούν τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας για την υποστήριξη των παραπάνω υπηρεσιών.

Η χρήση σε εμπορικό επίπεδο των UAVs βιώνει μία σχεδόν εκθετική αύξηση, η οποία προβλέπεται να συνεχισθεί με αμείωτο ρυθμό για το προσεχές μέλλον. Τα οφέλη από την ευκολία του χειρισμού τους, τον πολλαπλό έλεγχο στην πτήση που προσφέρουν, την πτητική τους ευελιξία, και την διαρκώς αυξανόμενη ικανότητά τους για μεταφορά φορτίων, έχουν οδηγήσει στην είσοδο αυτών των μηχανών σε πολλαπλές εφαρμογές στρατιωτικού ή δημοσίου χαρακτήρα. Μέσα σε αυτές τις εφαρμογές περιλαμβάνονται όπως προαναφέρθηκε, η ικανότητα για παρακολούθηση και έλεγχο γεωγραφικών περιοχών (τομέων), η καταγραφή εικόνας (video), η ανακούφιση από κατάσταση καταστροφών, η μετακίνηση αγαθών καθώς και η χρήση τους ως δικτυακών κόμβων για την παροχή και κάλυψη τηλεπικοινωνιακών αναγκών συνδεσιμότητας. Σύμφωνα με στατιστικές έρευνες οι οποίες παρέχονται στα πλαίσια μετρήσεων επί των αγορών από εταιρείες μετρήσεων, η χρήση των UAVs ως μη επανδρωμένων πτητικών συσκευών αναμένεται να ανέλθει τα 2.7 εκατομμύρια συσκευές μέχρι το 2025 παρέχοντας υπηρεσίες οι οποίες σε οικονομικό επίπεδο αποτιμώνται στα 8.7 δις δολάρια για την επόμενη δεκαετία [98].

Ισοδύναμα με τον όρο UAVs οι μη επανδρωμένες αυτές πτητικές συσκευές πολλές φορές καλούνται και Μη Επανδρωμένα Πτητικά Συστήματα (Unmanned Aerial Systems – UAS), τα οποία είναι γνωστά με την πιο κοινή τους ονομασία στο ευρύ κοινό ως drones. Αυτές οι πτητικές συσκευές μπορεί να διαφέρουν σε μέγεθος από μικρής κλίμακας, με διαστάσεις που δεν ξεπερνούν το μέγεθος της ανθρώπινης παλάμης μέχρι την κλίμακα ενός μεγάλου στρατιωτικού αεροσκάφους όπως τα General Atomics MQ-9 Reaper που είναι πιο γνωστά με το όνομα Predator, με άνοιγμα πτερύγων της τάξης των 15 μέτρων [99]. Τα μικρής κλίμακας αεροσκάφη χρησιμοποιούν για την τροφοδότηση των ηλεκτρικών κινητήρων τους, συσσωρευτές (μπαταρίες), οι οποίες τους προσφέρουν αυτονομία πτήσης μέχρι και 15 λεπτά, ενώ τα μεγαλύτερης κλίμακας UAVs σχεδιάζονται με αυτονομίες μεγάλης κλίμακας έως και 30 ωρών χωρίς επαναφόρτιση. Τα τελευταία είναι ικανά για πτήσεις σε πολύ μεγάλα υψόμετρα της τάξης των 15 Km.

Σε αυτήν την εργασία επικεντρώναστε στα μικρών διαστάσεων UAVs. Πολλοί οργανισμοί έχουν αναπτύξει προδιαγραφές και πρότυπα για την κατηγοριοποίηση των UAVs, σύμφωνα με το μέγεθος τους, εισάγοντας τις κατηγορίες μικρής, μεσαίας και μεγάλης κλίμακας. Στις Η.Π.Α. η ομοσπονδιακή Διεύθυνση για τον Έλεγχο των πτήσεων (Federal Aviation Administration – FAA) έχει εισάγει κανόνες για τα μικρής κλίμακας UAVs τα οποία ζυγίζουν κάτω από 25 Kg [46]. Μέσα σε αυτούς τους κανόνες περιλαμβάνεται και η απευθείας οπτική επικοινωνία του ιπτάμενου αντικειμένου και του χειριστή του (Line of Sight – LOS), καθορισμός της πτήσης με βάση τις συνθήκες φωτεινότητας (ημέρα – νύκτα και έναρξη της δυνατότητας πτήσης), επιβάλλοντας ακόμη και φώτα όγκου των ιπτάμενων οχημάτων για την αποφυγή συγκρούσεων. Επιπλέον οι κανόνες αυτοί ορίζουν τα 122 m (400 ft) ως μέγιστο ύψος πτήσης και μέγιστη ταχύτητα της τάξης των 100 μ.α.ω (161 Km/h ή 81 κόμβοι). Κανόνες περιορισμού επίσης αφορούν στις πτήσεις σε περιοχές κοντά σε αεροδρόμια και γενικά θέτουν την βάση ότι ο χειριστής της ιπτάμενης συσκευής είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο και την πτήση αυτής.

Μία από τις πολλά υποσχόμενες εφαρμογές των UAVs, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι η χρησιμοποίησή τους ως τηλεπικοινωνιακών κόμβων

(hot spots) κατά την φάση που οι υπάρχουσες δικτυακές υποδομές βιώνουν συμφόρηση (congestion) ή σε περιπτώσεις καταστροφής, όπου τα υπάρχοντα εγκατεστημένα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα βιώνουν απώλειες λειτουργικότητας λόγω καταστροφής των υποδομών και των κόμβων τους. Αναμένεται ότι η μελλοντική 5G τεχνολογία (τεχνολογία ασυρμάτων δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς) [69], θα συμπεριλάβει τα UAVs ως αυτόνομους τηλεπικοινωνιακούς κόμβους για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας με χαμηλή καθυστέρηση (low latency) και υψηλού ρυθμού και ποιότητας. Πολλές εταιρείες τηλεπικοινωνιακού σχεδιασμού έχουν αρχίσει ήδη να κάνουν δοκιμές για την χρήση των UAVs ως κόμβων στα δίκτυα που παρέχουν. Πιο συγκεκριμένα εταιρείες όπως η Qualcomm® ήδη ελέγχει την διαλειτουργικότητα των UAVs με τα υπάρχοντα LTE δίκτυα της (Long Term Evolution) και τις μελλοντικές γενιές των ασύρματων δικτύων που θα προσφέρει στην αγορά στο προσεχές μέλλον. Επιπρόσθετα τα UAVs μπορούν να λειτουργήσουν ως σημεία διασύνδεσης (Access Points) για κινητές επικοινωνίες σε διαφορετικά δικτυακά περιβάλλοντα, υποστηρίζοντας τα απαιτούμενα πρωτόκολλα για την επικοινωνία με τις υπάρχουσες WiFi δομές και το πρωτόκολλο 802.11. Εταιρείες όπως η Facebook® και η Google® διερευνούν ήδη την δυνατότητα των UAVs για διασύνδεση διαδικτύου (Internet) σε απομονωμένες περιοχές που δεν καλύπτονται ήδη από τα υπάρχοντα ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα [70].

### 2.1.1 Ιστορική Αναδρομή των Καναλιών επικοινωνίας

Οι ασύρματες επικοινωνίες Αέρος – Γης (Air to Ground – AG) μπορεί να αναχθούν σε ακόμη παλαιότερες εποχές, φτάνοντας στην δεκαετία του 1920 [71] όπου χρησιμοποιούνται ράδιο-τηλέγραφοι. Χαμηλής και μεσαίας κλίμακας συχνότητες (μπάντες – bands) επικοινωνίας, χρησιμοποιούνταν ήδη από το 1930 αλλά δεν υποστήριζαν ταυτόχρονη μετάδοση φωνής και προς τις δύο κατευθύνσεις (AG – GA). Από τις αρχές της δεκαετίας του 1940 εμφανίστηκαν διαμορφώσεις Πλάτους Διπλής Πλευρικής Ζώνης (AM-DSB) οι οποίες λειτουργούσαν στις ζώνες συχνοτήτων από 118 – 137 MHz, δηλαδή, στην κλίμακα πολύ υψηλών συχνοτήτων (VHF), χρησιμοποιώντας την ζώνη αυτή για την μετάδοση φωνής και επικοινωνία μεταξύ των πιλότων των αεροσκαφών και των σταθμών βάσης. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιούσε 140 κανάλια και συνέχισε να είναι αντικείμενο χρήσης μέχρι και το 1979. Η πολύπλεξη των καναλιών γινόταν με χειροκίνητη επιλογή των ζωνών και πολυπλεξία Συχνότητας (Frequency Division Multiplexing – FDM). Σε περιβάλλοντα όπου οι ανάγκες επικοινωνίας ήταν πιο έντονες, για την ενεργοποίηση επιπλέον παράλληλων μεταδόσεων, κανάλια των 25 KHz σε AM-DSB διαμόρφωση διαιρέθηκαν σε υποκανάλια των 8.33 KHz. Η Πολιτική Αεροπορία εξακολουθεί να χρησιμοποιεί αυτά τα αξιόπιστα αναλογικά κανάλια μέχρι και σήμερα αν και από το 1990 κάποια μικρά τμήματα της VHF μπάντας σε μερικές γεωγραφικές περιοχές έχουν αναβαθμιστεί σε ψηφιακές γραμμές μετάδοσης δεδομένων, υποστηρίζοντας 2280 κανάλια [72],[73]. Αυτό το σύστημα επικοινωνιών χρησιμοποιεί διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing – TDM) και συχνότητας (FDM), με διαμόρφωση Ολίσθησης Φάσης (Phase Shift Keying – PSK). Στρατιωτικού τύπου επικοινωνίες χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες και πιο περίπλοκα συστήματα διαμόρφωσης για μικρής και μεγάλης εμβέλειας επικοινωνίες [74].

Εξαιτίας των χαμηλών ρυθμών μετάδοσης που υποστηρίζουν τα αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας δεν μπορούν να υποστηρίξουν υψηλότερες απαιτήσεις μεταδόσεις ρυθμών και δεδομένων όπως τα σύγχρονα δίκτυα.

Το 2007, τμήμα της ζώνης L-band προτάθηκε για χρήση επέκτασης των επικοινωνιών πολιτικής αεροπορίας και προέκυψαν δύο συστήματα γνωστά ως L-band Ψηφιακά Συστήματα για επικοινωνίες Πολιτικής Αεροπορίας, (L-band Digital Aeronautical Communications Systems – LDACS). Εξαιτίας της συμβατότητας που πρέπει να προσφέρει το νέο σύστημα στην ζώνη L-band, η ανάπτυξη των συστημάτων δεν έχει κλείσει και ακόμη επεκτείνεται.

### 2.1.2 Χαρακτηριστικά των Καναλιών AG

Υπάρχουν αναρίθμητες μελέτες στην βιβλιογραφία για τα χαρακτηριστικά των αεροπορικών καναλιών [72],[75],[76],[77],[78]. Οι αεροπορικές επικοινωνίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με μία σύντομη κατάταξη σε επικοινωνίες ανάμεσα στον πιλότο και το πλήρωμα με τον σταθμό επίγειας παρακολούθησης, και σε ασύρματες επικοινωνίες δεδομένων που απευθύνονται στους επιβάτες. Και οι δύο αυτοί τύποι επικοινωνιών εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της πτήσης.

Υπάρχουν επίσης μελέτες για κανάλια AG επικοινωνίας για μεγάλες αποστάσεις διαδόσεων, διαθέσιμα για δορυφόρους και πλατφόρμες οι οποίες κινούνται σε μεγάλα ύψη (High Altitude Platforms – HAP). Το AG κανάλι μετάδοσης σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί ως ένα UAV κανάλι επικοινωνίας, αλλά εξαιτίας των μεγάλων αποστάσεων από την επιφάνεια της γης (μεγαλύτερες των 17 Km), η μοντελοποίηση τέτοιων διαύλων ίσως χρειαστεί να λάβει υπόψη της φαινόμενα της ανώτερης ατμόσφαιρας. Το κανάλι εξαρτώμενο από την συχνότητα λειτουργίας και το ύψος στο οποίο κινείται το UAV, μπορεί να είναι υποκείμενο ακόμη και σε χαμηλά τροποσφαιρικά φαινόμενα όπως η εξασθένιση από υδρομετέωρα (hydrometeors) [79]. Για τις περισσότερες από αυτές τις πλατφόρμες, για επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων θα πρέπει να υπάρχει σύστημα για τον έλεγχο της Επικοινωνίας Οπτικής Επαφής (LOS) εξαιτίας των περιορισμών στην ισχύ λειτουργίας. Κατά συνέπεια το κανάλι AG μοντελοποιεί το φαινόμενο εξασθένισης και διαλείψεων ως κατανομή Rice [80]. Καθώς η χρήση των UAVs ως τηλεπικοινωνιακών κόμβων στο άμεσο μέλλον αναμένεται να κάνει χρήση μικρότερων υψομέτρων συγκρινόμενο με αυτό των HAPs και των δορυφόρων, η μελέτη για την επίδραση των επικοινωνιών στα AG κανάλια των UAVs θα πρέπει να επικεντρωθεί σε αυτά τα μικρότερα ύψη.

Για την διασφάλιση υψηλών ρυθμών μετάδοσης με χρήση των UAVs σε διαφορετικά περιβάλλοντα, είναι λογικό ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν όσο το δυνατόν πιο ακριβή και πιο εύρωστα μοντέλα για την μοντελοποίηση των AG καναλιών. Τα υπάρχοντα μοντέλα μετάδοσης για τα AG κανάλια χρησιμοποιούνται για επικοινωνίες σε μεγαλύτερα ύψη, και για τον λόγο αυτό δεν γίνεται να χρησιμοποιηθούν επακριβώς για την κάλυψη των επικοινωνιών μέσω των UAVs. Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα μικρότερα σε μέγεθος UAVs διαθέτουν διαφορετικά δομικά στοιχεία και χαρακτηριστικά πτήσης, όπως διαφορετικές δυναμικές γραμμές ροής του αέρα εξαιτίας των διαφορετικών σχημάτων και υλικών που χρησιμοποιούν για την κατασκευή της ατράκτου τους. Επίσης τα μικρότερα UAVs βιώνουν εντονότερα φαινόμενα ρυθμών ανόδου - καθόδου και επιταχύνσεων κατά την διάρκεια της πτήσης. Επομένως γίνεται

προφανές ότι οι επικοινωνίες μέσω AG καναλιών για τα UAVs δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς για χρήση τους σε επικοινωνίες με τους επίγειους σταθμούς.

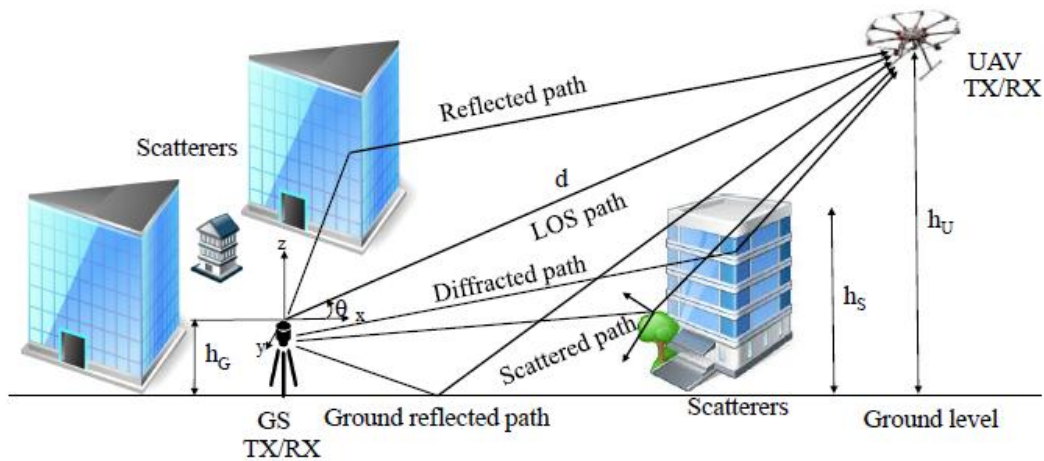
Η ως τώρα έρευνα και μελέτη για τα μοντέλα AG όπως μπορεί να χρησιμοποιηθούν επί των UAVs μπορεί χονδρικά να κατηγοριοποιηθεί σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά στην επικοινωνία ωφέλιμου φορτίου δεδομένων (payload communication), όπου ο όρος payload μπορεί να είναι στενής συχνοτικής ζώνης (narrow-band) ή ευρείας συχνοτικής ζώνης (wide-band), και εξαρτάται πλήρως από τον τύπο της εφαρμογής. Η δεύτερη κατηγορία αφορά στον έλεγχο (control) και σε μη ωφέλιμο φορτίο δεδομένων (Control and Non—Payload Communications – CNPC) και αυτή η επικοινωνία αναφέρεται στον έλεγχο της τηλεμετρίας για την ίδια την πτήση των UAVs. Οι περισσότερες επικοινωνίες των UAVs που αναφέρονται σε δεδομένα ωφέλιμου φορτίου κάνουν χρήση συχνοτικών ζωνών οι οποίες δεν είναι αδειοδοτημένες (π.χ. 900 MHz, 2.4 GHz, 5.8 GHz, κλπ) για τον σκοπό αυτό. Οι ζώνες αυτές γενικά όμως δεν είναι επιθυμητές λόγω της ευρείας χρήσης τους στα παγκόσμια μήκη και πλάτη, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε συμφόρηση επικοινωνίας και απώλειες παρεμβολές (jamming). Στις Η.Π.Α. οι επικοινωνίες CNPC που αναφέρονται στον έλεγχο της τηλεμετρίας των UAVs είναι επιθυμητό να τοποθετηθούν σε ένα τμήμα της L-band (0.9 – 1.2 GHz) και της C-band (5.03 – 5.091 GHz), αν και όπως είναι γνωστό κατά την ανάθεση φάσματος σε τέτοιες ζώνες η χρήση αυτών των ζωνών είναι ακόμη υπό διαπραγμάτευση [81],[82]. Μετρήσεις επί των καναλιών επικοινωνίας και μοντέλα πρόβλεψης για τα UAVs είναι τελείως ανεξάρτητα από την κατηγοριοποίηση της προηγούμενης κίνησης δηλ, είτε είναι σηματοδότηση – control για το UAV, είτε πρόκειται για ωφέλιμο φορτίο δεδομένων της επικοινωνίας.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου θα παρατεθούν μελέτες για την μοντελοποίηση των AG καναλιών όπως προορίζονται για χρήση από UAVs. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η μοντελοποίηση των AG καναλιών για χρήση τους από UAVs συσκευές, είναι ένας χώρος ανοικτός όπου δεν υπάρχει οριστικοποιημένη πληροφορία και μετρήσεις.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί το κανάλι AG για τα UAVs. Επίσης, θα παρουσιαστούν μετρήσεις επί του AG καναλιού καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του. Έπειτα θα παρουσιαστούν τα προτεινόμενα μοντέλα ορισμένα εκ των οποίων βασίζονται σε τεχνικές προσομοίωσης.

## ***2.2 Χαρακτηριστικά του Καναλιού Μετάδοσης AG Επικοινωνίας για UAVs***

Ένα σενάριο καναλιού διάδοσης AG παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί, λαμβάνοντας υπόψη επίγεια εμπόδια τα οποία ονομάζονται σκεδαστές (scatterers).



Σχήμα 19: Τυπικό μοντέλο διάδοσης Air to Ground (AG) καναλιού για κάλυψη με UAV [103]

Σε αυτό το σχήμα τα  $h_G$ ,  $h_S$ ,  $h_U$  αντιπροσωπεύει τα ύψη από την επιφάνεια της γης (Ground Station – GS), τους σκεδαστές, το UAV πάνω από την επιφάνεια, ενώ  $d$  είναι η απόσταση των κεραιών του UAV από την επιφάνεια του εδάφους και  $\theta$  είναι η γωνία ανύψωσης ανάμεσα στο GS και τις κεραιές του UAV.

### 2.2.1 Σύγκριση του UAV AG καναλιού με το κλασικό επίγειο κανάλι

Το AG κανάλι διαθέτει διακριτά και διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με άλλα κλασικά και καλά μελετημένα επίγεια κανάλια μετάδοσης (π.χ. το κανάλι UTRAN – Universal Terrestrial Radio Access Network Channel). Από την μία πλευρά υπάρχει ένα εγγενές πλεονέκτημα σε σχέση με τις επίγειες επικοινωνίες που εμφανίζουν μεγαλύτερη πιθανότητα για την απώλεια οπτικής επαφής (LOS propagation). Αυτό συνηγείται σε μείωση του επιπέδου ισχύος εκπομπής, καταλήγοντας σε μεγαλύτερη αναξιοπιστία για την γραμμή μετάδοσης. Σε περιπτώσεις όπου μόνο μονοπάτια μη άμεσης οπτικής επαφής (NonLOS) υπάρχουν, όταν η γωνία ανόδου του UAV είναι αρκετά μεγάλη, το κανάλι AG μπορεί να βιώσει μικρότερη διάθλαση και απώλειες σκίασης από γειτονικές επίγειες γραμμές μετάδοσης.

Από την άλλη πλευρά, το AG κανάλι μπορεί να βιώσει σημαντικά μεγαλύτερες μεταβολές από τα κλασικά επίγεια κανάλια, εξαιτίας της ταχύτητας κίνησης του UAV. Όταν το κανάλι μοντελοποιείται με στατιστικό τρόπο, αυτό σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά του καναλιού διατηρούνται στατιστικά σταθερά, (δηλαδή, το κανάλι είναι στάσιμο υπό την ευρεία έννοια), και προφανώς αυτό μπορεί να ισχύει μόνο για μία εντοπισμένη χωρική περιοχή. Αυτό συνήθως αναφέρεται με τον χαλαρό όρο της «μη-στασιμότητας». Εάν το UAV δεν είναι σε απευθείας οπτική επαφή με τα αντικείμενα σκέδασης ή με την επιφάνεια της γης, τα χαρακτηριστικά του καναλιού θα μπορούσαν να διατηρηθούν προσεγγιστικά σταθερά για ένα αιωρούμενο UAV. Σε μία τέτοια περίπτωση, δυσμενείς συνθήκες μετάδοσης π.χ. μεταβολή του επιπέδου του λαμβανομένου σήματος, μπορεί να διαρκέσουν από αρκετά δευτερόλεπτα μέχρι και λεπτά, ώστε οι κοινές τεχνικές των επικοινωνιών για επιπρόσθετη πληροφορία ή μέση τιμή (interleaving or averaging) δεν θα αποδώσουν. Σε πολλές περιπτώσεις όταν τα ύψη πτήσης των

UAVs είναι αρκετά υψηλότερα από τους σκεδαστές – εμπόδια, η μη-στασιμότητα του AG καναλιού θα γίνει αισθητή σε όσους βρίσκονται στις γειτονικές περιοχές π.χ. στις περιοχές που είναι κοντά σε κτίρια ή στην επιφάνεια της γης γύρω από εκείνες τις περιοχές.

Επιπρόσθετα οι επικοινωνίες Αέρος – Εδάφους (AG) με τα UAVs, αντιμετωπίζουν επιπλέον και άλλες προκλήσεις εξαιτίας των τυχαία μεταβαλλόμενων τύπων κίνησης και ποικίλων τύπων εφαρμογών επικοινωνίας [20],[83],[84],[85]. Καθώς το UAV είναι ένας εναέριος κόμβος, κάποια από τα μοντέλα θεωρούν ότι θα πρέπει να ληφθούν υπόψη η σκίαση λόγω των πτερύγων της ιπτάμενης συσκευής, ο μηχανικός και ηλεκτρονικός θόρυβος από τα ηλεκτρονικά της συσκευής και τον κινητήρα και τέλος τα χαρακτηριστικά της κεραίας που το UAV χρησιμοποιεί, όπως το μέγεθος της, η κατεύθυνση της, η πόλωση των παραγόμενων πεδίων, η χρήση συστοιχίας κεραιών (για την κατευθυντικότητα της δέσμης) ειδικά για συστήματα MIMO (Multiple Input Multiple Output), κλπ [86],[87]. Για UAVs σε κίνηση θα πρέπει να καθοριστεί ένα βέλτιστο ύψος για την πτήση π.χ. για την διατήρηση συνθήκης LOS (οπτικής επαφής) με τον χώρο κάλυψης [88].

### **2.2.2 Ζώνες Συχνοτήτων Λειτουργίας για την διάδοση του AG καναλιού από UAV**

Όπως με όλα τα κανάλια επικοινωνιών μία θεμελιώδης βάση είναι η ζώνη συχνοτήτων, διότι τα χαρακτηριστικά της διάδοσης μπορούν να μεταβληθούν σημαντικά με βάση την συχνότητα λειτουργίας του καναλιού. Με τις ζώνες L και C να προορίζονται για την επικοινωνία ελέγχου (control) και με βάση τις μη αδειοδοτημένες ζώνες για μετάδοση δεδομένων, τροποσφαιρικές αποσβέσεις από αέρια στην ατμόσφαιρα και τα υδρομετέωρα είναι κυρίως αμελητέες. Η παραπάνω συνθήκη δεν θα ισχύει σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων, π.χ. στις ζώνες Ku, Ka και άλλες μικροκυματικές ζώνες, οι οποίες φτάνουν μέχρι και την συχνότητα των 100 GHz. Αυτές οι ζώνες υψηλότερων συχνοτήτων υποφέρουν από μεγαλύτερες απώλειες ανοικτής μετάδοσης (free space path Loss) καθώς και από τροποσφαιρικές αποσβέσεις. Εξαιτίας αυτών των φαινομένων, αυτές οι ζώνες θα προτιμηθούν για μικρής εμβέλειας κανάλια AG επικοινωνίας.

Σε αντίθεση με τα χαρακτηριστικά αποσβέσεων συγκρινόμενα με τις ζώνες επικοινωνίας, οι μικροκυματικές ζώνες προσφέρουν μεγάλο εύρος ζώνης (bandwidth). Μεγάλα εύρη ζώνης μπορούν να εμφανίσουν πιο ευσταθή συμπεριφορά σε φαινόμενα ολίσθησης Doppler, η οποία είναι μία εξάπλωση του φάσματος που παρατηρείται όταν τα UAVs κινούνται με μεγάλες ταχύτητες.

### **2.2.3 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά για την διάδοση του AG καναλιού από UAV**

Σε AG κανάλια μετάδοσης από UAVs, οι οδεύσεις σήματος από διαφορετικά μονοπάτια (multipath components – MPCs) εμφανίζονται εξαιτίας των ανακλάσεων από την επιφάνεια της γης, από επίγεια αντικείμενα (σκεδαστές), και

μερικές φορές από την ίδια την άτρακτο του UAV. Τα χαρακτηριστικά του καναλιού εξαρτώνται από το υλικό, το σχήμα και το μέγεθος των αντικειμένων που προκαλούν την σκέδαση. Η ισχυρότερη συνιστώσα πολλαπλής διαδρομής σε σχέση με την βασική συνιστώσα από την οπτική ζεύξη σε ένα AG κανάλι διάδοσης, είναι κυρίως η απλή ανάκλαση από την επιφάνεια της γης. Αυτή η παρατήρηση αποτελεί το αίτιο για την προσέγγιση της ζεύξης με το μοντέλο των ‘δύο ακτινών’.

Για αρκετά υψηλές συχνότητες, οι σκεδαστές επί της γης και γύρω από το UAV μπορούν να μοντελοποιηθούν ως σημεία σκέδασης κείμενα επί της επιφάνειας δύο αντικριστών κυλίνδρων, ή σφαιρών, ή ελλειψοειδών [89],[90] που ορίζουν επιφάνειες που μπορούν να περικοπούν στην τομή των ελλειπτικών επιπέδων με την επιφάνεια της γης. Αυτές οι τοπολογίες βοηθούν στην εξαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μοντέλου AG διάδοσης [91],[92]. Η κατανομή των σκεδαστών, κείμενοι επίγειοι ή επί επιφάνειας νερού, μπορούν να μοντελοποιηθεί στοχαστικά και με βάση αυτήν την τεχνική να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία των γεωμετρικών-στοχαστικών μοντέλων για την διάδοση του καναλιού (Geometrically based Stochastic Channel Models – GBSCMs). Για υπτάμενη συσκευή κινούμενη επί μίας περιοχής με μία τέτοια κατανομή, αυτό δίνει μία βάση για διακοπτόμενα μοντέλα πολλαπλής όδευσης [29] όπως βιώνονται και στην επικοινωνία μεταξύ κινούμενων οχημάτων μεταξύ τους (vehicle-to-vehicle channels).

Για να περιγραφούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά ενός καναλιού με διαλείψεις, συνήθως θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι πρώτης και δεύτερης τάξης διαλείψεις. Η πλειονότητα της βιβλιογραφίας για AG κανάλια χρησιμοποιεί τα στατιστικά για πρώτης τάξης διαλείψεις [30].

Στην περίπτωση μετάδοσης σε κανάλι επάνω σε υδάτινη επιφάνεια, οι απώλειες ελεύθερης διάδοσης [31] είναι συγκρίσιμες με αυτές του κενού χώρου με μία επιφάνεια ισχυρής ανάκλασης. Οι υπόλοιπες οδεύσεις σήματος από την επιφάνεια του νερού είναι σημαντικά ασθενέστερες και περίπου ίσης ισχύος και χρόνου άφιξης (Time of Arrival – ToA) μεταξύ τους, ενώ ανακλάσεις από σκεδαστές επί της θάλασσας π.χ. πλοία μπορεί να είναι σημαντικά ισχυρότερες.

#### 2.2.4 Καθορισμός Κεραίας για την διάδοση του AG καναλιού από UAV

Η κεραία είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία για την επικοινωνία μέσω του AG καναλιού, εξαιτίας των χαρακτηριστικών διαθέσιμου χώρου και άλλων περιοριστικών παραγόντων λόγω της υπτάμενης φύσης της συσκευής που η κεραία έχει τοποθετηθεί [92],[93]. Παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στην απόδοση της επικοινωνίας μέσω του AG καναλιού είναι ο αριθμός, ο τύπος, ο προσανατολισμός των κεραιών που χρησιμοποιούνται καθώς και το σχήμα της άτρακτου του UAV και το υλικό κατασκευής του.

Η πλειονότητα των μετρήσεων επί του AG καναλιού αφορούν απλές κεραίες, αλλά και συστοιχίες από κεραίες έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί [34]. Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί SIMO (Single Input Multiple Output) και MIMO (Multiple Input Multiple Output) ως συνδυασμοί κεραιών που είναι εμπορικά διαθέσιμες για μετρήσεις επί του AG καναλιού [35],[36].

Οι ευρυγώνιες κεραίες είναι πιο προτιμητέες για τοποθέτηση επί κινούμενων οχημάτων εξαιτίας της υψηλής απόδοσης τους κατά την διάρκεια της

κίνησης, ενώ οι κατευθυντικές κεραίες που εμφανίζουν υψηλότερα κέρδη σε συγκεκριμένα εύρη γωνιών, καταλήγουν να δίνουν χειρότερα αποτελέσματα κατά την κίνηση λόγω ακριβώς της κατευθυντικότητας τους. Δεδομένου ότι τα UAVs είναι υποκείμενα σε γρήγορες μεταβολές κίνησης κατά την πτήση τους, οι ευρυγώνιες κεραίες φαίνεται να συμπεριφέρονται καλύτερα από τις κατευθυντικές κεραίες. Ένας παράγοντας υποβάθμισης της λειτουργίας της κεραίας που τοποθετείται επί του UAV είναι η σκίαση (shadowing) από την ίδια την άτρακτο του UAV. Ομοίως, ο προσανατολισμός των κεραίων επί του UAV μπορεί να επιδράσει στην ποιότητα της επικοινωνίας [37],[38].

Η χρήση πολλαπλών κεραίων για την επεκτασιμότητα της κάλυψης σε ευρυγώνιο μπορεί να δημιουργήσει φαινόμενα χωρικής επικάλυψης, προσφέροντας ενισχυμένα κέρδη σε πολλαπλές οδεύσεις (MPCs) από το περιβάλλον [39],[94]. Με την ίδια λογική, πολλαπλές κεραίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για επιλεκτικότητα σε ζώνες χώρου κατευθύνοντας την δέσμη κάλυψης των κεραίων (beam forming/steering). Όμως εξαιτίας του περιορισμένου χώρου επί της επιφάνειας του UAV, η επιλεκτική κάλυψη χωρικών ζωνών με χρήση πολλαπλών κεραίων επί του οχήματος είναι δύσκολο να επιτευχθεί, ειδικότερα για χαμηλές συχνότητες λειτουργίας. Η χρήση συστοιχίας κεραίων για την ενίσχυση του λοβού σε μικροκυματικές συχνότητες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ξεπεραστούν τα προβλήματα διαλείψεων [95],[96] και να αυξηθεί η κάλυψη, αλλά η επεξεργασία των παραγόμενων σημάτων από τις κεραίες απαιτεί με την σειρά της αρκετή επεξεργαστική ισχύ. Επίσης έχει προταθεί η χρήση MIMO συστημάτων για την έκταση της χωρητικότητας του καναλιού για την AG διάδοση. Μεταβάλλοντας την διάμετρο μίας συστοιχίας από κυκλικές κεραίες και ταυτόχρονα το ύψος πτήσης του UAV, μπορεί να επιτευχθούν σε σύστημα MIMO διαφορετικές τιμές χωρητικότητας για το κανάλι. Επίσης βελτιστοποιώντας την απόσταση ανάμεσα στα στοιχεία της κεραίας, και χρησιμοποιώντας συστοιχία επί γραμμικές κεραίες αποτελεί επίσης μία προτεινόμενη τεχνική για την αύξηση της χωρητικότητας καναλιού σε MIMO συστήματα.

### 2.2.5 Φαινόμενο Doppler

Εξαιτίας της κίνησης του UAV υπάρχουν ολισθήσεις συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler, οι οποίες εξαρτώνται τόσο από την ταχύτητα του UAV καθώς και από την γεωμετρία του χώρου. Όσο υψηλότερη η συχνότητα για το φαινόμενο Doppler τόσο δημιουργεί επιπλέον πρόβλημα εάν τα διαφορετικά μονοπάτια σήματος σχετίζονται με επίσης υψηλές και διαφορετικές συχνότητες Doppler μεταξύ τους, δίνοντας μεγάλο εύρος εξάπλωσης συχνοτήτων κατά Doppler. Αυτό μπορεί να συμβεί εάν το UAV βρίσκεται αρκετά κοντά στην επιφάνεια της γης. Εάν το αεροσκάφος είναι αρκετά μακριά από την επιφάνεια του εδάφους και σε κατάλληλο ύψος, όλες οι διαδρομές πολλαπλών οδεύσεων θα έχουν μία πολύ κοντινή συχνότητα Doppler καθώς τα αντικείμενα που είναι κοντά στην επιφάνεια του εδάφους προκαλούν ανακλάσεις οι οποίες προσέρχονται όλες σχεδόν με την ίδια γωνία προς το UAV. Η επίδραση μιας μεγάλης συχνότητας Doppler, η οποία όμως είναι σταθερή για όλα τα μονοπάτια πολλαπλής οδευσης, θα πρέπει να μπορεί να τύχει επεξεργασίας από το σύστημα με συγχρονισμό. Οι ολισθήσεις Doppler μπορούν να προκαλέσουν μεταβολές στην



συχνότητα φέροντος (Carrier Frequency Offset – CFO) και ενδο-παρεμβολή φέροντος (Inter Carrier Interference) ειδικότερα για ορθογωνική πολυπλεξία (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM). Μερικοί αλγόριθμοι όπως , ο Multi Carrier code division for Multiple Access (διαίρεση κώδικα πολλαπλού φέροντος για Πολλαπλή πρόσβαση) έχει αποδειχθεί ότι είναι εξαιρετικά εύρωστος στο φαινόμενο εξάπλωσης Doppler κατά την AG μετάδοση [97],[98],[99],[100].

## **2.3 Μετρήσεις επί AG καναλιών για UAVs**

Ένα σημαντικό πλήθος μετρήσεων έχουν εκτελεστεί για AG κανάλια διάδοσης, τα οποία υλοποιούνται τόσο με χρήση επανδρωμένων όπως και μη επανδρωμένων ιπτάμενων αεροσκαφών (MAV – Manned Air Vehicles). Οι μετρήσεις αυτές διεξήχθησαν σε διαφορετικά μεταξύ τους περιβάλλοντα και με διαφορετικές μετρητικές διαδικασίες. Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί μία συνοπτική ταξινόμηση αυτών των μετρήσεων βασισμένες στο σενάριο μετρήσεων, με παραμέτρους από σενάριο σε σενάριο που αφορούν σε χρησιμοποιούμενα σήματα, συχνότητα φέροντος για το AG κανάλι, εύρος ζώνης, τύποι κεραιών που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τοποθετήσεις τους επί της ατράκτου της ιπτάμενης συσκευής. Επιπλέον, παρέχονται πληροφορίες για τον τύπο των UAV συσκευών, την ταχύτητα κίνησης τους, τα ύψη πτήσεώς τους, την απόσταση τους από τα επιφανειακά σημεία κάλυψης (GS), την απόσταση των γραμμών μετάδοσης και λήψης (Tx-Rx), την γωνία ανόδου των πτητικών συσκευών, καθώς και τα στατιστικά χαρακτηριστικά των καναλιών όπως αυτά έχουν μοντελοποιηθεί και προταθεί από την αντίστοιχη βιβλιογραφία. Οι μετρήσεις αυτές συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Στις αναφερόμενες μετρήσεις επί των AG καναλιών είτε η κατεύθυνση μετάδοσης Tx είτε η κατεύθυνση λήψης Rx στο UAV/GS θεωρούν την πτητική συσκευή ακίνητη. Μετρήσεις με κινούμενες και τις δύο πηγές Rx/Tx για το AG κανάλι είναι σχετικά σπάνιες. Μία αξιοσημείωτη συνεισφορά στον χώρο των μετρήσεων για το AG κανάλι αναφέρεται στην χρήση των ζωνών L και C-bands χρησιμοποιώντας SIMO κεραίες για διαφορετικές μορφολογίες εδάφους και εναλλαγή περιβάλλοντος εδάφους-νερού [49],[50],[51],[52],[53],[54],[55]. Οι υπόλοιπες μετρήσεις αφορούν διαφορετικές συχνοτικές ζώνες και αφορούν είτε σε σήματα στενής είτε σε σήματα ευρείας ζώνης.

### **2.3.1 Παράμετροι των μετρήσεων στο AG κανάλι**

Οι διεξαγωγές των μετρήσεων χρησιμοποιούσαν διαφορετικές κεραίες, με διαφορετικούς τρόπους συνδυασμού για την δημιουργία του AG καναλιού. Η πιο ευρέως χρησιμοποιημένη κεραία στα πειράματα διεξαγωγής των μετρήσεων, ήταν η κλασική ευρυγώνια κεραία (omni) και ο πιο συνηθισμένος συνδυασμός ήταν η οργάνωση της κεραίας σε λειτουργία SISO (Single Input Single Output).

Ref.	Scenario	Sound. Sig.	Freq. (GHz)	BW (MHz)	Antenna and mounting	$P_T$ (dBm)	UAV, $v_{max}$ (m/s)	$h_U, h_G, d$ (m)	$\theta$ (deg.)	Channel statistics
[30]	Urban	CW	2	.0125	1 Monopole on UAV for TX, 4 on GS for RX	27	Air balloon, 8	170, 1.5, 6000	1-8	$P_H$ , Auto-correlation of direct and diffuse components
[48]	Open field, suburban	PRN	3.1 - 5.3	2200	1 Dipole on UAV for TX and 1 on GS for RX	14.5	Quad-copter, 20	18, 1.5, 18.5	-	PL, PDP, RMS-DS, TOA of MPCs, PSD of sub-bands
[29], [30], [33], [49]–[52]	Urban, suburban, hilly, desert, fresh water, harbor, sea	DS-SS	0.988, 5.08	5, 50	1 directional antenna on GS for TX, 4 monopoles on UAV for RX	40	Fixed wing, 101	520 – 1952, 20, 1000 – 54390	1.5-48	PL, PDP, RMS-DS, K-factor, tap probability and statistics (power, delay, duration) in TDL model
[55]	rural, suburban	OFDM	0.97	10	1 monopole antenna on GS for TX, 1 monopole on aircraft for RX	37	Fixed wing, 235	11000, 23, 350000	0-45	PL, PDP, DPP
[57]	rural, suburban, urban, forest	FMCW	5.08	20	1 monopole on UAV for TX, 1 patch antenna on GS for RX	30	Fixed wing, 50	-, 0, 25000	-	CIR, PG, RSS
[58]	Urban	MSK	2.3	6	1 Whip antenna on UAV as transceiver, 1 patch antennas as transceiver on GS	33	Fixed wing, 50	800, 0.15, 11000	4.15-88	RSS
[59]	Urban, suburban, rural	GSM, UMTS	0.9, 1, 9-2, 2	-	Transceiver on balloon and GS	41.78	Captive balloon	450, -, -	-	RSSI, handover analysis
[60]	Urban, hilly, ocean	OFDM	2.4	4.375	4 whip antennas on AV for TX, 4 patch antennas on GS for RX	-	Fixed wing, 120	3500, -, 50000	-	Eigen values, beam-forming gain
[39]	Rural	PRN, BPSK	0.915	10	2 helical antennas on AV for TX, 8 at GS for RX	44.15	Fixed wing, 38	200, -, 870	13-80	CIR, $P_H$ , RMS-DS, spatial diversity
[37]	-	OFDM	5.28	-	4 omni-directional on UAV for TX, 2 on GS for RX	18	Fixed wing, 17.88	45.72, 4.26, -	-	$P_H$ , RSSI
[38]	Urban, open field	OFDM	5.34	-	2 omni-directional on UAV for TX, 2 on GS for RX	20	Quad-copter, 16	120, 2, 502.5	-	RSSI
[62]	Open field	OFDM	5.34	-	3 omni-directional on UAV for TX, 3 on GS for RX	20	Quad-copter, 16	110, 3, 968.87	10-85	RSS
[61]	-	IEEE 802.15.4	2.4	-	On board inverted F transceiver antenna on UAV and GS	0	Hexacopter, 16	20, 1.4, 120	-	RSSI
[20]	Suburban	WiFi, 5G/4G	-	-	Transceiver on UAV and GS	-	Hexacopter, 8	100, -, -	-	$P_H$ , RTT of packets
[62]	Forest (anechoic chamber)	-	8-18	-	Spiral antennas on TX and RX	-	-	2.3, 0.6, 2.85	20-45	$P_H$
[63]	Open area	Mod. sig.	5.8	-	2 Monopole, 1 horn on UAV for TX, 2 on GS for RX	-	Fixed wing, -	150, 0, 500	-	$P_H$
[64]	Open area/forest	802.11 b/g	5.8	-	1 omni-directional on GS for TX, 4 on UAV for RX	-	Fixed wing, 20	75, 2, -	-	Diversity performance
[65]	Urban/suburban, open field, foliage	CW	2.00108, 2.00088	-	2 monopoles on UAV for TX, 2 on GS for RX	27	Gondola airship, 8.3	50 and above, 1.5, 2700	1	$P_H$
[66]	Urban, rural, open field	-	0.915	-	1 omni-directional antenna on UAV for TX, 1 on GS for RX	-	Quad-copter, -	-, 13.9, 500	-	RSSI, PL
[67]	Sea	PRN	5.7	-	Omni-directional on AV for TX, 2 directional antennas at GS for RX	40	Fixed wing AV, -	1830, 2.1, 7.65, 95000	-	PL
[34]	Urban	CW	2.05	-	1 monopole on AV for TX, 4 on GS for RX	-	Aerial platform, -	975, -, -	7.5-30	PDP, RMS-DS, MPCs count, K-factor, PL
[47]	Near airport	CW	5.75	-	Directional antenna on GS for TX and omni-directional on AV for RX	33	Fixed wing AV, -	914, 20, 85000	80	$P_H$ , fading depth, K-factor, PL
[68]	Urban, hilly	Chirp	5.12	20	1 monopole antenna on GS for TX and 1 omni-directional on AV for RX	40	Fixed wing AV, 293	11000, 18, 142000	(-16)–5	PDP

Πίνακας 1: Πίνακας σημαντικών μετρήσεων επί AG καναλιών σε υπάμενες συσκευές [103]

Η τοποθέτηση της κεραίας επί του UAV είναι σημαντική για την αποφυγή φαινομένων σκίασης από την άτρακτο του αεροσκάφους καθώς και για την αποφυγή διαταραχής των αεροδυναμικών γραμμών του αεροσκάφους από την κεραία. Στην πλειονότητα των μετρήσεων οι κεραίες τοποθετήθηκαν στην βάση της άτρακτου του αεροσκάφους ή στα φτερά του. Ο προσανατολισμός των κεραιών στο UAV και στο σταθμό εδάφους μπορεί επίσης να επηρεάσει τα χαρακτηριστικά του σήματος [60],[61]. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι κυρίως σημαντικό κατά την περιστροφή του αεροσκάφους και όταν η γωνία ανόδου (pitch) δεν είναι οριζοντιωμένη (φάση ανόδου). Η γωνία ανόδου ανάμεσα στις κεραίες εκπομπής και λήψης εξαρτάται από το ύψος του αεροσκάφους UAV και το σημείο της επιφάνειας GS, θέσεις οι οποίες αναπόφευκτα μεταβάλλονται διαρκώς κατά την διάρκεια μιας πτήσης.

Στην πλειονότητα των εφαρμογών επικοινωνιών που προορίζονται να κάνουν χρήση UAVs, το ιπτάμενο μέσο αναμένεται να παραμένει στατικό στον χώρο για δεδομένο χρονικό διάστημα. Όπως ήδη έχει αναφερθεί για κινούμενα UAV, η ταχύτητα θα επιδράσει σημαντικά στα χαρακτηριστικά του καναλιού. Για UAVs τα οποία κινούνται με υψηλότερες ταχύτητες, ο χρόνος συνοχής (coherence time) για το κανάλι μειώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία μεγάλη φασματική εξάπλωση Doppler. Για συνδέσεις σε πολλαπλά UAVs, οπότε σε αυτήν την περίπτωση απαιτούνται και μεταπομπές (handovers), αναμένεται ότι το πλήθος των μεταπομπών αυτών θα αυξηθεί καθώς η ταχύτητα πτήσης αυξάνεται. Κατά συνέπεια αυτό θα χρειαστεί περισσότερη επεξεργαστική ισχύ για τον χειρισμό του φαινομένου των μεταπομπών από πλευράς δικτύου. Επιπρόσθετα, οι υψηλότερες ταχύτητες οδηγούν σε αύξηση του συντελεστή τριβής από τον αέρα και σε μηχανικές περιδινήσεις οι οποίες για τις κεραίες καταλήγουν σε αυξημένα επίπεδα θορύβου. Πολλές από τις μετρήσεις για το AG κανάλι στην βιβλιογραφία, έχουν διεξαχθεί με δεδομένους τύπους πτερυγίων αεροσκαφών και για ταχύτητες που αφορούν σε εύρος από 17 m/s έως και 293 m/s. Οι ταχύτητες για τα ελικόπτερα και τα αερόστατα είναι κατά πολύ μικρότερες από ότι στα συνηθισμένα αεροσκάφη και μεταβάλλονται στην ζώνη των 8 m/s έως και 20 m/s.

Το ύψος πτήσης του UAV από την επιφάνεια της γης είναι μια σημαντική παράμετρος για το AG κανάλι και θα επιδράσει σημαντικά στα χαρακτηριστικά του καναλιού. Αυξάνοντας το ύψος πτήσης του UAV συνήθως καταλήγει σε μείωση όδευσης πολλαπλών διαδρομών σήματος [101] από τους γειτονικούς σκεδαστές. Ένα ακόμη όφελος από την πτήση των UAVs σε μεγάλα υψόμετρα είναι η κάλυψη μεγαλύτερης περιοχής εδάφους. Επίσης η μορφολογία και οι υψομετρικές διαφορές του εδάφους αναμένεται να επιδράσουν εξίσου στα χαρακτηριστικά του AG καναλιού. Για κάθε σενάριο μετρήσεων μπορεί να υπάρχει ένα βέλτιστο ύψος για την επιφάνεια της γης προς κάλυψη. Το ύψος αυτό προκύπτει από την σχετική εξισορρόπηση των φαινομένων απόσβεσης στο κανάλι σε συνδυασμό με τα επίπεδα απόκλισης και διαφορών φάσης από τις πολλαπλές διαδρομές οδεύσεων.

Επίσης διαθέσιμες στην βιβλιογραφία είναι και μετρήσεις για το AG κανάλι με χρήση ελικοπτέρων ή αεροστάτων. Αυτές οι μετρήσεις διάδοσης για το AG κανάλι αφορούν σε διαφορετικά ύψη πτήσης των UAVs κυμαινόμενα από 16 m έως και 11 Km για αποστάσεις σύνδεσης μεταξύ πομπού – δέκτη από 16.5 m έως και τα 142 Km. Οι γεωγραφικές θέσεις και οι παράμετροι πτήσης του UAV (longitude, latitude, pitch, yaw, roll), μπορούν σε όλες τις μετρήσεις να εξαχθούν με ακρίβεια από τα συστήματα GPS που καλύπτουν τις επίγειες και εναέριες μετακινήσεις.

Εκτός από την εγκατάσταση διαύλων μέσω AG καναλιών για επικοινωνία φωνής, χρησιμοποιούνται και κάποιες ειδικές εκδοχές των πρωτοκόλλων IEEE 802.11 για την μετάδοση δεδομένων. Το πρότυπο IEEE 802.11 υποστηρίζει συσκευές, προσφέροντας μία πολύ ευέλικτη βάση σύνδεσης και μπορεί να προσφέρει μία βάση συνένωσης των υπηρεσιών επικοινωνίας των UAVs για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

### **2.3.2 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κατά την επιβολή μετρήσεων στο AG κανάλι**

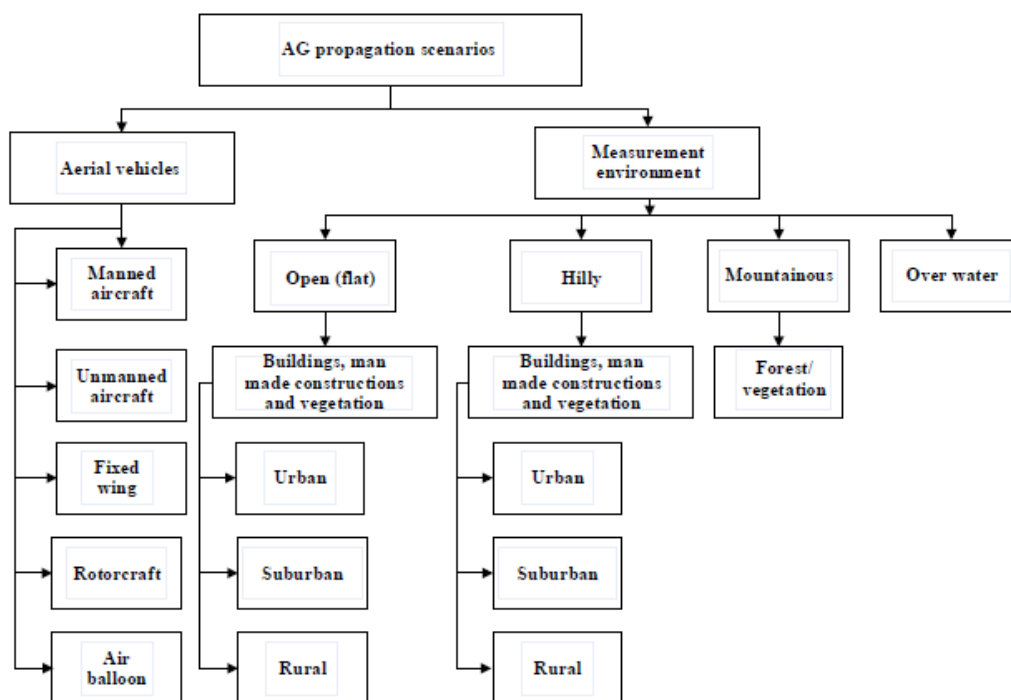
Αξίζει να σημειωθεί, ότι η διεξαγωγή μετρήσεων επί των AG καναλιών είναι σαφώς πιο απαιτητική διαδικασία σε σχέση με την εφαρμογή επίγειων μετρήσεων. Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις είναι το περιορισμένο φορτίο που ένα UAV μπορεί να μεταφέρει σε συνδυασμό με την εμβέλεια που αυτό παρουσιάζει καθώς και το ύψος πτήσης (το οποίο ρυθμίζεται από κανονισμούς πτήσεων). Η χρήση μεγαλύτερων UAVs για την διεξαγωγή πειραμάτων και μετρήσεων συνεπάγεται σαφώς και μεγαλύτερα κόστη. Εξαιτίας των περιορισμών στο ύψος πτήσης των UAVs, η πτήση σε χαμηλά ύψη δεν διασφαλίζει οπτική επαφή (LOS) για μεγάλο πλήθος σημείων της επιφάνειας και κατά συνέπεια οι επικοινωνίες είναι υποκείμενες σε φαινόμενα σκίασης, ειδικότερα σε ημιαστικές και αστικές περιοχές. Εξαιτίας περιορισμών στην ανύψωση βάρους είναι δύσκολο να επιτευχθεί εκπομπή μεγάλης ισχύος. Επίσης η επεξεργασία των σημάτων λήψης απαιτεί επεξεργαστική ισχύ η οποία με την σειρά της οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση ισχύος για το σύστημα επικοινωνιών.

Άλλες προκλήσεις σε αυτού του τύπου τις μετρήσεις, περιλαμβάνουν μεταβαλλόμενες συνθήκες στην επιφάνεια κατά την διάρκεια της πτήσης (κινήσεις επίγειων αντικειμένων), μετεωρολογικές μεταβολές (άνεμοι και βροχή), τοποθέτηση της κεραίας επί του UAV, ακριβής εντοπισμός του UAV στον χώρο και στον χρόνο, τηλεμετρίες για εκτίμηση θέσης-ταχύτητας με διαφορετικές καθυστερήσεις, εύρος ζώνης για την μετάδοση και ευρωστία στην λειτουργία του καναλιού, καθώς και ο περιορισμένος χρόνος πτήσης ειδικά για τα μικρότερα UAVs που χρησιμοποιούν μπαταρίες. Εξαιτίας του τρόπου κίνησης των UAVs στον χώρο ακόμη και η εκτίμηση των αποστάσεων μεταξύ πομπών – δεκτών είναι ένα σημαντικό θέμα. Ξαφνικές ριπές ανέμων που διαταράσσουν την θέση του UAV δυσκολεύουν τον εντοπισμό της τρέχουσας θέσης με ακρίβεια. Η πιο κοινή τεχνική για την εκτίμηση των αποστάσεων είναι η χρήση του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού (Global Positioning System – GPS), τόσο για το UAV όσο και για το σημείο επικοινωνίας. Όπως όμως είναι γνωστό και τα συστήματα GPS εμφανίζουν περιορισμούς στον εντοπισμό, καθώς τα διαδιδόμενα σήματα από και προς αυτά, είναι διερχόμενα από διαφορετικές ζώνες λόγω της μεταβαλλόμενης θέσης των UAVs.

### 2.3.3 Σενάρια μετρήσεων στο AG κανάλι

Μία συσκευή παραγωγής σημάτων ειδικού τύπου για εκπομπή αποτελεί εξοπλισμό ο οποίος λόγω βάρους μπορεί να μην είναι δυνατόν να μεταφερθεί από τα UAVs. Για τον λόγο αυτό οι παραγόμενες κυματομορφές για μετρήσεις τόσο σε επικοινωνία ευρείας όσο και σε επικοινωνία στενής ζώνης, γίνονται με χρήση κρουστικών, συσχετιστικών ή αιχμηρού φάσματος (chirp) παλμών.

Κατάλληλη εκλογή των παραμέτρων καναλιού σε δεδομένο περιβάλλον είναι πολύ σημαντική διαδικασία για τον προσδιορισμό των στατιστικών χαρακτηριστικών του καναλιού. Το περιβάλλον διάδοσης του AG καναλιού κυρίως χαρακτηρίζεται με βάση την μορφολογία του εδάφους, π.χ. επίπεδο, λοφώδες, ορεινό, και υδάτινο. Ένα συγκεκριμένο περιβάλλον (terrain) μπορεί να έχει κάλυψη από βλάστησης γκαζόν, δάσος ή κτίρια. Η πιο αποδεκτή μορφολογία για την κάλυψη του περιβάλλοντος (terrain) παρέχεται από την ITU (International Telecommunication Union). Με βάση αυτό το πρότυπο τα σενάρια μετρήσεων κατατάσσονται ως ανοικτά – open (flat), λοφώδη/βραχώδη και επί ύδατος. Κάθε σενάριο μπορεί να υποδιαιρεθεί στην βάση του περιβάλλοντος (terrain) όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 20: Σενάρια μετρήσεων για διάδοση στο κανάλι AG με χρήση UAV [103]

Για κάθε περιβάλλον, διαφορετικοί τύποι από UAV που ελέγχονται με ραδιοσήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αερόστατα ή αερόπλοια είναι εύκολα στον χειρισμό αλλά δεν έχουν ευσταθή συμπεριφορά κατά την κίνηση τους. Όλα τα υπόλοιπα UAVs μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως σταθερού ανοίγματος πτερύγων ή ελικόπτερα. Τα UAVs με σταθερό άνοιγμα πτερύγων γλιστρούν, διατηρούν υψηλές ταχύτητες και ταξιδεύουν ταχύτερα από τα ελικόπτερα. Τα ελικόπτερα όμως είναι πιο ευέλικτα. Τα ελικόπτερα έχουν επίσης την ικανότητα να παραμένουν σταθερά ενώ τα UAVs με σταθερό άνοιγμα πτερύγων όχι. Τα

σενάρια για διάδοση στο AG κανάλι μέσω UAVs σε διαφορετικά περιβάλλοντα με ειδικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Σενάριο	Χαρακτηριστικά Σεναρίου	Παράγοντες επίδρασης
Αστική/Ημιαστική Περιοχή	Λόγος Χερσαίας επιφάνειας προς τον Λόγο Ανοικτής Επιφάνειας προς επιφάνεια οικοδομημάτων, Κατανομή της επιφάνειας κτισμάτων και ύψη, Κατανομή αντικειμένων στην επιφάνεια (οχήματα, πεζοί), Κατανομή και Χαρακτηριστικά Βλάστησης, υδάτινες επιφάνειες, κλπ.	Υλικά κατασκευής των κτισμάτων και των οροφών σκεπής
Αγροτική/Ανοικτή Περιοχή	Τύπος και Πυκνότητα Βλάστησης, Κατανομή και σχήματα των αραιών κτισμάτων.	Τραχύτητα επιφάνειας, τύπος εδάφους, επίπεδα υγρασίας
Λοφώδης/Βραχώδης Περιοχή	Ύψη επιφάνειας και κλίσεις τοπίου, Κατανομή και Τύπος της Βλάστησης, Κατανομή και Μεγέθη των κτισμάτων.	Κλίση εδάφους, γενική τραχύτητα εδάφους
Δασώδης Περιοχή	Πυκνότητα και τύποι Βλάστησης, Κλιμακώσεις ύψους βλάστησης.	Κατανομή και εξάπλωση φύλλων και κλαδιών
Θαλάσσια Επιφάνεια	Τύπος ύδατος (αλμυρό – γλυκό), Κατανομές και σχήματα αντικειμένων επί της επιφάνειας (πλοία, πλατφόρμες, κλπ), Κατανομές αντικειμένων πλησίον (κτίσματα, υδραγωγεία, κλπ), μεταβολές επί της υδάτινης επιφάνειας (κύματα, παλίρροιες).	Τροποποιημένοι συντελεστές ανάκλασης συγκρινόμενοι με τους αντίστοιχους του εδάφους, κυματο-οδεύσεις επί υδάτινων επιφανειών.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά διάδοσης του AG καναλιού για διαφορετικά σενάρια [103]

Τα σενάρια μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

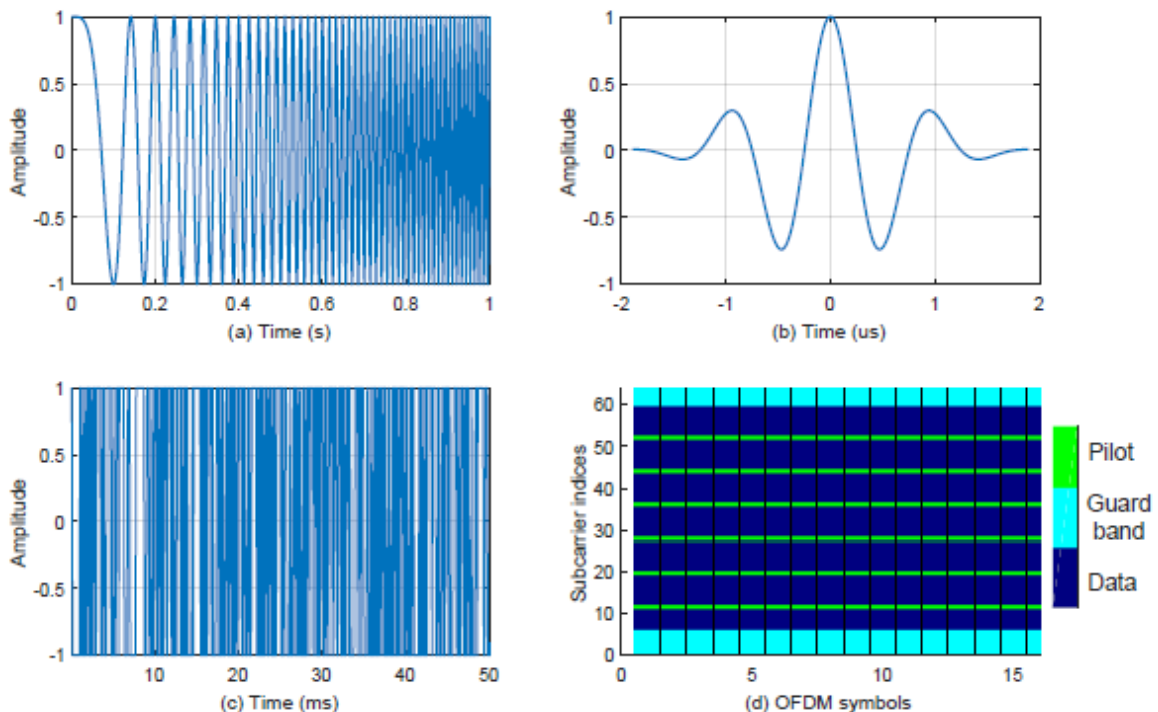
- Ανοικτού Χώρου (Open Space)
- Λοφώδη/Βραχώδη (Hilly/Mountainous)
- Δασώδη (Forest)
- Επί υδάτινων επιφανειών/θάλασσας (water/sea)

### 2.3.3 Κυματομορφές των σημάτων μέτρησης στο AG κανάλι

Τα συνηθισμένα σήματα που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις διάδοσης στον διάυλο είναι σύντομοι παλμοί (πολύ μικρής διάρκειας που μπορεί να θεωρηθούν κρουστικοί), απευθείας ακολουθίες σημάτων εξαπλωμένου φάσματος (direct sequence spread spectrum signals – DS-SS) για συσχετιστική επεξεργασία, σήματα με γραμμικά μεταβαλλόμενη διαμόρφωση (chirp), και σήματα αποτελούμενα από πολλαπλούς τόνους/συχνότητες (multi-tone). Στο σχήμα που ακολουθεί παρατίθενται chirp (αιχμηρά) σήματα, RF-Gaussian παλμός, ψευδοτυχαία ακολουθία παλμών και σήματα ορθογωνικής πολυπλεξίας στο πεδίο της συχνότητας (OFDM).

Αυτά τα σήματα έχουν χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές μετρήσεις όπως παρουσιάζει και ο Πίνακας 1. Παλμοί μικρής διάρκειας αποτελούν καλές προσεγγίσεις κρουστικών παλμών διευκολύνοντας τις μετρήσεις για την πολλαπλή οδευση μονοπατιών του σήματος στο πεδίο του χρόνου. Το βασικό θέμα είναι η δημιουργία παλμών με

ικανοποιητικά επίπεδα ενέργειας για να μπορούν να διαδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις και επίσης μεγάλου λόγου Μέγιστης προς Μέση Τιμή (Peak to average power ratios – PAPR). Τα DS-SS σήματα χρησιμοποιούν ψευδοτυχαίες ακολουθίες αριθμών για την δημιουργία σημάτων με εξαπλωμένο φάσμα το οποίο αποδιαμορφώνεται με ολίσθηση σε μία διάταξη συσχετιστή (correlator). Η επεξεργασία μέσω του συσχετιστή δίνει μία εκτίμηση της κρουστικής απόκρισης του καναλιού (Channel Impulse Response – CIR). Η τεχνική DS-SS μπορεί να χρησιμοποιήσει διαμόρφωση BPSK (Binary Phase Shift Keying – Διαδική Διαμόρφωση με Ολίσθηση Φάσης) και με λίγο φιλτράρισμα του σήματος, προκύπτει σήμα με μικρό PAPR. Η χρήση chirp σημάτων έχει το πλεονέκτημα της υψηλής συχνοτικής ευκρίνειας και την δυνατότητα διολίσθησης του σήματος επί μεγάλων συχνοτικών διαστημάτων. Ιδανικά το PAPR θα πρέπει να είναι περίπου μονάδα. Η τεχνική των παλμών chirp δίνει την συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού μέσω της οποίας μπορεί να προκύψει η κρουστική απόκριση με χρήση αντιστροφου μετασχηματισμού Fourier.



Σχήμα 21: Σήματα διάδοσης: (a) Σήμα Chirp (b) RF Gaussian παλμός με κεντρική συχνότητα 1 MHz και εύρος συχνοτήτων 60% (c) Ψευδοτυχαία ακολουθία συμβόλων (d) OFDM σήμα με 64 υπο-φέροντα (sub-carriers) 16 σύμβολα και 6 πιλότους [103]

Μία άλλη εξίσου δημοφιλής τεχνική είναι η χρήση πολυτονικών παλμών (multi-tone signals), τα οποία δειγματοληπτούν την συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού. Αυτό είναι κατ'ουσίαν η μετάδοση των ορθογωνικά διαμορφωμένων παλμών στο πεδίο της συχνότητας (OFDM). Ένα πλεονέκτημα των σημάτων OFDM είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιήσουν μέσω της κωδικοποίησης τους και γνωστά σήματα προς μετάδοση, επιτρέποντας και μετάδοση αυτών των δεδομένων μαζί με τα σήματα ελέγχου διάδοσης του καναλιού. Τα σήματα OFDM έχουν το πλεονέκτημα ενός επίπεδου φάσματος με μία χρονική καθυστέρηση τύπου  $\text{sinc}(x)$  (συνάρτηση δειγματοληψίας) και σχετικά μεγάλο PAPR.

Διαφορετικές συχνότητες φέροντος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διάδοση στο κανάλι AG και η χρήση τους μπορεί να είναι τελείως αυθαίρετη (αφού δεν υπάρχει προτυποποίηση). Οι περισσότερες μετρήσεις αφορούν σε ζώνες συχνοτήτων όπου τα ίδια τα UAVs δεν χρησιμοποιούν για τον έλεγχο της πλοήγησής τους. Οι μετρήσεις για συχνότητες φέροντος ξεκινούν από τα 100 MHz και φτάνουν μέχρι τα 18 GHz με τις περισσότερες όμως των μετρήσεων να διεξάγονται στην ζώνη των 5 GHz (5.06 – 5.8 GHz). Ομοίως και τα σήματα που χρησιμοποιούνται για την διάδοση στο κανάλι, διαφέρουν από στενής ζώνης μέχρι σήματα που έχουν εύρος συχνοτήτων μερικών δεκάδων MHz. Επίσης μετρήσεις έχουν γίνει σε κανάλια Ultra Wide Band – UWB με εύρος συχνοτήτων που φτάνει στα 2.2 GHz (!) δίνοντας πάρα πολύ μικρούς χρόνους ανάλυσης (κάτω του ns).

## ***2.4 Μετρήσεις διάδοσης επί AG καναλιών για UAVs***

Αρκετοί τύποι στατιστικής περιγραφής του καναλιού είναι χρήσιμοι για τον χαρακτηρισμό του καναλιού ανάλογα με τις εφαρμογές. Για την διάδοση στο AG κανάλι τα στατιστικά χαρακτηριστικά του καναλιού είναι όμοια με αυτά που έχουν συγκεντρωθεί για τα επίγεια κανάλια. Γενικά τα κανάλια διάδοσης είναι γραμμικά και χρονο-μεταβαλλόμενα, αλλά κατά χρονικές περιόδους μπορούν να προσεγγισθούν ως χρονικά αμετάβλητα (Γ.Χ.Α – Γραμμικά Χρονικά Αναλλοίωτα). Για γραμμικά χρονικά μεταβαλλόμενα κανάλια, η κρουστική απόκριση ή η συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού, μπορούν να χαρακτηρίσουν πλήρως το κανάλι. Όπως σημειώθηκε εξαιτίας της σχετικής κίνησης του UAV το κανάλι AG μπορεί να θεωρηθεί ως στάσιμο μόνο για μικρές αποστάσεις. Έτσι η απόσταση που διασφαλίζει αυτήν την στασιμότητα χρειάζεται να ληφθεί υπόψη όταν υπολογίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά του καναλιού.

Μία άλλη σημαντική παράμετρος η οποία έχει χρησιμοποιηθεί από αρκετούς ερευνητές για να χαρακτηρίσουν την ποιότητα της διάδοσης σήματος στο AG κανάλι, είναι ο ρυθμός μετάδοσης (throughput). Αυτή η παράμετρος είναι εξαρτώμενη από την υλοποίηση των πομπών και των δεκτών της συνολικής διάταξης, άλλες παραμέτρους του διαύλου (αέρα), τον αριθμό των κεραιών που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση καθώς και την ισχύ εκπομπής των σημάτων. Επομένως, η παράμετρος αυτή είναι μικρής χρησιμότητας για τον χαρακτηρισμό του καναλιού AG. Ομοίως, για MIMO κανάλια, η διαμόρφωση του κέρδους με κατεύθυνση του λοβού (beam forming), η απόκλιση και η χωρητικότητα του καναλιού, συχνά αποτελούν παραμέτρους προς υπολογισμό. Μερικές από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που αναφέρονται στα χαρακτηριστικά για την διάδοση στα AG κανάλια δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

### **2.4.1 Απώλειες Διάδοσης. (Path Loss – PL) / Σκίαση (Shadowing)**



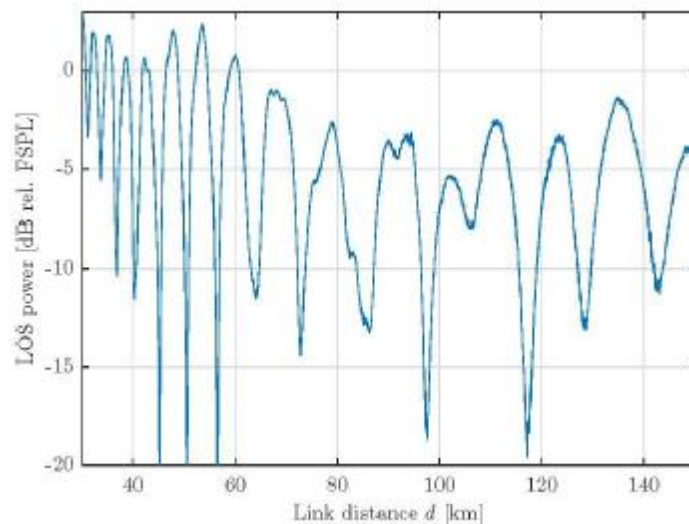
Οι περισσότερες μετρήσεις στο AG κανάλι παρουσιάζουν την απώλεια διάδοσης καθώς και την σκίαση εφόσον είναι παρούσα. Για τα AG κανάλια που εντοπίζουν καταστάσεις εκτός LOS, η μοντελοποίηση της απώλειας διάδοσης (PL) ξεκινά με τις απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου. Όταν όμως η ανάκλαση από την επιφάνεια της γης είναι παρούσα (και δεν εμποδίζεται από χρήση κατευθυντήρων κεραιών), η απώλεια διάδοσης μπορεί να περιγραφεί από το μοντέλο των δύο ακτινών (two ray model). Όπως και στα επίγεια κανάλια έτσι και εδώ, για την απώλεια διάδοσης γίνεται χρήση λογαριθμικής απόστασης (log-απόστασης) για το PL μοντέλο. Η απώλεια αυξάνει καθώς η απόσταση αυξάνει με χρήση εκθετικού παράγοντα (Path Loss Exponent – PLE). Οι τιμές του PLE έχουν βρεθεί να διαφέρουν για αστικά, ημιαστικά, λοφώδη και σενάρια επί νερού. Γενικά όμως είναι κοντά στην προβλεπόμενη τιμή του κενού χώρου (τιμή 2) με τυπική απόκλιση από αυτήν την τιμή, η οποία μεταβάλλεται γραμμικά γύρω από αυτήν με μεταβολή που δεν ξεπερνά τα 3 db.

Οι συνθήκες LOS και NLOS μελετούνται στις μετρήσεις ξεχωριστά. Για τις μετρήσεις όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή πομπού – δέκτη (NLOS) επιπρόσθετα στο μοντέλο PL προκύπτει και ένας παράγοντας εξασθένησης (ο οποίος μοντελοποιείται ως παράγοντας Rayleigh). Επιπλέον, στην περίπτωση αυτή, προστίθεται και ένας παράγοντας ανάκλασης. Κατά αναλογία τα μοντέλα LOS για τις L και C bands μπορούν να εισάγουν Ricean επιδράσεις μικρής κλίμακας. Μία συνάρτηση που περιγράφει την απώλεια διάδοσης και χρησιμοποιεί επίσης και την γωνία ανόδου ανάμεσα σε χαμηλού ύψους υπτάμενα UAVs και την γωνία λήψης  $\theta_e$ , δίνεται από την σχέση:

$$FSPL = 20 \log \left( \frac{\Delta h}{\sin \theta_e} \right) + 20 \log(f_{\text{MHz}}) - 27.55,$$

όπου  $\Delta h = h_{\text{LP}} - h_{\text{RX}}$  είναι η διαφορά ανάμεσα στο ύψος της υπτάμενης πλατφόρμας (UAV) και του δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στο έδαφος. Ο παράγοντας  $\Delta h / \sin \theta_e$  εκφράζει απλά την απόσταση ζεύξης λαμβάνοντας υπόψη την γωνία ανόδου.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για την μεταβολή του επιπέδου ισχύος για οπτική επαφή πομπού – δέκτη (LOS) εξαιτίας των πολλαπλών ανακλώμενων οδεύσεων από την επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης d.



Σχήμα 22: Επίπεδα μεταβολής ισχύος σε συνθήκη LOS εξαιτίας της πολλαπλής όδευσης σήματος από ανακλάσεις στην επιφάνεια της γης. Η ισχύς είναι κανονικοποιημένη προς την απώλεια διάδοσης ελευθέρου χώρου [103]

Ειδικότερα, το παραγόμενο αποτέλεσμα από το διάγραμμα περιλαμβάνει την συνεισφορά της οπτικής επικοινωνίας πομπού – δέκτη (LOS) και την επίδραση των ανακλάσεων από την επιφάνεια της γης. Οι μετρήσεις έχουν συλλεγεί από αγροτικό περιβάλλον χρησιμοποιώντας εύρος ζώνης 10 MHz. Το ύψος από το έδαφος  $h_G$  είναι 23 m. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων το σημείο ανάκλασης διέρχεται από την οροφή του κτιρίου και μετά πάνω από επίπεδο με χαμηλή βλάστηση (γκαζόν). Από το σχήμα παρατηρούμε μία περιοδική μεταβολή των επιπέδων ισχύος. Μία επίσης απόσβεση του σήματος σε ποσοστό μεγαλύτερο από 10 dB δεν είναι επίσης κάτι το ασυνήθιστο. Αυτές οι μεταβολές του επιπέδου σημάτων προφανώς θα έχουν αρνητική επίδραση στην απόδοση του συστήματος επικοινωνιών. Για μία αυξανόμενη απόσταση της διασύνδεσης πομπού – δέκτη τότε η συχνότητα αυτών των μεταβολών παρουσιάζεται μειωμένη, γεγονός που αποτελεί μία σαφή ένδειξη για το μοντέλο προσέγγισης με τις δύο ακτίνες. Έτσι για αυτό το μοντέλο ακόμη και για ένα UAV το οποίο κινείται με υψηλές ταχύτητες, η διάλειτουργία μπορεί να διαρκέσει αρκετά δευτερόλεπτα. Είναι επίσης κλασική παρατήρηση ότι η ανάκλαση και η όδευση πολλαπλών διαδρομών δεν είναι πάντοτε παρούσες ως φαινόμενα. Ειδικότερα, στην περίπτωση που το έδαφος παρουσιάζει ένα χαμηλό συντελεστή ανάκλασης ή ακόμη η επιφάνεια εμφανίζεται πολύ τραχιά συγκρινόμενη με το μήκος του κύματος της εκπομπής.

Η απώλεια διάδοσης παρουσιάζει πλήρη πληροφωρία για την απόσβεση της μετάδοσης, αλλά και μία άλλη παράμετρος συχνά χρησιμοποιείται για να περιγράψει την απόσβεση μέσω του καναλιού. Η παράμετρος αυτή καλείται Ισχύς Λαμβανόμενου Σήματος (Received Signal Strength - RSS). Η παράμετρος RSS εμφανίζεται μειούμενη εξαιτίας του μη ταιριάσματος των πολώσεων μεταξύ των κεραιών πομπού και δέκτη, ειδικότερα όταν ένα UAV βρίσκεται σε φάση περιστροφής. Η ακρίβεια της παραμέτρου RSS σε εμπορικά προϊόντα μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά, για τον λόγο αυτό εμφανίζεται ιδιαίτερη η ανάγκη για μικρορυθμίσεις.

## 2.4.2 Διασπορά καθυστέρησης. (Delay Dispersion)

Το προφίλ καθυστέρησης ισχύος (Power Delay Profile – PDP) αποτελεί την εκδοχή της κρουστικής απόκρισης του καναλιού στο πεδίο ισχύος. Η πληροφορία αυτή μπορεί να εξαχθεί με στιγμιαίο τρόπο ή να γίνει εξαγωγή του μέσου όρου σε μία χωρική περιοχή εντοπισμένης ισχύος που αναφέρεται σε έναν όγκο (σε αυτήν την περιοχή το κανάλι θεωρείται Στάσιμο Υπό την Ευρεία Έννοια – WSS). Πολλές μελέτες για την διάδοση στο AG κανάλι σε διαφορετικά περιβάλλοντα έχουν μετρήσει τα PDPs. Μέσω του PDP η πιο κοινή εκτίμηση για την διάχυση της καθυστέρησης στο πεδίο του χρόνου μπορεί να προσδιορισθεί. Η εκτίμηση αυτή καλείται RMS-DS. Άλλες μετρήσεις διάχυσης όπως το παράθυρο καθυστέρησης, αναφέρονται μερικές φορές. Όπως είναι αναμενόμενο και από την γεωμετρία της διάδοσης η RMS-DS εμφανίζεται να μειώνεται καθώς η γωνία ανόδου αυξάνει.

Το μοντέλο Saleh – Valenzuela αρχικά αναπτύχθηκε για την μελέτη καναλιών μετάδοσης σε κλειστούς χώρους (indoor). Χρησιμοποιήθηκε επίσης για να μοντελοποιήσει την πληροφορία του PDP όταν πολλαπλοί δρόμοι όδευσης για το σήμα εμφανίζονται ομαδοποιημένοι ή μπλεγμένοι στην καθυστέρηση. Αυτό το μοντέλο προσδιορίζει τα μονοπάτια πολλαπλής όδευσης από τέτοια συμπλέγματα. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο αριθμός των συμπλεγμάτων διαφέρει για διαφορετικά περιβάλλοντα. Από μετρήσεις βρέθηκε ότι το RMS-DS ήταν εξαρτώμενο από την κάλυψη επιφανείας με μέγιστη εξάπλωση της καθυστέρησης, τα 4 us για αστικά και ημιαστικά περιβάλλοντα. Οι μεγαλύτερες τιμές για την μέτρηση RMS-DS προκύπτουν όταν υπάρχουν μεγάλα κτίρια τα οποία μπορούν να παρέχουν πολλαπλές διαδρομές σήματος με ισχυρές ανακλάσεις. Για λοφώδη περιβάλλοντα η τιμή ήταν 1 us, ενώ για βραχώδη μόλις 180 ns. Για μετρήσεις επί υδάτινων επιφανειών η τιμή της παραμέτρου RMS-DS ήταν 350 ns. Σε όλες αυτές τις μετρήσεις που αναφέρθηκε πάντα υπήρχε οπτική επαφή των σημείων ζεύξης. Για την πλειονότητα του χρόνου η τιμή της παραμέτρου RMS-DS ήταν μικρή στην κλίμακα μερικών δεκάδων ns.

## 2.4.3 Κυριαρχία του Παράγοντα Απόσβεσης Στενής Ζώνης. Ο Ricean K-παράγοντας

Στο AG κανάλι διάδοσης η μικρής κλίμακας εξασθένηση του πλάτους ακολουθεί κατανομή Rice εξαιτίας της ύπαρξης οπτικής επαφής πομπού – δέκτη (LOS component). Ο Ricean K-factor (K-παράγοντας), ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του κυρίου καναλιού προς το άθροισμα ισχύος για όλα τα υπόλοιπα κανάλια. Ο παράγοντας K χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει την απόσβεση του AG καναλιού. Ο παράγοντας K βρέθηκε να αυξάνει με την αύξηση της γωνίας ανόδου. Ο παράγοντας K συσχετίζεται επίσης και με την απόσταση πομπού – δέκτη. Ο παράγοντας K βρέθηκε επίσης να διαφέρει κατά τις φάσεις πτήσης του αεροσκάφους.

Ο παράγοντας K μετρήθηκε για επικοινωνία καναλιού AG στις μπάντες L και C για αστικά, ημιαστικά, λοφώδη και βραχώδη περιβάλλοντα καθώς και για επικοινωνία επί θαλάσσιας επιφάνειας. Οι μέσες τιμές του παράγοντα K για αστικές περιοχές ήταν γύρω στα 12 και 27.4 db για επικοινωνία σε L-band και C-

band αντίστοιχα. Οι μέσες τιμές του παράγοντα για λοφώδη και βραχώδη περιβάλλοντα βρέθηκαν σε τιμή 12.8 και 29.4 db για τις L-band και C-band αντίστοιχα. Για επικοινωνία επί της θάλασσας, ο παράγοντας K λαμβάνει τιμές 12.5 και 31.3 db για τις L-band και C-band. Αξίζει να σημειωθεί ότι για αυτά τα ισχυρά περιβάλλοντα, σε συνθήκες LOS ο παράγοντας K δεν εξαρτάται από το περιβάλλον επιφανείας GS. Το ότι οι τιμές για τον παράγοντα προέκυψαν μεγαλύτερες για την C-band από ότι για την L-band αυτό εξηγείται κυρίως από δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι ότι η C-band χρησιμοποιεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης από την L-band. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι για οποιαδήποτε γωνία και επιφάνεια, καθώς η συχνότητα του φέροντος αυξάνει η τραχύτητα της επιφάνειας φαίνεται να αυξάνει επίσης επειδή το μήκος κύματος της επικοινωνίας μειώνεται και επομένως τα προσπίπτοντα κύματα ανακλώνται προς περισσότερες από μία κατευθύνσεις.

#### 2.4.4 Εξάπλωση του φαινομένου Doppler

Το φαινόμενο Doppler είναι ένα γνωστό φαινόμενο για τις ασύρματες επικοινωνίες. Θεωρούμε την διάδοση σήματος στο AG κανάλι μέσω UAVs σε ένα περιβάλλον πολλαπλής όδευσης σημάτων. Έστω ότι  $\phi_i$  παριστάνει την γωνία μεταξύ του διανύσματος της ταχύτητας του αεροσκάφους και της κατεύθυνσης όπου το  $i$  εκφράζει την  $i$ -οστή όδευση μονοπατιού σήματος που λαμβάνεται. Τότε η συχνότητα Doppler για αυτήν την διαδρομή δίνεται από την σχέση:

$$f_d^i = \frac{v \cos \phi_i}{\lambda}$$

όπου  $u$  είναι η ταχύτητα του UAV και  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος για την επικοινωνία (στο σημείο αυτό υποθέτουμε ότι η επιφάνεια GS λήψης είναι ακίνητη, αλλιώς μια πιο πολύπλοκη σχέση για την ολίσθηση Doppler θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί). Εάν γίνονται λήψεις από πολλαπλές διαδρομές και διαφορετικές Doppler συχνότητες, αυτό το φαινόμενο παράγει φασματική εξάπλωση και καλείται εξάπλωση Doppler (Doppler spread).

Προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιορίσουν την ολίσθηση Doppler καθώς και την επίδραση της στο κανάλι σε διαφορετικές φάσεις της πτήσης.

#### 2.4.5 Μετρήσεις για τον καθορισμό στατιστικών στοιχείων του καναλιού

Εκτός από τα βασικά χαρακτηριστικά του καναλιού υπάρχουν και άλλοι δείκτες επίδοσης, οι οποίοι επίσης μπορούν να μετρηθούν. Δύο από αυτές είναι ο ρυθμός μετάδοσης (throughput) και ο ρυθμός σφαλμάτων (Bit Error Rate – BER), για κάθε τεχνολογία μετάδοσης. Όπως και με τις μετρήσεις του δείκτη RSS (RSS Indicator – RSSI), έτσι και οι προηγούμενοι δείκτες είναι χρήσιμοι για την εξαγωγή πληροφορίας σε κάθε σύστημα επικοινωνίας και κάθε περιβάλλον διασύνδεσης, αλλά και πάλι η πληροφορία που παρέχουν μπορεί να φανεί

ελλιπής στην προσπάθεια μοντελοποίησης του AG καναλιού. Το throughput για την διάδοση στο AG κανάλι διερευνήθηκε σε πολλές μελέτες χρησιμοποιώντας ως βάση το πρωτόκολλο IEEE 802.11. Οι μετρήσεις ρυθμού μετάδοσης βασίστηκαν σε παραλλαγές από το προηγούμενο πρωτόκολλο χρησιμοποιώντας επίσης διαφορετικούς προσανατολισμούς επί των κεραιών μετάδοσης, αποστάσεις μετάδοσης και ανυψώσεις διαφορετικών συσκευών UAV. Ο ρυθμός μετάδοσης από αυτές τις μελέτες βρέθηκε να είναι σε πλήρη εξάρτηση από τον τύπο της διαμόρφωσης και το σχήμα κωδικοποίησης για την μετάδοση της πληροφορίας. Από μετρήσεις επίσης βρέθηκε ότι ένα σχήμα κινητής διασύνδεσης όπως αυτό με τα UAV, μπορεί να δώσει τουλάχιστον διπλάσιο ρυθμό μετάδοσης από μία στατική σύνδεση για ένα καθορισμένο σχήμα καθυστέρησης στην επικοινωνία.

Ο ρυθμός σφαλμάτων συνδέεται με τον σηματοθορυβικό λόγο του σήματος (Signal to Noise Ratio – SNR) και αποτελεί ένα μέτρο για την απόδοση του συστήματος επικοινωνίας. Ανάλογες μετρήσεις έχουν γίνει και για τα συστήματα AG καναλιού βασισμένα στα σχήματα UAV. Επίσης, μετρήσεις του BER έγιναν για πτήσεις σε διαφορετικά περιβάλλοντα καθώς και για διαφορετικές τιμές της Ricean παραμέτρου  $K$ .

## **2.5 Μοντέλα για διάδοση στο AG κανάλι**

Οι μετρήσεις επί των AG καναλιών που υποστηρίζονται από UAV συσκευές και παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, είναι χρήσιμες για την ανάπτυξη μοντέλων για διαφορετικά περιβάλλοντα. Στην βιβλιογραφία, μοντέλα για το AG κανάλι διάδοσης με UAV συσκευές, έχουν αναπτυχθεί είτε χρησιμοποιώντας ντετερμινιστικές προσεγγίσεις ή στατιστικές προσεγγίσεις για την περιγραφή του καναλιού, είτε και συνδυασμό των δύο αυτών μεθόδων. Τα μοντέλα αυτά μπορεί να αφορούν επικοινωνία στενής ζώνης, ευρείας ζώνης, είτε εξαιρετικά ευρείας περιοχής συχνοτήτων (narrow/wide/ultra-wide – band). Πλήρη μοντέλα για την περιγραφή των καναλιών συμπεριλαμβάνουν τόσο μικρά όσο και μεγάλης κλίμακας φαινόμενα που επιδρούν στην λειτουργία τους. Στην συνέχεια ακολουθεί μία κατηγοριοποίηση των μοντέλων για τα AG κανάλια με βάση τις υπάρχουσες αναλύσεις.

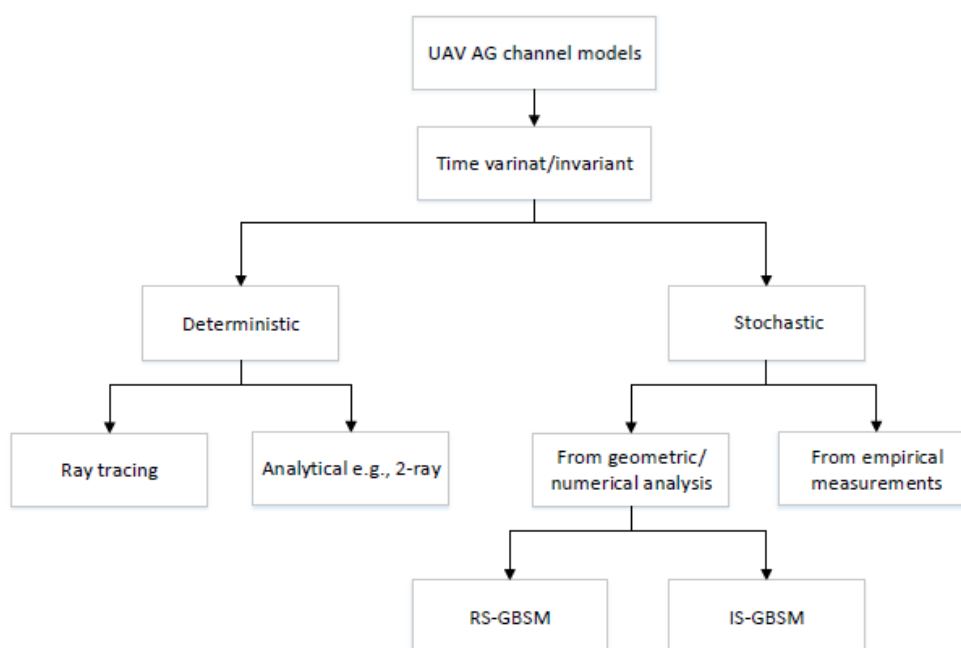
Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή του AG καναλιού χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ντετερμινιστικά. Υπολογίζουν την κρουστική απόκριση του καναλιού και μπορεί να παρέχουν υψηλή ακρίβεια αλλά χρειάζονται εκτενή δεδομένα για την περιγραφή του πραγματικού περιβάλλοντος. Χρησιμοποιούν σχήματα κεραιών, αεροσκάφους, κατευθύνσεις κίνησης καθώς και εμποδία στον χώρο.
- Στοχαστικά. Χρησιμοποιούν γεωμετρικές και αριθμητικές αναλύσεις χωρίς όμως την χρήση μετρήσεων ή κάνοντας χρήση εμπειρικών κανόνων και δεδομένων. Αυτά τα μοντέλα δεν αξιοποιούν την παρεχόμενη επεξεργαστική ισχύ και τείνουν να μην χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή πραγματικών συνθηκών στο κανάλι, δεδομένου ότι

χρειάζονται επιπλέον αριθμητικά δεδομένα για να πετύχουν αυτή την ακρίβεια.

- Ντετερμινιστικά και στοχαστικά σε συνδυασμό. Αυτά πολλές φορές καλούνται ημι-ντετερμινιστικά (quasi-deterministic). Συνήθως οι σάθηκες LOS και η καμπυλότητα της επιφάνειας της γης μοντελοποιούνται ντετερμινιστικά μέσω της γεωμετρίας ενώ τα μονοπάτια πολλαπλής όδευσης μοντελοποιούνται με στοχαστικές μεθόδους.

Το σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζει μία εποπτική περιγραφή των τεχνικών μοντελοποίησης για το AG κανάλι.



Σχήμα 23: Χαρακτηρισμός μοντέλων AG καναλιών υποστηριζόμενα μέσω UAV [103]

## 2.6 Συμπεράσματα

Η μοντελοποίηση των AG καναλιών υποστηριζόμενα με χρήση συσκευών UAV, αποτελεί ένα δύσκολο πρόβλημα δεδομένης της ιδιαιτερότητας των συνθηκών του ανοικτού του διαύλου επικοινωνίας και της φύσης αυτής [103]. Η επικοινωνία από εναέριους προς επίγειους σταθμούς επηρεάζεται από ένα πλήθος σημαντικών παραμέτρων (εξασθένιση, πολλαπλές οδεύσεις, μορφολογία του εδάφους, εμπόδια) οι οποίες είναι εγγενείς στην φύση των ασύρματων επικοινωνιών. Επιπλέον αυτών, η κινητικότητα των μέσων UAV δημιουργεί επιπρόσθετα προβλήματα, δεδομένου ότι είναι δύσκολο να διασφαλιστεί ο συνεχής προσανατολισμός των κεραιών και η σταθερότητα του διαγράμματος ακτινοβολίας καθώς η εναέρια συσκευή μεταβάλλει την θέση και την ταχύτητα της. Ήπιας κινητικότητας UAV (αερόστατα – αερόπλοια) μπορούν να

διασφαλίσουν τις συνθήκες για την μη γρήγορη μεταβολή θέσης και ταχύτητας, εντούτοις ακόμη και αυτοί οι τύποι των ιπτάμενων συσκευών μεταβάλλουν την διόπτρευση των σημείων κάλυψης καθώς μεταβάλλεται έστω και με ελάχιστο τρόπο η θέση και ο προσανατολισμός των κεραιών τους.

Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των καναλιών AG είναι εξίσου σημαντικές, δεδομένου ότι τα χαρακτηριστικά τους επιδρούν σημαντικά στα επίπεδα επικοινωνίας και σήματος. Οι ευρυγώνιες κεραίες φαίνεται να είναι πιο κατάλληλες για την διασφάλιση απρόσκοπτης επικοινωνίας σε ένα μεγάλο πλήθος στερεών γωνιών διόπτρευσης. Το πιο απλό σχήμα της μίας κεραιάς SISO φαίνεται να είναι αυτό που μειώνει τις επεξεργαστικές εξαρτήσεις για το συνολικό σύστημα. Εντούτοις, ακόμη και μικρές μεταβολές στην γωνία ανόδου του αεροσκάφους κάλυψης φαίνεται να επηρεάζουν την ποιότητα επικοινωνίας. Στην συνέχεια θα γίνει εισαγωγή στο θέμα σχεδίασης της κεραιάς κάλυψης για το AG κανάλι. Το περιβάλλον ανάλυσης και σχεδιασμού που θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση της απαιτούμενης κεραιάς είναι το HFSS®.

# 3

## Σχεδιασμός Κεραίας τύπου patch για την υποστήριξη AG καναλιού επί UAV

### 3.1 Εισαγωγή

Όπως παρουσιάστηκε και στις προηγούμενες ενότητες της εργασίας, ο σχεδιασμός μίας κεραίας αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία η οποία εισάγει ένα σημαντικό αριθμό παραμέτρων που θα πρέπει να καθορισθούν κατά την φάση της σχεδίασης, με στόχο την ικανοποίηση των τελικών προδιαγραφών. Οι κεραίες είναι ένα αναφαίρετο βασικό στοιχείο της λειτουργίας των AG καναλιών επί ιπταμένων UAVs. Οι κεραίες που απαιτούνται για την υλοποίηση αξιόπιστων καναλιών επικοινωνίας και ελέγχου επί ιπταμένων συσκευών, επιπλέον των κλασικών συνθηκών μετάδοσης - λήψης, θα πρέπει να λάβουν σοβαρά υπόψη τους, περιορισμούς που εισάγει η τοποθέτηση τους επί ταχέως κινουμένων συσκευών. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν τόσο στην μηχανική μορφή και το σχήμα τους καθώς και στο βάρος και την ισχύ τροφοδοσίας που απαιτούν για την λειτουργία τους. Η τοποθέτηση τους (στήριξη) σε συγκεκριμένο σημείο της ατράκτου, επηρεάζει αμφίπλευρα τόσο την λειτουργία της ίδιας της κεραίας όσο και την πτητική ικανότητα του ίδιου του αεροσκάφους (επιδρώνοντας στον συντελεστή αεροδυναμικότητας του).



Συνολικά λοιπόν, η εγκατάσταση μίας κεραίας για την υλοποίηση επικοινωνίας μέσω AG καναλιού, πρέπει να [103]:

- Επιτρέπει εύκολη εγκατάσταση επί της ατράκτου του αεροσκάφους
- Προσφέρει μηχανική αντοχή σε περιβάλλοντα έντονων μεταβολών ταχύτητας και διευθύνσεων
- Ικανοποιεί σχετικά χαμηλή τροφοδοσία για την μεγιστοποίηση της πτητικής ικανότητας του αεροσκάφους
- Διαθέτει ευρυγώνιο διάγραμμα ακτινοβολίας
- Διαθέτει σημαντικό εύρος ζώνης για την υλοποίηση των υπηρεσιών του καναλιού
- Είναι επεκτάσιμη

Οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) αποτελούν ιδανικές επιλογές κεραίων οι οποίες επιλύουν κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα θέματα μηχανικής στήριξης και εγκατάστασης τους επί κινουμένων οχημάτων [109]. Δεδομένου ότι οι κεραίες τύπου μικροταινίας (patch antennas) αποτελούν κεραίες δύο διαστάσεων (επίπεδες), δεν εκτείνονται σε όγκο και για τον λόγο αυτό δεν αλλοιώνουν την πτητική ικανότητα της συσκευής επί της οποίας θα εγκατασταθούν. Η στήριξη τους, είναι καθαρά στήριξη μίας αγωγίμης επιφάνειας η οποία δεν εισάγει τριβές και δεν μεταβάλλει τις αεροδυναμικές γραμμές της πτητικής συσκευής. Επιπλέον, με κατάλληλη εκλογή της συχνότητας λειτουργίας τους, μπορούν να καλύψουν ένα σημαντικό εύρος ζώνης ικανό να χρησιμοποιηθεί για μεγάλο αριθμό εφαρμογών ευρυζωνικών απαιτήσεων. Τα κόστη παραγωγής ή αγοράς τους είναι σχετικά μικρά, δεδομένου ότι η τεχνολογία κατασκευής τους εκμεταλλεύεται την τεχνολογία τυπωμένων κυκλωμάτων. Η ισχύς που απαιτείται για την τροφοδοσία τους μπορεί να είναι αρκετά χαμηλή έτσι ώστε να μην επιβαρύνει την συνολική ανάγκη ισχύος του συστήματος. Το διάγραμμα ακτινοβολίας τους μπορεί να διαμορφωθεί κατά τρόπο που να καλύψει ένα σημαντικό τμήμα των στερεοσκοπικών διευθύνσεων στο χώρο.

Για όλους αυτούς τους λόγους, οι κεραίες τύπου patch αποτελούν μία καλή εκλογή για την υλοποίηση της κεραίας που απαιτείται για την υποστήριξη των AG καναλιών επί των UAVs.

Ο σχεδιασμός των κεραίων τύπου patch είναι όμως μια απαιτητική διαδικασία η οποία εκτός από τα χρησιμοποιούμενα υλικά κατασκευής της κεραίας, θα πρέπει να λάβει υπόψη και τις επιβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος. Στόχος, με τον σχεδιασμό της κεραίας είναι η ικανοποίηση των τεχνικών προδιαγραφών επικοινωνίας, οι οποίες θα πρέπει να αποτιμηθούν ποσοτικά. Το τελευταίο συνεπάγεται ακρίβεια στους αριθμητικούς υπολογισμούς για την λειτουργία της κεραίας καθώς και εκτεταμένη πεδιακή ανάλυση για τον περιβάλλοντα χώρο. Η σχεδίαση μίας κεραίας απαιτεί επίλυση των εξισώσεων Maxwell για τον προσδιορισμό των πεδίων στον χώρο. Η διαδικασία υπολογισμού είναι επίπονη και χρειάζεται ένα σημαντικό πλήθος αριθμητικών υπολογισμών σε συνθήκες πλέγματος (πεπερασμένων διαφορών) στον χώρο και στον χρόνο. Στο σημείο αυτό η σχεδίαση εκμεταλλεύεται τις αριθμητικές τεχνικές σε συνδυασμό με την χρήση των H/Y που διευκολύνουν σημαντικά το πρόβλημα των αναλυτικών υπολογισμών.

Τα περιβάλλοντα προσομοιώσεων για την ανάλυση της συμπεριφοράς των κεραίων, παρουσιάστηκαν με λεπτομέρεια σε προηγούμενη ενότητα της εργασίας. Για την επίλυση των υπολογισμών των πεδίων και τον σχεδιασμό της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό

περιβάλλον Ansys High Frequency Structure Simulator – HFSS®. Οι προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στη παρούσα εργασία υλοποιήθηκαν με χρήση του HFSS και πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μία σύντομη παρουσίαση των λειτουργιών και των δυνατοτήτων του προγράμματος παρουσιάζεται στις παραγράφους που ακολουθούν.

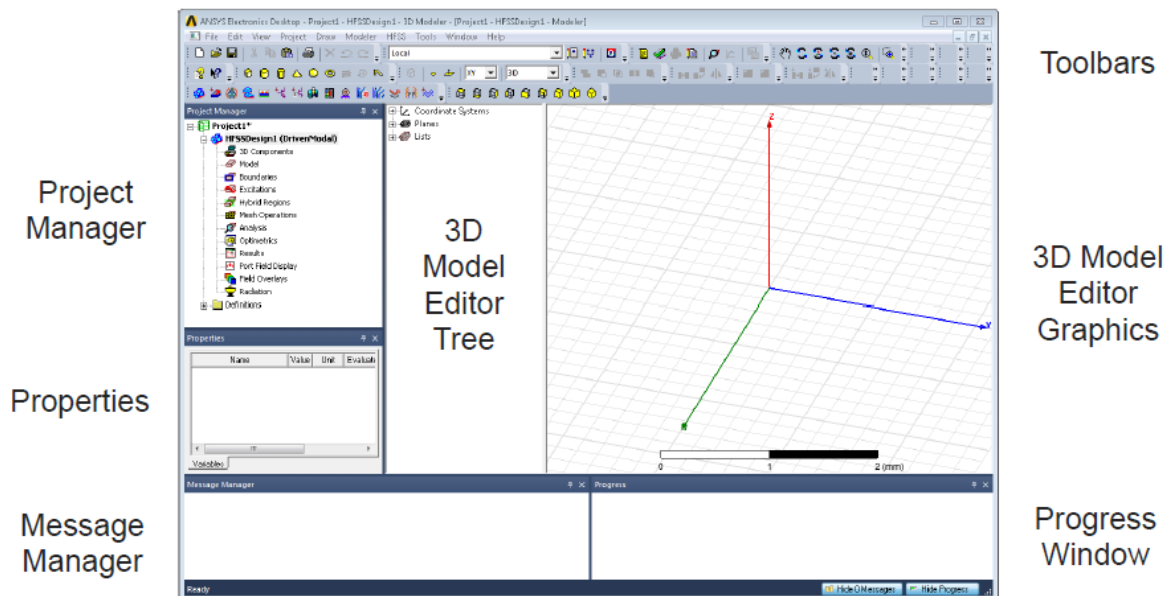
### ***3.2 Το περιβάλλον ανάλυσης και προσομοιώσεων HFSS®***

Το περιβάλλον HFSS® παρέχει την δυνατότητα για τρισδιάστατη ανάλυση και αναλυτικό προσδιορισμό των πεδίων κάνοντας χρήση τεχνικών ανάλυσης πλήρους κύματος στο πεδίο συχνοτήτων. Οι αριθμητικοί υπολογισμοί στο πρόγραμμα προσομοίωσης γίνονται με χρήση της μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method). Η ακρίβεια που παρέχεται από τους αλγόριθμους προσομοίωσης είναι εξαιρετικά υψηλή καθιστώντας το πακέτο ιδανικό για σχεδιασμό πρωτοτύπων που απευθύνονται σε βιομηχανική υλοποίηση. Για την εκτέλεση των υπολογισμών το περιβάλλον προσομοίωσης υποστηρίζει την χρήση πλεγμάτων (grids), επιτρέποντας προσαρμοστικές τεχνικές με μεταβλητό πλέγμα, προσφέροντας έτσι την δυνατότητα για ακριβή υπολογισμό ακόμη και σε αυθαίρετα σχήματα (που η μορφή τους έχει μία γραφική αναλυτική μορφή αλλά δεν είναι εύκολο να περιγραφούν από αναλυτικές εξισώσεις) [104].

Η διαδικασία της μοντελοποίησης στο πρόγραμμα είναι πλήρως παραμετρική, επιτρέποντας στον χρήστη μεταβαλλόμενες γεωμετρίες, υλικά και συνθήκες για την εύκολη βελτίωση και μετατροπή των μοντέλων κεραιών που έχουν περιγραφεί στο σύστημα. Αυτό συνεπάγεται την εύκολη αλλαγή των υλικών κατασκευής καθώς και των γεωμετρικών μεταβολών των σχημάτων. Το περιβάλλον HFSS® είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο για σχεδιασμό RF και μικροκυματικών (microwave) συστημάτων. Το πακέτο υποστηρίζει [105], [106]:

- Σχεδιασμό κεραιών και ενσωμάτωση τους σε συστοιχίες
- Σχεδιασμό Φίλτρων και κυματοδηγών
- Σχεδιασμό Ηλεκτρονικών κελυφών για στήριξη – εγκατάσταση κυκλωμάτων καθώς και Τυπωμένων Πολυστρωματικών Κυκλωμάτων
- Σχεδιασμό Συνδετήρων διεπιφανειών (connectors)
- Ελέγχους H/M Συμβατότητας και Παρεμβολών (EMC/EMI)
- Σχεδιασμό κυκλωμάτων συστημάτων Radar

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η γραφική οργάνωση των οθονών και των λειτουργικών τμημάτων του HFSS®:

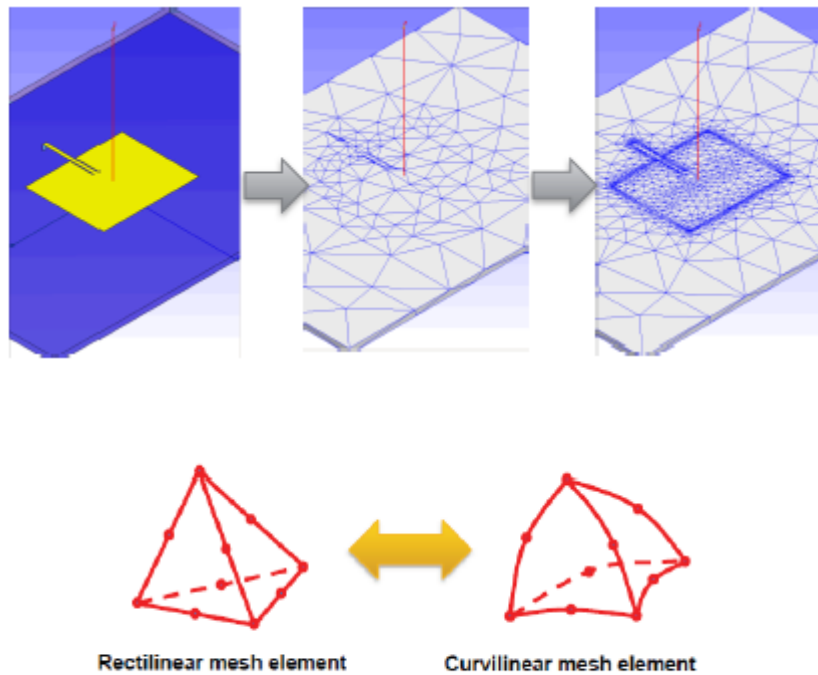


Σχήμα 24: Παρουσίαση του HFSS<sup>®</sup>

Το περιβάλλον προσομοίωσης παρέχει επιλυτές (solvers) για τις ακόλουθες μορφές προβλημάτων [106]:

- Εντοπισμός Ιδιοτιμών (EigenMode Solution). Το περιβάλλον υπολογίζει της φυσικές ιδιοσυχνότητες συντονισμού της διάταξης, βασιζόμενο στην γεωμετρία, τα υλικά της, καθώς και τις επιβαλλόμενες συνοριακές συνθήκες.
- Παρέχει τις συχνότητες συντονισμού, τους συντελεστές ποιότητας  $Q$  και αναλυτικές μορφές για τις πεδιακές λύσεις.
- Ορισμός Ακροδέκτη για την επιβολή πεδίου διέγερσης της διάταξης – καθοδηγούμενη εκπομπή (Driven Solution).
- Ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων των παραγόμενων ρυθμών διέγερσης (TEM).
- Υπολογισμός των Παραμέτρων απορρόφησης ισχύος  $S$  και των Πεδίων στο υλικό και στον περιβάλλοντα Χώρο (Εγγύς/Μακράν Πεδίο).

Για την παρεχόμενη ακρίβεια στην ανάλυση, το HFSS<sup>®</sup> χρησιμοποιεί έναν προσαρμοζόμενο αλγόριθμο πλέγματος (Adaptive Mesh Algorithm), ο οποίος εισάγει αυτοματοποιημένα την χρήση τετραέδρων επί των οριζομένων επιφανειών του χρήστη στην διάταξη. Η αυτοματοποιημένη δημιουργία δεν διαταράσσει τις δομές της διάταξης αλλά αυξάνει την ακρίβεια και την ταχύτητα των υπολογισμών, προσφέροντας περισσότερα σημεία υπολογισμού για το σύστημα. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται και επί αυθαιρέτων σχημάτων και επιφανειών βελτιώνοντας τα αποτελέσματα καθώς και την ταχύτητα σύγκλισης των αριθμητικά υπολογιζόμενων τιμών.

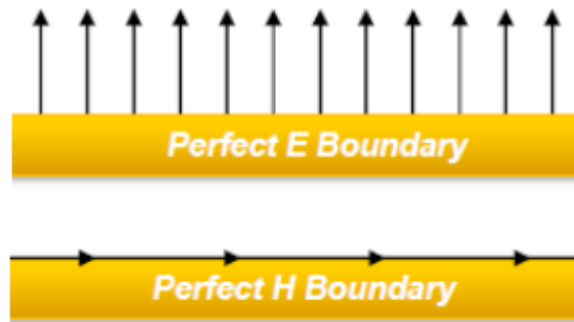


Σχήμα 25: Ο Adaptive Mesh Algorithm του HFSS®

Για την επίτευξη των επιπέδων σύγκλισης και ακρίβειας των λύσεων, το περιβάλλον υποστηρίζει ελεύθερη εκλογή από τον χρήστη των επιθυμητών επιπέδων ακρίβειας. Κατά την διεξαγωγή των αριθμητικών υπολογισμών το περιβάλλον χρησιμοποιεί αναδρομικούς αλγορίθμους για την επίτευξη της ακρίβειας η οποία αναφέρεται τόσο στο πεδίο της συχνότητας όσο και στο επίπεδο ακρίβειας στην εκτίμηση των  $S$  παραμέτρων της διάταξης. Επιπλέον το περιβάλλον προσομοίωσης τροποποιεί όπου χρειάζεται, το υπάρχον πλέγμα για την περιγραφή των επιφανειών των αντικειμένων, με στόχο την ευκρινή παρουσίαση και τον ακριβή υπολογισμό των πεδιακών γραμμών στα όρια των επιφανειών του αντικειμένου.

Για την διέγερση των διατάξεων, το περιβάλλον HFSS® επιτρέπει την εισαγωγή ακροδεκτών (Wave and Lumped Ports). Οι ακροδέκτες μπορούν να ορισθούν από τον χρήστη με δεδομένα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (σύνθετη αντίσταση) καθώς και την ικανότητα για διάδοση καθορισμένων TEM ρυθμών. Το σύστημα μπορεί να κάνει επιμέρους ανάλυση των διεγερόμενων και διαδιδόμενων ρυθμών ή/και συνολική υπέρθεση τους [105], [106].

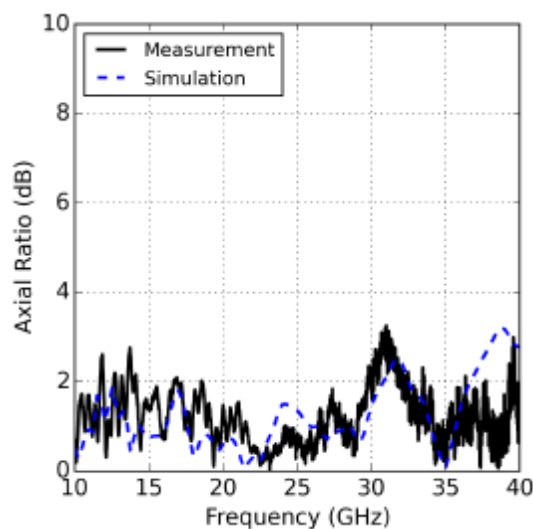
Το περιβάλλον προσομοίωσης του HFSS® για την επίλυση των εξισώσεων επιτρέπει την χρήση συνοριακών συνθηκών. Οι συνοριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται για να απλοποιήσουν την γεωμετρία και για να διευκολύνουν την διαδικασία κατασκευής πλέγματος για τον υπολογισμό των πεδίων. Στα υλικά που ορίζονται επί των επιφανειών, το περιβάλλον επιτρέπει πεπερασμένη είτε άπειρη ηλεκτρική και μαγνητική αγωγιμότητα. Επίσης, κατά την διαδικασία των επιλύσεων το περιβάλλον προσομοίωσης μπορεί να κάνει χρήση περιγραφών RLC για τις συνοριακές συνθήκες στις επιφάνειες είτε να χρησιμοποιήσει μονάδες αντιστάσεων, όπως σχηματίζονται ανά τμήματα της επιφάνειας. Στην ανάλυση της ακτινοβολίας το περιβάλλον εντοπίζει συνοριακές συνθήκες για την απορρόφηση της ή/και τέλεια ταιριασμένα επίπεδα. Επίσης το περιβάλλον υποστηρίζει την ύπαρξη γεωμένων (ηλεκτρικά/μαγνητικά ουδέτερων) επιφανειών (Perfect E/H boundary).



Σχήμα 26: Τέλεια Ηλεκτρικές και Μαγνητικές Επιφάνειες

Το περιβάλλον προσομοίωσης του HFSS® εκτελεί διακριτή σάρωση της ζώνης των συχνοτήτων που επιλέγονται από τον χρήστη (με βήμα καθοριζόμενο επίσης από τον χρήστη ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια στην ανάλυση). Συνθέτει τα παραγόμενα αποτελέσματα για κάθε κόμβο και κάθε συχνότητα έτσι ώστε να διαθέτει πλήρη περιγραφή της συμπεριφοράς της διάταξης στο πεδίο των συχνοτήτων. Το περιβάλλον επιτρέπει επίσης την χρήση παρεμβολικών πολυωνύμων για αύξηση της ταχύτητας των υπολογισμών του.

Τα αποτελέσματα που παράγονται από το πρόγραμμα HFSS® είναι σε μεγάλη ακρίβεια συσχέτισης με τα πραγματικά μετρούμενα αποτελέσματα επί των αναλυόμενων διατάξεων. Το γεγονός αυτό καθιστά το περιβάλλον προσομοίωσης και ανάλυσης, εξαιρετικά αξιόπιστο διασφαλίζοντας τα σχεδιαστικά αποτελέσματα ειδικότερα σε διαδικασίες μελέτης και σχεδιασμού πρωτοτύπων.



Σχήμα 27: Σύγκριση Πραγματικά μετρούμενων τιμών και αποτελέσματα προσομοίωσης με το HFSS®

Για την αριθμητική επίλυση και τον αναλυτικό υπολογισμό των πεδίων, το περιβάλλον προσομοίωσης χρησιμοποιεί την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM). Η Μέθοδος επιλύει ένα γραμμικό σύστημα της μορφής  $Ax=b$ . Για την αποδοτική επίλυση του συστήματος, χρησιμοποιούνται τεχνικές περιγραφής αραιών μητρών (sparse matrices) ενώ για την αντιστροφή του πίνακα  $A$  χρησιμοποιείται η μέθοδος παραγοντοποίησης LU. Η επίλυση γίνεται για όλες τις διεγέρσεις. Οι βασικές συναρτήσεις για την εφαρμογή της μεθόδου FEM είναι πολυώνυμα  $n$ -τάξης, που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν πως μεταβάλλονται τα ηλεκτρικά πεδία στις περιοχές της διάταξης.

### ***3.3 Προδιαγραφές Σχεδιασμού της Κεραίας Τύπου Μικροταινίας (patch antenna)***

Το περιβάλλον HFSS® χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) που θα χρησιμοποιηθεί ως βάση για την υλοποίηση του AG καναλιού επί της ιπτάμενης συσκευής (UAV). Από τις προηγούμενες ενότητες έχουν παρουσιασθεί τα χαρακτηριστικά και οι ιδιαιτερότητες μίας τέτοιας κεραίας για την υποστήριξη επικοινωνίας και εφαρμογών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η υφιστάμενη κεραία θα πρέπει να υποστηρίξει τόσο την επικοινωνία ελέγχου (control) που αφορά στην τηλεμετρία και το χειρισμό της μη επανδρωμένης ιπτάμενης συσκευής (UAV), καθώς επίσης να προσφέρει το κανάλι επικοινωνιών για την διασύνδεση με τα δίκτυα κορμού. Με τις μέχρι τώρα μελέτες στα AG κανάλια η διασύνδεση γενικότερα φαίνεται να βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11, το οποίο αποτελεί την βάση για τις υπηρεσίες WiFi (Wireless Fidelity) πρωτοκόλλου. Το πρότυπο προβλέπει επικοινωνία σε συχνότητες φέροντος 900 MHz, 2.4 GHz, 3.6 GHz, 5 GHz, και 60 GHz.

Η σχεδιαζόμενη κεραία αναμένεται να συνεργαστεί με το πρότυπο αλλά χωρίς αυτό να σημαίνει ότι πρέπει να είναι υποκειμένη στις συχνότητες φέροντος που έχουν προκαθορισθεί, δεδομένου ότι διαρκείς επεκτάσεις του προτύπου αναμένονται να κάνουν χρήση και άλλων συχνοτήτων. Επίσης η επικοινωνία AG καναλιών με χρήση UAVs καλό θα είναι να αποφύγει περιοχές συχνοτήτων οι οποίες είναι «κορεσμένες». Αυτό συμβαίνει για τις συχνότητες 900/1800 MHz – κινητή τηλεφωνία, ενώ τα 2.4 και 5 GHz είναι επίσης κορεσμένες ζώνες δεδομένης της επίγειας λειτουργίας όλων των τοπικής κλίμακας ασύρματων routers που κάνουν χρήση των παραπάνω καναλιών για να προσφέρουν διαδικτυακή σύνδεση σε εφαρμογές οικιών/γραφείων (WiFi/LTE/HSPA). Επομένως συμφέρει να χρησιμοποιηθεί μία ζώνη συχνοτήτων η οποία να απέχει σημαντικά από τις ήδη χρησιμοποιούμενες, έτσι ώστε να μην είναι υποκειμένη άμεσα σε παρεμβολές και επιπλέον να μην χρειάζεται μεγάλα ποσά ισχύος για την εκπομπή της δεδομένου ότι θα πρέπει να ανταγωνιστεί ήδη υπάρχοντα φέροντα σε αυτές τις συχνότητες. Από την άλλη πλευρά, η συχνότητα των 60 GHz που προβλέπει το πρότυπο απαιτεί ακτινοβολήση σημαντικών ποσών ισχύος για ικανοποιητική διάδοση σε στοιχειώδεις αποστάσεις > 100 m, ειδικότερα σε συνθήκες NLOS.

Για όλους αυτούς τους λόγους για το σχεδιασμό της κεραίας επιλέχθηκε ως βάση φέροντος τα 10 GHz. Η παραπάνω συχνότητα απέχει σημαντικά από τις ήδη υπάρχουσες και επιπλέον με χρήση των τεχνολογιών σχεδιασμού κεραιών τύπου patch αναμένεται να αποδώσει σε ένα εύρος ζώνης της τάξης του 1 – 2% της συχνότητας λειτουργίας δηλαδή, παρέχοντας bandwidth 100 – 200 MHz. Η εκλογή της παραπάνω συχνότητας δεν αποτελεί σημαντική σχεδιαστική δέσμευση δεδομένου ότι με μικρές μεταβολές του μήκους του κεραιών τύπου Patch και σχετικά σύντομη διαδικασία προσομοίωσης μπορεί να επιτευχθεί οποιαδήποτε άλλη συχνότητα συντονισμού για την κεραία. Το παραπάνω εύρος ζώνης είναι αρκετά μεγάλο για την υποστήριξη εφαρμογών και διασυνδέσεων μέσω διαδικτύου, δεδομένου ότι η επέκταση της λειτουργίας και υποστήριξης διασυνδέσεων μέσω UAVs θα κάνει χρήση παράλληλα πολλών τέτοιων ιπτάμενων

κόμβων διασύνδεσης. Επιπλέον, απαίτηση για τον σχεδιασμό της κεραίας είναι η ελαχιστοποίηση κατανάλωσης που θα πρέπει να προσφέρει για δικαιολογημένες αποστάσεις διασύνδεσης (π.χ. έως 200 m) σε συνθήκες LOS. Ο παραγόμενος λοβός και το διάγραμμα ακτινοβολίας της σχεδιαζόμενης κεραίας θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευρυγώνιος διασφαλίζοντας διασύνδεση και συνθήκες LOS για όλες τις φάσεις κίνησης της ιπτάμενης συσκευής.

Όλα τα προηγούμενα χαρακτηριστικά σχεδιασμού συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Συχνότητα Λειτουργίας (Φέροντος)	10 GHz
Εύρος Ζώνης (bandwidth)	100 – 200 MHz
Επίπεδα Κατανάλωσης Ισχύος	Ελάχιστο δυνατό (συνάρτηση της απόστασης εμβέλειας)
Εύρος Λοβού ακτινοβολίας	Μέγιστο
Διαστάσεις	Κλίμακας cm
Μορφή Αγωγίμης Επιφάνειας	Ορθογωνική

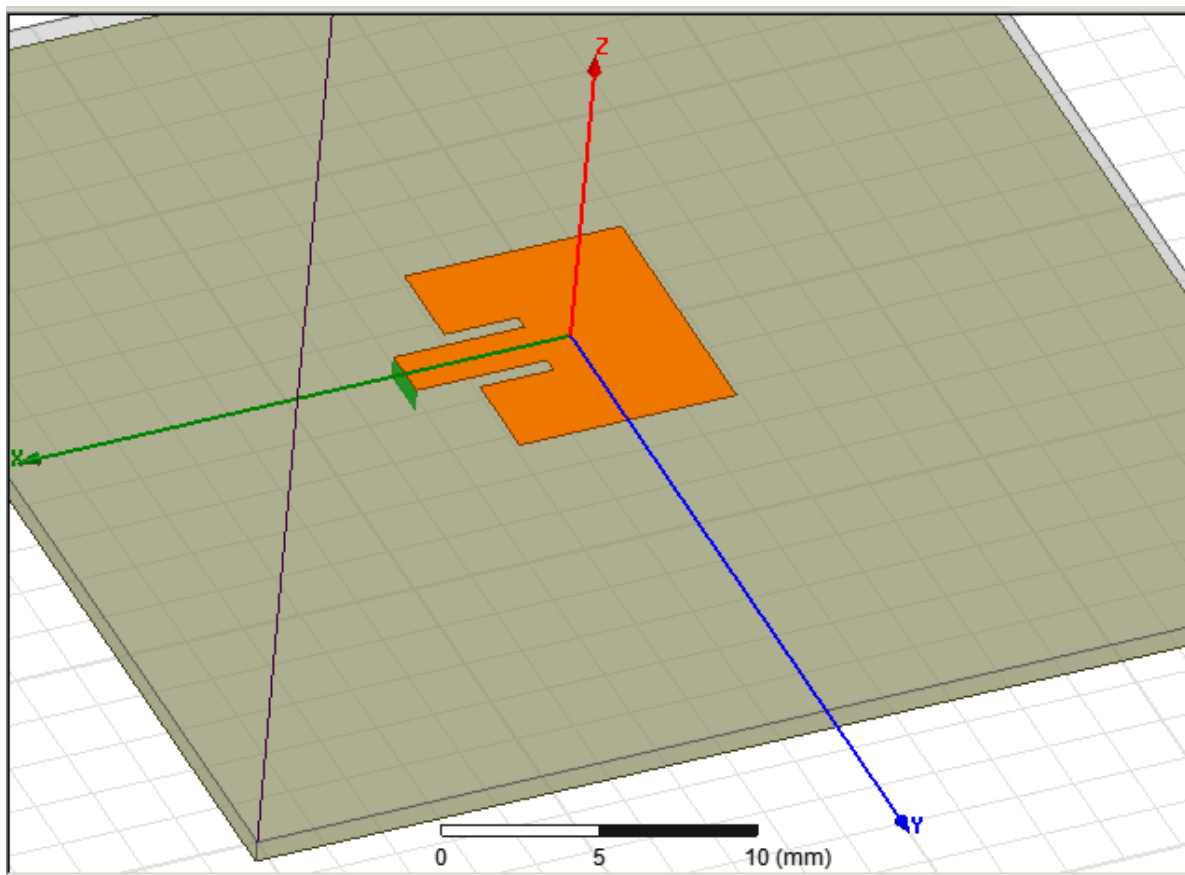
Πίνακας 3: Προδιαγραφές για την σχεδιαζόμενη κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna) υποστήριξης AG καναλιού επί UAV

Το σχήμα της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) επιλέχθηκε να είναι ορθογωνικό για απλοποίηση της διαδικασίας σχεδιασμού, εφόσον δεν προκύπτουν ειδικές προδιαγραφές για τον τύπο πόλωσης του παραγόμενου κύματος εκπομπής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατανάλωση ισχύος για την κεραία είναι πλήρης συνάρτηση της απόστασης εκπομπής και του τύπου της εφαρμογής και για αυτόν τον λόγο δεν προσδιορίζεται αναλυτικά. Η τροφοδότηση της κεραίας θα γίνει από το άκρο (edge – fed).

Στην συνέχεια οι παραπάνω προδιαγραφές θα ληφθούν υπόψη για τον σχεδιασμό και την προσομοίωση των λειτουργιών της κεραίας στο περιβάλλον HFSS® για την εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων με στόχο την βελτιστοποίηση της λειτουργίας της. Τα αριθμητικά αποτελέσματα θα προκύψουν από την εφαρμογή προσομοιώσεων για την επιθυμητή ζώνη συντονισμού της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna).

### 3.4 Σχεδιασμός της Κεραίας Τύπου Μικροταινίας (patch antenna)

Η κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna) με βάση τις προδιαγραφές είναι ορθογωνική, ενώ ο τρόπος τροφοδότησης της αφορά σύνδεση από το άκρο της. Ο λόγος είναι η ευκολία της διασύνδεσης και η απλότητα σχεδιασμού όσον αφορά κεραίες αυτού του τύπου. Οι διαστάσεις του ορθογωνικού πλαισίου αρχικά προέκυψαν με εκτίμηση από τους τύπους γεωμετρικών διαστάσεων που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1. Τυχόν μεταβολές και μικροσυντονισμοί για βελτίωση της απόδοσης θα βασιστούν στην διαδικασία προσομοίωσης. Μία σχηματική παρουσίαση της κεραίας παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 28: Σχηματικό μοντέλο της ορθογωνικής κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) στο περιβάλλον HFSS®

Η απεικόνιση της ορθογωνικής κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) βασίζεται στην γραφική απεικόνιση και μοντελοποίηση των γεωμετρικών διαστάσεων της κεραίας μέσα από το περιβάλλον σχεδιασμού δομών (structures) του HFSS®. Η κεραία όπως φαίνεται και από το σχήμα, είναι καθαρά ορθογωνικής μορφής. Οι διαστάσεις στο μοντέλο έχουν τεθεί με χρήση μαθηματικού τύπου/σχέσης δίνοντας την δυνατότητα στον χρήστη να μεταβάλλει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κεραίας με αναλογικό τρόπο (μεγέθυνση διαστάσεων – σμίκρυνση διαστάσεων) έτσι ώστε να διασφαλιστεί συνδεσιμότητα των τμημάτων της κεραίας σε όλες τις κλίμακες. Ο συγκεκριμένος τρόπος σχεδιασμού διευκολύνει την ανάπτυξη μοντέλων ειδικότερα στην περίπτωση όπου μπορούν να απαιτηθούν μικρές ή ακόμη και μεγάλες μεταβολές των διαστάσεων για την ικανοποίηση των προδιαγραφών.

Η κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna) συνίσταται από τα τμήματα του υποστρώματος (substrate), της αγωγικής επιφάνειας (patch), του άκρου τροφοδότησης (port) καθώς και του γειωμένου υποστρώματος (Ground Plane).

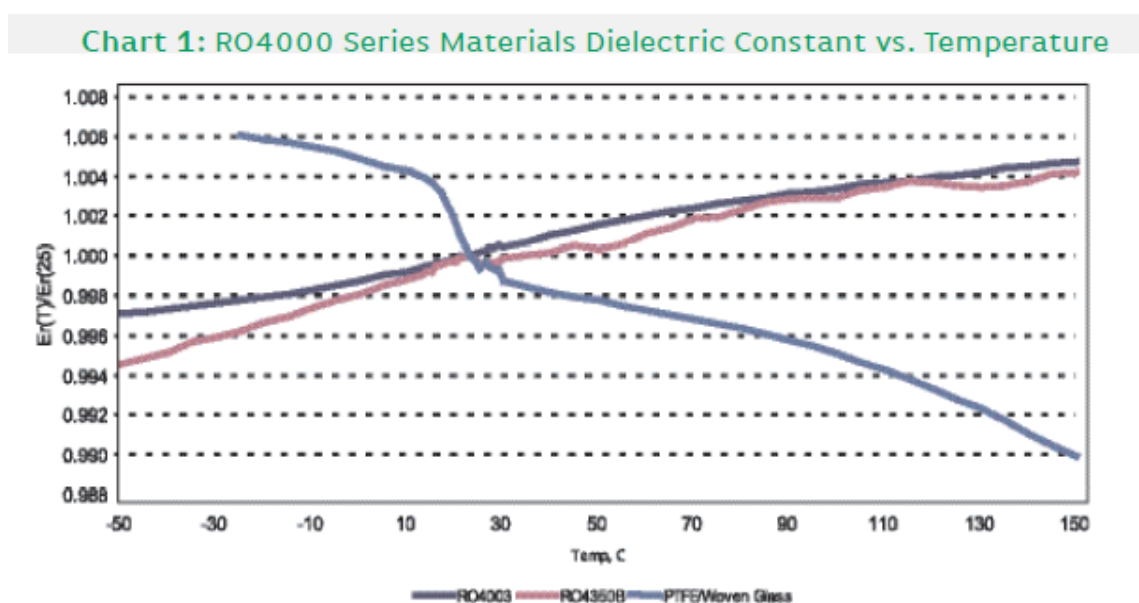


### 3.4.1 Υλικό υποστρώματος [107]

Για το υλικό του υποστρώματος χρησιμοποιήθηκε από τις προσφερόμενες βιβλιοθήκες του HFSS®, το υλικό Rogers RO4350. Το υλικό αυτό ανήκει στην κατηγορία των υλικών της σειράς Rogers 4000 και αποτελεί ένα υλικό για τον σχεδιασμό και την κατασκευή κυκλωμάτων υψηλής συχνότητας. Πρόκειται για ένα hydrocarbon κεραμικό φύλλο (laminates) το οποίο προσφέρει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά λειτουργίας σε υψηλές συχνότητες, μειώνοντας παράλληλα το απαιτούμενο κόστος για την παραγωγή του, άρα προσφέρει μία οικονομική βάση για την ανάπτυξη τέτοιων κυκλωμάτων. Η κατασκευή αυτών των κυκλωμάτων βασίζεται στις διεργασίες epoxy/glass (FR-4) που αποτελούν την βάση για την κατασκευή τυπωμένων κυκλωμάτων πολυστρωματικών καρτών.

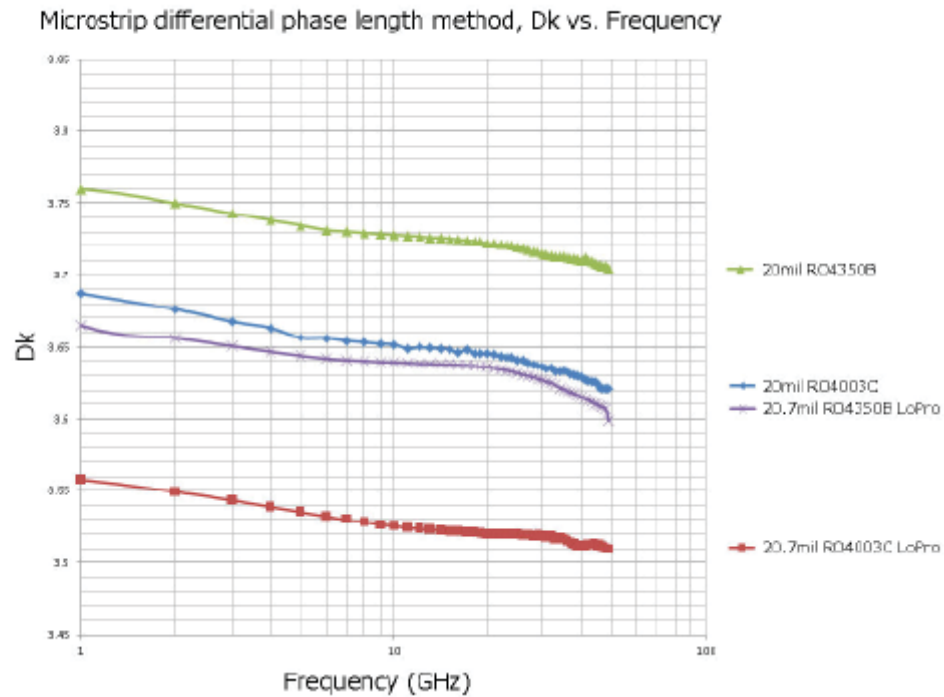
Τα συνήθη υλικά αυτού του τύπου περιορίζουν την λειτουργία τους σε συχνότητες μέχρι 400 MHz. Το συγκεκριμένο υλικό προσφέρει λειτουργία σε μικροκυματικές συχνότητες και είναι κατάλληλο για την υλοποίηση RF/microwave κυκλωμάτων και γραμμών μεταφοράς. Συνήθως, η λειτουργία των παρεχόμενων διηλεκτρικών επηρεάζεται από την θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής εξάρτησης του συγκεκριμένου υλικού είναι από τους χαμηλότερους, προσφέροντας σταθερή λειτουργία σε ένα μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος μεταβολών. Επιπλέον, ο θερμοκρασιακός συντελεστής διαστολής του συγκεκριμένου υλικού είναι ανάλογος αυτού του χαλκού και για τον λόγο αυτό διασφαλίζει σταθερότητα των γεωμετρικών διαστάσεων της κεραίας μη μεταβάλλοντας τις διαστάσεις της σε μικροκυματική λειτουργία με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το γεγονός αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό λόγω της υψηλής συχνότητας λειτουργίας της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) καθώς και λόγω της τοποθέτησης του σε άμεση επικοινωνία με το εξωτερικό περιβάλλον στο οποίο μπορούν να παρατηρηθούν μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας και της μεταβολής των συχνοτήτων λειτουργίας.



Σχήμα 29: Διάγραμμα μεταβολής της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού υποστρώματος συναρτήσει της θερμοκρασίας

**Chart 2: RO4000 Series Materials Dielectric Constant vs. Frequency**



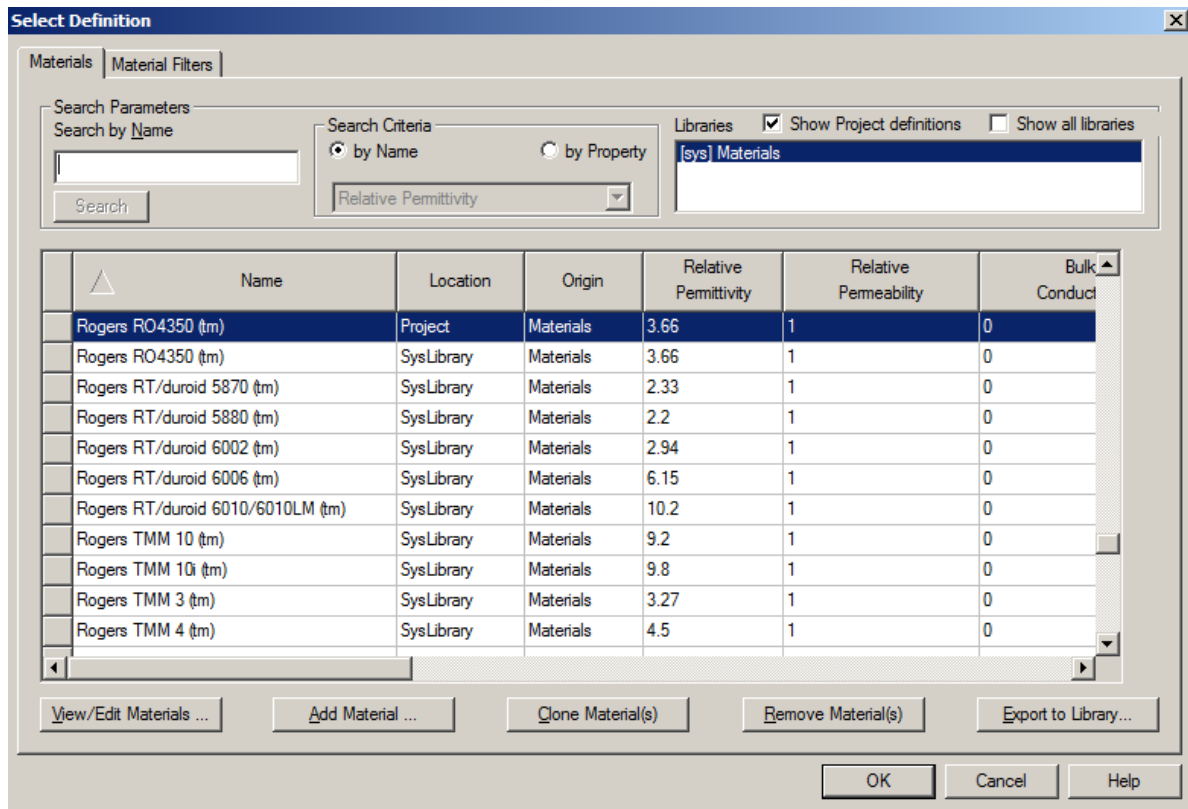
Σχήμα 30: Διάγραμμα μεταβολής της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού υποστρώματος συναρτήσει της συχνότητας

Τα ειδικότερα χαρακτηριστικά του υλικού της σειράς Rogers 4000 παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Property	Typical Value		Direction	Units	Condition	Test Method
	RO4003C	RO4350B				
Dielectric Constant, $\epsilon_r$ , Process	3.38 $\pm$ 0.05	<sup>(3)</sup> 3.48 $\pm$ 0.05	Z	--	10 GHz/23°C	IPC-TM-650 2.5.5.5 Clamped Stripline
<sup>(2)</sup> Dielectric Constant, $\epsilon_r$ , Design	3.55	3.66	Z	--	8 to 40 GHz	Differential Phase Length Method
Dissipation Factor tan, $\delta$	0.0027 0.0021	0.0037 0.0031	Z	--	10 GHz/23°C 2.5 GHz/23°C	IPC-TM-650 2.5.5.5
Thermal Coefficient of $\epsilon_r$	+40	+50	Z	ppm/°C	-50°C to 150°C	IPC-TM-650 2.5.5.5
Volume Resistivity	1.7 X 10 <sup>10</sup>	1.2 X 10 <sup>10</sup>		M $\Omega$ •cm	COND A	IPC-TM-650 2.5.17.1
Surface Resistivity	4.2 X 10 <sup>9</sup>	5.7 X 10 <sup>9</sup>		M $\Omega$	COND A	IPC-TM-650 2.5.17.1
Electrical Strength	31.2 (780)	31.2 (780)	Z	KV/mm (V/mil)	0.51mm (0.020")	IPC-TM-650 2.5.6.2
Tensile Modulus	19,650 (2,850) 19,450 (2,821)	16,767 (2,432) 14,153, (2,053)	X Y	MPa (ksi)	RT	ASTM D638
Tensile Strength	139 (20.2) 100 (14.5)	203 (29.5) 130 (18.9)	X Y	MPa (ksi)	RT	ASTM D638
Flexural Strength	276 (40)	255 (37)		MPa (kpsi)		IPC-TM-650 2.4.4
Dimensional Stability	<0.3	<0.5	X,Y	mm/m (mils/inch)	after etch +E2/150°C	IPC-TM-650 2.4.39A
Coefficient of Thermal Expansion	11 14 46	10 12 32	X Y Z	ppm/°C	-55 to 288°C	IPC-TM-650 2.4.41
Tg	>280	>280		°C TMA	A	IPC-TM-650 2.4.24.3
Td	425	390		°C TGA		ASTM D3850
Thermal Conductivity	0.71	0.69		W/m/°K	80°C	ASTM C518
Moisture Absorption	0.06	0.06		%	48 hrs immersion 0.060" sample Temperature 50°C	ASTM D570
Density	1.79	1.86		gm/cm <sup>3</sup>	23°C	ASTM D792
Copper Peel Strength	1.05 (6.0)	0.88 (5.0)		N/mm (pli)	after solder float 1 oz. EDC Foil	IPC-TM-650 2.4.8
Flammability	N/A	<sup>(3)</sup> V-0				UL 94
Lead-Free Process Compatible	Yes	Yes				

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά του διηλεκτρικού υλικού υποστρώματος Rogers RO 4000

Η αναλυτική μοντελοποίηση των υλικών βιβλιοθήκης του HFSS® παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί:



Πίνακας 5: Προσφερόμενα διηλεκτρικά υποστρώματα κατασκευής από την βιβλιοθήκη του HFSS®

Από τον πίνακα διαπιστώνουμε ότι το υλικό Rogers Ro 4350 παρουσιάζει σχετική διηλεκτρική σταθερά της τάξης των 3.66. Στην συνέχεια με βάση την προηγούμενη τιμή για την σχετική διηλεκτρική σταθερά θα γίνουν οι απαιτούμενοι υπολογισμοί για τις αρχικές προσεγγίσεις των γεωμετρικών διαστάσεων της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna).

### 3.4.2 Γεωμετρικές Διαστάσεις Κεραίας Τύπου Μικροταινίας (patch antennas)

Οι γεωμετρικές διαστάσεις της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) προέκυψαν αρχικά με την μεθοδολογία σχεδιασμού της παραγράφου 1.9. Αρχικά υπολογίζουμε το μήκος κύματος για την βασική λειτουργία:

$c_0 = \lambda_0 \cdot f_0$  Άρα έχουμε λοιπόν:

$$\lambda_0 = c_0 / f_0 = 3 \times 10^8 / 10 \times 10^9 = 0.03 \text{ m} = 30 \text{ mm}$$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την ενεργό επιτρεπτότητα:

$$\epsilon_e = (\epsilon_r + 1) / 2 = (3.66 + 1) / 2 = 2.33$$

Και στην συνέχεια υπολογίζουμε το ενεργό μήκος κύματος με βάση την σχέση:

$$\lambda_e = \lambda_0 / \epsilon_e = 0.03 \text{ m} / 2.33 = 0.0128755 \text{ m} = 12.985 \text{ mm}$$

Το εκτιμώμενο εύρος ζώνης για την λειτουργία της κεραίας μπορεί προσεγγιστικά να κάνει χρήση της σχέσεως:

$$\frac{\delta f}{f_{res}} = 1.2 \frac{d}{w}$$

όπου  $d = 31 \text{ mils} = 31 \times 0.0254 \text{ mm} = 0.7874 \text{ mm}$  (ύψος της κεραίας).

$w = 9 \text{ mm}$  (το πλάτος της αγωγίμης επιφάνειας).

$f_{res} = 10 \text{ GHz}$  (η συχνότητα συντονισμού της κεραίας).

Δίνοντας εύρος ζώνης  $\delta f = 1.04 \text{ GHz}$ . Το παραπάνω εκτιμώμενο εύρος είναι καθαρά προσεγγιστικό ενώ η ακριβής του τιμή θα προκύψει μετά την εξαγωγή των διαγραμμάτων ακτινοβολίας από το περιβάλλον HFSS®.

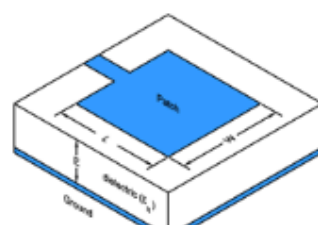
Εναλλακτικά ο γεωμετρικός προσδιορισμός των διαστάσεων της ορθογωνικής κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) με κάποιες προσεγγίσεις μπορεί να γίνει με χρήση έτοιμης υπολογισμού όπως προσφέρεται στον [110] ο οποίος προσφέρει με βάση τον καθορισμό των παραμέτρων της κεραίας τους απαιτούμενους υπολογισμούς

## Microstrip Patch Antenna Calculator

Pasternack's **Microstrip Patch Antenna Calculator** determines the length and width (in millimeters) of a rectangular patch antenna.

[Bookmark or "Favorite" this page by pressing CTRL + D.](#)

Dielectric Constant	3.65	
Dielectric Height:	31	Microinches
Operation Frequency:	10	GHz
<b>Calculate</b>		



**Result:**

Width: 9.831 mm  
Length: 7.846 mm

$$Width = \frac{c}{2f_0\sqrt{\frac{\epsilon_R+1}{2}}}; \quad \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_R+1}{2} + \frac{\epsilon_R-1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1+12\left(\frac{h}{W}\right)}} \right]$$

$$Length = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left( \frac{(\epsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \right)$$

Πίνακας 6: Αναλυτικοί υπολογισμοί για τις διαστάσεις ορθογωνικής κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna)

Για τους υπολογισμούς παρουσιάζονται οι αναλυτικές σχέσεις οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τους την σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού

υποστρώματος, το ύψος της κεραίας καθώς και την συχνότητα λειτουργίας. Παρατηρούμε ότι τα παραγόμενα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αρκετά ακριβή και σχετικά κοντά (όπως θα φανεί στην συνέχεια), με τα μικρορυθμιζόμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που προέκυψαν από την διαδικασία προσομοίωσης.

Στην συνέχεια οι διαστάσεις εισήχθησαν στο σχεδιασμό μέσω του HFSS® και όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως μεταβλήθηκαν με στόχο την ικανοποίηση πρωτίστως της συχνότητας συντονισμού φέροντος στα 10 GHz. Αναλυτικά οι γεωμετρικές διαστάσεις για την ορθογωνική κεραία τύπου patch που προέκυψαν από τον σχεδιασμό και τις επιβαλλόμενες μικρορυθμίσεις (για την επίτευξη της συχνότητας συντονισμού), παρουσιάζονται μέσα από τμήμα παραθύρου του σχεδιαστικού περιβάλλοντος HFSS®:

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Type
subs	40	mm	40mm	Design
h	31	mil	31mil	Design
lp	7.625	mm	7.625mm	Design
wp	9	mm	9mm	Design
xnot	2.6	mm	2.6mm	Design
yno2	2.8	mm	2.8mm	Design
ynot	2.8	mm	2.8mm	Design
w50	1.76	mm	1.76mm	Design
l1	2	mm	2mm	Design

Πίνακας 7: Γεωμετρικές Διαστάσεις της ορθογωνικής κεραίας τύπου patch από το σχεδιαστικό παράθυρο του HFSS®

Οι γεωμετρικές διαστάσεις που αφορούν στο μήκος και το πλάτος της κεραίας είναι αντίστοιχα οι  $lp = 7.625 \text{ mm}$  και  $wp = 9 \text{ mm}$ . Παρατηρούμε δηλαδή, ότι το πλαίσιο για την επίτευξη της συχνότητας συντονισμού προέκυψε σχεδόν τετραγωνικό. Επίσης, παρατηρούμε μία σχετική απόκλιση για τον υπολογισμό των διαστάσεων της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) από τις προσεγγιστικές σχέσεις, συγκρίνοντας με τις πραγματικές που προέκυψαν μετά την διαδικασία προσομοιώσεων. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς αναφέρεται και στην μεθοδολογία σχεδιασμού, ότι η ακρίβεια αυτών των σχέσεων είναι θεμελιώδης για τον καθορισμό της τάξης μεγέθους της κεραίας τύπου patch, ενώ πιο ακριβείς τιμές προκύπτουν μετά την επιβολή προσομοιώσεων.

Οι υπόλοιπες γεωμετρικές διαστάσεις αναφέρονται στα τμήματα των εγχοπών (gaps) για την διασύνδεση του άκρου τροφοδοσίας επί της κεραίας τύπου patch. Το πάχος του αγωγίμου υλικού  $h = 31 \text{ mils}$  ενώ το πάχος του υλικού υποστρώματος ήταν  $40 \text{ mm}$ .

### 3.4.3 Χαρακτηριστικά του Άκρου Τροφοδότησης

Για την τροφοδότηση της κεραίας από τις περιγραφόμενες τεχνικές επιλέχθηκε η τροφοδότηση από το άκρο (edge – fed). Ο λόγος για την επιλογή της συγκεκριμένης τροφοδότησης είναι η απλότητα στην διεργασία κατασκευής της κεραίας καθώς και η υψηλή αντοχή (μηχανική σύνδεση) για την τοποθέτηση της επί ατράκτου ιπταμένου αντικειμένου (UAV). Η συγκεκριμένη πηγή στο περιβάλλον HFSS® μοντελοποιήθηκε ως lumped port με χαρακτηριστική αντίσταση 50 Ohm.

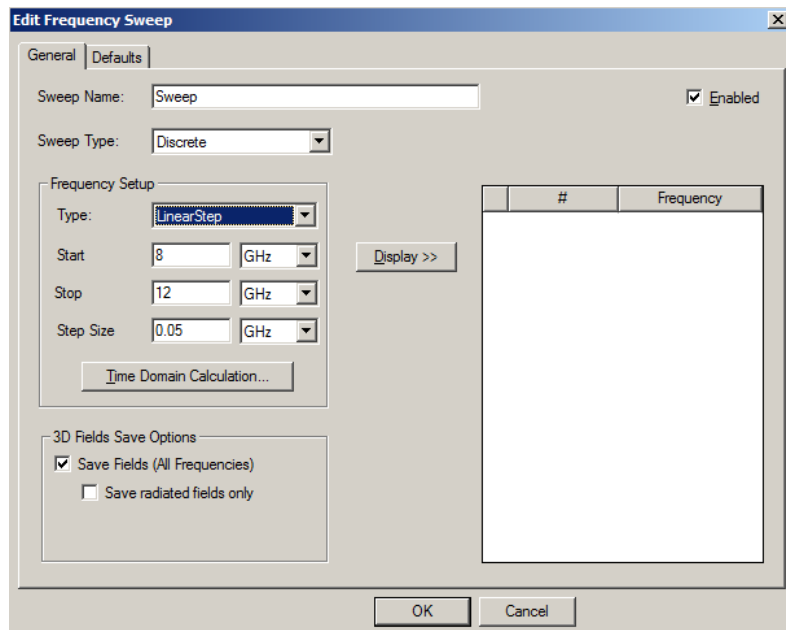
### 3.4.4 Επιλογή πλέγματος και συνοριακών συνθηκών για την επίλυση

Για την επίλυση του προβλήματος προσδιορισμού των πεδίων, για τις συμπαγείς επιφάνειες ορίστηκαν τα συνεχή χαρακτηριστικά χωρίς να προκαθορισθεί άλλος επιθυμητός τύπος πλέγματος (mesh). Στην φάση ανάλυσης το περιβάλλον έκανε χρήση των αυτοματοποιημένων αλγορίθμων πλέγματος που διαθέτει για την διαδικασία επίλυσης.

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στο πρόγραμμα προσομοίωσης αφορούσαν στο γειωμένο υπόστρωμα (PerfE\_Ground), στο αγωγίμο υλικό της επιφάνειας (PerfE\_Patch) και στο τμήμα του άκρου (port) που χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδότηση (Radiation).

### 3.4.5 Ανάλυση στο Πεδίο Συχνότητας

Για την Ανάλυση στο Πεδίο της συχνότητας το περιβάλλον HFSS® δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να καθορίσει την επιθυμητή συχνότητα ανάλυσης (συντονισμού), και επίσης να επιλέξει το διάστημα συχνοτήτων στο οποίο θα επεκτείνει την ανάλυση της δομής. Τα χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν για την ανάλυση της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:



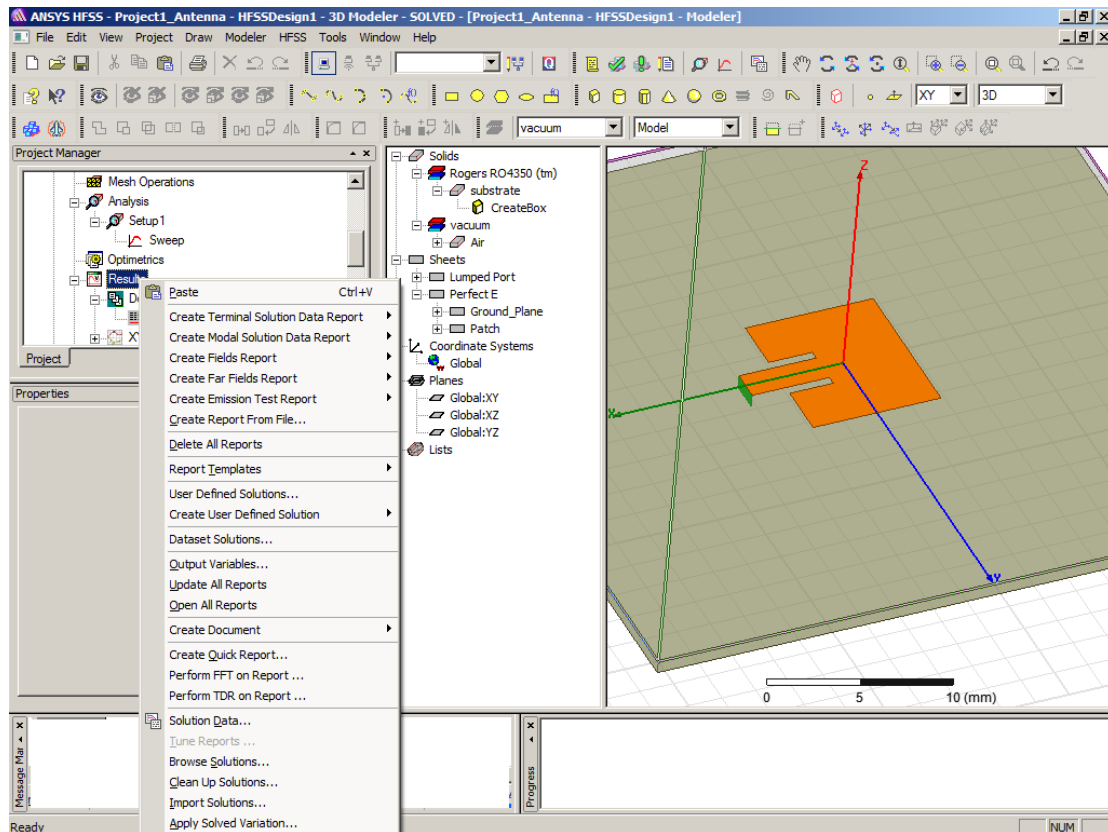
Πίνακας 8: Καθορισμός ζώνης συχνοτήτων ανάλυσης

Από τον πίνακα καθορισμού για την ανάλυση συχνοτήτων, καθορίστηκε η ζώνη 8 – 12 GHz η οποία περιλαμβάνει ως κεντρική συχνότητα την συχνότητα συντονισμού των 10 GHz. Για ακρίβεια στην ανάλυση δόθηκε γραμμική σάρωση των συχνοτήτων με βήμα 50 MHz.

### 3.4.6 Αριθμητικά Αποτελέσματα Επίλυσης

Τα αριθμητικά αποτελέσματα από την διαδικασία επίλυσης και υπολογισμού των πεδίων μέσω του περιβάλλοντος HFSS® μπορούν να απεικονισθούν με χρήση διαγραμμάτων, οπτικοποιώντας την παρεχόμενη πληροφορία για την ανάλυση του συστήματος. Η ανάλυση του συστήματος, εφόσον δεν υπάρχει σχεδιαστικό λάθος (Design Rule Check – DRC) το οποίο να αποτρέπει την διαδικασία προσομοίωσης, βασίζεται στις επιλογές του χρήστη. Το περιβάλλον επιτρέπει ένα σύνολο από αναλύσεις οι οποίες παρουσιάζονται στα μενού επιλογής για την προσομοίωση του συστήματος στο πεδίο Results.





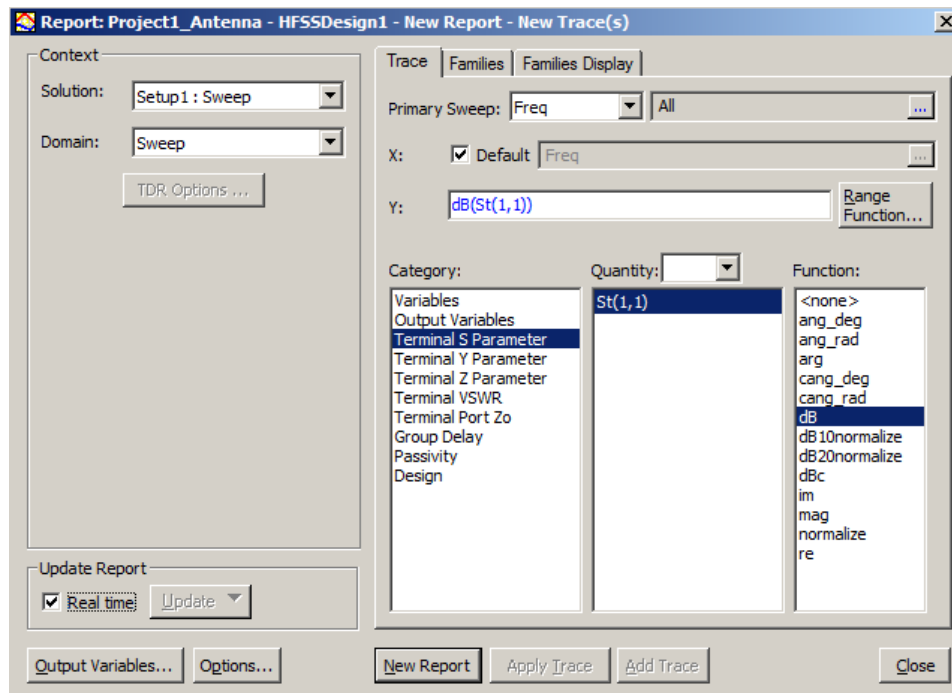
Σχήμα 31: Επιλογές επίλυσης και ανάλυσης αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Από τις υποστηριζόμενες αναλύσεις που εμφανίζονται στο μενού επιλογών ο χρήστης μπορεί να επιλέξει είτε αναλυτική αποτύπωση των δεδομένων, είτε γραφική αναπαράστασή τους σε διαγράμματα δύο ή/και τριών διαστάσεων εφόσον η απεικόνιση είναι δυνατή.

Αναλυτικά οι προσφερόμενες επιλογές για την διαδικασία της ανάλυσης αφορούν στα παρακάτω:

- **Create Terminal Solution Data Report.** Οι επιλογές σε αυτό το πεδίο επιτελούν διαδικασίες ανάλυσης για τους συντελεστές απορρόφησης ισχύος  $S$ , σύνθετης αντίστασης και αγωγιμότητας της κεραίας.

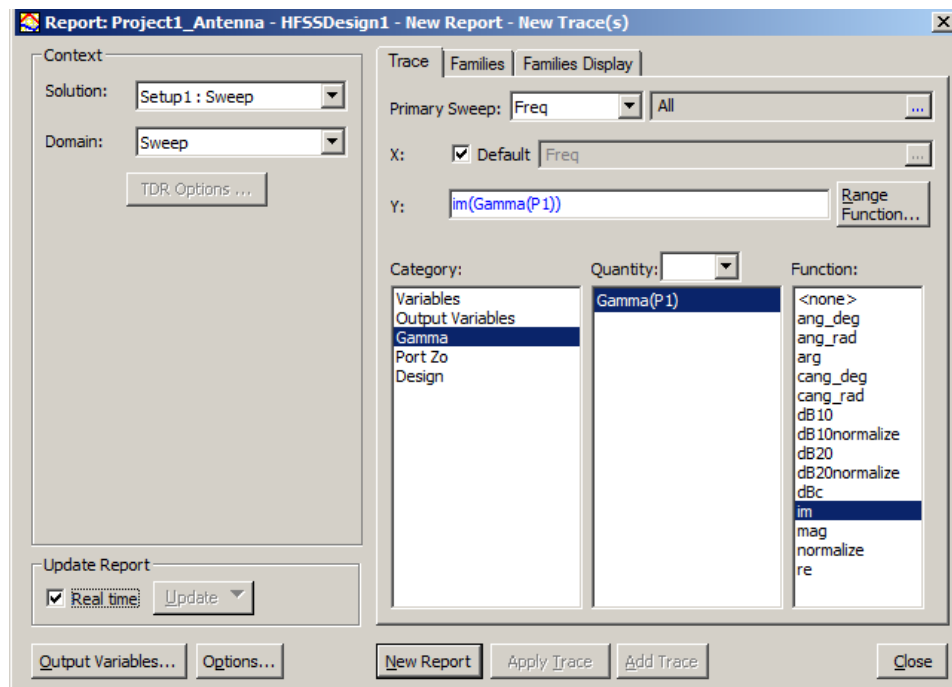
Οι επιλογές δίνονται στον παρακάτω πίνακα:



Πίνακας 9: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Terminal Solution Data Report

- Create Modal Solution Data Report. Στην επιλογή αυτή γίνεται ανάλυση μεταβλητών, συντελεστή ανάκλασης, χαρακτηριστικής αντίστασης  $Z_0$ , κλπ.

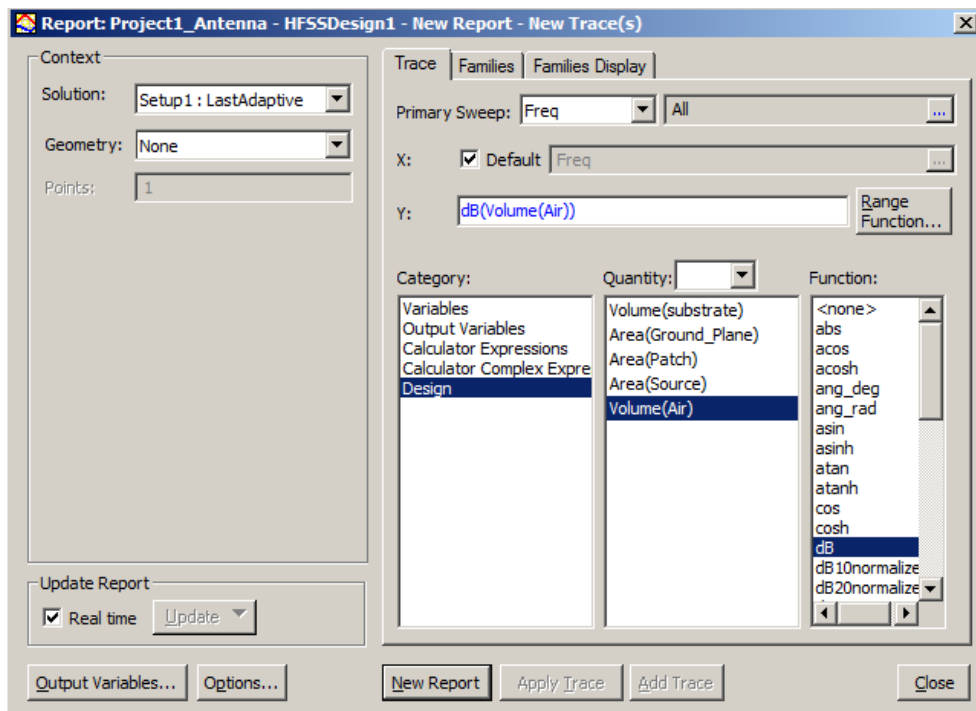
Οι επιλογές δίνονται στον παρακάτω πίνακα:



Πίνακας 10: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Modal Solution Data Report

- Create Fields. Report. Στην επιλογή αυτή ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει την μορφή των πεδίων σε διαφορετικά τμήματα της δομής – κατασκευής καθώς και να κάνει υπολογισμό σύνθετων μεταβλητών του συστήματος.

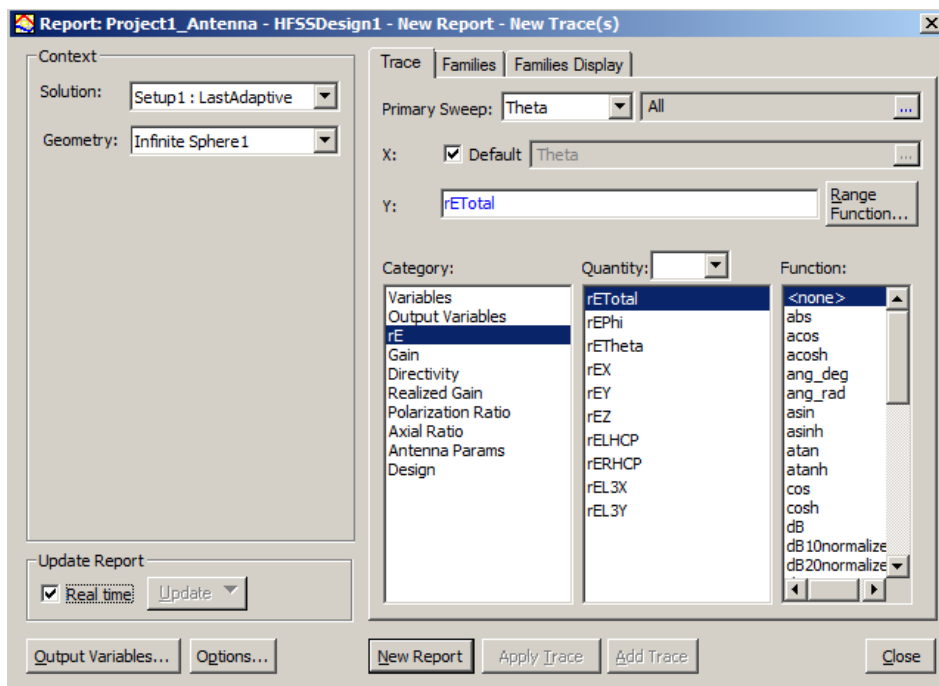
Οι επιλογές δίνονται στον παρακάτω πίνακα:



Πίνακας 11: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Fields Report

- Create Far Fields. Report. Στην επιλογή αυτή ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει τα αναπτυσσόμενα πεδία μακράν της κατανομής καθώς το κέρδος (gain) και την κατευθυντικότητα (directivity) της κεραίας.

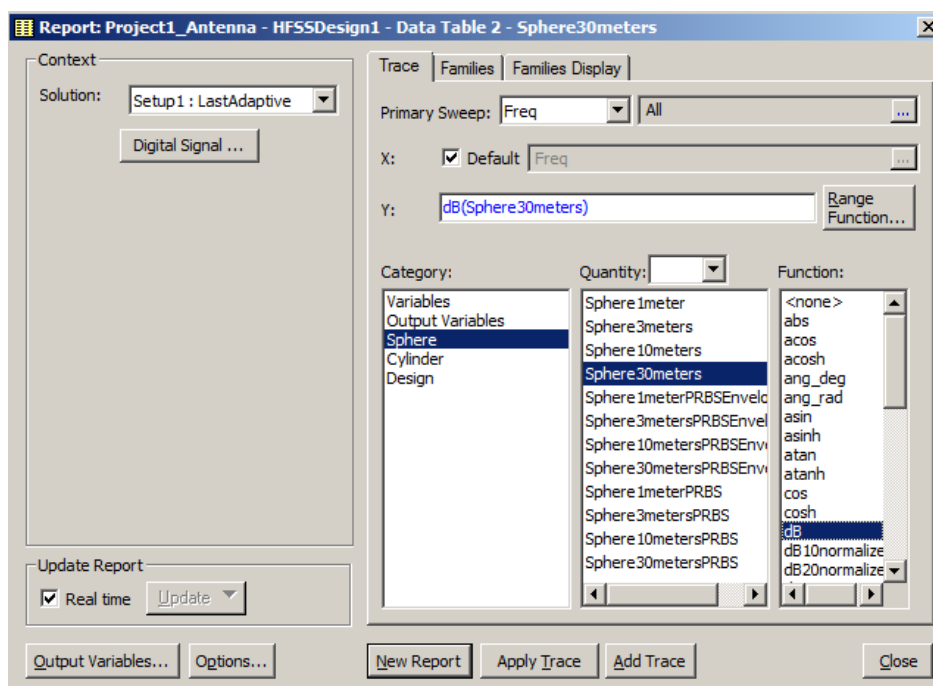
Οι επιλογές δίνονται στον παρακάτω πίνακα:



Πίνακας 12: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Far Fields Report

- Create Emission Test Report. Στην επιλογή αυτή ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει την εκπεμπόμενη ισχύ σε επιφάνειας που ορίζει.

Οι επιλογές δίνονται στον παρακάτω πίνακα:



Πίνακας 13: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Emission Test Report

Στην επόμενη ενότητα θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα από τις αναλυτικές διαδικασίες προσομοίωσης με στόχο την αξιολόγηση του σχεδιασμού της κεραίας τύπου patch καθώς και τον έλεγχο ικανοποίησης των προδιαγραφών. Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν σε κατάλληλα διαγράμματα είτε απευθείας ως αριθμητικές τιμές.

# 4

## Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο περιβάλλον

HFSS®

### *4.1 Προσομοίωση στο περιβάλλον HFSS®*

Για το προηγούμενο μοντέλο της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 της εργασίας, η αναλυτική επίλυση καθώς και η προσομοίωση των αποτελεσμάτων έγινε στο περιβάλλον HFSS®. Όπως αναφέρθηκε και στην παρουσίαση του περιβάλλοντος HFSS®, παρέχει την δυνατότητα για επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων με χρήση είτε αριθμητικών παρουσιάσεων (σε μορφή δεδομένων – reports), είτε σε συγκρότηση διαγραμμάτων τα οποία δίνουν μία εποπτική εικόνα των αποτελεσμάτων. Το περιβάλλον HFSS® παρέχει την δυνατότητα για επεξεργασία δεδομένων σε διάγραμμα μέσω ενός σημαντικού πλήθους επιλογών που παρέχει στο τμήμα Results της επεξεργασίας.

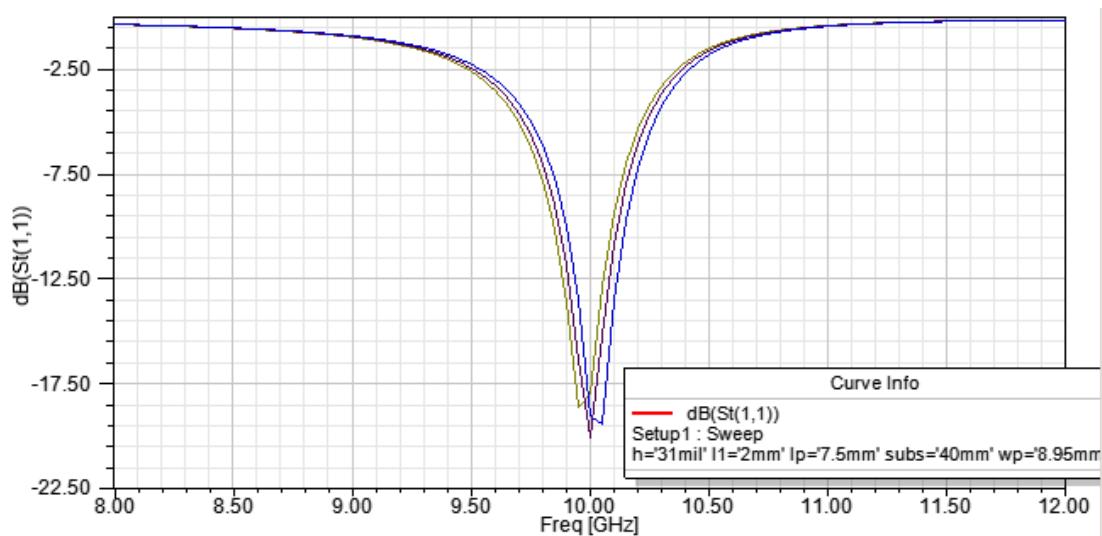
Επιπλέον θα πρέπει να σημειωθεί ότι το περιβάλλον HFSS® επιτρέπει την ανάλυση ευαισθησίας και επίδρασης στα αποτελέσματα της κεραίας δίνοντας την δυνατότητα μεταβολής των γεωμετρικών διαστάσεων της κεραίας. Από την θεωρητική ανάλυση γνωρίζουμε ότι η στοιχειώδης μεταβολή του μήκους ( $l_p$ ) της κεραίας τύπου patch έχει άμεση επίδραση στην συχνότητα συντονισμού που δέχεται η κεραία. Επομένως οι αναλύσεις ευαισθησίας έγιναν με βάση την μεταβολή του μήκους αυτής.

## 4.2 Διαγράμματα Επίλυσης Τερματικού

Στο τμήμα αυτό συγκαταλέγονται ένα σύνολο από διαγράμματα τα οποία αναπαριστούν τον συντελεστή ανάκλασης ισχύος ( $S$ ) της κεραίας, την σύνθετη αντίσταση  $Z$ , καθώς και την αγωγιμότητα της κεραίας  $Y$  συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας.

### Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης ισχύος $S(1,1)$ :

Το διάγραμμα περιλαμβάνει απεικόνιση όλων των συντελεστών απορρόφησης ισχύος της κεραίας για μεταβολές του μήκους στο διάστημα (lp) 7.625 mm έως 8.5 mm.

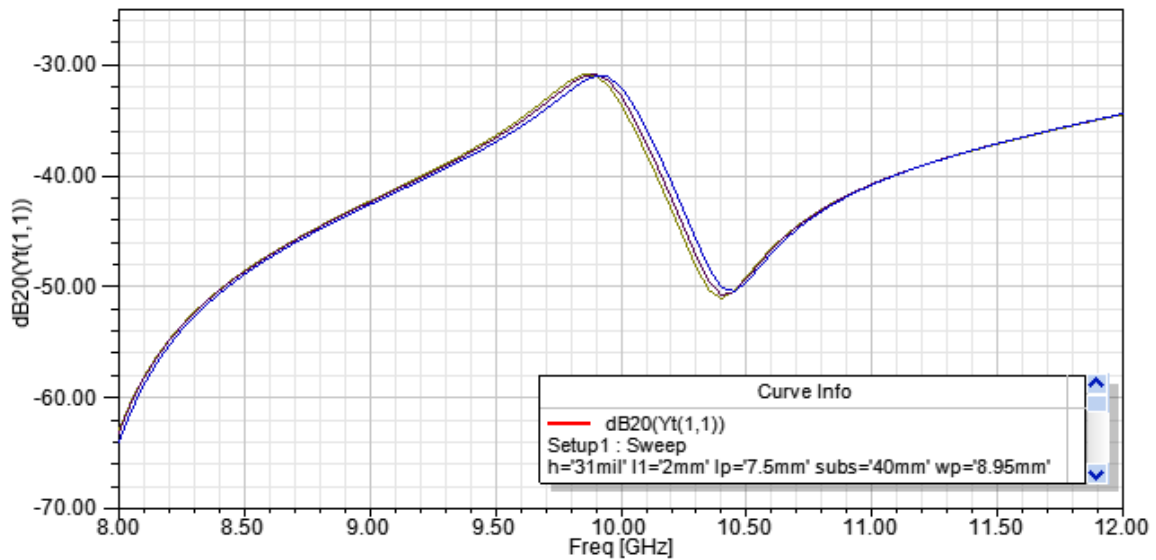


Σχήμα 32: Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης ισχύος  $S$  της κεραίας συναρτήσει της συχνότητας

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι για όλη την ζώνη μεταβολής μηκών της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) (lp), ο συντελεστής απορρόφησης ισχύος  $S$  παραμένει σε συντονισμό στην συχνότητα των 10 GHz με μικρές μεταβολές. Η απεικόνιση της παραμέτρου  $S$  είναι εκπεφρασμένη σε db. Από το διάγραμμα μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε ότι η ζώνη συντονισμού εκτείνεται περίπου σε 200 MHz, ικανοποιώντας έτσι και το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τις προδιαγραφές επικοινωνίας.

### Διάγραμμα αγωγιμότητας $Y$ :

Το διάγραμμα περιλαμβάνει απεικόνιση της αγωγιμότητας της κεραίας για μεταβολές του μήκους στο διάστημα (lp) 7.625 mm έως 8.5 mm.

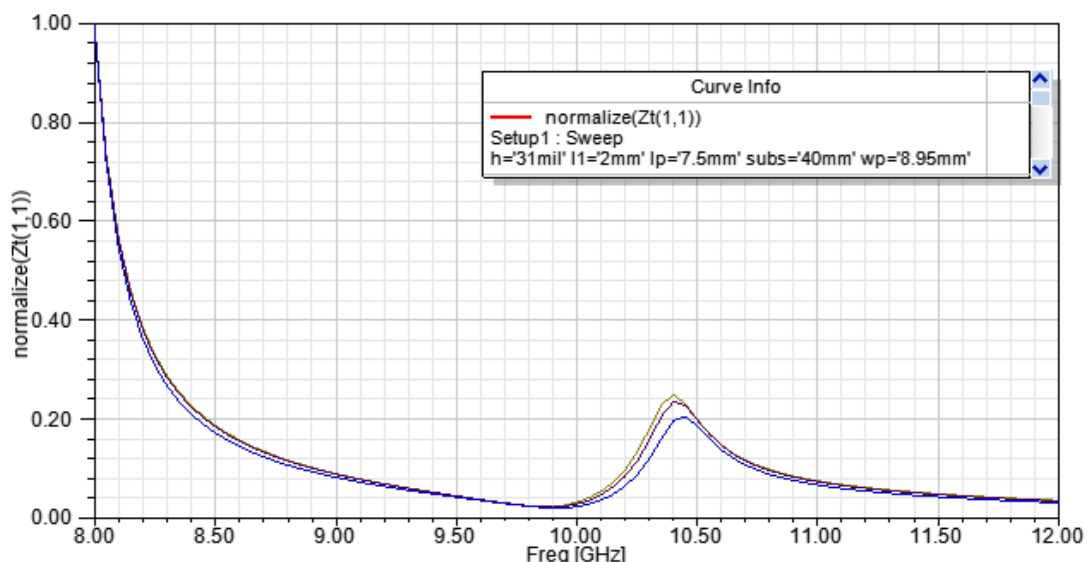


Σχήμα 33: Διάγραμμα αγωγιμότητας  $Y$  της κεραίας συναρτήσει της συχνότητας

Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα για την οικογένεια αγωγιμοτήτων των κεραίων για μεταβολή του  $l_p$ , οι κεραίες εμφανίζουν μέγιστο της τιμής αγωγιμότητας κοντά στην συχνότητα των 10 GHz η οποία αποτελεί και την συχνότητα συντονισμού της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna). Η έκφραση της αγωγιμότητας στο διάγραμμα δίνεται κανονικοποιημένα σε db, οπότε όσο πιο υψηλή η τιμή σε db τόσο χαμηλότερη η κανονικοποιημένη σύνθετη αντίσταση της κεραίας δηλαδή, καλύτερη προσαρμογή στην γραμμή που την οδηγεί.

#### Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης $Z$ :

Το διάγραμμα περιλαμβάνει απεικόνιση της σύνθετης αντίστασης της κεραίας για μεταβολές του μήκους στο διάστημα ( $l_p$ ) 7.625 mm έως 8.5 mm.

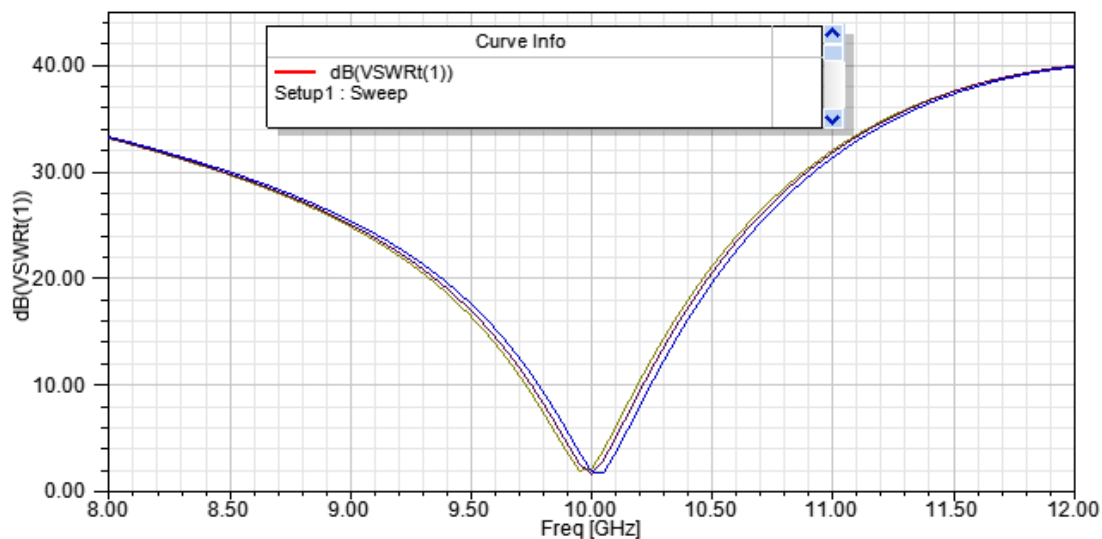


Σχήμα 34: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης  $Z$  της κεραίας συναρτήσει της συχνότητας

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι η κεραία εμφανίζει την χαμηλότερη σύνθετη αντίσταση στην συχνότητα συντονισμού των 10 GHz.

### Διάγραμμα λόγου στασίμων κυμάτων VSWR:

Το διάγραμμα περιλαμβάνει απεικόνιση του λόγου στασίμων κυμάτων της κεραίας για μεταβολές του μήκους στο διάστημα (lp) 7.625 mm έως 8.5 mm.



Σχήμα 35: Διάγραμμα λόγου στασίμων κυμάτων VSWR της κεραίας συναρτήσει της συχνότητας

Η απεικόνιση του λόγου VSWR είναι σε db. Παρατηρούμε ότι ο λόγος στασίμων κυμάτων παραμένει σε σχεδόν μηδενική τιμή για την συχνότητα συντονισμού των 10 GHz. Από την θεωρία ανάλυσης κεραιών γνωρίζουμε ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή του VSWR τόσο καλύτερα ταιριασμένη είναι η κεραία στην γραμμή μεταφοράς που την οδηγεί και τόσο καλύτερα απορροφά και εκπέμπει την παρεχόμενη ισχύ σε ακτινοβολήση [108]. Από το αποτέλεσμα του διαγράμματος παρατηρούμε ότι η κεραία έχει συνταιριαστεί σχεδόν απόλυτα με την γραμμή μεταφοράς που οδηγεί το σήμα προς εκπομπή. Η τιμή που επιτυγχάνεται για τον VSWR είναι 1.25 (περίπου), η οποία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί αντιστοιχεί σε εκπεμπόμενη ισχύ της τάξης του 96% από την κεραία.



VSWR	$\Gamma$ (s11)	Reflected Power (%)	Reflected Power (dB)
1.0	0.000	0.00	-Infinity
1.5	0.200	4.0	-14.0
2.0	0.333	11.1	-9.55
2.5	0.429	18.4	-7.36
3.0	0.500	25.0	-6.00
3.5	0.556	30.9	-5.10
4.0	0.600	36.0	-4.44
5.0	0.667	44.0	-3.52
6.0	0.714	51.0	-2.92
7.0	0.750	56.3	-2.50
8.0	0.778	60.5	-2.18
9.0	0.800	64.0	-1.94
10.0	0.818	66.9	-1.74
15.0	0.875	76.6	-1.16
20.0	0.905	81.9	-0.87
50.0	0.961	92.3	-0.35

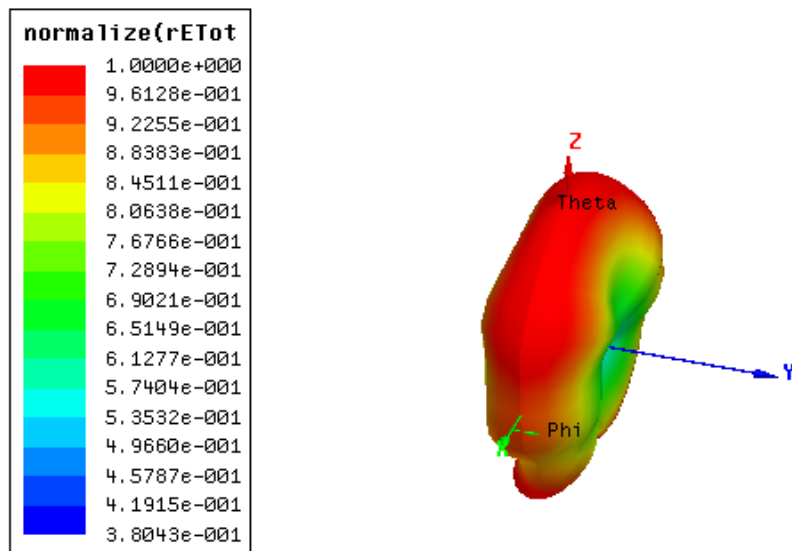
Πίνακας 14: Πίνακας σύνδεσης του VSWR, του συντελεστή ανάκλασης (S11), και της ανακλώμενης ισχύος από την κεραία

### 4.3 Διαγράμματα Μακράν Πεδίου

Στο τμήμα αυτό συγκαταλέγονται ένα σύνολο από διαγράμματα τα οποία αναπαριστούν τα χαρακτηριστικά του μακράν πεδίου της κεραίας ως συνάρτηση πολικών συντεταγμένων αναπαράστασης.

#### Διάγραμμα Εντάσεως Ηλεκτρικού Πεδίου E:

Το διάγραμμα περιλαμβάνει στερεοσκοπική απεικόνιση της συνολικής εντάσεως του ηλεκτρικού της κεραίας για μεταβολές του μήκους στο διάστημα (lp) 7.625 mm έως 8.5 mm.

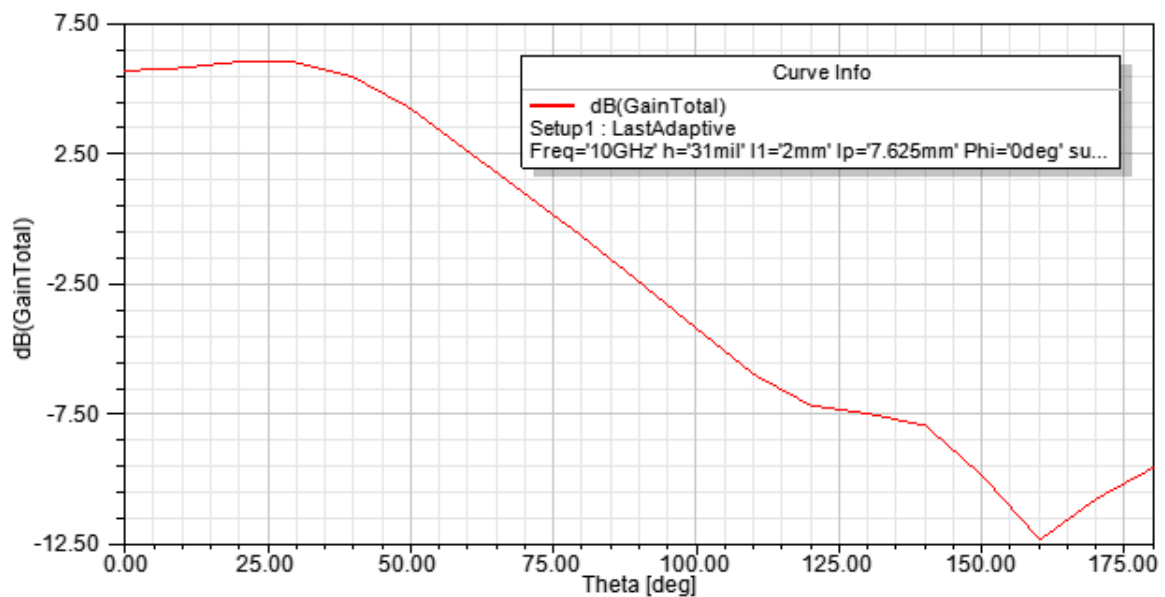


Σχήμα 36: 3D Διάγραμμα Εντάσεως Ηλεκτρικού Πεδίου της κεραίας

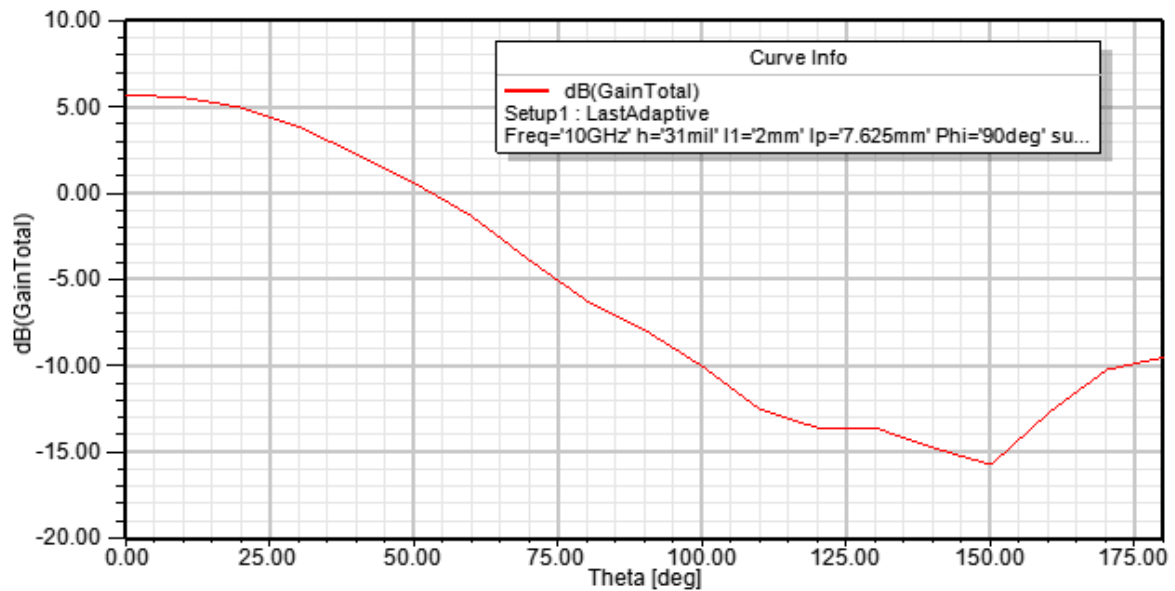
Από την τρισδιάστατη απεικόνιση της συνολικής εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου παρατηρούμε ότι το εκπεμπόμενο πεδίο εμφανίζει κάθετα μέτωπα στην επιφάνεια της κεραίας (όπως αναμενόταν και από την θεωρητική ανάλυση των κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antennas)). Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι κανονικοποιημένη ως προς την μέγιστη τιμή της. Τα υψηλά επίπεδα της έντασης παρουσιάζονται για αζιμουθιακές γωνίες  $\theta$  της τάξης  $0^\circ - 60^\circ$  προσεγγιστικά όπως παρουσιάζεται από την στερεοσκοπική (τρειςδιάστατη απεικόνιση) των λοβών του πεδίου.

#### Διάγραμμα Κέρδους G:

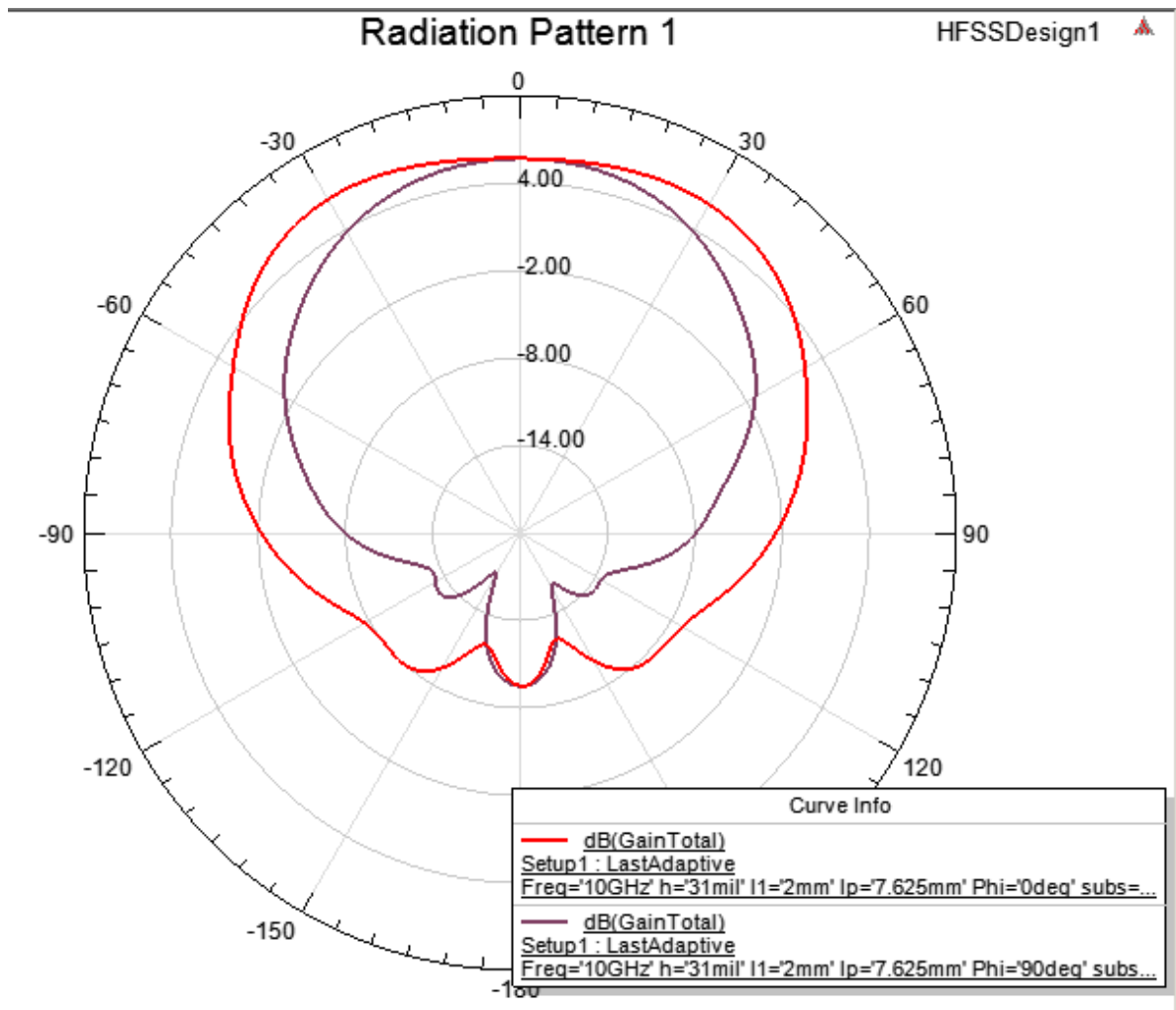
Το διάγραμμα περιλαμβάνει απεικόνιση του κέρδους της κεραίας για μήκος αγωγίμης επιφάνειας (lp) 7.625 mm.



Σχήμα 37: Διάγραμμα Κέρδους της κεραίας συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  ( $\varphi=0^\circ$ )

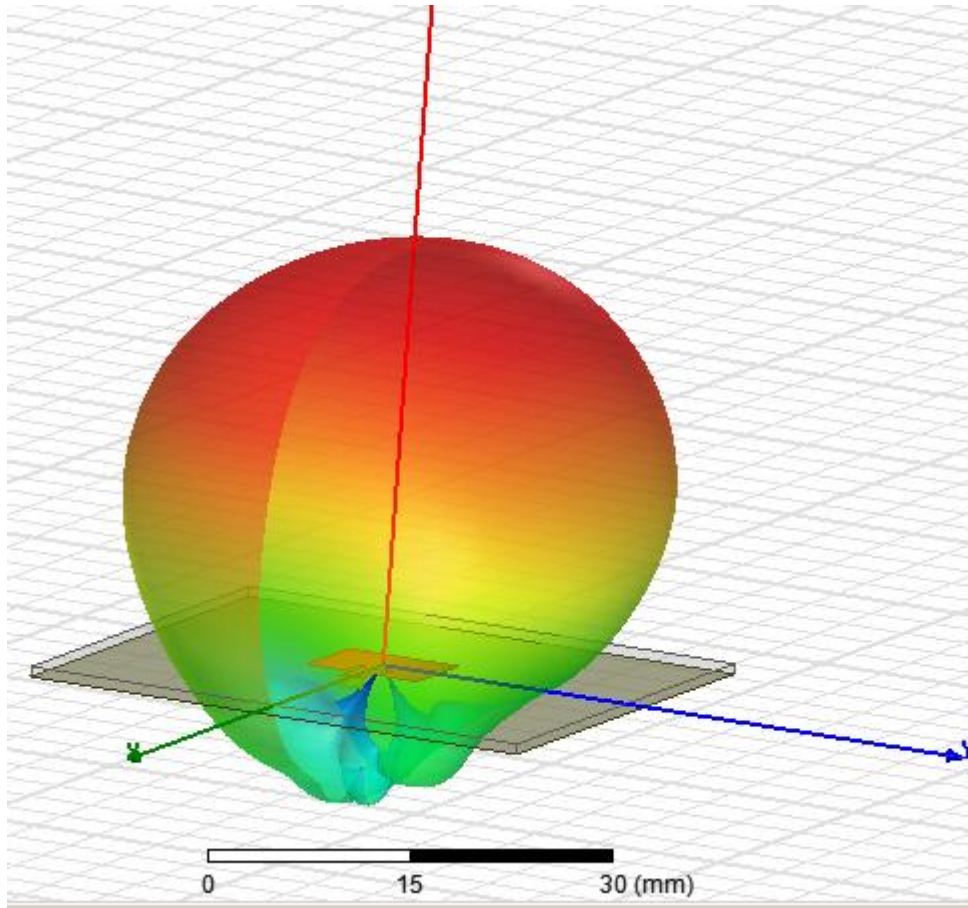


Σχήμα 38: Διάγραμμα Κέρδους της κεραίας συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  ( $\varphi=90^\circ$ )



Σχήμα 39: Πολικό Διάγραμμα Κέρδους της κεραίας συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  ( $\varphi=0^\circ$  και  $90^\circ$ )

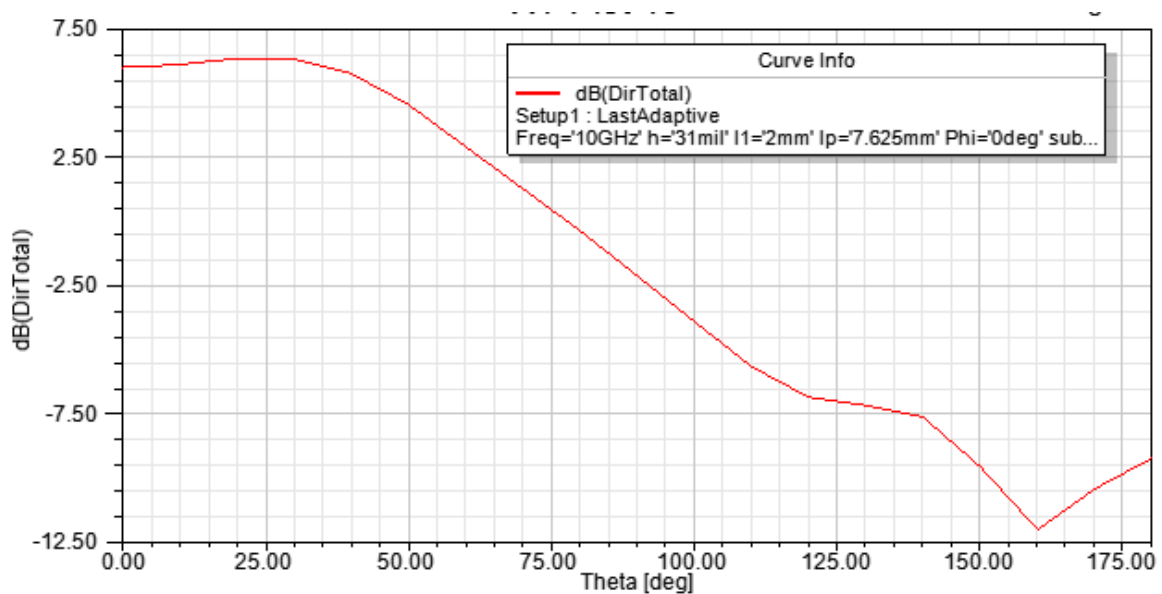
Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι η κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna) αναπτύσσει μέγιστο κέρδος περίπου στα 5 db για γωνίες αζιμουθίου  $\theta$  από  $0^\circ$  έως  $60^\circ$ . Στην συνέχεια το κέρδος της κεραίας πέφτει μονοτονικά.



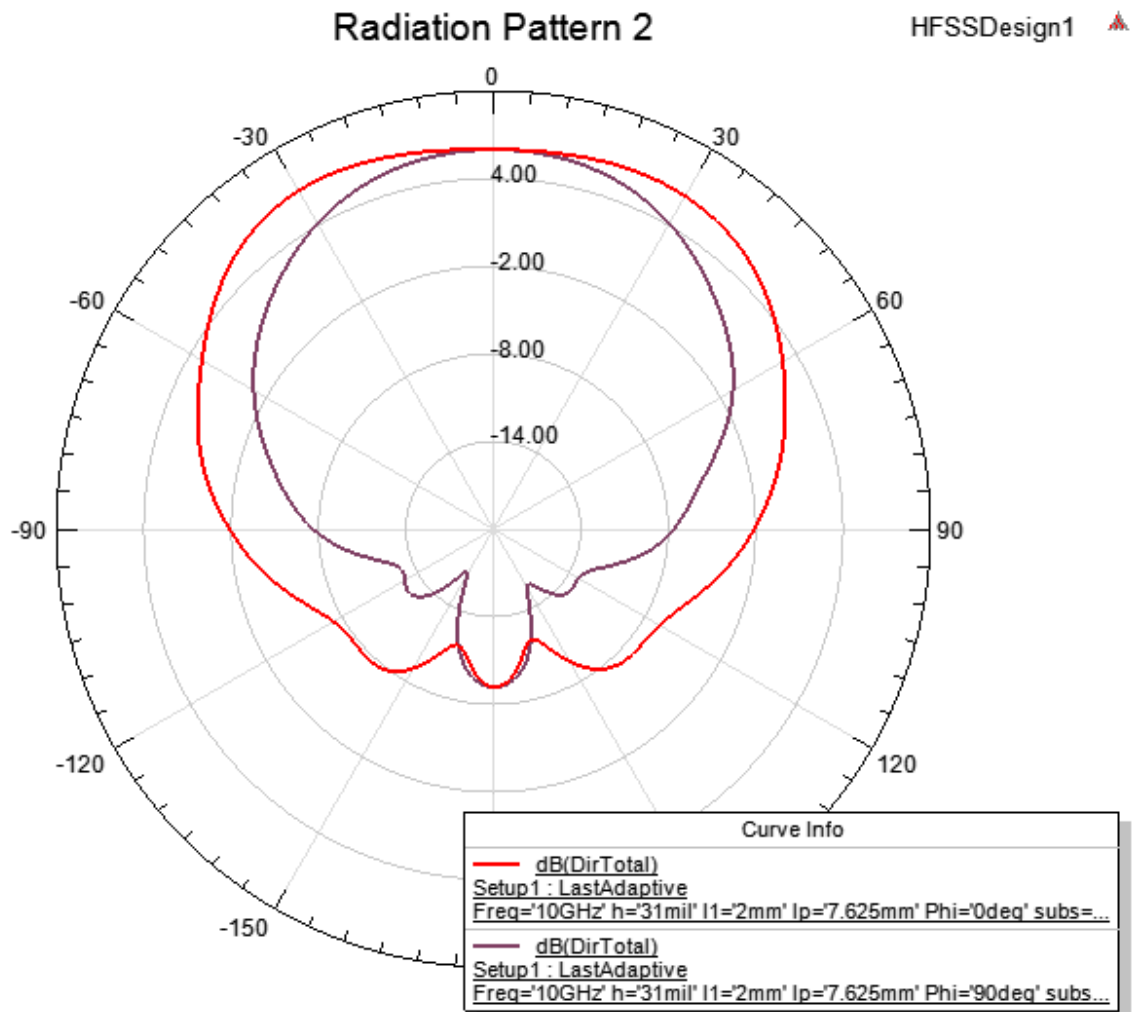
Σχήμα 40: Τρισδιάστατη άποψη του κέρδους της κεραίας με τοποθέτηση των λοβών επί της επιφάνειας

#### Διάγραμμα Κατευθυντικότητας D:

Το διάγραμμα περιλαμβάνει απεικόνιση της κατευθυντικότητας της κεραίας για μήκος αγωγικής επιφάνειας ( $l_p$ ) 7.625 mm.



Σχήμα 41: Διάγραμμα Κατευθυντικότητας της κεραίας συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  ( $\varphi=0^\circ$ )



Σχήμα 42: Πολικό Διάγραμμα Κατευθυντικότητας της κεραίας συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  ( $\varphi=0^\circ$  και  $90^\circ$ )

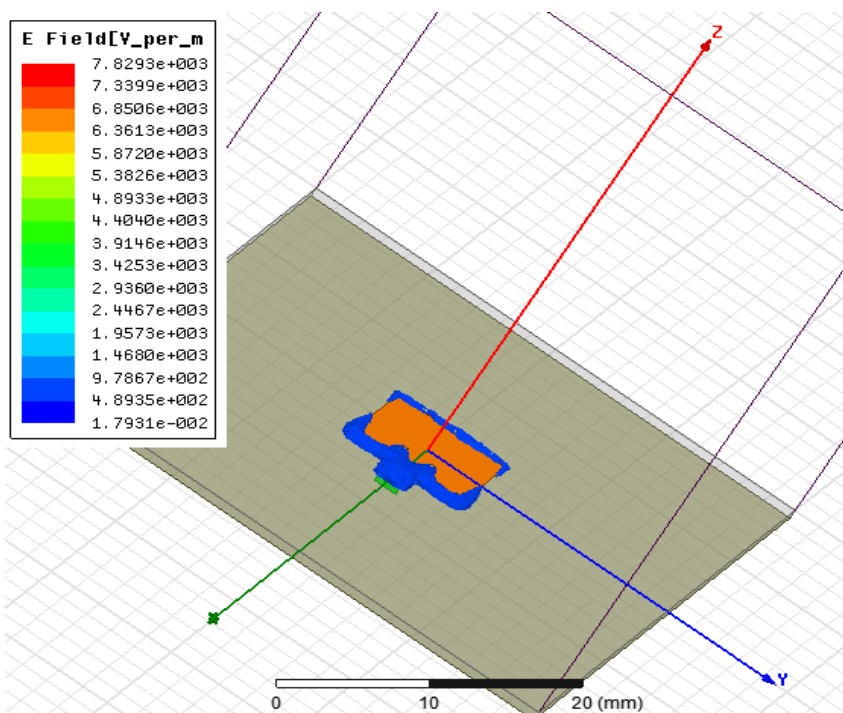
Το διάγραμμα κατευθυντικότητας συμφωνεί στην μορφή του με το αντίστοιχο διάγραμμα κέρδους. Η κεραία μπορεί να θεωρηθεί αποδοτική για την ζώνη αζιμουθιακής γωνίας  $\theta$  από  $0^\circ$  έως  $60^\circ$ .

#### 4.4 Διαγράμματα Εγγύς Πεδίου

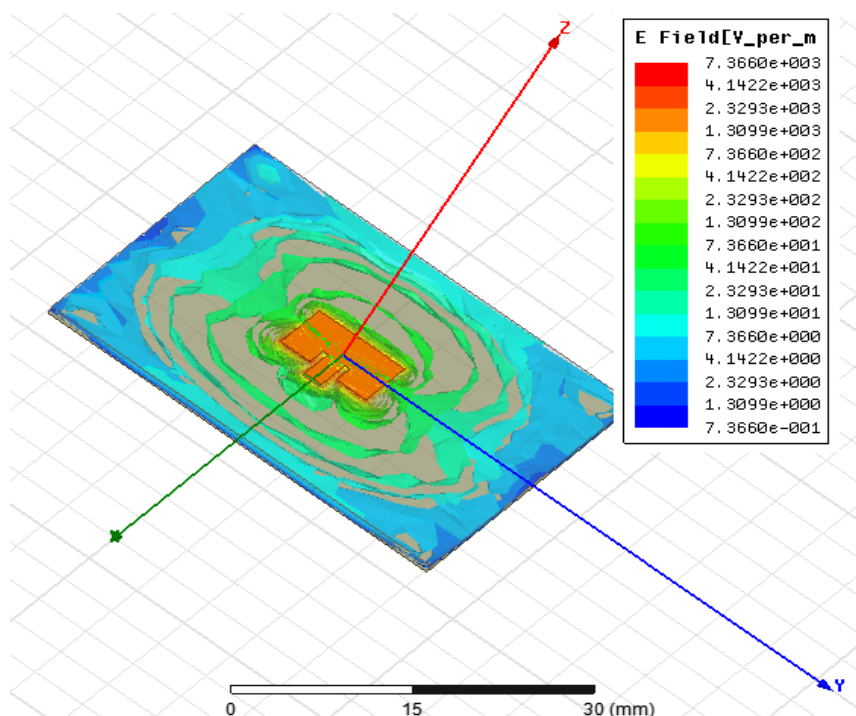
Στο τμήμα αυτό συγκαταλέγονται ένα σύνολο από διαγράμματα τα οποία αναπαριστούν τα χαρακτηριστικά του εγγύς πεδίου της κεραίας ως συνάρτηση πολικών συντεταγμένων αναπαράστασης.

##### Διάγραμμα Εντάσεως Ηλεκτρικού Πεδίου E:

Το διάγραμμα περιλαμβάνει στερεοσκοπική απεικόνιση της συνολικής εντάσεως του ηλεκτρικού για την κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna).



Σχήμα 43: 3D Διάγραμμα Εντάσεως Ηλεκτρικού Πεδίου της κεραίας



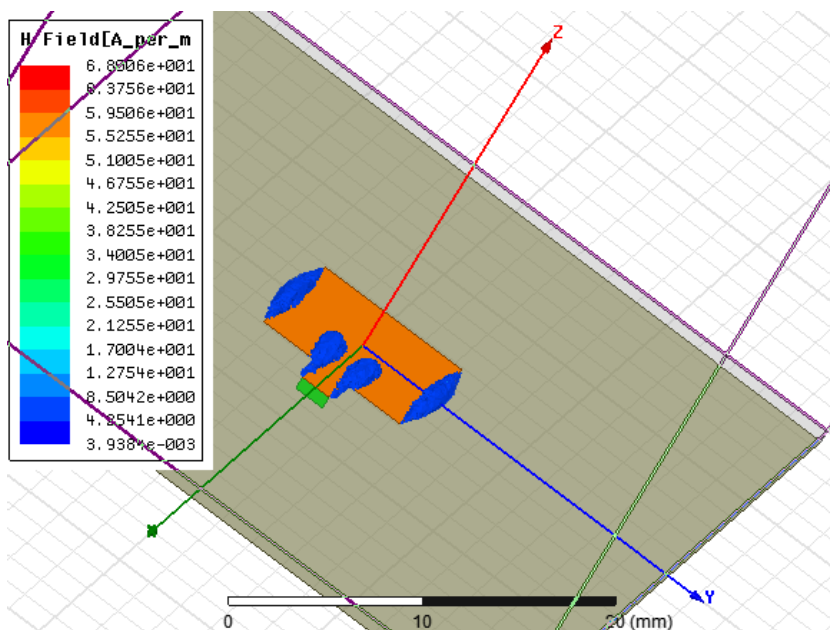
Σχήμα 44: 3D Διάγραμμα Εντάσεως Ηλεκτρικού Πεδίου της κεραίας με έμφαση στην επιφάνεια (λογαριθμική κλίμακα)



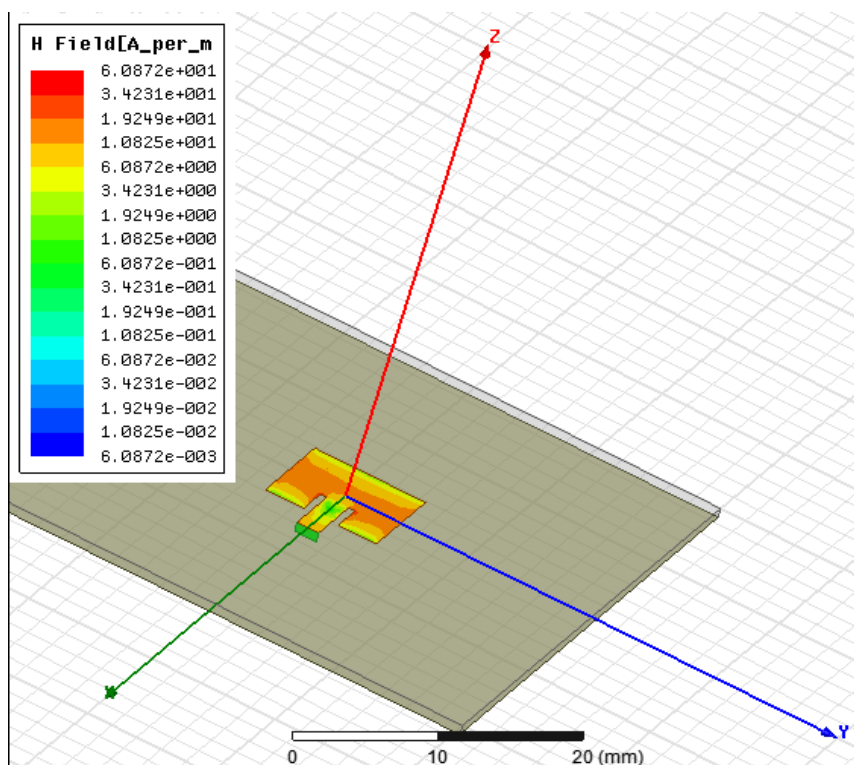
Από το διάγραμμα της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου επί της κεραίας τύπου patch παρατηρούμε ότι αυτό αναπτύσσει την μέγιστη τιμή του προς το κέντρο της διάταξης, ενώ στα άκρα παρουσιάζονται χαμηλότερες τιμές.

#### Διάγραμμα Εντάσεως Μαγνητικού Πεδίου H:

Το διάγραμμα περιλαμβάνει στερεοσκοπική απεικόνιση της συνολικής εντάσεως του μαγνητικού πεδίου για την κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna).



Σχήμα 45: 3D Διάγραμμα Εντάσεως Μαγνητικού Πεδίου της κεραίας

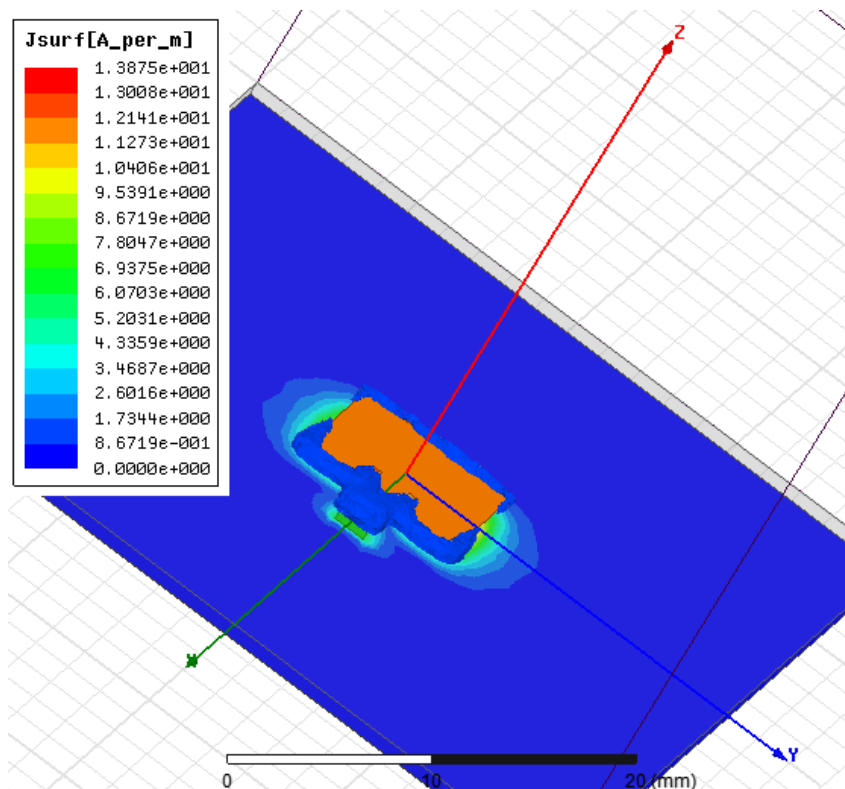


Σχήμα 46: 3D Διάγραμμα Εντάσεως Μαγνητικού Πεδίου της κεραίας με έμφαση στην επιφάνεια (λογαριθμική κλίμακα)

Από το διάγραμμα της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου επί της κεραίας τύπου patch παρατηρούμε ότι αναπτύσσει την μέγιστη τιμή του σχεδόν σε ολόκληρη την επιφάνεια της κεραίας, ενώ στα άκρα αναπτύσσονται οι χαμηλότερες τιμές.

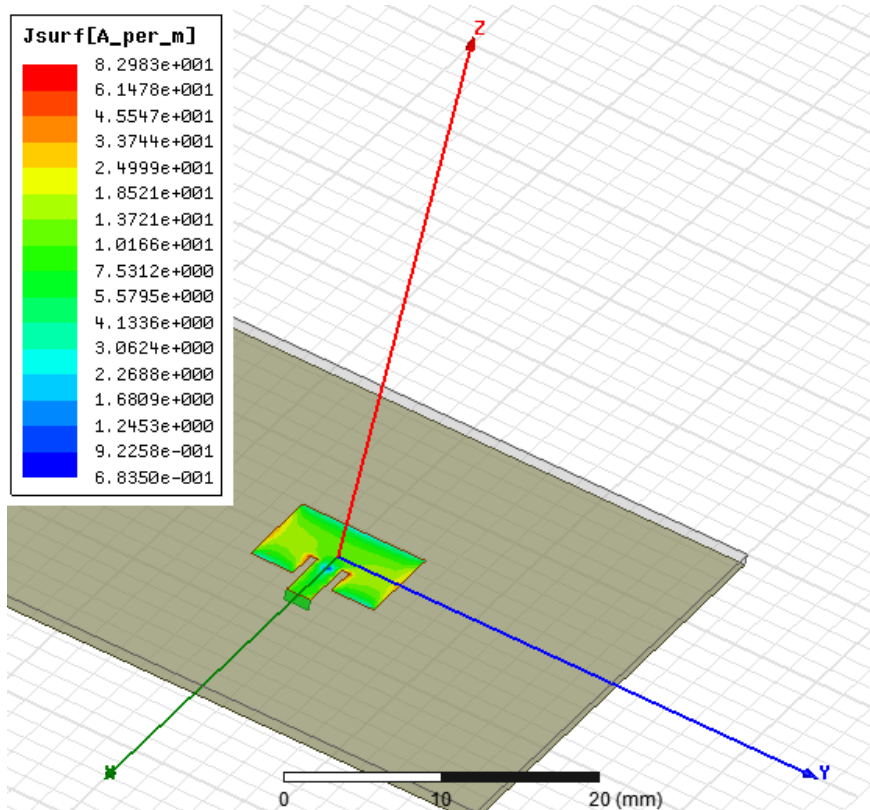
#### Διάγραμμα Χωρικής Πυκνότητας Ρεύματος J:

Το διάγραμμα περιλαμβάνει στερεοσκοπική απεικόνιση χωρικής πυκνότητας ρεύματος για την κεραία τύπου μικροταινίας (patch antenna). Η χωρική πυκνότητα ρεύματος καταλήγει πρακτικά σε επιφανειακό ρεύμα το οποίο διατρέχει την αγωγίμη επιφάνεια της κεραίας.



Σχήμα 47: 3D Διάγραμμα Χωρικής Πυκνότητας Ρεύματος της κεραίας



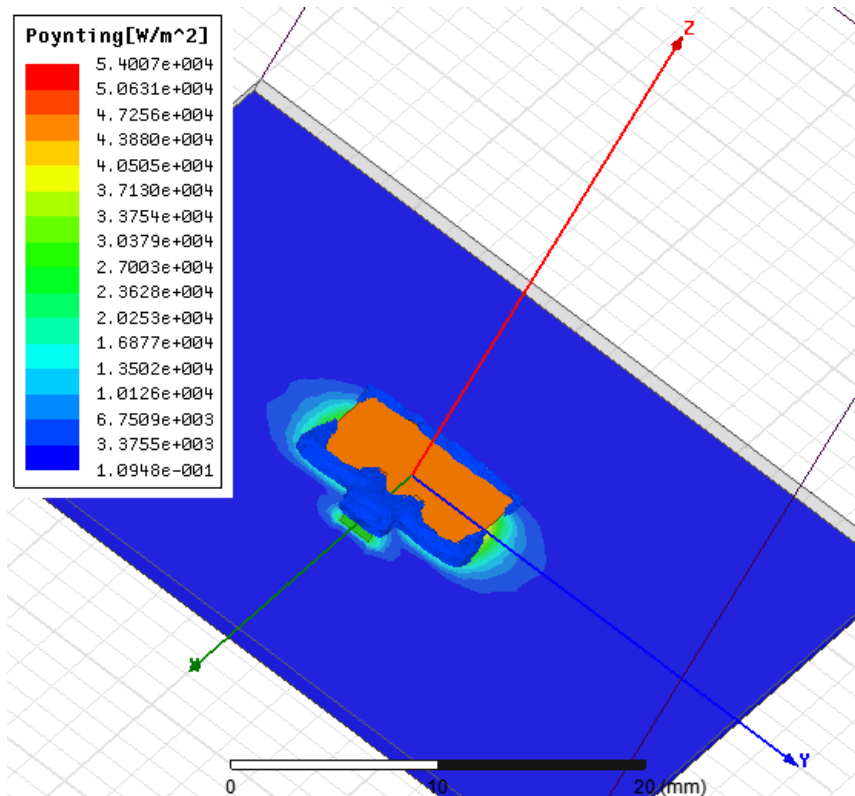


Σχήμα 48: 3D Διάγραμμα Χωρικής Πυκνότητας Ρεύματος της κεραίας με έμφαση στην επιφάνεια (λογαριθμική κλίμακα)

Από την κατανομή ρεύματος στην επιφάνεια παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή αναπτύσσεται στην κεντρική περιοχή της αγωγίμης επιφάνειας, ενώ τα άκρα τείνουν προς χαμηλότερες τιμές. Το διάγραμμα βρίσκεται σε συμφωνία και με το αναπτυσσόμενο ηλεκτρικό πεδίο επί της αγωγίμης επιφάνειας.

#### Διάγραμμα Διανύσματος Poynting N:

Το διάγραμμα περιλαμβάνει στερεοσκοπική απεικόνιση της ακτινοβολούμενης ισχύος από την κεραία (πραγματικό μέρος του διανύσματος Poynting).



Σχήμα 49: 3D Διάγραμμα του πραγματικού μέρους του διανύσματος Poynting της κεραίας

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το διάνυσμα Poynting, το οποίο δηλώνει και την κατεύθυνση της ακτινοβολούμενης ισχύος στην κεραία, λαμβάνει τις μέγιστες τιμές του στα κεντρικά σημεία της κεραίας τύπου patch, ενώ προς τα άκρα η ακτινοβολούμενη ισχύς γίνεται μικρότερη.

#### 4.5 Συμπεράσματα από την ανάλυση της κεραίας τύπου patch

Από την διαδικασία της ανάλυσης της κεραίας τύπου patch μέσω αναλυτικών υπολογισμών στο περιβάλλον προσομοίωσης HFSS® παρατηρούμε ότι η γενική λειτουργία της κεραίας είναι σύμφωνη με τις αρχές και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των κεραιών τύπου μικροταινίας (patch antennas) όπως αυτά διατυπώθηκαν στις θεωρητικές αρχές (Κεφάλαιο 1 της παρούσας εργασίας).

Η διάταξη της κεραίας έχει πολύ μικρές διαστάσεις (μόλις 7.625 mm x 9 mm) δηλαδή, εμβαδόν επιφάνειας της τάξης των 69 mm<sup>2</sup> περίπου. Το γεγονός αυτό την καθιστά πολύ εύκολα τοποθετήσιμη επί μίας ιπτάμενης συσκευής, η οποία με την σειρά της μπορεί να είναι επίσης μικρής κλίμακας (διαστάσεις ενός κλασσικού drone).

Η κεραία τύπου patch με ανάλυση μεταβολής του μήκους της στην ζώνη 7.625 – 8.6 mm εξακολουθεί να συμπεριφέρεται συντονιστικά στην ζώνη των 10 GHz με πολύ μικρή μεταβολή συχνότητας για την κεραία. Από πλευράς εύρους ζώνης η λειτουργία στην συχνότητα αυτή διασφαλίζει ένα εύρος ζώνης (bandwidth) της τάξης των 200 MHz το οποίο είναι ικανοποιητικό για την διασφάλιση της λειτουργίας ενός τοπικού δικτυακού κόμβου επί ενός UAV.

Η κεραία εμφανίζει κέρδος το οποίο παραμένει σταθερό γύρω στην τιμή των 5 db για ένα άνοιγμα γωνίας  $\theta$  της τάξης των  $60^\circ$  από την κατακόρυφο. Το συγκεκριμένο άνοιγμα γωνίας ( $2 \times 60^\circ = 120^\circ$  αμφίπλευρα από την κατακόρυφο), δεν διασφαλίζει το απόλυτο ευρυγώνιο για την λειτουργία ενός συστήματος UAV. Για ένα ύψος πτήσης 100 m για την πτητική συσκευή (UAV) αυτό διασφαλίζει επιφανειακή κάλυψη της τάξης των 94,2 στρεμμάτων. Ιδανικά η υλοποίηση του καναλιού AG μέσω UAV χρειάζεται έναν ιστροπικό ακτινοβολητή ο οποίος όμως δεν μπορεί να κατασκευαστεί στην πράξη. Όμως το εύρος του κύριου λοβού της κεραίας όπως εμφανίζεται αμφίπλευρα και από τα αντίστοιχα πολικά διαγράμματα είναι ικανοποιητικό. Η κατευθυντικότητα της κεραίας τύπου μικροταινίας (patch antenna) ακολουθεί επίσης το ίδιο άνοιγμα με τον λοβό για το κέρδος. Ενδεχομένως, στο σημείο αυτό, θα μπορούσε να ικανοποιηθεί περαιτέρω η προδιαγραφή για το ευρυγώνιο της λειτουργίας με χρήση συστοιχίας από κεραίες τύπου patch, οι οποίες θα προσέδιδαν κάλυψη στις υπόλοιπες γωνίες σε συνδυασμό με αύξηση του συνολικού κέρδους του συστήματος. Όμως, όπως παρατηρήθηκε και από την αρχική παρουσίαση των δεσμεύσεων και των δυνατοτήτων των AG καναλιών, η προσθήκη περισσότερων της μίας κεραίων δημιουργεί επιπλέον την ανάγκη επεξεργασίας των εισερχόμενων σημάτων στο δέκτη, αυξάνοντας την ανάγκη για επεξεργαστική μονάδα σε συνδυασμό με την γενικότερη αύξηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης ισχύος στο σύστημα.

Από τα δεδομένα ανάλυσης επίσης παρατηρούμε ότι η κεραία είναι πολύ καλά προσαρμοσμένη (matched) στην γραμμή μεταφοράς εμφανίζοντας μικρή τιμή για το VSWR το οποίο οδηγεί σε ακτινοβολή περίπου του 96% της προσφερόμενης ισχύος από την πηγή στην κεραία.

Το διάνυσμα Poynting της διάταξης δείχνει ότι κυρίως η κατεύθυνση ακτινοβολούμενης H/M ισχύος από το σύστημα γίνεται κάθετα από την επιφάνεια της κεραίας. Για τον λόγο αυτό προτείνεται η τοποθέτηση της κεραίας τύπου Patch στο κήτος της ατράκτου της ιπτάμενης UAV συσκευής, δίνοντας συνεχή κάλυψη από το ύψος πτήσεως της συσκευής προς τα σημεία της επιφάνειας της γης (LOS).



# 5

## Γενικά συμπεράσματα

### *5.1 Συμπεράσματα από την υποστήριξη AG καναλιού*

Τα AG κανάλια αποτελούν διαύλους επικοινωνίας με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα οποία χρειάζεται να μελετηθούν εκτενώς λόγω της ιδιαιτερότητας της φύσης τους. Τα AG κανάλια ξεφεύγουν από τις κλασικές αναλύσεις των επίγειων καναλιών, τα οποία έχουν μελετηθεί εκτενώς στα πλαίσια ανάπτυξης τηλεπικοινωνιακών διαύλων για την υποστήριξη επικοινωνίας επί σημείων στην επιφάνεια της γης. Πρωτίστως τα AG κανάλια είναι υποκείμενα σε διαρκείς κινήσεις λόγω της φύσης τους (ιπτάμενη συσκευή – Air to Ground) ακόμη και όταν το σημείο της επίγειας διασύνδεσης παραμένει σταθερό. Οι γρήγορες μεταβολές θέσης και η ταχύτητα κίνησης των ιπτάμενων συσκευών δεν

επιτρέπουν σταθερή διόπτρευση των σημείων επικοινωνίας, διασφαλίζοντας συνεχείς συνθήκες LOS. Αφετέρου, η ύπαρξη πολλαπλών οδεύσεων (MPCs) του σήματος από τον πομπό προς τον δέκτη και αντίστροφα, μέσω ετερογενών περιβαλλόντων (επίπεδες επιφάνειες με διαφορετική μορφολογία, βλάστηση, κτίρια, κλπ), τα φαινόμενα διαλείψεων καθώς και σκίασης, επιδρούν αρνητικά στο κανάλι. Τα φαινόμενα Doppler για την φασματική εξάπλωση των φερόντων επικοινωνίας, συνδυαζόμενα με τις πολλαπλές οδεύσεις δημιουργούν ακόμη πιο σύνθετα προβλήματα για αντιμετώπιση τους (spread Doppler). Η ύπαρξη φαινομένων διάθλασης καθώς και το ευμετάβλητο των ατμοσφαιρικών συνθηκών, λειτουργούν επίσης αρνητικά για την διατύπωση σταθερών (στάσιμων) ιδιοτήτων για τα κανάλια αυτά. Επομένως, όπως αναφέρθηκε και κατά την προηγούμενη παρουσίαση, τα κανάλια αυτά μόνο κατά παραδοχή μπορούν να θεωρηθούν ως Στάσιμα υπό την Ευρεία Έννοια (WSS), ή μόνο κατά χρονικά διαστήματα κατά την διάρκεια μετάδοσης/λήψης.

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη όλους αυτούς τους παράγοντες γίνεται κατανοητό ότι η υλοποίηση AG καναλιών επικοινωνίας με στόχο την ενσωμάτωση τους στους τηλεπικοινωνιακούς διαύλους κορμού των επίγειων επικοινωνιών, είναι κάτι εξαιρετικά δύσκολο, το οποίο απαιτεί προσεκτική σχεδίαση και μελέτη.

Για την αποφυγή των μεταβολών που εισάγουν οι γρήγορα μεταβαλλόμενες κινήσεις της πτητικής συσκευής, συνίσταται η ενσωμάτωση των κεραιών επικοινωνίας σε πτητικές συσκευές που κινούνται ομαλά με δυνατότητα να ίπτανται με σταθερό τρόπο επί γεωγραφικών περιοχών διατηρώντας σταθερά επίσης το ύψος και την θέση τους (π.χ. ελικόπτερα – αερόστατα – αερόπλοια). Οι παραπάνω επιλογές σαφώς διευκολύνουν την εγκατάσταση των καναλιών AG δεδομένου ότι παρέχουν σταθερότητα στην κίνηση χωρίς μεγάλες μεταβολές θέσης, ταχύτητας, αλλά ακόμη και αυτές οι πτητικές συσκευές είναι υποκείμενες σε διαταραχές πτήσης, οι οποίες μπορούν να προκύψουν από την παρουσία ανέμων σε μορφή ριπής. Εντούτοις, προτείνονται ως πρώτες απόπειρες για την υλοποίηση ενός δικτύου ομπρέλας (umbrella network) για την κάλυψη συγκεκριμένων γεωγραφικών περιοχών. Το περιορισμένο της χρονικής διάρκειας πτήσης αποτελεί ένα ακόμη πρόβλημα και για τα μικρής κλίμακας αεροσκάφη τα οποία βασίζουν την πτήση τους σε συσσωρευτές – μπαταρίες. Λύση σε αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε επίσης να δοθεί με την χρήση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.) οι οποίες να βασίζονται σε μικρής κλίμακας Φωτοβολταϊκά συστήματα (ΦΒ), τα οποία να είναι εγκατεστημένα επί της ιπτάμενης συσκευής. Η χρήση ΦΒ συστημάτων θα μπορούσε να διευκολύνει σημαντικά σε περιοχές με έντονη ηλιακή κάλυψη, την αύξηση της διάρκειας των πτήσεων (αυτονομία) καθώς και την ικανότητα για τροφοδότηση με σημαντικά ποσά ισχύος των συστοιχιών κεραιών οι οποίες υλοποιούν το τηλεπικοινωνιακό AG κανάλι. Και πάλι τα αερόπλοια διαφαίνονται ως η καλύτερη λύση στην παραπάνω επιλογή, δεδομένου ότι βασίζουν την πτητική τους ικανότητα σε μετεωρισμό λόγω άνωσης χωρίς να χρειάζονται κινητήρα για την απογείωση τους (κήτη πληρωμένα με υδρογόνο – ήλιο). Η χρήση κινητήρων μικρής ισχύος για την επιλογή διευθύνσεων κίνησης καθώς και για έλεγχο ύψους στα αερόπλοια, μπορεί να αξιοποιήσει την χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων δεδομένης της μεγάλης επιφάνειας που αυτά διαθέτουν. Η ανυψωτική ικανότητα των τελευταίων είναι σημαντική, γεγονός το οποίο μπορεί να συνεισφέρει στην ανύψωση ειδικού εξοπλισμού για την επιβολή μετρήσεων, καθώς και στην χρήση

και στήριξη και άλλων τύπων κεραιών οι οποίες μπορεί να έχουν μεγαλύτερα κέρδη χωρίς να αναγκάζουν τις κεραιές υλοποίησης να είναι αποκλειστικά και μόνο κεραιές τύπου μικροταινίας (patch antennas).

Η χρήση συστοιχιών κεραιών όπως παρουσιάστηκε, βελτιστοποιεί την επίλυση πολλών προβλημάτων επικοινωνίας (MIMO), προσθέτοντας όμως στην πολυπλοκότητα του όλου συστήματος και στις ανάγκες επεξεργαστικής ισχύος.

Σημαντική παράμετρος επίσης για την διασφάλιση του καναλιού επικοινωνιών AG, είναι και η ζώνη συχνοτήτων στην οποία τα φέροντα του καναλιού ορίζονται. Όπως αναμένεται, ως συνήθως κατά τις φάσεις προτυποποίησης, η διαδικασία είναι ανοικτή χωρίς να εντοπίζει με σαφή τρόπο την επιλογή των συχνοτικών ζωνών που θα ήταν προτιμότερες για την λειτουργία. Θα πρέπει να αποφευχθούν οίγουρα συχνοτικές ζώνες οι οποίες είναι ήδη σε κατάσταση συμφόρησης – κορεσμού – παρεμβολών (jamming) παρά το γεγονός ότι απευθείας χρήση τους θα συνέβαλε με σημαντικό τρόπο στην άμεση διασύνδεση των καναλιών AG με το υπάρχον δίκτυο κορμού. Για παράδειγμα, η χρήση των συχνοτικών ζωνών του πρωτοκόλλου 802.11 φαίνεται ως μία καλή βάση για την αμεσότητα της διασύνδεσης που αυτή προσφέρει, εντούτοις όμως δεν θα πρέπει να αγνοηθούν τα προβλήματα που θα αντιμετωπιστούν κατά την χρήση τέτοιων φερόντων σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, όπου πληθώρα αυτών των καναλιών χρησιμοποιείται για την κάλυψη της διασύνδεσης στα δίκτυα κορμού (WiFi συνδέσεις τοπικής κλίμακας).

Θα ήταν καλύτερο λοιπόν να χρησιμοποιηθούν ζώνες συχνοτήτων οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται σε σημαντικό βαθμό ως τώρα, χωρίς όμως αυτές να είναι εξαιρετικά υψίσυχνες (π.χ. 60 GHz) για να διευκολύνουν την μετάδοση και λήψη σημάτων με μικρότερη δυνατή απόσβεση και κατά συνέπεια με χαμηλότερα ποσά ισχύος για την λειτουργία των κεραιών λήψης/εκπομπής.

Το γενικό συμπέρασμα που ανακύπτει από την μελέτη των καναλιών AG είναι ότι αποτελούν ανοικτούς διαύλους, οι οποίοι χρειάζονται περαιτέρω μελέτη για την εξακρίβωση των χαρακτηριστικών τους. Τα συνήθη μοντέλα για τις επίγειες επικοινωνίες δεν φαίνεται να επαρκούν για την περιγραφή αυτών των καναλιών. Για την απλοποίηση του προβλήματος επικοινωνίας συστήνεται η χρήση όσο το δυνατόν μικρότερης κινητικότητας των ιπταμένων συσκευών, οι οποίες για την τροφοδότηση τους είναι καλό να κάνουν χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Καλό επίσης είναι για την μεγιστοποίηση της διάρκειας της πτητικής ικανότητας των πτητικών συσκευών, να χρησιμοποιούνται συσκευές τύπου αερόπλοιων, οι οποίες δεν χρειάζονται την συνεχή παροχή ανυψωτικής ισχύος παρά μόνο τις διορθωτικές κινήσεις που απαιτούνται για την διατήρηση της θέσεως τους. Κατά τις φάσεις μεταβολής θέσεως – ταχύτητας, όταν αυτό κρίνεται επιβεβλημένο, μία τεχνική για να μην αλλοιώνεται το κανάλι επικοινωνίας, μπορεί να είναι η σηματοδότηση η οποία θα θέτει το κανάλι σε κατάσταση OFF (μη ενεργό), αποφεύγοντας την αλλοίωση των χαρακτηριστικών του η οποία μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια δεδομένων.

Κατά τον τρόπο αυτό τα AG κανάλια που μπορούν να ορισθούν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σταθερό τρόπο κατά αναλογία με τους γεωστατικούς δορυφόρους οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την κάλυψη της επικοινωνίας σε παγκόσμιο επίπεδο.

Επιπλέον προβλήματα τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη αφορούν στην χρήση κωδικοποιήσεων και κρυπτογραφίας για το AG κανάλι, που θα

διασφαλίζουν την προστασία των ανταλλασσόμενων δεδομένων, όπως ακριβώς και στα επίγεια δίκτυα.

## ***5.2 Επιλογές Κεραιών για την υποστήριξη AG καναλιών επί των UAV's***

Οι κεραιές για την υλοποίηση των AG καναλιών αποτελούν τα σημαντικότερα δομικά στοιχεία. Η τεχνολογία στον χώρο των κεραιών προσφέρει σημαντικές λύσεις οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για την υλοποίηση αυτών των καναλιών, προσφέροντας τα απαιτούμενα επίπεδα ισχύος καθώς και τα απαιτούμενα διαγράμματα ακτινοβολίας για την κάλυψη των υπηρεσιών.

Οι ιπτάμενες συσκευές UAVs εμφανίζουν, με βάση τα χαρακτηριστικά πτήσεως ειδικού τύπου ανάγκες ως προς την χρήση κεραιών. Έτσι εφόσον η πτητική συσκευή κινείται με μεγάλες ταχύτητες επιβάλλοντας απότομες μεταβολές διευθύνσεων στην κίνηση της, είναι λογικό ότι οι κλασικές κεραιές τύπου διπόλου (horn antennas) δεν ταιριάζουν στο προφίλ κίνησης του στοιχείου. Ακόμη και αν αποδίδουν με καλά χαρακτηριστικά όσον αφορά στο κέρδος, την κατευθυντικότητα και τα διαγράμματα ακτινοβολίας τους, επιδρούν με καθοριστικό τρόπο στην πτητική ικανότητα του αεροσκάφους λόγω της διαταραχής που εισάγουν στις αεροδυναμικές γραμμές του. Από την άλλη πλευρά και οι ίδιες οι κεραιές είναι υποκειμένες στις μηχανικές διαταραχές λόγω της απότομης κίνησης (G force), με συνέπεια αυτό να εντοπίζεται ως ενισχυμένος ηλεκτρικός – ηλεκτρονικός θόρυβος στην λειτουργία τους. Επιπλέον, η μηχανική αντοχή σε τέτοιες καταπονήσεις δημιουργεί άμεσα προβλήματα συντήρησης και αντικατάστασης τους στο βάθος του χρόνου λειτουργίας.

Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων συστήνεται προφανώς η επιλογή των αερόπλοιων, τα οποία έχουν εξομαλυμένη κίνηση σε συνδυασμό με κεραιές τύπου μικροταινίας (patch antennas) οι οποίες διευκολύνουν τα θέματα μηχανικής στήριξης και αντοχής. Οι κεραιές τύπου μικροταινίας (patch antennas) αποτελούν ειδικού τύπου κεραιές οι οποίες έχουν μελετηθεί επαρκώς τα τελευταία 40 χρόνια, προσφέροντας σημαντικές λύσεις για την κάλυψη ειδικών εφαρμογών. Τα κέρδη και τα διαγράμματα ακτινοβολίας που παρέχουν είναι επαρκή για την κάλυψη ευρυγώνιας επικοινωνίας. Το σημαντικότερο όμως χαρακτηριστικό τους, είναι η μικρή επιφάνεια τους, η ευκολία στην κατασκευή συστοιχίας κεραιών για την ενίσχυση του διαγράμματος ακτινοβολίας, η κλιμακούμενη ισχύ τροφοδοσίας και η ευκολία κατασκευής – ολοκλήρωσης τους. Σε μηχανικό επίπεδο οι κεραιές τύπου μικροταινίας (patch antennas) λόγω της υφής επιφάνειας (δισδιάστατες κεραιές) μπορούν να εγκατασταθούν πολύ εύκολα επί των επιφανειών της ιπτάμενης συσκευής.

Για την βελτιστοποίηση στην κάλυψη των επιγείων σημείων (συνίσταται η τοποθέτηση τους επί του κήτους της κοιλιάς της ατράκτου των αεροσκαφών. Όπως αποδείχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ο σχεδιασμός τους είναι μία καθαρή διαδικασία η οποία μπορεί να ολοκληρωθεί με σαφή και εύκολο τρόπο. Τα χαρακτηριστικά τα οποία παρέχουν είναι εύκολα ελέγξιμα και για απλούς



τρόπους τροφοδότησης μπορούν να συμβάλλουν πολύ εύκολα στην δημιουργία συστοιχιών.

Η συχνότητα λειτουργίας αυτών των κεραιών μπορεί να μεταβληθεί πολύ εύκολα μεταβάλλοντας την γεωμετρία (μήκος) της αγωγίμης επιφάνειάς τους. Ειδικότερα, για τα ορθογωνικές αγωγίμες επιφάνειες η μεταβολή μήκους επιδρά άμεσα στην δημιουργούμενη συχνότητα συντονισμού  $f_0$ .

Για όλους τους παραπάνω λόγους οι κεραιές τύπου μικροταινίας (patch antennas) σε συνδυασμό με την επιλογή πτητικών συσκευών UAV οι οποίες έχουν την δυνατότητα να μετεωρίζονται (αερόπλοια) δίνουν την δυνατότητα της καλύτερης κάλυψης σε συγκεκριμένο ύψος πτήσης των γεωγραφικών περιοχών που είναι επιθυμητό να διασυνδεθούν.

### ***5.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις στην χρήση UAV ως τηλεπικοινωνιακών κόμβων κορμού δικτύου***

Η ικανότητα υποστήριξης AG καναλιών επί UAV συσκευών αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο τομέα για το άμεσο μέλλον. Όπως ήδη προαναφέρθηκε στα πλαίσια της εργασίας και στην παρουσίαση των τεχνολογιών, πολλές εταιρείες μεγάλης κλίμακας έχουν αρχίσει να επενδύουν στην χρήση υπτάμενων κόμβων για την κάλυψη των τηλεπικοινωνιακών αναγκών δικτύων κορμού. Ο λόγος είναι ότι παρά τα προβλήματα που διαφαίνονται στην χρήση των καναλιών, εφόσον αυτά μελετηθούν και τα προβλήματα επιλυθούν στο άμεσο μέλλον, αναμένεται να υπάρξει ραγδαία αύξηση στην χρήση τους. Λόγοι για αυτήν την χρησιμοποίηση είναι η ευκολία χειρισμού των υπτάμενων συσκευών σε σχέση με τους γεωστατικούς δορυφόρους, οι οποίοι κινούνται σε πολύ μεγάλα ύψη, καθώς και το σημαντικά μεγαλύτερο πλήθος που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί συγκρινόμενο με το πλήθος και το κόστος των δορυφόρων που απαιτούνται.

Τα κόστη για να τεθούν τα UAVs σε κατάλληλα ύψη και να προσφέρουν τις υπηρεσίες διασυνδέσεις είναι πολύ μικρότερα συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα ενός δορυφόρου. Το πλήθος των UAVs που θα συναρμολογούνται για την παροχή υπηρεσιών διασύνδεσης μπορεί να είναι σαφώς πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με το πλήθος ανάλογων δορυφόρων. Δυσλειτουργία των UAVs επιφέρει μικρά κόστη και χρόνους συντήρησης σε σχέση με τα αντίστοιχα ενός δορυφόρου τηλεπικοινωνιακής χρήσης.

Στόχος λοιπόν των τεχνολογιών για την επίτευξη AG καναλιών διασύνδεσης, είναι η μαζική χρήση τους για την διασύνδεση στα υπάρχοντα δίκτυα κορμού. Η τελευταία θα διευκολύνει την κάλυψη απομονωμένων περιοχών οι οποίες αναγκαστικά καλύπτονται με δορυφορικές επικοινωνίες. Επιπλέον όμως, η χρήση των UAV's και η ικανότητα τους να παρέχουν on-demand AG κανάλια, θα συμβάλλει στην δημιουργία ad-hoc δομών δικτύου οι οποίες ανάλογα με την κατάσταση των επίγειων δικτύων κορμού θα συμβάλλουν στον χειρισμό και την αποσυμφόρηση των υπαρχουσών δομών. Η πληθώρα τέτοιων διατάξεων μπορεί να δημιουργήσει ένα συνολικό δίκτυο ομπρέλας το οποίο να καλύψει σε μεγάλη κλίμακα τις γεωγραφικές περιοχές που απαιτούνται με ad-hoc προσθήκη – αφαίρεση των απαιτούμενων κόμβων και μετακίνηση τους

σε άλλες γεωγραφικές περιοχές (όπου η δικτυακή κάλυψη είναι απαραίτητη). Οι τεχνολογίες μεταπομπής (handovers) που απαιτούνται για ένα τέτοιας κλίμακας εγχείρημα, δεν είναι άγνωστες, καθώς έχουν μελετηθεί επαρκώς από τα δίκτυα παροχής κινητών επικοινωνιών. Έτσι η διασύνδεση των UAVs κόμβων μεταξύ τους, θα μπορεί να υποστηρίζεται με δυναμικό τρόπο στο άμεσο μέλλον προσφέροντας τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες όπου χρειάζεται, με βάση τις συνθήκες λειτουργίας των δικτύων κορμού.

Παράλληλα, με τις υπηρεσίες τηλεπικοινωνιακής υφής, τα UAVs μπορούν να προσφέρουν κάλυψη και άλλων αναγκών, όπως για παράδειγμα, τηλεμετρίας, συλλογής μετεωρολογικών δεδομένων, ανάλυσης γεωγραφικών δεδομένων, κλπ. Εφόσον διαθέτουν ικανοποιητικό εύρος ζώνης και την επεξεργαστική ισχύ για την μετάδοση και την λήψη τέτοιων πληροφοριών, μία πληθώρα υπηρεσιών και εφαρμογών είναι δυνατή.

Επομένως, παρά τις απαιτούμενες δυσκολίες που θα πρέπει να ξεπεραστούν στην εφαρμογή μίας νέας τεχνολογίας, αυτή είναι πολλά υποσχόμενη για το άμεσο μέλλον στοχεύοντας στην χρήση πολλών και μικρών «δορυφόρων» που κινούνται σε χαμηλό ύψος και μπορούν να συμβάλλουν στην δυναμική λειτουργία και τον χειρισμό τηλεπικοινωνιακών κόμβων με βέλτιστο και δυναμικό τρόπο.

## Βιβλιογραφία

- [1] R. E. Munson, "Conformal Microstrip Antennas and Microstrip Phased Arrays," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-22, pp. 74 - 78, January 1974.
- [2] R.1. Mailloux, 1. F. Mcllvanna and N. P. Kemweis, "Microstrip array technology," *IEEE Trans. Antennas & Propagation* , vol. 29, pp. 25 - 37, Jan. 1981.
- [3] S. A. Long and D. M. Walton, "A dual-frequency stacked circular-disc antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-27, pp. 270-273, March 1979.
- [4] D. M. Pozar, "A Microstrip Antenna Aperture Coupled to a Microstrip Line," *Electronics Letters*, Vol. 21, pp. 49 - 50, January 1985.
- [5] D. M. Pozar and B. Kaufman, "Increas ing the Bandwidth of a Microstrip Antenna by Proximity Coupling," *Electronics Letters*, Vol. 23, pp. 368 - 369, April 1987.
- [6] 1. R. Mosig and F. E. Gardiol, "General Integral Equation Formulation for Microstrip Antennas and Scatterers," *Proc. Inst. Elect. Eng., pt. H*, Vol. 132, pp. 424 - 432, 1985.
- [7] D. M. Pozar, "Input Impedance and Mutual Coupling of Rectangular Microstrip Antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-30, pp. 1191 - 1196, November 1982.
- [8] D. M. Pozar and D. H. Schaubert, "Scan blindness in infinite arrays of printed dipoles," *IEEE Trans. Antennas & Propagation*, vol. 32, pp. 602 - 610, June 1984.
- [9] J. T. Aberle and D. M. Pozar, "Analysis of infinite arrays of probe fed rectangular microstrip patches using a rigorous feed model", *Proc. Inst. Elec. Eng., Pt. H*, vol. 136, pp. 110-119, April 1989.
- [10] D. L. Rascoe, et al, "Ka-band MMIC beam-steered transmitter array", *IEEE Trans. Microwave Theory & Techniques*, vol. 37, pp. 2165 - 2168, Dec. 1989.
- [11] E. Levine, G. Malamud, S. Shtrikman and D. Treves, "A study of microstrip array antennas with the feed network," *IEEE Trans. Antennas & Propagation*, vol. 37, pp. 426-434, April 1989.
- [12] 1. Huang, "A Technique for an Array to Generate Circular Polarization with Linearly Polarized Elements", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, AP-34, pp. 1113 - 1124, September 1986.
- [13] P. S. Hall, 1. S. Dahele and 1. R. James, "Design Principles of Sequentially Fed Wide Bandwidth, Circularly Polarized Microstrip Antennas," *IEE Proc. H*, vol. 136, pp. 381- 389, October 1989.
- [14] S. Sabban, "A New Broadband Stacked Two-Layer Microstrip Antenna," 1983 IEEE Antennas Propagat. Symposium, pp. 63 - 66, June 1983.
- [14] S. Sabban, "A New Broadband Stacked Two-Layer Microstrip Antenna," 1983 IEEE Antennas Propagat. Symposium, pp. 63 - 66, June 1983.

- [15] Kumar and K. C. Gupta, "Non radiating edges and four edges gap-coupled multiple resonator broad-band microstrip antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-33, pp. 173-178, February 1985.
- [16] J.F. Zurcher, "The SSFIP: A global concept for high performance broadband planar antennas", *Electronics Letters*, vol. 24, pp. 1433-1435, Nov. 1988.
- [17] XFDTD, Remcom: [www.fdttd.com](http://www.fdttd.com)
- [18] J.-M. Jin and J. L. Volakis, "A Hybrid Finite Element Method for Scattering and Radiation by Microstrip Patch Antennas and Arrays Residing in a Cavity," *IEEE Trans. Antennas Propagat.* vol. AP-39, pp. 1598 -1604, November 1991.
- [19] S. D. Targonski, R. B. Waterhouse and D. M. Pozar, "Design of wideband aperture stacked patch microstrip antennas", *IEEE Transactions Antennas & Propagation*, vol. 46, pp. 1246 - 1251, Sept. 1998.
- [20] L. Afonso, N. Souto, P. Sebastiao, M. Ribeiro, T. Tavares, and R. Marinheiro, "Cellular for the skies: Exploiting mobile network infrastructure for low altitude air-to-ground communications," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Mag.*, vol. 31, no. 8, pp. 4–11, Aug. 2016.
- [21] K. R. Carver and J. W. Mink, "Microstrip Antenna Technology," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-29, pp. 2 - 24, January 1981.
- [22] E. H. Van Lil and A. R. Van de Capelle, "Transmission Line Model for Mutual Coupling Between Microstrip Antennas," *IEEETrans. Antennas Propagat.*, Vol. AP32, pp. 816 - 821, August 1984.
- [23] Y. T. Lo, D. Solomon and W. F. Richards, "Theory and Experiment on Microstrip Antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.* , Vol. AP-27, pp. 137 - 145, March 1979.
- [24] W. F. Richards, Y. T. Lo and D. D. Harrison, "An Improved Theory of Microstrip Antennas with Applications," *IEEETrans. Antennas Propagat.* , Vol. AP-29, pp. 25 27, January 1981.
- [25] M. D. Deshpande and M. C. Bailey, "Input Impedance of Microstrip Antennas," *IEEETrans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-30, pp. 651- 656, July 1982.
- [26] D. M. Pozar, "Input Impedance and Mutual Coupling of Rectangular Microstrip Antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-30, pp. 1191 - 1196, November 1982.
- [27] J. R. Mosig and F. E. Gardiol, "General Integral Equation Formulation for Microstrip Antennas and Scatterers," *Proc. Inst. Elect. Eng., pt. H*, Vol. 132, pp. 424 - 432, 1985.
- [28] A. Reineix and B. Jecko, "Analysis of Microstrip Patch Antennas Using Finite Difference Time Domain Method," *IEEETrans. Antennas Propagat.*, vol. AP-37, pp. 1361 - 1369, November 1989.

- [29] D. W. Matolak and R. Sun, "Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems: The near-urban environment," in Proc. IEEE Military Commun. Conf., MILCOM, 2015, pp. 1656–1660.
- [30] M. Simunek, F. P. Fontan, and P. Pechac, "The UAV low elevation propagation channel in urban areas: Statistical analysis and time-series generator," IEEE Trans. Ant. Propag., vol. 61, no. 7, pp. 3850–3858, Jul. 2013.
- [31] D. W. Matolak and R. Sun, "Air ground channel characterization for unmanned aircraft systems part I: Methods, measurements, and models for over-water settings," IEEE Trans. Vehic. Technol., vol. 66, no. 1, pp. 26–44, Jan. 2017.
- [32] J.-M. Jin and J. L. Volakis, "A Hybrid Finite Element Method for Scattering and Radiation by Microstrip Patch Antennas and Arrays Residing in a Cavity," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-39, pp. 1598 -1604, November 1991.
- [33] *High Frequency Structure Simulator - Version 5.5*, Agilent Technologies, 2000.
- [34] W. G. Newhall, R. Mostafa, C. Dietrich, C. R. Anderson, K. Dietze, G. Joshi, and J. H. Reed, "Wideband air-to-ground radio channel measurements using an antenna array at 2 GHz for low-altitude operations," in Proc. IEEE Military Commun. Conf. (MILCOM), vol. 2, 2003, pp. 1422–1427.
- [35] D. W. Matolak and R. Sun, "Antenna and frequency diversity in the unmanned aircraft systems bands for the over-sea setting," in Proc. IEEE Digital Avionics Sys. Conf. (DASC), Oct. 2014, pp. 6A4–1–6A4– 10.
- [36] J. Chen, B. Daneshrad, and W. Zhu, "MIMO performance evaluation for airborne wireless communication systems," in Proc. Military Commun. Conf. (MILCOM), Nov. 2011, pp. 1827–1832.
- [37] C.-M. Cheng, P. H. Hsiao, H. Kung, and D. Vlah, "Performance measurement of 802.11 a wireless links from UAV to ground nodes with various antenna orientations," in Proc. Int. Conf. Computer Communs. and Networks, (ICCCN), 2006, pp. 303–308.
- [38] E. Yanmaz, R. Kuschig, and C. Bettstetter, "Channel measurements over 802.11a-based UAV-to-ground links," in Proc. IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2011, pp. 1280–1284.
- [39] T. J. Willink, C. C. Squires, G. W. K. Colman, and M. T. Muccio, "Measurement and characterization of low-altitude air-to-ground MIMO channels," IEEE Trans. Vehic. Technol., vol. 65, no. 4, pp. 2637–2648, Apr. 2016.
- [40] R. F. Munson, "Conformal Microstrip Antennas and Microstrip Phased Arrays," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-22, pp. 74 -78, January 1974.
- [41] D. M. Pozar, "Input Impedance of Microstrip Antennas," *Proc. IEEE*, Vol. 80, pp. 74 - 81, January 1992.
- [42] D. M. Pozar and B. Kaufman, "Increasing the Bandwidth of a Microstrip Antenna by Proximity Coupling," *Electronic Letters*, Vol. 23, pp. 1070 - 1072, September 1987.

- [43] D. M. Pozar, "A Microstrip Antenna Aperture Coupled to a Microstrip Line," *Electronic Letters*, Vol. 21, pp. 49 - 50, January 1985.
- [44] Tractica, "Commercial drone shipments to surpass 2.6 million units annually by 2025," accessed: 2017-11-28.
- [45] Wikipedia, "General atomics MQ-9 Reaper," accessed: 2017-07-03. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/General Atomics MQ-9 Reaper](https://en.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-9_Reaper)
- [46] Federal Aviation Administration, "FAA small unmanned aircraft regulations," accessed: 2017-07-03. [Online]. Available: [https://www.faa.gov/news/fact sheets/news story.cfm?newsId=20516](https://www.faa.gov/news/fact_sheets/news_story.cfm?newsId=20516)
- [47] H. D. Tu and S. Shimamoto, "A proposal of wide-band air-to-ground communication at airports employing 5-GHz band," in Proc. IEEE Wireless Commun. Networking Conf. (WCNC), 2009, pp. 1–6.
- [48] W. Khawaja, I. Guvenc, and D. W. Matolak, "UWB channel sounding and modeling for UAV air-to-ground propagation channels," in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), Dec. 2016, pp. 1–7.
- [49] D. W. Matolak and R. Sun, "Air-ground channel measurements & modeling for UAS," in Proc. Integrated Commun., Navigation and Surveillance Conf. (ICNS), 2013, pp. 1–9.
- [50] R. Sun and D. W. Matolak, "Over-harbor channel modeling with directional ground station antennas for the air-ground channel," in Proc. IEEE Military Commun. Conf. (MILCOM), 2014, pp. 382–387.
- [51] D. W. Matolak and R. Sun, "Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems: The hilly suburban environment," in Proc. Vehic. Technol. Conf. (VTC), 2014, pp. 1–5.
- [52] R. Sun and D. W. Matolak, "Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—part II: Hilly & mountainous settings," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, 2016.
- [53] D. W. Matolak and R. Sun, "Air-ground channels for UAS: Summary of measurements and models for L-and C-bands," in Proc. Integrated Commun. Navigation and Surveillance (ICNS), 2016, pp. 8B2–1.
- [54] D. W. Matolak and R. Sun, "Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—part III: The suburban and near-urban environments," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, 2017.
- [55] D. W. Matolak, "Channel characterization for unmanned aircraft systems," in Proc. European Conf. Ant. Propag. (EuCAP), 2015, pp. 1–5.
- [56] N. Schneckenburger, T. Jost, D. Shutin, M. Walter, T. Thiasiriphet, M. Schnell, and U. Fiebig, "Measurement of the L-band air-to-ground channel for positioning applications," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 52, no. 5, pp. 2281–2297, Oct. 2016.

- [57] K. Takizawa, T. Kagawa, S. Lin, F. Ono, H. Tsuji, and R. Miura, "C-band aircraft-to-ground (A2G) radio channel measurement for unmanned aircraft systems," in Proc. Wireless Personal Multimedia Commun. (WPMC) Conf., 2014, pp. 754–758.
- [58] F. Ono, K. Takizawa, H. Tsuji, and R. Miura, "S-band radio propagation characteristics in urban environment for unmanned aircraft systems," in Proc. Ant. Propag. (ISAP) Conf., 2015, pp. 1–4.
- [59] N. Goddemeier, K. Daniel, and C. Wietfeld, "Coverage evaluation of wireless networks for unmanned aerial systems," in Proc. IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2010, pp. 1760–1765.
- [60] E. Yanmaz, R. Kuschig, and C. Bettstetter, "Achieving air-ground communications in 802.11 networks with three-dimensional aerial mobility," in Proc. IEEE INFOCOM, 2013, pp. 120–124.
- [61] N. Ahmed, S. S. Kanhere, and S. Jha, "On the importance of link characterization for aerial wireless sensor networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 52–57, 2016.
- [62] E. L. Cid, A. V. Alejos, and M. G. Sanchez, "Signaling through scattered vegetation: Empirical loss modeling for low elevation angle satellite paths obstructed by isolated thin trees," *IEEE Vehic. Technol. Mag.*, vol. 11, no. 3, pp. 22–28, Sep. 2016.
- [63] J. Romeu, A. Aguasca, J. Alonso, S. Blanch, and R. R. Martins, "Small UAV radio communication channel characterization," in Proc. European Conf. Ant. Propag. (EuCAP), 2010, pp. 1–5.
- [64] H. Kung, C.-K. Lin, T.-H. Lin, S. J. Tarsa, and D. Vlah, "Measuring diversity on a low-altitude UAV in a ground-to-air wireless 802.11 mesh network," in Proc. IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2010, pp. 1799–1804.
- [65] J. Zelený, F. P´erez-Font´an, and P. Pechač, "Initial results from a measurement campaign for low elevation angle links in different environments," in Proc. European Conf. Ant. Propag. (EuCAP), 2015, pp. 1–4.
- [66] E. Teng, J. Falcao, C. Dominguez, F. Mokaya, P. Zhang, and B. Iannucci, "Aerial sensing and characterization of three-dimensional RF fields," Univ. at Buffalo, cse. buffalo. edu, accessed: Sep, 2016.
- [67] Y. S. Meng and Y. H. Lee, "Measurements and characterizations of air-to-ground channel over sea surface at C-band with low airborne altitudes," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 60, no. 4, pp. 1943–1948, 2011.
- [68] J. Kunisch, I. De La Torre, A. Winkelmann, M. Eube, and T. Fuss, "Wideband time-variant air-to-ground radio channel measurements at 5 GHz," in Proc. European Conf. Ant. Propag. (EuCAP), 2011, pp. 1386–1390.
- [69] Qualcomm, "Leading the world to 5G: Evolving cellular technologies for safer drone operation," accessed: 2017-05-17. [Online]. Available:

<https://www.qualcomm.com/invention/technologies/lte/advanced-pro/cellular-drone-communication>

- [70] T. Patterson, "Google, Facebook, SpaceX, OneWeb plan to beam internet everywhere," accessed: 2017-05-17. [Online]. Available: <http://www.cnn.com/2015/10/30/tech/pioneers-google-facebook-spacex-oneweb-satellite-drone-balloon-internet/>
- [71] F. White, "Air-ground communications: history and expectations," IEEE Trans. Commun., vol. 21, no. 5, pp. 398–407, May 1973.
- [72] M. S. B. Mahmoud, C. Guerber, A. Pirovano, N. Larrieu et al., Aeronautical Air-Ground Data Link Communications. John Wiley & Sons, 2014.
- [73] M. Schnell, U. Epple, D. Shutin, and N. Schneckenburger, "LDACS: future aeronautical communications for air-traffic management," IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 5, pp. 104–110, May 2014.
- [74] RadioReference.com, "VHF/UHF military monitoring," accessed: 2017-05-31. [Online]. Available: [http://wiki.radioreference.com/index.php/VHF/UHF Military Monitoring](http://wiki.radioreference.com/index.php/VHF/UHF_Military_Monitoring)
- [75] E. Haas, "Aeronautical channel modeling," IEEE Trans. Vehic. Technol., vol. 51, no. 2, pp. 254–264, Mar. 2002.
- [76] B. G. Gates, "Aeronautical communications," Electrical Engineers - Part IIIA: Radio communication, Journal, vol. 94, no. 11, pp. 74–81, Mar. 1947.
- [77] D. F. Lamiano, K. H. Leung, L. C. Monticone, W. J. Wilson, and B. Phillips, "Digital broadband VHF aeronautical communications for air traffic control," in Proc. Integrated Commun., Navigation and Surveillance Conf., May 2009, pp. 1–12.
- [78] D. W. Matolak, "Air-ground channels models: Comprehensive review and considerations for unmanned aircraft systems," in Proc. IEEE Aerospace Conf., Mar. 2012, pp. 1–17.
- [79] C. Levis, J. T. Johnson, and F. L. Teixeira, Radiowave propagation: physics and applications. John Wiley & Sons, 2010.
- [80] G. M. Djuknic, J. Freidenfelds, and Y. Okunev, "Establishing wireless communications services via high-altitude aeronautical platforms: a concept whose time has come?" IEEE Commun. Mag., vol. 35, no. 9, pp. 128–135, Sep. 1997.
- [81] B. Kerczewski, "Spectrum for UAS control and non-payload communications," in Proc. IEEE Integrated Commun., Navigation and Surveillance Conf. (ICNS), 2013, pp. 1–21.
- [82] B. R. Jackson, "Telemetry, command and control of UAS in the National Airspace," in Proc. Int. Telemetry Conf. Int. Foundation for Telemetry, 2015.



- [83] M. Asadpour, B. V. den Bergh, D. Giustiniano, K. A. Hummel, S. Pollin, and B. Plattner, "Micro aerial vehicle networks: an experimental analysis of challenges and opportunities," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 7, pp. 141–149, Jul. 2014.
- [84] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 36–42, May 2016.
- [85] Z. Xiao, P. Xia, and X. g. Xia, "Enabling UAV cellular with millimeterwave communication: potentials and approaches," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 66–73, May 2016.
- [86] M. Ibrahim and H. Arslan, "Air-ground doppler-delay spread spectrum for dense scattering environments," in *Proc. IEEE Military Commun. Conf. MILCOM*, Oct. 2015, pp. 1661–1666.
- [87] R. Essaadali and A. Kouki, "A new simple unmanned aerial vehicle doppler effect RF reducing technique," in *Proc. IEEE Military Commun. Conf.*, Nov. 2016, pp. 1179–1183.
- [88] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, "Optimal LAP altitude for maximum coverage," *IEEE Wireless Commun. Letters*, vol. 3, no. 6, pp. 569–572, 2014.
- [89] L. Zeng, X. Cheng, C. X. Wang, and X. Yin, "Second order statistics of non-isotropic UAV rician fading channel," in *Proc. IEEE Vehic Technol. Conf. (VTC)*, Sep., 2017.
- [90] A. Ksendzov, "A geometrical 3D multi-cluster mobile-to-mobile MIMO channel model with Rician correlated fading," in *Proc. IEEE Int. Congress Ultra Modern Telecommun. (ICUMT) Conf.*, 2016, pp. 191–195.
- [91] S. M. Gulfam, S. J. Nawaz, A. Ahmed, and M. N. Patwary, "Analysis on multipath shape factors of air-to-ground radio communication channels," in *Proc. IEEE Wireless Telecomm. Symposium (WTS)*, 2016, pp. 1–5.
- [28] S. M. Gulfam, J. Syed, M. N. Patwary, and M. Abdel-Maguid, "On the spatial characterization of 3-D air-to-ground radio communication channels," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, 2015, pp. 2924–2930.
- [92] S. Kaul, K. Ramachandran, P. Shankar, S. Oh, M. Gruteser, I. Seskar, and T. Nadeem, "Effect of antenna placement and diversity on vehic. Network communications," in *Proc. IEEE Sensor, Mesh and Ad Hoc Commun. and Networks*, Jun. 2007, pp. 112–121.
- [93] A. R. Ruddle, "Simulation of far-field characteristics and measurement techniques for vehicle-mounted antennas," in *IEE Colloquium on Antennas for Automotives (Ref. No. 2000/002)*, 2000, pp. 7/1–7/8.
- [94] D. W. Matolak, H. Jamal and R. Sun, "Spatial and frequency correlations in two-ray SIMO channels," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC)*, May, 2017.
- [95] X. Gao, Z. Chen, and Y. Hu, "Analysis of unmanned aerial vehicle MIMO channel capacity based on aircraft attitude," *WSEAS Trans. Inform. Sci. Appl*, vol. 10, pp. 58–67, 2013.

- [96] C. Zhang and Y. Hui, "Broadband air-to-ground communications with adaptive MIMO data links," in Proc. IEEE Digital Avionics Sys. Conf. (DASC), 2011, pp. 4D4–1.
- [97] J. Yang, P. Liu, and H. Mao, "Model and simulation of narrowband ground-to-air fading channel based on Markov process," in Proc. Network Computing and Information Security Conf. (NCIS), vol. 1, 2011, pp. 142–146.
- [98] C. Bluemm, C. Heller, B. Fourestie, and R. Weigel, "Air-to-ground channel characterization for OFDM communication in C-band," in Proc. Int. Conf. Signal Processing Commun. Sys. (ICSPCS), 2013, pp. 1–8.
- [99] V. Vahidi and E. Saberinia, "Orthogonal frequency division multiplexing and channel models for payload communications of unmanned aerial systems," in Proc. Int. Conf. Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2016, pp. 1156–1161.
- [100] Z. Wu, H. Kumar, and A. Davari, "Performance evaluation of OFDM transmission in UAV wireless communication," in Proc. Southeastern Symposium Sys. Theory, (SSST), 2005, pp. 6–10.
- [101] W. Khawaja, O. Ozdemir, and I. Guvenc, "UAV air-to-ground channel characterization for mmwave systems," in Proc. IEEE Vehic. Technol. Conf. (VTC) Sep. 2017.
- [102] Dr R.B. Waterhouse Microstrip Patch Antennas: A Designer's Guide, RMIT University, Springer Science (C) 2003
- [103] Wahab Khawaja\_, Ismail Guvenc\_, David W. Matolaky, Uwe-Carsten Fiebigz, Nicolas Schneckenbergerz, A Survey of Air-to-Ground Propagation Channel Modeling for Unmanned Aerial Vehicles, North Carolina University
- [104] P. Alitalo, Introduction to Ansoft HFSS Helsinki University of Technology 17.4.2007
- [105] An Introduction to HFSS: Fundamental, Principles, Concepts and Use, © 2009 Ansoft, LLC
- [106] M. Jones, Ansys High Frequency Structure Simulator (HFSS) Tutorial, P.Northwest National Laboratory, 1/10/17
- [107] Rogers Corporation, RO4000 Series, High Frequency Circuit Materials
- [108] <http://www.antenna-theory.com/definitions/vswr.php>
- [109] Microstrip Patch Antenna Calculator <https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip-ant.aspx>
- [110] Antenna Theory and Microstrip Antennas - D. Fang (CRC, 2010)
- [111] Rodney Waterhouse-Microstrip Patch Antennas\_ A Designer's Guide-Springer (2010)