



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ

## Σχεδίαση και Προσομοίωση Κεραιών σε Μικρό Δορυφόρο CubeSat

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στρωματιάς Γρηγόριος

A.M: 03117685

Επιβλέπων : **Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος** Αθανάσιος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάϊος 2024





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ

## Σχεδίαση και Προσομοίωση Κεραιών σε Μικρό Δορυφόρο CubeSat

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων : **Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος**

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30<sup>η</sup> Απριλίου 2024

.....  
Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Παναγιώτης Κωττής  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Γ. Φικιώρης  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μαΐος 2024

.....  
Στρωματιάς Γρηγόριος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Στρωματιάς Γρηγόριος, 2024.

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 στο συγγραφέα στην ηλεκτρονική διεύθυνση [gregstrom123@yahoo.gr](mailto:gregstrom123@yahoo.gr).

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την επικοινωνία κεραιοσυστημάτων για την υποστήριξη δορυφορικών επικοινωνιών σε μικρούς δορυφόρους CubeSats. Τα CubeSats αποτελούν δομές μικρών δορυφόρων, οι γεωμετρικές διαστάσεις των οποίων ξεκινούν από πολύ μικρά μεγέθη με βάση την μετρική μονάδα 1U ( $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ). Προφανώς τα κόστη ανάπτυξης και εγκατάστασης τους σε τροχιά, είναι πολύ μικρότερα σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς δορυφόρους. Η επικοινωνία μεταξύ των CubeSats με χρήση των δορυφορικών τους καναλιών, μπορεί να επεκτείνει τη χρήση τους σχηματίζοντας αστερισμούς επικοινωνίας. Οι πιο σημαντικές εφαρμογές των CubeSats είναι η παρατήρηση της Γης, η εξερεύνηση του διαστήματος, μετεωρολογικές μελέτες, και η επικοινωνία.

Οι κεραίες των CubeSats, αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη της επικοινωνίας. Η σύγχρονη τεχνολογία επιτρέπει χρήση μεγάλου πλήθους κεραιών, με δυνατότητα αξιόπιστης κατασκευής και ανάλυσης της λειτουργίας. Η εργασία παρουσιάζει όλο το πλήθος τεχνολογικών θεμάτων που αφορούν στην ανάπτυξη των κεραιοσυστημάτων επικοινωνίας μεταξύ δορυφόρων “intersatellite links”, καθώς και με επίγεια συστήματα για ένα μικρό δορυφόρο CubeSat. Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται τα τεχνικά θέματα για το σχεδιασμό διατάξεων κεραιών σε CubeSats. Τα θέματα αφορούν σε διάφορους τύπους κεραιών, στις εφαρμογές τους, στα τεχνικά χαρακτηριστικά πόλωσης και πυροδότησης και στην επιλογή των συχνοτήτων λειτουργίας. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα τεχνικά θέματα για τις διατάξεις κεραιών CubeSat, που προορίζονται για την υποστήριξη εφαρμογών Internet of Things (IoT). Ένα από αυτά, είναι η δυνατότητα αναδιαμόρφωσης των διαγραμμάτων ακτινοβολίας της διάταξης, για επίτευξη σύνδεσης σε μεταβλητές γεωγραφικές θέσεις. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το περιβάλλον σχεδιασμού HFSS, το οποίο αποτελεί τη βάση για τη μελέτη και την ανάλυση της διάταξης κεραιών της εργασίας. Δίνονται οι προδιαγραφές σχεδιασμού της διάταξης και καθορίζονται οι επιλογές σχεδιασμού της. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το σχεδιαστικό μοντέλο της διάταξης, και η ανάλυση της στο πεδίο των συχνοτήτων. Ελέγχεται επίσης η επίτευξη των επιθυμητών προδιαγραφών επικοινωνίας για τις δορυφορικές και με επίγεια συστήματα επικοινωνίας (προς τα κάτω ζεύξεις). Το κεφάλαιο 5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα και τα γενικά συμπεράσματα από τη σχεδίαση της διάταξης. Το κεφάλαιο παραθέτει επίσης τους ανοικτούς τεχνολογικούς τομείς για μελλοντική έρευνα και εξέλιξη των διατάξεων επικοινωνίας σε CubeSats.

Οι τεχνολογίες των CubeSats είναι πολλά υποσχόμενες για την ανάπτυξη καθολικών εφαρμογών επικοινωνίας σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι εφαρμογές τους αναμένεται να επιδράσουν σημαντικά στο άμεσο μέλλον στην επικοινωνία και διασύνδεση. Για το λόγο αυτό, αποτελούν έναν εξαιρετικά σημαντικό τομέα έρευνας, ο οποίος εξελίσσεται παράλληλα με τις άλλες τεχνολογίες και επιστήμες.

Λέξεις κλειδιά

Κεραίες, Μικροί δορυφόροι, CubeSats, Intersatellite links, διάγραμμα ακτινοβολίας, εφαρμογές IoT/IoS, έρευνα διαστήματος, Ζώνες συχνότητας λειτουργίας, αναδιαμόρφωση λοβού ακτινοβολίας, δορυφορικά και επίγεια κανάλια μετάδοσης, HFSS

# Abstract

This diploma thesis studies the development of communication devices to support satellite and terrestrial communication on CubeSats. CubeSats are structures of small satellites, the geometric dimensions of which start from very small sizes based on the unit of measure 1U (10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup>). Obviously, the costs of developing and installing them in orbit are much lower compared to traditional satellites. The small satellites may communicate each other with intersatellite links creating a satellite constellation. The most significant applications of CubeSats are: earth observation, space exploration, meteorological studies, and global communication.

CubeSats antennas are the basic parts for the establishment of communication. Modern technology allows the use of a large number of antennas, with the ability to reliably build and analyze their operation. Current work presents the full range of technological issues related to the development of satellite and terrestrial channels on a CubeSat. Chapter 1 presents the technical issues for designing antenna devices on CubeSats. The issues concern different types of antennas, their applications, the technical characteristics of polarization and firing and the choice of operating frequencies. Chapter 2 presents the technical issues with CubeSat antenna devices designed to support Internet of Things (IoT) applications. One of them is the possibility of remodeling the radiation diagrams of the device, to achieve connection in variable geographical locations. Chapter 3 presents the HFSS design environment, which is the basis for the study and analysis of the antenna layout of the work. The design specifications of the device are given and its design options are defined. Chapter 4 presents the design model of the device, and its analysis in the field of frequencies. The achievement of the desired communication specifications for the intersatellite links and with terrestrial ground terminals is also examined. Chapter 5 presents the results and the general conclusions from the design of the CubeSat. The chapter also outlines the open technology areas for future research and development of CubeSats communication devices.

CubeSats technologies are promising for the development of universal communication applications worldwide. Their applications are expected to have a significant impact on communication and interconnection in the near future. For this reason, there is an extremely important field of research, which is evolving in parallel with other technologies and sciences.

## Key words

Antennas, Small Satellites, CubeSats, Intersatellite links, radiation diagram, IoT/IoS applications, space research, Operating frequency bands, beam reforming, satellite and terrestrial transmission channels, HFSS





## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου Κο. Παναγόπουλο Αθανάσιο τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας 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.....	- 9 -
Πίνακας Περιεχομένων.....	- 11 -
Κατάλογος Σχημάτων.....	- 14 -
Κατάλογος Πινάκων.....	- 16 -
1 Εισαγωγή στα θέματα των Μικρών Δορυφόρων .....	- 17 -
1.1 Εισαγωγή στις τεχνολογίες των Μικρών Δορυφόρων .....	- 17 -
1.2 Εφαρμογές των Μικρών Δορυφόρων .....	- 18 -
1.3 Απαιτήσεις των Κεραιών των Μικρο-Δορυφόρων .....	- 19 -
1.3.1 Συχνότητες Λειτουργίας για τις κεραιές των CubeSat .....	- 20 -
1.3.2 Πόλωση των κεραιών των CubeSats .....	- 21 -
1.3.3 Συμπαγές Μέγεθος και αναπτυξιμότητα των κεραιών των CubeSats .....	- 24 -
1.4 Υλικά κατασκευής των Κεραιών των Μικρο-Δορυφόρων .....	- 25 -
1.4.1 Κεραιές τυπωμένου κυκλώματος (boards) .....	- 25 -
1.4.2 Συμβατικά μέταλλα για την κατασκευή κεραιών .....	- 25 -
1.4.3 Λεπτές επιφάνειες (films) για την κατασκευή κεραιών.....	- 26 -
1.4.4 Μεμβράνες για την κατασκευή κεραιών .....	- 26 -
1.5 Τύποι κεραιών για εφαρμογές σε CubeSats .....	- 27 -
1.5.1 Κεραιές τύπου patch .....	- 27 -
1.5.2 Κεραιές τύπου μονοπόλου/διπόλου .....	- 28 -
1.5.3 Κεραιές με χρήση ανακλαστήρα .....	- 28 -
1.5.4 Ανακλαστικές Κεραιές .....	- 29 -
1.5.5 Σπειροειδείς και Ελικοειδείς Κεραιές .....	- 30 -
1.6 Μηχανισμοί ανάπτυξης για χρήση των κεραιών σε μικρο-δορυφόρους.....	- 31 -
1.6.1 Μηχανισμός ανάπτυξης πακέτου - ελατηρίου .....	- 31 -
1.6.2 Δομές ανάπτυξης τύπου ομπρέλας .....	- 32 -
1.6.3 Δομές ανάπτυξης τύπου φουσκώματος .....	- 32 -
1.7 Γενικά συμπεράσματα για την επιλογή κεραιών για CubeSats.....	- 33 -
2 CubeSats και Διαδίκτυο των Αντικειμένων (IoT) .....	- 37 -
2.1 Η υλοποίηση του Internet of Things μέσω CubeSats.....	- 37 -
2.2 CubeSats και IoT .....	- 37 -
2.3 Απαιτήσεις των Κεραιών για κάλυψη του IoT .....	- 38 -
2.4 Επιλογή Κεραιών .....	- 39 -
2.4.1 Κεραιές Ανακλαστήρων (Aperture Antennas).....	- 40 -
2.4.2 Μηχανικά Κατευθυνόμενες Κεραιές .....	- 41 -
2.4.3 Ηλεκτρονικά Κατευθυνόμενες Κεραιές .....	- 46 -
2.5 Γενικά Συμπεράσματα .....	- 49 -
3 Σχεδιασμός Κεραιών για CubeSats.....	- 51 -

3.1	Εισαγωγή .....	- 51 -
3.2	Το περιβάλλον ανάλυσης και προσομοιώσεων HFSS® .....	- 53 -
3.3	Προδιαγραφές Σχεδιασμού για τις κεραιές του CubeSat.....	- 57 -
3.4	Σχεδιασμός της συνολικής διάταξης κεραιών του CubeSat.....	- 58 -
3.4.1	Υλικό υποστρώματος.....	- 61 -
3.4.2	Γεωμετρικές Διαστάσεις των Κεραιών τύπου Patch.....	- 64 -
3.4.3	Χαρακτηριστικά του Άκρου τροφοδότησης.....	- 68 -
3.4.4	Επιλογή πλέγματος και συνοριακών συνθηκών για την επίλυση .....	- 68 -
3.4.5	Ανάλυση στο Πεδίο Συχνότητας .....	- 69 -
3.4.6	Αριθμητικά Αποτελέσματα Επίλυσης .....	- 69 -
4	Αποτελέσματα προσομοίωσης της διάταξης κεραιών του CubeSat .....	- 74 -
4.1	Προσομοίωση στο περιβάλλον HFSS® .....	- 74 -
4.2	Διαγράμματα Επίλυσης της διάταξης .....	- 74 -
4.3	Διαγράμματα λόγου στασίμων κυμάτων VSWR για τις κεραιές της διάταξης .....	- 77 -
4.4	Διαγράμματα Μακράν Πεδίου .....	- 78 -
4.5	Το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της διάταξης.....	- 79 -
4.6	Η κυκλική πόλωση για τη διάταξη δορυφορικής επικοινωνίας .....	- 81 -
4.7	Συμπεράσματα από το σχεδιασμό.....	- 82 -
5	Γενικά Συμπεράσματα από τη σχεδίαση διάταξης κεραιών για CubeSat .....	- 84 -
5.1	Συμπεράσματα από την υποστήριξη δορυφορικών και επίγειων καναλιών σε CubeSats .....	- 84 -
5.2	Επιλογές Κεραιών και άλλα τεχνικά θέματα για την υποστήριξη intersatellite links δορυφορικών και επίγειων καναλιών σε CubeSats.....	- 85 -
5.3	Μελλοντικές Τάσεις και Ανοικτά Ερευνητικά θέματα για υποστήριξη καναλιών σε CubeSats .....	- 87 -
	Παραρτήματα .....	- 89 -
	Παράρτημα Α – Κεραιές του Δορυφορικού Καναλιού .....	- 89 -
	A-1 Πίνακας Κερδών.....	- 89 -
	Βιβλιογραφία.....	- 90 -

# Κατάλογος Σχημάτων

- Σχήμα 1: Μία κεραία CubeSat, με χρήση ανακλαστήρα προσαρμοσμένη στη ζώνη Ka-Band (Deep Space Exploration)
- Σχήμα 2: Κυκλικά πολωμένη κεραία με ολίσθηση φάσης πυροδότησης (a) εμπρόσθια και (b) πλαϊνή άποψη της κεραίας
- Σχήμα 3: Συμπαγής κεραία με συμμετρικές σχισμές
- Σχήμα 4: Διπολική κεραία με υψηλή αντίσταση εισόδου η οποία επιτυγχάνει κυκλική πόλωση
- Σχήμα 5: Μία μεταλλική κεραία (Bulls Eye) για χρήση σε CubeSat
- Σχήμα 6: Οι κεραίες για τα ISARA (a) και Marco (b) CubeSats
- Σχήμα 7: Η κεραία τύπου “Bull-Eye”
- Σχήμα 8: Ο μηχανισμός ανάπτυξης κεραίας που χρησιμοποιήθηκε στο PolySat
- Σχήμα 9: Σύστημα ανάπτυξης κεραίας τύπου
- Σχήμα 10: Μοντέλο ανάπτυξης φουσκώματος
- Σχήμα 11: Μία περιληπτική αναφορά των κεραιών προς χρήση για το IoT. (a) Μηχανικά κατευθυνόμενες κεραίες (b) Ηλεκτρονικά κατευθυνόμενες κεραίες
- Σχήμα 12: Μία μηχανικά κατευθυνόμενη κεραία με γραμμική πόλωση που προορίζεται για λειτουργία στη ζώνη C συχνοτήτων. (a) το πρωτότυπο σχεδιασμού, (b) το κεντρικό τμήμα εκπομπής
- Σχήμα 13: Κεραία με ανακλαστήρα με κινητά περιστρεφόμενα τμήματα, κυκλική πόλωση, προοριζόμενη για λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων X. (a) το πρωτότυπο σχεδιασμού, (b) άποψη από το επάνω τμήμα με έμφαση στο μηχανισμό περιστροφής
- Σχήμα 14: Παρουσίαση της γραμμικά πολωμένης κεραίας RPA. (a) η πρωτότυπη μηχανική υλοποίηση, (b) προσομοίωση της λειτουργίας που αποδεικνύει τη μεταβολή θέσης της δέσμης
- Σχήμα 15: Μία μηχανικά ελεγχόμενη κεραία γραμμικής πόλωσης με χρήση μεταβλητής θέσης τροφοδότησης
- Σχήμα 16: Μία ηλεκτρονικά κατευθυνόμενη κεραία LP για τη ζώνη συχνοτήτων C, με χρήση varactor ολισθητή φάσης
- Σχήμα 17: Ηλεκτρονικά κατευθυνόμενη συστοιχία κεραιών CP με χρήση p-i-n διόδων. (a) το πρωτότυπο (b) η πλακέτα σχεδιασμού – ελέγχου με τη χρήση των διόδων (c) μετρήσεις από το πρωτότυπο (d) Τα παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας στα 29 GHz
- Σχήμα 18: Διακόπτης MEMS
- Σχήμα 19: Παρουσίαση του HFSS
- Σχήμα 20: Ο Adaptive Mesh Algorithm του HFSS®
- Σχήμα 21: Τέλεια Ηλεκτρικές και Μαγνητικές Επιφάνειες
- Σχήμα 22: Σύγκριση Πραγματικά μετρούμενων τιμών και αποτελέσματα προσομοίωσης με το HFSS®
- Σχήμα 23: Η διάταξη κεραιών του CubeSat στο περιβάλλον HFSS®
- Σχήμα 24: Κεραίες τύπου patch για τη δορυφορική επικοινωνία (επικεντρωμένη άποψη)
- Σχήμα 25: Κεραία τύπου patch για την επίγεια επικοινωνία (επικεντρωμένη άποψη)
- Σχήμα 26: Στοιχεία πυροδότησης των κεραιών του συστήματος CubeSat
- Σχήμα 27: Διάγραμμα μεταβολής της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού υποστρώματος συναρτήσει της θερμοκρασίας

Σχήμα 28: Διάγραμμα μεταβολής της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού υποστρώματος συναρτήσει της συχνότητας

Σχήμα 29: Επιλογές επίλυσης και ανάλυσης αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Σχήμα 30: Συντελεστής απορρόφησης ισχύος  $S(1,1)$  για την κεραία 1

Σχήμα 31: Συντελεστής απορρόφησης ισχύος  $S(1,1)$  για την κεραία 2

Σχήμα 32: Συντελεστής απορρόφησης ισχύος  $S(1,1)$  για την κεραία 3

Σχήμα 33: Συντελεστής απορρόφησης ισχύος  $S(1,1)$  για την κεραία 4

Σχήμα 34: Συντελεστής απορρόφησης ισχύος  $S(1,1)$  για την κεραία 5 (επίγειο κανάλι)

Σχήμα 35: Διάγραμμα λόγου στασίμων κυμάτων VSWR για τις κεραίες 1 - 4 συναρτήσει της συχνότητας

Σχήμα 36: Διάγραμμα λόγου στασίμων κυμάτων VSWR για την κεραία 5 συναρτήσει της συχνότητας

Σχήμα 37: Τρισδιάστατο πολικό διάγραμμα εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου για τη συνολική διάταξη κεραιών του CubeSat

Σχήμα 38: Τρισδιάστατο πολικό διάγραμμα συνολικού κέρδους για τη διάταξη κεραιών του CubeSat

Σχήμα 39: Διάγραμμα ακτινοβολίας της συνολικής διάταξης για τη γωνία  $\phi=0^\circ$

Σχήμα 40: Διάγραμμα ακτινοβολίας της συνολικής διάταξης για τη γωνία  $\phi=90^\circ$

Σχήμα 41: Διάγραμμα ακτινοβολίας της συνολικής διάταξης για τη γωνία  $\phi=270^\circ$

Σχήμα 42: Axial Ratio – AR για τη γωνία  $\phi=90^\circ$

Σχήμα 43: Axial Ratio – AR για τη γωνία  $\phi=270^\circ$

# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Λειτουργικά Χαρακτηριστικά για διάφορες εφαρμογές Μικρών Δορυφόρων

Πίνακας 2: Συνοπτική παρουσίαση των τύπων κεραιών που χρησιμοποιούνται στους μικρο-δορυφόρους

Πίνακας 3: Πίνακας προδιαγραφών για κεραιές του IoT

Πίνακας 4: Σύνοψη των χαρακτηριστικών για μηχανικά και ηλεκτρονικά κατευθυνόμενες κεραιές

Πίνακας 5: Προδιαγραφές για την σχεδιαζόμενη διάταξη κεραιών τύπου patch για την υποστήριξη δορυφορικού και επίγειου καναλιού σε CubeSat

Πίνακας 6: Τεχνικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του υλικού επιστρώσεως Rogers RO 4350

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά του διηλεκτρικού υλικού υποστρώματος Rogers RO 4000

Πίνακας 8: Προσφερόμενα διηλεκτρικά υποστρώματα κατασκευής από την βιβλιοθήκη του HFSS®

Πίνακας 9: Αναλυτικοί υπολογισμοί για τις διαστάσεις ορθογωνικής κεραιάς τύπου patch (λειτουργία στα 9.1 GHz)

Πίνακας 10: Αναλυτικοί υπολογισμοί για τις διαστάσεις ορθογωνικής κεραιάς τύπου patch (λειτουργία στα 3.9 GHz)

Πίνακας 11: Γεωμετρικές Διαστάσεις των κεραιών τύπου patch του CubeSat από το σχεδιαστικό παράθυρο του HFSS®

Πίνακας 12: Καθορισμός ζώνης συχνοτήτων ανάλυσης

Πίνακας 13: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Terminal Solution Data Report

Πίνακας 14: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Modal Solution Data Report

Πίνακας 15: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Fields Report

Πίνακας 16: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Far Fields Report

Πίνακας 17: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Emission Test Report

Πίνακας 18: Αποτελέσματα από την προσομοίωση της διάταξης των κεραιών τύπου patch για την υποστήριξη δορυφορικού και επίγειου καναλιού σε CubeSat





# 1

## Εισαγωγή στα θέματα των Μικρών Δορυφόρων

### **1.1 Εισαγωγή στις τεχνολογίες των Μικρών Δορυφόρων**

Γενικά, οι δορυφόροι είναι δομές που είναι ικανές να εκπέμπουν ή να λαμβάνουν σήματα από ή προς τη γη και το διάστημα. Λόγω της τοποθέτησής τους, είναι σε θέση να παρέχουν ευρεία κάλυψη περιοχών με μεγάλη εμβέλεια επικοινωνίας. Η ανάπτυξη των συμβατικών δορυφόρων συνεπάγεται σημαντικό οικονομικό κόστος, κόστος σε χρόνο και γενικότερα σε πόρους. Μια βιώσιμη εναλλακτική λύση σε σχέση με τους συμβατικούς δορυφόρους, είναι η ανάπτυξη μικρο-δορυφόρων (small satellites), όπως οι ορθογωνικοί δορυφόροι σε μορφή κύβου (CubeSats). Αυτού του τύπου οι δορυφόροι κοστίζουν λιγότερο, καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και επιτρέπουν γρήγορη ανάπτυξη τους σε σύντομα χρονικά πλαίσια. Ταυτόχρονα, είναι τεχνολογικά εφικτοί και αρκετά αξιόπιστοι, παρόμοια με τους συμβατικούς δορυφόρους.

Τα CubeSats είναι δορυφορικές δομές με όγκο  $10 \text{ cm}^3$  και μάζα μικρότερη από 1 kg, και συνήθως είναι κατασκευασμένοι από ελαφριά εξαρτήματα του εμπορίου [1]. Λόγω του μεγέθους και του βάρους τους, τα CubeSats είναι γνωστό ότι αποτελούν μέρος της οικογένειας των μικρο-δορυφόρων (picosatellite family). Ένα από τα πρώτα CubeSats αναπτύχθηκε από την Πολυτεχνική Σχολή της Καλιφόρνια (California Polytechnic State University - Cal Poly), σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ (Stanford University) το 1999 [1], και τέθηκε σε τροχιά το 2002 [2]. Η αποστολή του Cal Poly είχε στόχο να κάνει χρήση του διαστημικού σκάφους του Πανεπιστημίου Στάνφορντ (OPAL) ως τον προτεινόμενο εκτοξευτή για δορυφόρους τύπου CubeSat [1]. Αυτό το έργο ξεκίνησε με την ανάπτυξη του τυπικού εκτοξευτή γνωστού ως Poly Picosatellite Orbital Deployer (P-POD). Εκτός από τη δομή του CubeSat και τα θεωρητικά του κριτήρια, όπως το βάρος και το μέγεθός του, αυτού του τύπου οι δορυφόροι πρέπει να συμμορφώνονται και με τις προδιαγραφές του προγράμματος εκκίνησης για να διασφαλιστεί η επιτυχής ανάπτυξη του δορυφόρου στο διάστημα [1].

Οι απαιτήσεις για τον προγραμματιστή P-POD περιλαμβάνουν πτυχές όπως μία ελάχιστη απόσταση μεταξύ των άκρων του CubeSat από τη ράγα συγκράτησης, για να αποφεύγεται η τριβή και να εξασφαλιστεί ομαλή ανάπτυξη. Επιπλέον πρέπει να διατίθενται εκτεταμένοι χώροι για τους ηλιακούς συλλέκτες, τις κεραιές του, ή άλλα εξαρτήματα που απαιτούν για την ανάπτυξη τους πιθανή επέκταση μεγαλύτερη από 10 cm.

Από εκείνη την εποχή και μετά, αναπτύχθηκαν αρκετοί τύποι CubeSats σε διάφορα μεγέθη, όπως το τυπικό CubeSat 1U με κυβική μονάδα (διαστάσεων  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ), 3U, 6U και 12U που συνιστούν τριπλάσιες, εξαπλάσιες και δωδεκαπλάσιες μονάδες κύβου. Η επιλογή του μεγέθους του μικρού δορυφόρου, εξαρτάται από τα εγκατεστημένα εξαρτήματα και τις προδιαγραφές του εκκινητή. Οι μικρο-δορυφόροι τοποθετούνται συνήθως σε χαμηλή γήινη τροχιά (Low Earth Orbit - LEO). από τα 160 km έως τα 2000 km υψόμετρο [3], με τυπική διάρκεια ζωής αρκετών ετών λειτουργίας στο διάστημα [4]. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των εφαρμογών των picosatellites καθώς και του τύπου των κεραιών που διατίθενται στη βιβλιογραφία μικρο-δορυφόρων. Οι προκλήσεις που εμπλέκονται στην ανάπτυξή τους και οι καινοτόμες μέθοδοι που εφαρμόζονται σε αυτές τις κεραιές για την επίλυση του θέματος περιορισμένου χώρου και ισχύος σε τέτοιους συμπαγείς δορυφόρους, είναι επίσης ένα σημαντικό θέμα προς μελέτη. Οι υπάρχουσες εργασίες σε κεραιές μικρο-δορυφόρων συνοψίζονται συστηματικά, με έμφαση σχετικά με τις σημαντικές παραμέτρους που μπορούν να επιτευχθούν από αυτές, όπως η στοιβασία (packaging), η τοποθέτησή τους, το μέγεθος της συσκευασίας τους και η αναλογία διαστάσεων αποθήκευσης προς ανάπτυξη.

## **1.2 Εφαρμογές των Μικρών Δορυφόρων**

Η τεχνολογία των δορυφόρων χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές πτυχές της σημερινής ζωής, όπως η τηλεοπτική μετάδοση, τα δορυφορικά κινητά, τα ραντάρ καθώς και σε εφαρμογές απεικόνισης, και πρόγνωσης καιρού [5]. Ωστόσο, η πρόσφατη εισαγωγή των picosatellites επέτρεψε την εφαρμογή τους σε ένα μικρό τμήμα του πεδίου που υποστηριζόταν συμβατικά από μεγαλύτερους δορυφόρους, για την παρατήρηση και την πρόγνωση καιρού του διαστήματος. Λόγω του μεγέθους και του χρόνου ανάπτυξης τους, το κόστος έχει μειωθεί σημαντικά, σε σύγκριση με τους συμβατικούς δορυφόρους. Οι απαιτήσεις των CubeSats έχουν αναθεωρηθεί σημαντικά σε πολλές ερευνητικές εργασίες [4], [6], [7]. Μια γενική επισκόπηση των CubeSats και των δυνατοτήτων τους δίνεται στην ερευνητική εργασία [6]. Εν τω μεταξύ, μια γενική έρευνα για τις διαστημικές επικοινωνίες μέσω CubeSat έχουν μελετηθεί στις εργασίες [4], [7]. Τα CubeSats εξακολουθούν να βελτιώνονται και να προσαρμόζονται σε νέες χρήσεις και πιο συγκεκριμένες και προηγμένες εφαρμογές. Αναλυτικότερα, ένα σύνολο εφαρμογών που βασίζονται στην τεχνολογία των μικροδορυφόρων είναι:

- Παρατήρηση της Γης και Κλιματολογικών Συνθηκών (Earth and Climate Observation)
- Πρόβλεψη Καιρού από το Διάστημα (Space Weather Forecasting)
- Έρευνα του Διαστήματος (Space Research)
- Επικοινωνίες (Communications)






Στη συνέχεια, στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά (συχνότητες λειτουργίας, ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων και κέρδη των κεραιών) για τις αντίστοιχες εφαρμογές των μικροδορυφόρων:

Types of application	Operating frequency band		Communication performances	
	Application-specific frequency (range)	Communication with ground station (range)	Required transmitting gain	Required data rate
Earth and climate observation	L-band (1-2 GHz), Millimeter wave	VHF band (130-170 MHz), UHF band (400-450 MHz), S-band (2-4 GHz)	Minimum 17 dB	More than 9600 bps
Space weather forecasting	X-band (8-12 GHz)	S-band (2-4 GHz)	26 dB & 37 dB	Up to 400 kbps
Space research	X-band (8-12 GHz)	VHF band (130-170 MHz), UHF band (400-450 MHz)	17 dB & 37 dB	More than 32 kbps
Communications	K-band (18-27 GHz)	K-band (18-27 GHz)	45 dB	More than 6 Mbps

Πίνακας 1: Λειτουργικά Χαρακτηριστικά για διάφορες εφαρμογές Μικρών Δορυφόρων [65]

### 1.3 Απαιτήσεις των Κεραιών των Μικρο-Δορυφόρων

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος επικοινωνίας ενός CubeSat καθορίζεται από ανάλυση του προϋπολογισμού ισχύος ζεύξης (Link budget power analysis). Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία που καθορίζουν τις απώλειες σύνδεσης είναι η απόδοση της κεραίας. Το μέγεθος της κεραίας σε ένα CubeSat εξαρτάται από το απαιτούμενο κέρδος και τη συχνότητα λειτουργίας.

Antenna model	Deployable (yes/no)	Frequency band	Size dimension	Stow size/location	Stow-to-deployment ratio	Gain	Ref
	No	V-band (60GHz)	10 cm × 10 cm × 0.32 cm	NA	NA	15.4 dBi	[57]
	Yes	Ka-band (26 GHz)	33.9 cm × 82.6 cm	On chassis	1:1	33.5 dBi	[72, 73]
	Yes	X-band (8.425GHz)	33.3 cm × 19.9 cm	On chassis	1:1.1	28 dBi	[73]
	Yes	Ka-band (35.75 GHz)	50 cm × 22.8 cm	1.5 U (10 × 10 × 5) cm <sup>3</sup>	1:1.5	42.6 dBi	[71]
	Yes	S-band (2.4GHz)	100 cm × 50 cm	0.5 U (10 × 10 × 5) cm <sup>3</sup>	1:10	6.48 dBi	[36]

Πίνακας 2: Συνοπτική παρουσίαση των τύπων κεραιών που χρησιμοποιούνται στους μικροδορυφόρους [65]

Λόγω της ανάγκης για συστοιχίες κεραιών πολλαπλών στοιχείων για την ενίσχυση του κέρδους, η χρήση τεχνικών σμίκρυνσης είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση κατάλληλου συνολικού μεγέθους της κεραίας, όταν αυτή προορίζεται για υλοποίηση σε

ένα μικρο-δορυφόρο. Επιπλέον, η κεραία πρέπει να παρουσιάζει κατάλληλη πόλωση για να διασφαλίσει την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης ακόμη και αν αυτή είναι σχεδιασμένη σε συμπαγές μέγεθος. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτές τις προκλήσεις, οι κεραίες που επιλέγονται για να πληρούν τις απαιτήσεις των μικρο-δορυφόρων, αναμένεται να είναι μάλλον διακριτές σε σχέση με αυτές που εφαρμόζονται στους συμβατικούς δορυφόρους. Μία επισκόπηση των κεραιών που χρησιμοποιούνται κατά το σχεδιασμό μικρο-δορυφόρων παρουσιάζονται στον προηγούμενο πίνακα.

### **1.3.1 Συχνότητες Λειτουργίας για τις κεραίες των CubeSat**

Μια σειρά τυποποιημένων συχνοτήτων λειτουργίας χρησιμοποιείται για την επικοινωνία των συστημάτων CubeSat. Η πρώιμη ανάπτυξη των CubeSats περιλάμβανε τη χρήση ερασιτεχνικών ραδιοσυχνοτήτων στις ζώνες των VHF και UHF, λόγω του χαμηλού κόστους και της υψηλής προσβασιμότητας [1]. Οι ζώνες UHF και VHF επιλέχθηκαν επίσης ως συχνότητες επικοινωνίας, ειδικά για τηλεμετρία, παρακολούθηση και μετάδοση εντολών (TT&C) σε CubeSats [8]. Μετά από αρκετά χρόνια από την πρώτη υλοποίηση των CubeSats, έχουν αναπτυχθεί διάφορες κεραίες σε διαφορετικές λειτουργικές συχνότητες, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις εφαρμογές του μικρο-δορυφόρου.

Η ευρεία χρήση των ζωνών UHF και VHF για δεδομένα και φωνητικές επικοινωνίες αποτελεί μία σημαντική βάση για την επικοινωνία σε δίκτυα CubeSat (π.χ. το project TURSKA CubeSat). Η ανάπτυξη του συστήματος κεραίας χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι ο δέκτης που αποτελείται από διπολικές κεραίες  $\lambda/4$  με πλάτος 3 mm και μήκος 50 cm και λειτουργεί στα 145 MHz. Το δεύτερο τμήμα είναι ένας πομπός με κεραία τριών λειτουργιών, για την κατερχόμενη ζεύξη της επικοινωνίας με το σταθμό βάσης, ως μόντεμ και αναμεταδότης. Αυτή η κεραία λειτουργεί στα 435 MHz και αποτελείται από δίπολα  $6\lambda/4$  παρόμοια με την κεραία του δέκτη. Ως εκ τούτου, οι δέκα συνολικά κεραίες που χρησιμοποιούνται για τις UHF και VHF ζώνες επικοινωνίας, αυξάνουν το κόστος του συστήματος και την πολυπλοκότητα του [9].

Εν τω μεταξύ, για χρήση της ζώνης συχνοτήτων S (S-band) αναπτύχθηκε μια κεραία για το CubeSat, από την ομάδα του MIT, χρησιμοποιώντας την ιδέα της «φουσκωτής» κεραίας. Αυτή η κεραία που λειτουργεί στα 2.45 GHz, με κέρδος 10 dB, αναπτύχθηκε με σκοπό την επέκταση της εξερεύνησης από Γεωστατική τροχιά (Geostationary Earth Orbit - GEO) σε σύνδεση με τις πλατφόρμες LEO (Low Earth Orbit) [10]. Προστέθηκε επιπλέον, ένας ανακλαστήρας στη δομή της κεραίας, για βελτιωμένο κέρδος απόδοσης [11], ο οποίος είχε ως αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλού ρυθμού δεδομένων επικοινωνίας [10]. Αυτό στη συνέχεια επέκτεινε την απόσταση του συστήματος από LEO σε GEO [11].

Εκτός από τα UHF, VHF και την S-band, ένα CubeSat με χρήση της ζώνης K (K-band) για εφαρμογές ραντάρ, υλοποιήθηκε για έρευνα στο βαθύ διάστημα (deep space), από τη NASA. Η κεραία σχεδιάστηκε με έναν ανακλαστήρα τύπου «ομπρέλας» και για την τροφοδοσία της χρησιμοποιήθηκε σχήμα horn, τοποθετημένο στο κέντρο της κεραίας, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Η συχνότητα λειτουργίας καθορίστηκε στα 34 GHz με κέρδος 42.8 dBi [12].



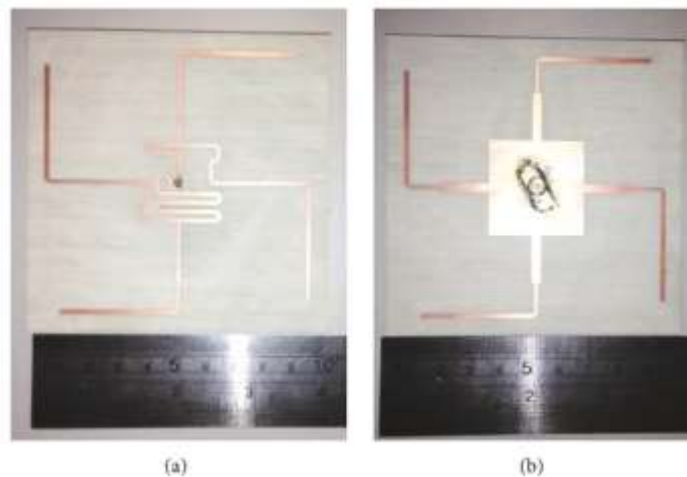
Σχήμα 1: Μία κεραία CubeSat, με χρήση ανακλαστήρα προσαρμοσμένη στη ζώνη Ka-Band (Deep Space Exploration) [12]

### 1.3.2 Πόλωση των κεραιών των CubeSats

Εκτός από την ανάγκη των κεραιών για την επίτευξη υψηλών κερδών στην στοχευόμενη λειτουργική συχνότητα, η πόλωση τους είναι εξίσου σημαντική. Οι Κυκλικά πολωμένες κεραίες (Circular Polarization - CP), χρησιμοποιούνται συνήθως σε διάφορες εφαρμογές δορυφορικής επικοινωνίας λόγω της ικανότητάς τους να λαμβάνουν τυχαία πολωμένα σήματα, καλύτερα από μια γραμμικά πολωμένη κεραία. Αυτό είναι επωφελές για επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού.

Ωστόσο, ο σχεδιασμός τόσο υψηλού κέρδους, ευρυζωνικότητας, συνδυαζόμενο με κυκλική πόλωση, είναι μία σημαντική πρόκληση. Ένας τύπος πρωτοτύπων κεραιών που ικανοποιούν τις παραπάνω δύο απαιτήσεις παρουσιάζονται στην ερευνητική εργασία [13], με μεγάλο εύρος συντονισμού ως προς την σύνθετη τους αντίσταση, της τάξης του 50.2% και εύρος ζώνης της τάξης του 27% ως προς την κεντρική κατεύθυνση του λοβού λειτουργίας τους. Εν τω μεταξύ, τα προτεινόμενα σχέδια που προτάθηκαν στις [14] και [15], παρήγαγαν ένα εύρος ζώνης 3-dB μεγαλύτερο από 120°. Εκτός αυτού, ένα υψηλό κέρδος κυκλικά πολωμένης κεραίας που διερευνήθηκε στην [16], επέδειξε ένα κέρδος άνω των 10 dBic.

Μια πιο εξελιγμένη κυκλικά πολωμένη σχεδίαση κεραίας υλοποιήθηκε μέσω της τεχνικής διαδοχικής τροφοδοσίας με διαφορά φάσης [15]. Με τη σχεδίαση επιτεύχθηκε περισσότερο από 10% του εύρους ζώνης σύνθετης αντίστασης, με ικανοποιητικό εύρος αξονικής ζώνης. Η κεραία σχεδιάστηκε με τεχνικές μικρογραφίας ( $0.533\lambda_0 \times 0.533\lambda_0$ ) σε υπόστρωμα τύπου Rogers RO4003D. Η κεραία παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2: Κυκλικά πολωμένη κεραία με ολίσθηση φάσης πυροδότησης (a) εμπρόσθια και (b) πλαϊνή άποψη της κεραίας [14]

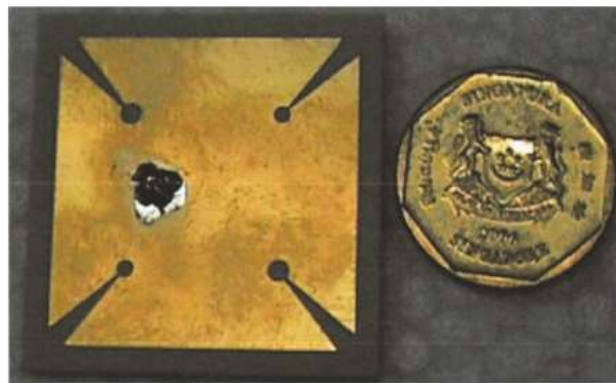
Το υλικό υποστρώματος της κεραίας έχει σχετική ηλεκτρική διαπερατότητα 3.55 και πάχους 0.813 mm. Η κεραία συντονίστηκε στη συχνότητα των 1.6 GHz [15]. Το σχέδιο της αποτελείται από δύο ζεύγη συμπληρωματικών διπολικών κεραιών που βρίσκονται παράλληλα σε κάθε επιφάνεια του υποστρώματος. Όπως παρουσιάστηκε και στο προηγούμενο σχήμα, κάθε δίπολο συνδέεται με έναν μετατοπιστή φάσης στο κέντρο του υποστρώματος. Κάθε βραχίονας σχεδιάστηκε με διαφορά φάσης  $90^\circ$  για την τροφοδοσία της κυκλικά πολωμένης κεραίας. Οι τέσσερις λωρίδες συνδυάστηκαν με μία κεραία τύπου patch, επιτρέποντας στο δίπολο να λειτουργεί ισορροπημένα. Η τελική δομή εμφάνισε εύρος ζώνης κέρδους 10 dB σε 31% ως προς τον κύριο λοβό, και εύρος ζώνης αξονικού λόγου 3 dB της τάξης του 1.6%, με μέγιστο κέρδος περίπου στα 5 dBic [15].

Μια άλλη τεχνική για την επίτευξη υψηλού κέρδους και μεγάλου εύρους ζώνης για κυκλικά πολωμένες κεραίες, είναι η διαδοχικά περιστρεφόμενη τροφοδοσία για να καταστεί δυνατή η κυκλική πόλωση, σε συνδυασμό με αυξημένα κέρδη [17], [18], [19], [20]. Αυτή η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί γενικά, χρησιμοποιώντας έναν αριθμό πανομοιότυπων στοιχείων (στοιχειοκεραία), τα οποία τροφοδοτούνται διαδοχικά χρησιμοποιώντας διαφορά φάσης της τάξης των  $90^\circ$  ως προς την πυροδότηση, με στόχο την επίτευξη κυκλικής πόλωσης. Για παράδειγμα, ο σχεδιασμός της κεραίας αυτής της μορφής στην ερευνητική εργασία [17], αποτελείται από τέσσερις διαδοχικά περιστρεφόμενες κυκλικές κεραίες (σε διαμόρφωση  $2 \times 2$ ) και διαδοχικά περιστρεφόμενη τροφοδοσία πυροδότησης. Το κυκλικό σύστημα τροφοδοσίας επιλέγεται για ελαχιστοποίηση της ασυνέχειας μεταξύ της τροφοδοσίας, σε κάθε τμήμα της στοιχειοκεραίας. Οι κεραίες της διάταξης είναι τοποθετημένες κάθετα μεταξύ τους για να δημιουργήσουν την επιθυμητή κυκλική πόλωση. Το τελικό σχέδιο ανέφερε σημαντικές βελτιώσεις· στο κέρδος από τα 3.6 dBic στα 8.7 dBic για τη συστοιχία, με εύρος ζώνης σύνθετης αντίστασης 3.8 GHz, που λειτουργεί στη ζώνη από 4.2 έως 8 GHz [42]. Ωστόσο, το εύρος ζώνης του αξονικού λοβού είναι 3 dB περίπου στο 1 GHz, σε αντίθεση με το 1.9 GHz για την στοιχειοκεραία [17].

Ομοίως, η κυκλική πολωμένη κεραία που περιγράφεται στο [20], αποτελείται από τέσσερις πανομοιότυπες ορθογώνιες κεραίες τύπου patch, με τα κέντρα τροφοδότησης τους να βρίσκονται στην επάνω και κάτω επιφάνεια του υποστρώματος αντίστοιχα, με συνολικό μέγεθος  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Κάθε κεραία τύπου patch τοποθετείται ορθογώνια σε κάθε

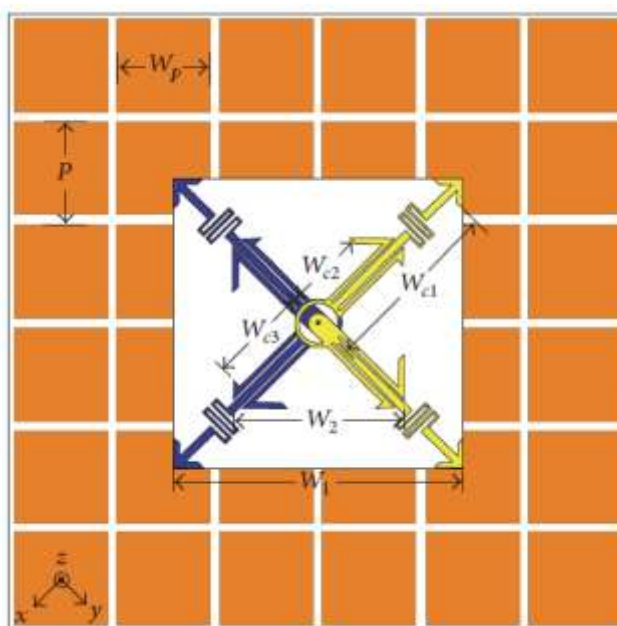
πλευρά ενός τετραγώνου. Διαφορά φάσης  $90^\circ$  μεταξύ των δύο ορθογώνιων ενεργοποιήθηκε για κάθε ζεύγος απέναντι κεραιών τύπου patch, επιτυγχάνοντας κυκλική πόλωση στην οπίσθια πλευρά [20]. Το δίκτυο τροφοδοσίας είναι τυπικά σχεδιασμένο χρησιμοποιώντας μετασχηματιστές  $\lambda/4$  που προσαρμόζονται στη δομή του διαιρέτη ισχύος Wilkinson. Κάθε κεραία patch, τροφοδοτείται εξίσου από το δίκτυο τροφοδοσίας αφού η ισχύς εισόδου διαιρείται χρησιμοποιώντας τρεις διαιρέτες ισχύος. Η κεραία λειτουργεί στο 2.45 GHz με κέρδος 5.9 dBi για κάθε στοιχείο patch, το οποίο βελτιώνεται στα 7.3 dBi για την πλήρη συστοιχία, με ομοιόμορφη αξονική ακτινοβολία.

Μία κυκλικά πολωμένη κεραία θα μπορούσε επίσης να επιτευχθεί σε μια ενιαία κεραία τύπου patch, εφαρμόζοντας στοιχεία στην επιφάνειά της όπως αποκομμένες νησίδες υλικού, σχισμές ή παρασιτικά στοιχεία. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί, όπου μια κεραία microstrip με πολλές πρόσθετες σχισμές σε κάθε γωνία της κεραίας (για να καταστεί δυνατή η κυκλική πόλωση) με συμπαγές μέγεθος [21]. Σύγκριση της ίδιας κεραίας σε δύο διαφορετικά υποστρώματα, FR-4 και Rogers RO4003C, δείχνει ότι το τελευταίο αποδίδει καλύτερα σε σύγκριση με το υπόστρωμα FR-4, από άποψη κέρδους, χωρίς αλλαγές στο μέγεθος της. Το εύρος ζώνης σύνθετης αντίστασης για την υλοποίηση σε FR-4 ήταν 3.85% με 3-dB αξονικό εύρος ζώνης 1.5% και μέγιστο κέρδος της τάξης των 0.8 dBic. Η κεραία με χρήση υποστρώματος Rogers RO4003C οδήγησε σε ένα εύρος ζώνης σύνθετης αντίστασης στο 1.5% και αξονικό εύρος ζώνης 0.5% και μέγιστο κέρδος της τάξης των 3.4 dBic [21], γεγονός που αποδεικνύει ότι το υπόστρωμα επηρεάζει σημαντικά το κέρδος της κεραίας που προκύπτει.



Σχήμα 3: Συμπαγής κεραία με συμμετρικές σχισμές [21]

Μια άλλη μέθοδος για τη δημιουργία κυκλικής πόλωσης, είναι η χρήση διασταυρούμενης διπολικής κεραίας που τροφοδοτείται με ίσο πλάτος σήματος και  $90^\circ$  διαφορά φάσης στην πυροδότηση της [22], [23], [25], [25]. Το δίπολο που απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί, αποτελείται από γραμμές καθυστέρησης με διαφορά φάσης  $90^\circ$ . Αυτή η δομή επικεντρώνεται στο σχέδιο της κεραίας για να σχηματίσει ένα σχήμα δακτυλίου. Και τα δύο μέρη της διπολικής κεραίας, διασταυρώθηκαν μεταξύ τους με χρήση ενός δακτυλίου στο κέντρο, που τροφοδοτείται από ένα ομοαξονικό καλώδιο χαρακτηριστικής αντίστασης  $50 \Omega$  [22], [23]. Το δίπολο στην πάνω και την κάτω πλευρά του υποστρώματος συνδέεται με το εσωτερικό και το εξωτερικό στρώμα του ομοαξονικού καλωδίου, αντίστοιχα. Με κάποια τροποποίηση στη δομή του διπόλου, επιτυγχάνει κυκλική πόλωση με αξονική αναλογία μικρότερη από 3 dB.



Σχήμα 4: Διπολική κεραία με υψηλή αντίσταση εισόδου η οποία επιτυγχάνει κυκλική πόλωση [23]

### 1.3.3 Συμπαγές Μέγεθος και αναπτυξιμότητα των κεραιών των CubeSats

Ίσως το πιο κρίσιμο χαρακτηριστικό των κεραιών που προορίζονται για CubeSats, είναι το συμπαγές μέγεθος τους. Δεν υπάρχει ακόμη μια σειρά τυποποιημένων κεραιών που να λειτουργούν σε προκαθορισμένες συχνότητες για CubeSats, και φαίνεται σχεδόν αδύνατο να σχεδιαστεί μια κεραία ικανή να εξυπηρετεί όλες τις συχνότητες λειτουργίας. Επομένως, οι τεχνικές μικρογραφίας για το σχεδιασμό κεραιών είναι σημαντικές, ειδικά όταν σχεδιάζονται κεραιές που λειτουργούν στις χαμηλότερες ζώνες των συχνοτήτων VHF - UHF, λόγω της εγγενούς συσχέτισης τους με το μήκος κύματος λειτουργίας. Τεχνικές μικρογραφίας για το σχεδιασμό κεραιών που καταλήγουν σε ηλεκτρικά μικρές σε μέγεθος κεραιές, είναι εξαιρετικά επιθυμητές, ειδικά σε εφαρμογές με περιορισμένους χώρους. Αρκετές περιπτώσεις τέτοιων τεχνικών, περιλαμβάνουν την αναδίπλωση, τη σπειροειδή γεωμετρία και τη γεωμετρία μαιάνδρου για κεραιές γραμμής [15], [26], [27]. Εκτός από το μέγεθος, απαιτούνται επίσης υψηλά χαρακτηριστικά κέρδους και κυκλικής πολώσεως για κεραιές που προορίζονται για CubeSats. Μια μέθοδος για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, είναι να ενεργοποιηθεί η αποθήκευση της κεραίας πριν από την ανάπτυξη της για λειτουργία. Ένα παράδειγμα αυτής της τεχνικής στη ζώνη UHF, είναι μία αναπτύξιμη ελικοειδής κεραία με κέρδος περίπου 13 dBi για λειτουργία στη συχνότητα των 400 MHz [28]. Μία τέτοια κεραία σχεδιάστηκε για λειτουργία σε τελικό μέγεθος μεγαλύτερο από το μέγεθος του CubeSat. Η χρήση ευέλικτων/εύκαμπτων υλικών επιτρέπει το στοίβαγμα (packaging) της κεραίας, απασχολώντας μόνο τον μισό διαθέσιμο χώρο στο CubeSat, πριν από την ανάπτυξη της [28]. Παρά το γεγονός ότι ο σχεδιασμός μικρών κεραιών που λειτουργούν στις ζώνες S και K δεν αποτελούν τεχνολογικές προκλήσεις, σε σύγκριση με τη ζώνες VHF και UHF, όπου το μέγεθος της κεραίας σε σύγκριση με το μήκος κύματος είναι αυτό που καθορίζει κυρίως το κέρδος. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στην εργασία [29], όπου υπήρχε μια κεραία ζώνης V με συχνότητα λειτουργίας στα 60 GHz, η οποία αναπτύχθηκε για να ταιριάζει στο πλαίσιο του



CubeSat που τη μετέφερε, με αποτέλεσμα κέρδους 15.4 dBi. Η κεραία αυτή χρησιμοποιείται για διαδορυφορική σύνδεση επικοινωνίας μεταξύ CubeSats [29].

Από την άλλη πλευρά, μια μικρού μεγέθους κεραία τύπου patch, είναι ικανή να παράγει υψηλά κέρδη με την ενσωμάτωση ενός μεγάλου ανακλαστήρα, με κόστος όμως το συνολικό της μέγεθος. Ωστόσο, το μεγάλο μέγεθος του ανακλαστήρα μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας εύκαμπτα υλικά, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να αποθηκευτούν πριν από την ανάπτυξη της κεραίας στο διάστημα, για να προσαρμοστεί στο μέγεθος του CubeSat [10]. Ένα ανάλογο παράδειγμα είναι μία κεραία για λειτουργία στην S-band με κέρδος της τάξης των 10 dBi που καταδεικνύεται στο [10], η οποία επέκτεινε το εύρος επικοινωνίας ενός δορυφόρου τύπου LEO σε τύπο GEO.

Εκτός από την ηλεκτρική κατανάλωση μίας μικρής κεραίας, ένα συμπαγές έξυπνο σχήμα έχει επίσης προταθεί, παράγοντας έτσι μία κεραία η οποία διαθέτει χαμηλό κόστος και καταναλώνει χαμηλή ισχύ [30]. Αυτό το πρωτότυπο κεραίας λειτουργεί μεταξύ 2.3 GHz και 2.55 GHz. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κεραία έχει δυνατότητα σάρωσης δέσμης 360° στο οριζόντιο επίπεδο, επιτυγχάνοντας κέρδος 4.0 dBi και αναλογία κέρδους έμπροσθεν προς οπίσθια δέσμη, της τάξης των 20 dB.

#### **1.4 Υλικά κατασκευής των Κεραίων των Μικρο-Δορυφόρων**

Το υλικό κατασκευής μίας κεραίας είναι μια από τις πιο σημαντικές πτυχές στην ανάπτυξη της. Εκτός από την ανάγκη συμμόρφωσης με τη λειτουργία του περιβάλλοντος χώρου, πρέπει επίσης να καθοριστεί η επιλογή υλικού σύμφωνα με τη συχνότητα λειτουργίας, τις απαιτήσεις κέρδους, και κατά πόσον χρειάζεται μια σταθερή ή αναπτύξιμη (εύκαμπτη) κεραία. Αν το τελευταίο αποτελεί και το σημαντικότερο σχεδιαστικό χαρακτηριστικό, πιθανά εύκαμπτα υλικά όπως το πολυαμίδιο Kardon και οι ταινίες Mylar είναι κατάλληλες για το σχεδιασμό. Εκτός αυτού, συμβατικά άκαμπτα υποστρώματα και φακοί (lens) μπορούν επίσης να επιλεγούν, λόγω της καταλληλότητάς τους για χρήση σε διαστημικές εφαρμογές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά αυτά τα υλικά και η χρήση τους στο σχεδιασμό κεραίων για CubeSats.

##### **1.4.1 Κεραίες τυπωμένου κυκλώματος (boards)**

Τα συμβατικά υποστρώματα είναι δημοφιλή λόγω της μηχανικής τους ευρωστίας στα διαστημικά περιβάλλοντα. Παρά συνήθως το μικρό τους πάχος, είναι εμπορικά και καλά υλικά, με αξιόπιστα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, όπως π.χ. τα υποστρώματα Rogers τα οποία μπορούν να αντέξουν το υψηλό θερμικό φορτίο κατά την πρόωση από το έδαφος στο διάστημα [20], [31]. Εκτός από το πάχος, αυτά τα υλικά πρέπει επίσης να είναι ελαφριά για να εξασφαλίσουν αποτελεσματική λειτουργία στο χώρο. Ο σχεδιασμός στο πλαίσιο CubeSat στο [20], είχε μέγεθος 39.7 mm (μήκος) × 12 mm (πλάτος) και πάχη 1.52 mm και 0.508 mm. Η σχετική διαπερατότητα του υποστρώματος με τιμή 2.33 οδήγησε σε κέρδος της τάξης των 7.3 dBi.

##### **1.4.2 Συμβατικά μέταλλα για την κατασκευή κεραίων**

Ένας αριθμός παλαιότερων κεραίων σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας συμβατικά αγωγίμα και άκαμπτα υλικά. Παρείχαν απαγωγή θερμότητας, μηχανική στιβαρότητα και πιθανώς μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Το αλουμίνιο είναι ένα τέτοιο υλικό, το οποίο

χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό κεραιών σε CubeSats [32]. Μία τέτοια κεραία παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5: Μία μεταλλική κεραία (Bulls Eye) για χρήση σε CubeSat [32]

Αυτό το σχέδιο που ονομάζεται "Bull's Eye", είναι ενσωματωμένο στο πλαίσιο, χρησιμοποιώντας δακτυλίους 6 εσοχών και η συνολική διάταξη έχει ως αποτέλεσμα τη λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων των 60 GHz. Ο αριθμός των δακτυλίων με εσοχή μετατοπίζει τη συχνότητα είτε προς τα επάνω είτε προς τα κάτω, και ο αριθμός των επτά δακτυλίων επιλέχθηκε λόγω των προδιαγραφών λειτουργίας στο συγκεκριμένο CubeSat [32]. Επιπλέον, η κεραία και οι προδιαγραφές της συνοψίζονται στον Πίνακα 2.

#### **1.4.3 Λεπτές επιφάνειες (films) για την κατασκευή κεραιών**

Το φιλμ Mylar έχει χρησιμοποιηθεί από τη NASA, για το Echo Balloons project [58] και πολλά άλλα έργα [11], [33], [34], λόγω της ευκολίας διαθεσιμότητάς του. Εκτός αυτού, ένα από τα πιο δημοφιλή υλικά που χρησιμοποιούνται για μικρές κεραιές, είναι η ταινία Karton Polyimide. Στα πλεονεκτήματά του συγκεκριμένου υλικού, περιλαμβάνονται η ευελιξία, η υψηλή αντοχή σε έναν αριθμό χημικών διαλυτών και η συμβατότητα του με υψηλές θερμοκρασίες, που κυμαίνονται από  $-269^{\circ}\text{C}$  έως  $+400^{\circ}\text{C}$ , καθιστώντας το κατάλληλο για διαστημικές εφαρμογές. Παρά το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιήθηκε για δορυφορικές κεραιές, αυτό το υλικό χρησιμοποιήθηκε πρόσφατα στην ανάπτυξη ενός διπόλου, χρησιμοποιώντας μία μέθοδο εκτύπωσης inkjet [35]. Οι έρευνες έδειξαν ότι το πρωτότυπο της κεραίας μπορεί να λυγίσει όταν εφαρμόζονται καμπτικές δυνάμεις, χωρίς μόνιμες παραμορφώσεις στην επιφάνειά του [35], [36], [37], [38], και δυνητικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό για κατασκευή κεραίας σε ένα περιβάλλον CubeSat.

#### **1.4.4 Μεμβράνες για την κατασκευή κεραιών**

Οι μεμβράνες έχουν χρησιμοποιηθεί ως ανακλαστές πρόσφατα στις δορυφορικές επικοινωνίες. Μία τέτοια μεμβράνη για την κατασκευή ανακλαστήρα έχει ολική ανακλαστική επιφάνεια με διάμετρο 300 cm, και στηρίζεται από ένα κουβούκλιο

κατασκευασμένο από 40 τεμάχια καλωδίων σύνδεσης, για να επιτευχθεί αναλογία μήκους εστίασης προς το διάφραγμα της διάταξης, της τάξης των 0.5 (focus length to aperture ratio). Πιο συγκεκριμένα, η επιφάνεια της μεμβράνης κατασκευάστηκε με χρήση πολυαμιδίου πάχους 0.025 mm και μεμβράνη Kardon τύπου VN, που υποστηρίζεται από νάιλον καλώδια σύνδεσης μαζί με πρόσθετα εξαρτήματα και συσκευές ρύθμισης για τη διασφάλιση των προδιαγραφών πίεσης της τάξης των 15.07 N [39]. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για την επιφάνεια του ανακλαστήρα, το σφάλμα είναι μικρότερο από 1 mm (rms-root mean square) κατά τη χρήση μίας μεθόδου ανάπτυξης της κεραίας Nylon-based-boom.

## **1.5 Τύποι κεραιών για εφαρμογές σε CubeSats**

Όπως συνοψίστηκε στις προηγούμενες ενότητες, είναι δύσκολο να σχεδιαστεί μια κεραία που να είναι συμβατή με όλες τις ζώνες συχνοτήτων. Εκτός από το ότι η λειτουργία και η απόδοση μίας κεραίας εξαρτάται από τα επιλεγμένα υλικά (και του ίδιου του CubeSat), τα χαρακτηριστικά της δορυφορικής κεραίας εξαρτώνται κυρίως από τη συχνότητα και τις εφαρμογές της. Ένα τυπικό διάγραμμα ακτινοβολίας για κάθε τύπο κεραίας, καθορίζει την έκταση για την περιοχή κάλυψης της επικοινωνίας από το διάστημα με τη γη, ή με άλλες κεραίες/ραντάρ. Σε αντίθεση με τους γεωστατικούς δορυφόρους, τα ίχνη των δορυφόρων LEO δεν είναι σταθερά για διόπτευση μιας συγκεκριμένης περιοχής της γης. Ωστόσο, το κινούμενο παράθυρο κάλυψης καθορίζεται από την τροχιά του δορυφόρου LEO, και συνδέεται άμεσα με την ώρα και την περιοχή της ορατότητας. Μια λεπτομερής έρευνα για την περιοχή κάλυψης των μικρών δορυφόρων τύπου LEO, παρουσιάζεται στην εργασία [40].

Για το σταθμό εδάφους, αυτό σημαίνει ότι απαιτείται μηχανισμός παρακολούθησης (tracking) για να εξασφαλιστεί η σύνδεση επικοινωνίας με τον δορυφόρο κατά τη διάρκεια της περιόδου πτήσης του. Στην ιδανική περίπτωση, η κεραία CubeSat θα πρέπει να δείχνει τον κύριο λοβός ακτινοβολίας της προς την κανονική κατεύθυνση στην επιφάνεια της γης (ναδύρ). Έτσι, σε περίπτωση ελέγχου του προσανατολισμού μίας κεραίας, απαιτείται ακριβής έλεγχος θέσης. Αυτό είναι δύσκολο να εφαρμοστεί στα CubeSats λόγω του περιορισμένου χώρου για την εφαρμογή ενός τέτοιου ελέγχου, ο οποίος απαιτεί στοιχεία όπως τροχοί ορμής/αντίδρασης ή προωθητές. Υπάρχουν συνεχείς ερευνητικές εργασίες σχετικά με τον παθητικό έλεγχο, με χρήση μόνιμου μαγνήτη [40] και ράβδους υστέρησης ή μαγνητικές ροπές [41], για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, ιδιαίτερα για 1U CubeSats. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι τύποι των κεραιών που έχουν μελετηθεί και χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλοντα CubeSats.

### **1.5.1 Κεραίες τύπου patch**

Έχουν σχεδιαστεί πολλές κεραίες για CubeSat με βάση την τοπολογία κεραιών τύπου patch, λόγω του μεγέθους, του μικρού βάρους τους και της επίπεδης γεωμετρίας τους. Ένα παράδειγμα μίας κεραίας τύπου patch αναπτύχθηκε σε υπόστρωμα τύπου Rogers με δύο διαφορετικά πάχη: 1.52 mm και 0.508 mm. Επιλέχθηκε ένα ορθογώνιο σχήμα για τη γεωμετρία της κεραίας, με αποτέλεσμα να επιτευχθεί κέρδος 7.3 dBi και κατευθυντικότητα 8.3 dBi στα 2.4 GHz [20]. Εν τω μεταξύ, μπορούν να αποφευχθούν ζητήματα που σχετίζονται με τις αναπτύξεις, χρησιμοποιώντας τέτοιες κεραίες patch, έτσι ώστε η κεραία να ακτινοβολεί προς το άνω μισό διάστημα με κυκλική πόλωση [31].

Τέτοιες κεραιές συνήθως τοποθετούνται στην επιφάνεια του CubeSat και με αμοιβαία σύζευξη μπορούν να συνδυαστούν με άλλες κεραιές τύπου patch, οι οποίες είναι τοποθετημένες στις γειτονικές επιφάνειες του CubeSat [31].

### 1.5.2 Κεραιές τύπου μονοπόλου/διπόλου

Στις πρώτες αναπτύξεις των CubeSat, οι κεραιές τύπου μονοπόλου και διπόλου είναι οι πιο συνηθισμένες κεραιές [1], [42], [43]. Η πολυ-κατευθυντικότητά τους παρέχει ευρεία κάλυψη σήματος, ειδικά όταν το CubeSat λειτουργεί στη ζώνη UHF. Για να καλύψουν τον περιορισμένο χώρο στο CubeSat, οι περισσότεροι σχεδιαστές τέτοιων κεραιών έχουν προσπαθήσει να διατηρήσουν τη χρήση μιας μόνο κεραιάς, για απλότητα και αποφυγή της χρήσης μηχανισμού ανάπτυξης [1], [9], [42]. Ωστόσο, αρκετοί άλλοι ερευνητές εφάρμοσαν απλές μονοπολικές κεραιές, που μπορούν να αναπτυχθούν πριν τη χρήση τους, χρησιμοποιώντας μεθόδους πακέτου - ελατηρίου (tape-spring method) [44]. Η κεραιά λειτουργεί στα 250 MHz με μήκος 55.88 cm και επίπεδο γείωσης μεγέθους  $114.3 \times 152.4 \text{ cm}^2$  [44]. Οι αξιολογήσεις δείχνουν ότι οι κεραιές δεν παρουσιάζουν σημαντικό συντελεστή ανάκλασης. Οι κεραιές αυτού του τύπου πέτυχαν κέρδος σχεδόν 2 dBi με εύρος ζώνης σύνθετης αντίστασης περίπου 8% [44].

### 1.5.3 Κεραιές με χρήση ανακλαστήρα

Παρόμοια με τις παραβολικές κεραιές,, οι κεραιές με ανακλαστήρες τροφοδοτούνται από το κέντρο της κεραιάς, για τη μετάδοση και λήψη σημάτων. Για τα CubeSats, μία τέτοια τοπολογία κεραιάς χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές ραντάρ, λόγω του υψηλού κέρδους που επιτυγχάνουν. Μία τέτοια κεραιά έχει αναπτυχθεί για ένα 6U CubeSat στην εργασία [45]. Αποθηκεύεται σε 1.5 μέρος όγκου σε σχέση με το συνολικό του 6U CubeSat και οι νευρώσεις για την ανάπτυξη της, κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας πολύ σκληρό υλικό για τη στήριξη της επιφάνειας της κεραιάς.

Για να απλοποιηθεί η διαμόρφωση της ανάπτυξης, μια εναλλακτική λύση, είναι η εισαγωγή αξονικής συμμετρίας στον ανακλαστήρα. Η συνολική δομή αποτελείται από έναν υπο-ανακλαστήρα και κεραιά τύπου horn, στον ίδιο μηχανισμό ανάπτυξης. Για να διατηρηθεί η κεραιά που είναι τοποθετημένη στο ίδιο επίπεδο αποθηκευτικού χώρου, ο υπο-ανακλαστήρας πρέπει να ρυθμιστεί σε μήκος 22 cm, για να διασφαλιστεί ότι δεν υπερβαίνει την κορυφή. Εν τω μεταξύ ένας μηχανισμός Cassegrainian, με 0.5m ανακλαστήρα και 0.25m εστιακή απόσταση, έχει ενσωματωθεί, με μηχανισμό ανάπτυξης που παρουσιάζεται στην εργασία [45]. Οι προδιαγραφές αυτής της κεραιάς συνοψίζονται στον Πίνακα 2.

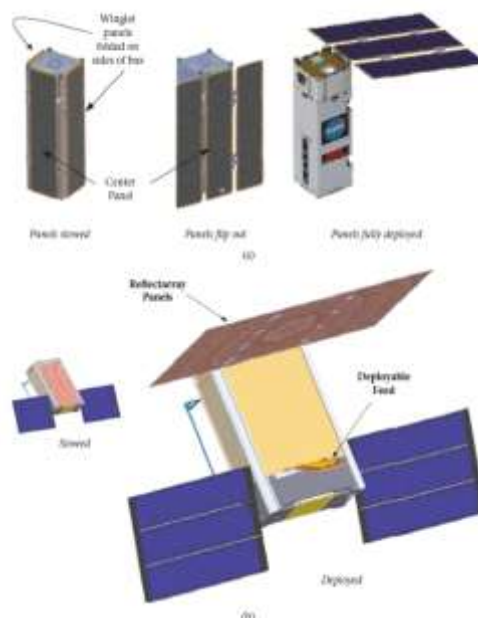
Εκτός αυτού, έχει γίνει ένας νέος σχεδιασμός εκτεινόμενης (φουσκωτής - inflatable) κεραιάς που παρουσιάζεται στην εργασία [10]. Η κεραιά αποτελείται από ένα τμήμα patch, και μία κεραιά ανακλαστήρα με χρήση διαφορετικών υλικών. Αυτή η κεραιά λειτουργεί ειδικά στη ζώνη S και ακτινοβολεί σήματα για επικοινωνία CubeSat στα 2.4 GHz. Εν τω μεταξύ, για την κεραιά αναπτύχθηκε μια εκτεινόμενη (φουσκωτή) μεμβράνη χρησιμοποιώντας μεταλλοποιημένη μεμβράνη Mylar, με πάχος 50.8  $\mu\text{m}$  ο οποίος λειτουργεί ως ανακλαστήρας για τα σήματα που ακτινοβολούνται από την κεραιά patch. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ως βάση ένα λεπτότερο φιλμ Mylar 25.4  $\mu\text{m}$  για να συνδυαστεί η κεραιά του ανακλαστήρα με το πλαίσιο CubeSat. Αυτή η κεραιά ανακλαστήρα και η θήκη της μπορούν να εκταθούν χρησιμοποιώντας μια μικρή ποσότητα

σκόνης εξαχνωσης με βάση το βενζοϊκό οξύ. Αυτό τοποθετείται στο εσωτερικό, πριν από τη διαδικασία ανάπτυξης. Αυτή η σκόνη στη συνέχεια θα μετατραπεί σε αέριο για να επιτρέψει το φούσκωμα της κεραίας με πίεση  $10^{-3}$  Torr, παρόμοια με ένα κοινό μπεκ. Ο ανακλαστήρας μπορεί να συνεχίσει να φουσκώνει χρησιμοποιώντας αυτή τη σκόνη ακόμα κι αν υπάρχει διαρροή στη μεμβράνη.

#### 1.5.4 Ανακλαστικές Κεραίες

Οι ανακλαστικές συστοιχίες κεραίων αποτελούνται γενικά από μια κεραία και μια επιφάνεια ανακλαστήρα. Η κεραία τοποθετείται στραμμένη προς τον ανακλαστήρα, ο οποίος με τη σειρά του δείχνει το σήμα προς την κατεύθυνση επικοινωνίας του CubeSat. Το ISARA CubeSat είναι ένα 3U ( $10 \times 10 \times 30 \text{ cm}^3$ ) CubeSat που χρησιμοποιεί ανακλαστικές συστοιχίες, ενσωματωμένες στα ηλιακά πάνελ του [46]. Ο ανακλαστήρας κεραίας που βλέπει προς τα κάτω, τοποθετήθηκε πίσω από το στραμμένο προς τα επάνω ηλιακό πάνελ του CubeSat. Μία κεραία τύπου patch που εκπέμπει σήματα, βρίσκεται απέναντι από τον ανακλαστήρα για λειτουργία στη ζώνη Ku στα 26 GHz. Η διάταξη πέτυχε κέρδος κεραίας της τάξης των 33.5 dB.

Η ίδια ιδέα χρησιμοποιήθηκε σε ένα άλλο γνωστό CubeSat, το MarCO [73]. Αυτό το 3U CubeSat αποτελείται από πολλά ωφέλιμα φορτία και δύο μεγάλα ηλιακά πάνελ τοποθετημένα δίπλα-δίπλα στο κάτω μέρος του CubeSat [73]. Σε αντίθεση με την προηγούμενη εργασία, ο ανακλαστήρας της κεραίας είναι τοποθετημένος στο αντίθετο άκρο του CubeSat, μακριά από τα ηλιακά πάνελ. Η κεραία παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Εκτός από αυτό, οι λεπτομερείς προδιαγραφές και για τις δύο κεραίες (συμπεριλαμβανομένων των ISARA και MarCO) συνοψίζονται στον πίνακα 2.

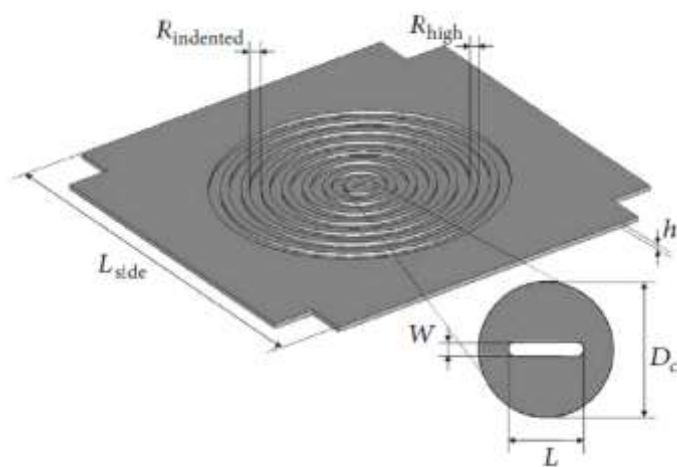


Σχήμα 6: Οι κεραίες για τα ISARA (a) και Marco (b) CubeSats [65]

### 1.5.5 Σπειροειδείς και Ελικοειδείς Κεραίες

Αρκετές σπειροειδείς ή ελικοειδείς τεχνικές για τα CubeSats έχουν επίσης αναπτυχθεί πρόσφατα [28], [29]. Η μία μέθοδος είναι γνωστή ως κεραία "Bull's Eye", που αποτελείται από πολλούς κυκλικούς δακτυλίους διαφορετικής διαμέτρου. Ο μικρότερος δακτύλιος διαμέτρου 7.12mm βρίσκεται στο κέντρο της δομής και περιβάλλεται από άλλους επτά μεγαλύτερους δακτυλίους με εσοχή σε βάθος 0.91 mm, τοποθετημένους σε πλάκα αλουμινίου πάχους 3.2 mm, για λειτουργία στα 60 GHz (για επικοινωνία στο διαδορυφορικό δίαυλο των 59 GHz έως 71 GHz) [29]. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί, το συνολικό μέγεθος της κεραίας είναι 10 cm<sup>2</sup>, ενώ πρόσθετες τομές 10mm<sup>2</sup> εισάγονται σε κάθε γωνία του τετράγωνου σχήματος του πλαισίου του CubeSat. Το κέρδος που επιτεύχθηκε στα 60 GHz είναι 19.1 dBi, με εύρος ζώνης σύνθετης αντίστασης 10 dB της τάξης του 8.4%.

Εκτός από τους δακτυλίους της διάταξης, οι ελικοειδείς κεραίες λειτουργούν στη ζώνη UHF. Η ζώνη UHF έχει εισαχθεί ως ζώνη για χρήση από CubeSats [28]. Η λειτουργία στα 400 MHz είχε ως αποτέλεσμα μια σχετικά μεγάλη κεραία, σε σύγκριση με άλλες κεραίες υψηλής απολαβής για CubeSats. Ο σχεδιασμός μίας τέτοιας κεραίας ενσωματώθηκε σε ένα CubeSat 1.5U, σε χώρο αποθήκευσης 0.5U. Η κεραία σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας ένα πηνίο πέντε στροφών, κατασκευασμένο με χρήση αυτοκόλλητου χάλκινου αγωγού πάχους 0.0889 mm, ο οποίος εκτείνεται προς την εξωτερική πλευρά του CubeSat με βήμα περιέλιξης της τάξης των 12°. Η διάταξη διαθέτει ένα πλαίσιο από λωρίδες από υαλοβάμβακα/θερμοπλαστική ταινία, με μήκος στήλης 138 cm και διάμετρο 37 cm. Η δομή χρησιμοποιεί δύο αντίθετα ελικοειδή στοιχεία που τυλίγονται δεξιόστροφα και αριστερόστροφα και καταλήγουν στο επάνω τμήμα της διάταξης. Το επίπεδο γείωσης κατασκευάστηκε με διάμετρο 60.96 cm από μία μόνο στρώση αλουμινωμένης μεμβράνης Karton, και στηρίχθηκε από τέσσερα τμήματα ράβδων από υαλοβάμβακα διαμέτρου 0.8128 mm. Κατά την αποθήκευση, η κεραία διπλώθηκε και τυλίχθηκε σε μία μικρή δομή και αναπτύχθηκε για χρήση, χρησιμοποιώντας την απελευθέρωση της αποθηκευμένης ενέργειας καταπόνησης της (stored strain energy). Η κεραία πέτυχε κέρδος 13 dBi και εύρος ζώνης αξονικής αναλογίας περίπου στο 55% [28]. Και οι δύο κεραίες και οι σχετικές πληροφορίες συνοψίζονται στον Πίνακα 2.



Σχήμα 7: Η κεραία τύπου "Bull-Eye" [29]

## 1.6 Μηχανισμοί ανάπτυξης για χρήση των κεραιών σε μικρο-δορυφόρους

Η χρήση χαμηλών συχνοτήτων, όπως η ζώνη UHF, τυπικά έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες διαστάσεις για τις σχεδιαζόμενες κεραιές. Εκτός από την εφαρμογή των τεχνικών μικρογραφίας, μια πιο αποτελεσματική επιλογή για την επίτευξη ενός υψηλού επιπέδου απολαβής, είναι η ενσωμάτωση της μεγάλης κεραιάς με αναπτυσσόμενου μηχανισμού για κατά τη μεταφορά της (packaging) από το περιορισμένο CubeSat.

Εκτός αυτού, χρειάζονται επίσης ανακλαστήρες για τη βελτίωση του κέρδους των κεραιών υψηλότερης συχνότητας, όπως αυτές που προορίζονται για χρήση στη ζώνη S, με σημαντικό κόστος ως προς το μέγεθος τους. Η διαδικασία ανάπτυξης μίας αναδιπλωμένης κεραιάς λαμβάνει χώρα συνήθως σε δύο φάσεις, δηλαδή μεταφορά με στοίβαγμα και ανάπτυξη της για την τελική λειτουργία. Οι εξελίξεις στους αναπτυσσόμενους μηχανισμούς για τα CubeSats παρουσιάζονται λεπτομερέστερα στις επόμενες ενότητες

### 1.6.1 Μηχανισμός ανάπτυξης πακέτου - ελατηρίου

Κατά το μηχανισμό ανάπτυξης πακέτου - ελατηρίου (tape-spring deployment), αυτή είναι μια από τις πρώτες μεθόδους που προσαρμόστηκαν στο CubeSat, παρόμοια με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται στο OPAL [47]. Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα που ακολουθεί, η συνολική κεραιά αποτελείται από δύο ανεξάρτητα διπολικά στοιχεία, τα οποία βρίσκονται στις γωνίες του πλαισίου του CubeSat, που προορίζεται για λειτουργία στη ζώνη UHF [47]. Αυτή η ιδέα ανάπτυξης βασίζεται σε ένα σύστημα κυλίνδρων που είναι ικανοί να αναπτύξουν την κεραιά μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα. Ένα μονό νήμα χρησιμοποιείται για να συγκρατήσει την κεραιά, χρησιμοποιώντας ένα μικρό σύρμα nichrome στο οποίο παράγεται μικρή ποσότητα ρεύματος για τη θέρμανση του νήματος για την απελευθέρωση των κεραιών.



Σχήμα 8: Ο μηχανισμός ανάπτυξης κεραιάς που χρησιμοποιήθηκε στο PolySat [47]

Εν τω μεταξύ, μια βελτιωμένη έκδοση αυτής της μεθόδου αναπτύχθηκε στην ερευνητική εργασία [44]. Ένα καμπύλο σταθερό σύνθετο ελατήριο ταινίας, χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη της κεραιάς στο διάστημα ως ρολό. Σε σύγκριση με το κανονικό ελατήριο ταινίας που συζητήθηκε προηγουμένως, αυτή η έκδοση χρησιμοποιεί δύο σταθερά ελατήρια ταινίας με ελαστική δομή. Αυτό παρέχει απλοποίηση καθώς απαιτείται λιγότερη προσπάθεια για την ανάπτυξη, χρησιμοποιώντας ένα μόνο περιστροφικό ενεργοποιητή σε σύγκριση με τη χρήση ουδέτερα ελαστικών ελατηρίων ταινίας.

### 1.6.2 Δομές ανάπτυξης τύπου ομπρέλας

Ο μηχανισμός ανάπτυξης μιας συμμετρικής, σαν ομπρέλα κεραίας παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Κατά την αποθήκευση, ο ανακλαστήρας, η βάση τροφοδοσίας και ο υπο-ανακλαστήρας διατηρούνται μέσα στους αποθηκευτικούς χώρους του CubeSat, με μέγεθος όχι περισσότερο από 0.5 U. Κατά την άφιξη στην επιθυμητή τροχιά, ο ανακλαστήρας πλέγματος ανοίγει, απελευθερώνοντας τα επιθυμητά εξαρτήματα [45].



Σχήμα 9: Σύστημα ανάπτυξης κεραίας τύπου ομπρέλας [45]

Η θέση μίας τέτοιας αναπτυσσόμενης κεραίας, πρέπει να επιλεγεί με προσοχή. Από το παραπάνω σχήμα, η αναπτυσσόμενη κεραία πρέπει να είναι τοποθετημένη στο άλλο άκρο του πλαισίου του CubeSat, για να αποφευχθεί η παρεμπόδιση των ηλιακών συλλεκτών. Ένας τέτοιος μηχανισμός χρησιμοποιεί χαλύβδινα υλικά ελατηρίου και είναι αρκετά εύκαμπτος, ώστε να κάμπτεται καθώς η κεραία είναι αναποδογυρισμένη. Πριν από την ανάπτυξη, η κεραία κάμπτεται  $180^\circ$  και τοποθετείται παράλληλα με το πλαίσιο του CubeSat. Η διαδικασία ανάπτυξης ξεκινά με θέρμανση ενός σύρματος από νάιλον που είναι προσαρτημένο στην κεραία και τη βάση στήριξης του CubeSat, και ταυτόχρονα συνδέεται με σύρμα νιχρώμου (Nichrome wire). Τέλος, η κεραία θα αναπτυχθεί πλήρως σε κατακόρυφη θέση [45].

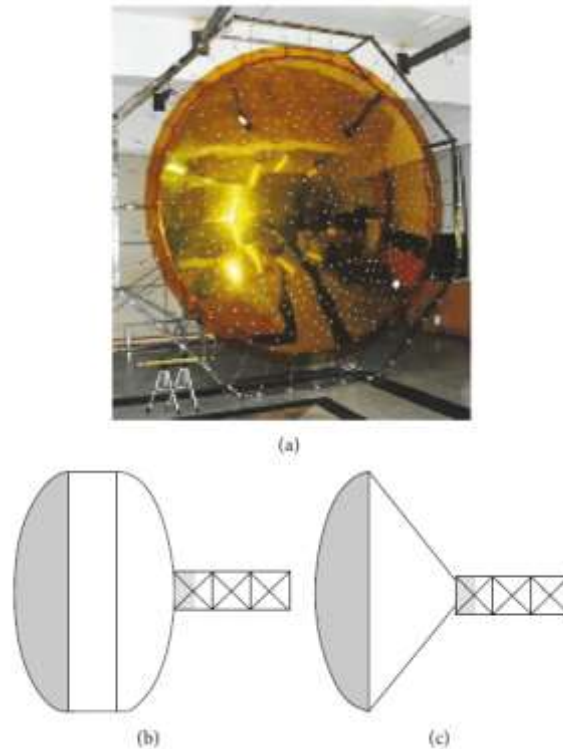
### 1.6.3 Δομές ανάπτυξης τύπου φουσκώματος

Οι κεραίες με ανάπτυξη φουσκώματος (inflatable mechanisms) είναι συμφέρουσες από πολλές πτυχές, οι οποίες περιλαμβάνουν χαμηλό κόστος κατασκευής δίνοντας κεραίες μικρού βάρους, ενώ επίσης απαιτούν μικρότερο χώρο κατά το στοίβαγμα της κεραίας. Στη δεκαετία του 1950 η ανάπτυξη φουσκωτών κεραιών ήταν μία ευαίσθητη διαδικασία λόγω του ασταθούς αερίου φουσκώματος και της δυσκολίας στη διατήρηση του φουσκώματος στις συνθήκες που επικρατούν στο διάστημα [10]. Ωστόσο, μία ανακάλυψη βελτίωσης αυτής της τεχνικής το 1996 από τη NASA, κατάφερε να εκτοξεύσει με επιτυχία έναν παραβολικό ανακλαστήρα διαμέτρου 14 m χρησιμοποιώντας μια φουσκωτή μεμβράνη [75], [48].

Πρόσφατα έγινε μία επιτυχημένη επίδειξη μιας κεραίας S-band υψηλής απολαβής (έως και 21 dBi) [10]. Αναλυτικότερες εκτιμήσεις των φουσκωτών μηχανισμών έχουν επίσης προταθεί, αναλύοντας τη διάμετρο της φουσκωτής μεμβράνης, χρησιμοποιώντας φωτογραμμετρικές μετρήσεις (photogrammetric measurements) [49], [50], [51]. Άλλη μία



φουσκωτή κεραία μεμβράνης, παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί, και κατασκευάστηκε στο ένα κοίλο σχήμα που χρησιμοποιεί μια ανακλαστική επιφάνεια. Οι παράμετροι φουσκώματος της μεμβράνης αναλύθηκαν ως προς την διάμετρο του ανακλαστήρα, την εστιακή απόσταση καθώς και την πίεση φουσκώματος [39].



Σχήμα 10: Μοντέλο ανάπτυξης φουσκώματος [39]

### **1.7 Γενικά συμπεράσματα για την επιλογή κεραιών για CubeSats**

Στο κεφάλαιο έγινε μία εισαγωγή στην τεχνολογία και τις εφαρμογές των CubeSats. Η χρήση των κεραιών στα CubeSats εξυπηρετεί κυρίως δύο κύριες συνδέσεις, είτε δορυφόρου προς επίγειους σταθμούς είτε συνδέσεις μεταξύ δορυφόρων. Οι συνδέσεις αυτές ιδανικά θα πρέπει να επιτυγχάνουν συνδέσεις με μεταδόσεις υψηλού ρυθμού δεδομένων. Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν CubeSats περιλαμβάνουν την παρατήρηση τόσο της γης όσο και την παρατήρηση του διαστήματος, μελέτες κλίματος, έρευνα στο διάστημα, πρόβλεψη καιρού και επικοινωνία. Λόγω των διαφορετικών τύπων των συλλεγόμενων δεδομένων και τη διαφορετικότητα των κόμβων σύνδεσης, οι χωρητικότητες, και οι συχνότητες λειτουργίας αυτών των εφαρμογών διαφέρουν, και το ίδιο ισχύει και για τον τύπο της κεραίας που επιλέγεται για να επιτύχει τα απαιτούμενα κέρδη. Οι περιοριστικοί παράγοντες στην απώλεια ισχύος της σύνδεσης (Link budget analysis) περιλαμβάνουν, τη μετάδοση ισχύος, τις συχνότητες λειτουργίας και το εγγενές κέρδος και τις δυνατότητες των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των διαφορετικών τοπολογιών κεραιών. Τα παραπάνω αποτελούν κρίσιμους παράγοντες ανάλογα με τις διαφορετικές εφαρμογές των CubeSats.

Στην ερευνητική βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολυάριθμα σχέδια και τύποι κεραιών για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις ενός τυπικού CubeSat. Μία από τις πιο σημαντικές

απαιτήσεις για τις κεραίες που προορίζονται για δορυφορική επικοινωνία, είναι η κυκλική πόλωση τους. Η κυκλική πόλωση είναι ικανή να μειώσει τις απώλειες στις μεγάλες αποστάσεις μετάδοσης μεταξύ διαστήματος και γης. Ωστόσο, μια τέτοια απαίτηση προσθέτει στην πολυπλοκότητα του σχεδιασμού των κεραιών των CubeSats. Επομένως, είναι σημαντικό οι κυκλικά πολωμένες κεραίες, να είναι μικροσκοπικές και κατασκευασμένες σε μεγέθη που μπορούν να φιλοξενηθούν στις γεωμετρικές διαστάσεις των CubeSats. Κεραίες που προορίζονται για χρήση σε χαμηλές συχνότητες διευκολύνουν τους κόμβους μετάδοσης δεδομένων, λόγω των μεγαλύτερων μηκών κύματος και των χαμηλότερων απαιτούμενων κερδών. Από την άλλη πλευρά η λειτουργία των κεραιών σε υψηλότερες συχνότητες διευκολύνει τον ίδιο το σχεδιασμό της κεραίας δίνοντας μικρότερα μεγέθη και γεωμετρικές διαστάσεις.

Λόγω του απαιτητικού διαστημικού περιβάλλοντος, για το οποίο προορίζονται οι κεραίες των CubeSats, απαιτείται να σχεδιάζονται με κατάλληλα υλικά για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία τους μετά την εκτόξευση των δορυφόρων. Αρκετά πιθανά υλικά έχουν μελετηθεί στην ερευνητική βιβλιογραφία, τα οποία χονδρικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο τύπους: άκαμπτα και εύκαμπτα υλικά. Τα άκαμπτα υλικά όπως οι επιφάνειες υποστρώματος υψηλής απόδοσης και οι συμβατικές μεταλλικές πλάκες είναι κατάλληλα όταν διατίθεται σημαντικός χώρος για την τοποθέτηση τους, και είναι συνήθως υλοποιήσιμες στις επιφάνειες του CubeSat ή αναπτύσσονται επί των CubeSats σε διπλωμένες φόρμες, μετά την ολοκλήρωση της εγκατάστασης σε τροχιά του δορυφόρου. Εκτός αυτού, η μέθοδος κατασκευής των άκαμπτων κεραιών που βασίζονται σε υπόστρωμα είναι επίσης συμβατή με τις σύγχρονες τεχνολογίες κατασκευής τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB). Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν ακρίβεια κατασκευής και ηλεκτρικών χαρακτηριστικών. Εκτός από υλικά με βάση τα διηλεκτρικά, η κατασκευή πιο περίπλοκων και πλήρως μεταλλικών κατασκευών όπως η κεραία Bull's Eye, μπορεί επίσης να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας εξειδικευμένα αυτοματοποιημένα συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ωστόσο, η χρήση τέτοιων άκαμπτων υλικών περιορίζει την ικανότητα αυτών των κεραιών ως προς την ενσωμάτωση τους στη δομή του CubeSat, καθώς πρέπει να είναι είτε συμπαγείς είτε διπλωμένες με κάποιο τρόπο, για να διασφαλίζεται αποτελεσματική αξιοποίηση του χώρου.

Εν τω μεταξύ, εύκαμπτα υλικά όπως οι μεμβράνες και τα films είναι πιο πιθανό να αποθηκευτούν εντός του CubeSat κατά τη διάρκεια εκτόξευσης και ανάπτυξης του δορυφόρου στο διάστημα. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης των αναπτυσσόμενων κεραιών, είναι η χρήση μικρότερου όγκου κατά τη μεταφορά τους. Ταινίες όπως το Karton είναι ικανές να αντέχουν έως και 400°C και αυτές οι κεραίες μπορεί να προστατευτούν επιπλέον σε μια θήκη εντός του CubeSat. Λόγω της λεπτότητας αυτών των εύκαμπτων υλικών, η βελτιστοποίηση της τελικής λειτουργίας μίας τέτοιας κεραίας μπορεί να είναι πιο περίπλοκη. Αυτό οφείλεται στην απαίτηση εξασφάλισης λογικού εύρους ζώνης της κεραίας, χρησιμοποιώντας το συνδυασμό της διαπερατότητας και του πάχους υποστρώματος των υλικών της. Επιπλέον, λεπτοί αγωγοί μπορεί επίσης δυνητικά να επηρεάζουν την αγωγιμότητα, η οποία με τη σειρά της υποβαθμίζει επίσης την απόδοση του κέρδους της κεραίας, καθώς και το διάγραμμα ακτινοβολίας της. Η κατασκευή αυτών των ταινιών για το σχεδιασμό των κεραιών μπορεί να γίνει με διάφορες τεχνολογίες, μεταξύ των οποίων είναι η εκτύπωση inkjet ή ο ψεκασμός αγωγίμου χρώματος. Τέτοιες τεχνολογίες απαιτούν εξειδικευμένα μηχανήματα και καλά χαρακτηρισμένες διαδικασίες για την εξασφάλιση της ακρίβειας κατασκευής. Ενώ οι μέθοδοι όπως η βαφή με ψεκασμό σε μεμβράνες ή films κοστίζει λιγότερο, από άποψη τεχνικής πολυπλοκότητας,

απαιτούνται μεγαλύτερες προσπάθειες για την υλοποίηση μικρών διαστάσεων. Συνοπτικά, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα CubeSats πρέπει πρώτα να λάβουν υπόψιν τις απαιτήσεις χώρου στον δορυφόρο και, μετά τις τοπολογίες των κεραιών με χρήση των κατάλληλων υλικών.

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι κεραιές για τις εφαρμογές στα CubeSats έχουν αναπτυχθεί εντατικά τα τελευταία χρόνια. Οι συρμάτινες κεραιές, όπως τα δίπολα και τα μονόπολα, αρχικά χρησιμοποιήθηκαν στα πρώτα CubeSats για επικοινωνία με τους επίγειους σταθμούς βάσης. Ωστόσο, τέτοιες κεραιές είναι γνωστό ότι είναι περιορισμένες όσον αφορά το κέρδος και την απαίτηση μεγάλων γεωμετρικών διαστάσεων. Επιπλέον, η ευρείας κατεύθυνσης ακτινοβολία τους μπορεί να μην είναι κατάλληλη για όλες τις εφαρμογές των CubeSats, ειδικά όταν απαιτείται κατευθυντική ακτινοβολία. Αντιθέτως, οι κεραιές που βασίζονται σε patch προτιμώνται για την επικοινωνία δορυφόρων λόγω της επίπεδης μορφής τους, της απλότητας σχεδιασμού τους και της συνολικής αποδοτικότητάς τους. Ο σχεδιασμός κεραιών patch απαιτεί την ακρίβεια των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του υποστρώματος και των αγώγιμων υλικών, καθώς η διακύμανσή τους μπορεί να οδηγήσει σε μετατόπιση συχνότητας της λειτουργίας τους. Για υψηλότερες συχνότητες, η ενσωμάτωση κεραιών patch στο CubeSat (π.χ. σε μια από τις πλευρές του), είναι απλή λόγω της προσφερόμενης επιφάνειας. Ωστόσο, για χαμηλές συχνότητες που προορίζονται για χρήση των ζωνών VHF ή UHF, διάφορες τεχνικές σμίκρυνσης απαιτούνται για να διασφαλιστεί ότι αυτές οι κεραιές μπορούν να ενσωματωθούν στη δομή CubeSat. Άλλη εναλλακτική επιλογή θα ήταν ο σχεδιασμός των patches σε διάφορα τμήματα του CubeSat, τα οποία είναι αναδιπλούμενα ή μπορούν να συνδυαστούν με κάποιο τρόπο μεταξύ τους. Απλοί μέθοδοι ανάπτυξης που κάνουν χρήση τεχνικών ελατηρίου, μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε τύπους κεραιών με συρμάτινο βρόχο, όπως οι σπειροειδείς και οι ελικοειδείς κεραιές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων. Πιο προχωρημένες μέθοδοι για κεραιές υψηλής απολαβής, είναι οι κεραιές ανακλαστήρα και οι συστοιχίες ανακλαστήρα. Αυτές οι τοπολογίες κεραιάς σχεδόν σίγουρα απαιτούν μηχανισμούς ανάπτυξης για την κάλυψη των απαιτούμενων μεγεθών τους. Οι μηχανισμοί ανάπτυξης από τη βιβλιογραφία μπορεί να περιλαμβάνουν μηχανικά εξαρτήματα για τη διασφάλιση της στιβαρότητας της κεραιάς μετά την ανάπτυξη της, διασφαλίζοντας παράλληλα ευελιξία κατά τη φάση μεταφοράς της. Πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψιν τα μεταλλικά εξαρτήματα στήριξης που αποτελούν μέρος του μηχανισμού ανάπτυξης, καθώς αυτά θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ακτινοβολία σήματος ή να προσθέσουν στον απαιτούμενο όγκο αποθήκευσης. Η διαδικασία σχεδιασμού πρέπει να εξισορροπηθεί μεταξύ των χαρακτηριστικών απόδοσης της κεραιάς, του κόστους της και του διαθέσιμου χώρου στην προτεινόμενη δομή CubeSat. Εκτός από αυτά, η κύρια πρόκληση στο CubeSat είναι ότι ο σχεδιασμός της κεραιάς θα πρέπει να διασφαλίζει την απόδοση του και ο μηχανισμός ανάπτυξης της κεραιάς δεν επηρεάζεται από τη δομή του CubeSat και αντίστροφα.

Η υλοποίηση κεραιών, με δυναμική ανάπτυξη στο CubeSat, πρέπει να εκτελεστεί με προσοχή για να διασφαλιστεί η ελάχιστη επίδραση της δομής του, στο διάγραμμα ακτινοβολίας. Ένας ακατάλληλα επιλεγμένος μηχανισμός ανάπτυξης μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική χρήση του αποθηκευτικού χώρου στο ήδη περιορισμένο από όγκο, περιβάλλον του CubeSat. Αντίθετα, η αποτελεσματική αξιοποίηση του χώρου από την κεραιά επιτρέπει περισσότερο φυσικό χώρο για ωφέλιμα φορτία, όπως φακοί κάμερας, αισθητήρες, κ.λπ. Παρά τα περιορισμένα μεγέθη τους, τα CubeSats διατίθενται σε πολλαπλάσια των  $10 \text{ cm}^3$ , τα οποία μπορούν να αποτελέσουν βάση για την κάλυψη

μεγαλύτερων χωρητικότητων ανάλογα με τις προβλεπόμενες εφαρμογές, σε βάρος της υψηλότερης χρήσης ενέργειας. Οι μηχανισμοί ανάπτυξης για μεγαλύτερες κεραίες με ομπρέλα και μηχανισμούς φουσκώματος, αποτελούν επίσης εναλλακτικές τεχνολογίες ανάπτυξης. Εκτός από αυτούς, οι κεραίες μπορούν επίσης να συμπεριλάβουν τους ηλιακούς συλλέκτες για την κάλυψη των απαιτήσεων ισχύος.

Επομένως το πρόβλημα της επιλογής κεραίας για το περιβάλλον CubeSat, είναι ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα, το οποίο θα πρέπει να λάβει υπόψιν του την εφαρμογή για την οποία προορίζεται το CubeSat, τον τύπο της κεραίας, τις γεωμετρικές της διαστάσεις, τις απαιτήσεις αναδίπλωσης (εάν και εφόσον προκύπτουν), τη ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας, τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, κ.λπ.

# 2

## CubeSats και Διαδίκτυο των Αντικειμένων (IoT)

### **2.1 Η υλοποίηση του *Internet of Things* μέσω *CubeSats***

Η έλευση των CubeSats ενίσχυσε το όραμα της χρήσης δορυφορικών αστερισμών για την παροχή απρόσκοπτης κάλυψης στο Διαδίκτυο σε όλο τον πλανήτη. Αυτό το όραμα, γνωστό ως Διαδίκτυο του Διαστήματος (Internet of Space-IoS), είναι ο βασικός ενεργοποιητής του Internet of Things (IoT). Μία από τις κύριες προκλήσεις για να γίνει πραγματικότητα το IoS, είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος κεραίας που να μπορεί να διατηρήσει μια σύνδεση υψηλής ταχύτητας δεδομένων, ενώ μπορεί να ενσωματωθεί στις μικρές γεωμετρικές διαστάσεις ενός CubeSat. Αυτή η πρόκληση μεγεθύνεται περαιτέρω από την απαίτηση ότι η κεραία επαναδιαμορφώνει δυναμικά το διάγραμμα ακτινοβολίας της, σε γεωγραφικές περιοχές που απαιτούν περισσότερη κάλυψη. Ο στόχος αυτής της ενότητας είναι να παρέχει μια επισκόπηση των εννοιών της κεραίας που απαιτείται για να καλυφθούν οι απαιτούμενες προκλήσεις. Αυτές οι έννοιες μπορούν να μετουσιώσουν το IoS που βασίζεται σε CubeSat σε ένα υλοποιήσιμο όραμα.

### **2.2 *CubeSats* και *IoT***

Το IoT προβλέπει, απρόσκοπτη συνδεσιμότητα μεταξύ ηλεκτρονικών συσκευών σε όλο τον πλανήτη, και είναι ένας από τους βασικούς μοχλούς για την έρευνα τον 21<sup>ο</sup> αιώνα [52]–[55]. Μαζί με την παγκόσμια προσπάθεια για να δημιουργήσει αυτή την παγκόσμια συνδεσιμότητα, προκύπτουν πολυάριθμες προκλήσεις. Μεταξύ αυτών των προκλήσεων, είναι η παροχή δικτύου, και η κάλυψη απομακρυσμένων περιοχών. Ωστόσο, πολλά γεωγραφικά χαρακτηριστικά σε απομακρυσμένες περιοχές σε μεγάλο βαθμό αποκλείουν τη δημιουργία τυπικής υποδομής (όπως σταθμοί βάσης και επαναλήπτες), για υποστήριξη

πρόσβασης στο Διαδίκτυο. Μια πιθανή λύση είναι η δημιουργία της απαιτούμενης υποδομής στο διάστημα, μέσω ενός αστερισμού δορυφόρων (σμήνους δορυφόρων). Μέχρι πρόσφατα, η ιδέα των συμβατικών δορυφόρων για να σχηματίσουν έναν τέτοιο σμήνος κάλυψης, κρίθηκε ανέφικτη λόγω του κόστους που σχετίζεται με την ανάπτυξη τέτοιας κλίμακας δορυφόρων.

Ωστόσο, η εμφάνιση των Μικρο-Δορυφόρων (Small-Sats) και των CubeSats έκανε τους δορυφορικούς αστερισμούς ένα υλοποιήσιμο όραμα. Τυπικά τα CubeSats αποτελούνται από στοιβαγμένα αρθρωτά μπλοκ. Κάθε μπλοκ έχει όγκο 1000 cm<sup>3</sup> και μάζα περίπου 1 kg (συνήθως αναφέρεται ως 1 U). Το μικρό μέγεθος και οι οικονομικά προσιτές τιμές των CubeSats, καθιστούν δυνατό να κατασκευάσουν ένα αστερισμό CubeSats σε χαμηλή τροχιά γύρω από τη Γη, που σχηματίζει ένα IoS για την παροχή απρόσκοπτης συνδεσιμότητας σε όλο τον κόσμο [56] – [58]. Με κίνητρο τα τεράστια πλεονεκτήματα που θα φέρουν τα CubeSats στο IoT, πολλά ιδιωτικά ιδρύματα στον εταιρικό τομέα αναλαμβάνουν την πρωτοβουλία να δημιουργήσουν το δικό τους δίκτυο CubeSat [59]. Αυτό απαιτεί την ανάπτυξη των απαραίτητων ηλεκτρονικών, που μπορούν να υποστηρίξουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, που να είναι κατάλληλα για ενσωμάτωση τους στα CubeSats.

Ο ρυθμός δεδομένων που μπορεί να διατηρήσει μια ασύρματη σύνδεση, είναι σε μεγάλο βαθμό καθοριζόμενος από το κέρδος της κεραίας που διαθέτει το σύστημα μετάδοσης - λήψης. Κεραίες χαμηλής απολαβής, όπως π.χ. οι κεραίες τύπου patch και διπόλου, έχουν διερευνηθεί αρκετά για τη χρήση τους σε CubeSats [60], [61]. Ωστόσο, η επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, απαιτεί την ενσωμάτωση κεραίων διαφράγματος υψηλής απολαβής στα CubeSats. Αυτό παραμένει ένας ανοιχτός τομέας έρευνας. Αρκετές ερευνητικές εργασίες υπογραμμίζουν τις πρόσφατες τάσεις στην ανάπτυξη τέτοιων κεραίων για τα CubeSats [62] – [65]. Μερικές πρόσφατες εξελίξεις στην έρευνα των κεραίων υψηλής απολαβής για τα CubeSats για εφαρμογές τηλεπισκόπησης και βαθέως διαστήματος (deep space), παρουσιάζονται στα [66 ] – [71]. Ένα σημαντικό στοιχείο είναι ότι όλες αυτές οι ερευνητικές κεραίες, αποτελούνται από ένα μόνο σταθερό τμήμα. Η κατεύθυνση της δέσμης είναι μια σημαντική απαίτηση για τη διευκόλυνση του IoT. Έτσι, αυτά τα σχέδια σταθερού στοιχείου δεν θα παρέχουν την απαιτούμενη απόδοση σε εφαρμογές IoT/IoS.

Ο στόχος των επόμενων ενοτήτων του κεφαλαίου, είναι να παρέχουν μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση της έρευνας κεραίων, που προορίζονται για το IoT σε CubeSats. Καθορίζονται οι αντιπροσωπευτικές προδιαγραφές που πρέπει να επιτευχθούν και αναδεικνύονται οι προκλήσεις. Ακολουθούν αρκετές επιλογές κεραίας που έχουν τη δυνατότητα να προσαρμοστούν σε αυτές τις προδιαγραφές, με έμφαση στις αρχιτεκτονικές κεραίων, οι οποίες είναι ικανές να προσαρμοστούν στο μακρινό πεδίο.

### **2.3 Απαιτήσεις των Κεραίων για κάλυψη του IoT**

Το όραμα της παροχής απρόσκοπτης διαδικτυακής κάλυψης σε όλη τον πλανήτη, μεταφράζεται σε αντιπροσωπευτικές προδιαγραφές για τις κεραίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3: Πίνακας προδιαγραφών για κεραίες του IoT [72]

Specification	Typical Requirement
Frequency	17.8–20.2 GHz (Tx) 27.5–31 GHz (Rx)
Polarization	RHCP/LHCP
Beam coverage (elevation)	$\pm 60^\circ$
Beam coverage (azimuth)	$\pm 180^\circ$
Gain	20–30 dB
Axial ratio (broadside)	<2 dB
Power	$\leq 20$ W

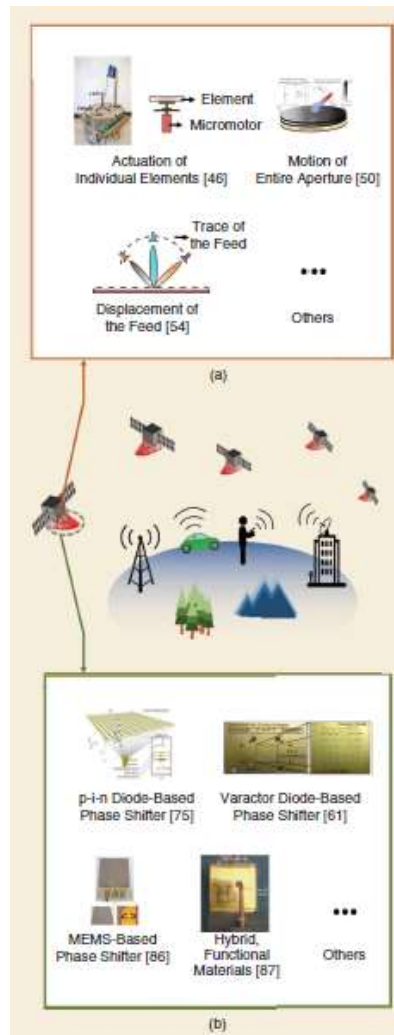
Η επίτευξη ρυθμών μετάδοσης δεδομένων πάνω από μερικές εκατοντάδες megabytes ανά δευτερόλεπτο (Mbytes/sec), με την περιορισμένη ισχύ ενός CubeSat, απαιτεί η κεραία να παρέχει κυκλικά πολωμένη υψηλή απολαβή (CP), τόσο για την εκπομπή όσο και για τη λήψη στη ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας. Στο σημείο αυτό προτείνεται επίσης η χρήση συχνοτήτων στη ζώνη E [59], ενώ πιο πρόσφατες ερευνητικές εργασίες έχουν επικεντρωθεί στη χρήση του εύρους συχνοτήτων της ζώνης K/Ka (όπως παρουσιάζεται και στον προηγούμενο πίνακα) [72]–[76].

Η κεραία πρέπει να είναι ικανή να αναδιαμορφώνει τη θέση της κύριας δέσμης της σε μια ευρεία γωνιακή περιοχή (συνήθως,  $0 \leq \theta \leq 60^\circ$  και  $0 \leq \phi \leq 360^\circ$ ) για να μπορεί να κάνει κατανομή των πόρων στις περιοχές που χρειάζονται κάλυψη [76]. Αν και η τιμή του επιθυμητού κέρδους της κεραίας εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως η απόδοση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και της διαθέσιμης ισχύος από τη δομή τροφοδοσίας, στοχεύοντας σε κέρδος περίπου 25 dB για τέτοιες εφαρμογές. Όταν οι απαιτήσεις (RF) συνδυάζονται με τον μηχανικό περιορισμό που αφορά στα CubeSats, αυτό απαιτεί σχεδιασμό υψηλής ποιότητας κεραίας, η οποία είναι ικανή να παρέχει κατευθυντήριες δέσμες CP που είναι κατευθυνόμενες με μικρή ή καθόλου πολυπλοκότητα ανάπτυξης.

Ενώ είναι δυνατή η επίτευξη αυτών των προδιαγραφών μεμονωμένα, συνδυάζοντας όλα αυτά τα χαρακτηριστικά ταυτόχρονα χωρίς σημαντικούς συμβιβασμούς, απαιτεί καινοτόμες λύσεις, αφήνοντας σημαντικό χώρο για ερευνητικό έργο. Οι επόμενες ενότητες προσφέρουν μια συστηματική κατηγοριοποίηση πολλών επιλογών κεραίας που μπορούν ενδεχομένως να ανταποκριθούν σε αυτές τις σχεδιαστικές απαιτήσεις.

## 2.4 Επιλογή Κεραιών

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται διάφορα σχέδια κεραίων που έχουν διερευνηθεί στην ερευνητική βιβλιογραφία, με σκοπό να καταστεί δυνατή η Ευρυζωνική υπηρεσία Διαδικτύου που βασίζεται σε χρήση CubeSat. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, αυτό το κεφάλαιο εστιάζει σε τεχνικές που είναι ικανές να παρέχουν μία κεραία, της οποίας η κατεύθυνση δέσμης μπορεί να διαμορφωθεί εκ νέου. Μία επισκόπηση της ταξινόμησης παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Στο σχήμα παρουσιάζονται δύο διαφορετικοί τρόποι για το χειρισμό της κατευθυντικότητας του διαγράμματος ακτινοβολίας μίας κεραίας. Ο πρώτος τρόπος αφορά σε μηχανικό προσανατολισμό για την κάλυψη άλλων περιοχών, ενώ ο δεύτερος βασίζεται σε διαφορές πυροδότησης των ρευμάτων τροφοδοσίας για αλλαγή της κατευθυντικότητας της κεραίας.



Σχήμα 11: Μία περιληπτική αναφορά των κεραιών προς χρήση για το IoT. (a) Μηχανικά κατευθυνόμενες κεραιές (b) Ηλεκτρονικά κατευθυνόμενες κεραιές [99]

### 2.4.1 Κεραίες Ανακλαστήρων (Aperture Antennas)

Μία από τις πιο κοινές κεραιές υψηλής απολαβής για χρήση σε δορυφόρους, είναι ο παραβολικός ανακλαστήρας [77]. Ενώ ένας παραβολικός ανακλαστήρας αποδίδει αρκετά καλά για σαρώσεις έως πολλά πλάτη δέσμης (συνήθως μέσω τροφοδοσίας με μεταβολή φάσης), η απόδοση υποβαθμίζεται σημαντικά εάν είναι επιθυμητές μεγαλύτερες γωνίες σάρωσης [78]. Η μόνη επιλογή λοιπόν, είναι η μηχανική περιστροφή της κεραίας. Εκτός από αυτό, το προφίλ του ανακλαστήρα απαιτεί εκλεπτυσμένη συσκευασία και μηχανισμούς ανάπτυξης. Ενώ αυτή είναι μια επιλογή για συμβατικούς δορυφόρους [79], αυτό δεν είναι εφικτό για τα CubeSats. Η χρήση στοιχειοκεραίας με διαφορές στη φάση πυροδότησης, ως ηλεκτρονική προσέγγιση, έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για εφαρμογές διαμόρφωσης δέσμης [80] και προτείνεται επίσης και για τα CubeSats [81]. Ωστόσο, για εφαρμογές CubeSat στις συχνότητες που ενδιαφέρουν, η απώλεια σε δίκτυα τροφοδοσίας καθώς και η πολυπλοκότητα και το κόστος που συνδέονται με τη μαζική χρήση ενεργών εξαρτημάτων RF για σάρωση δέσμης, μπορεί να επιφέρει σημαντικά χαρακτηριστικά για το σχεδιασμό.



Άλλες κατηγορίες κεραιών με διάφραγμα, φακούς, συστοιχίες ανακλαστικών, και transmitarrays (στοιχειοκεραίες), επέστησαν την προσοχή των ερευνητών για τη διευκόλυνση του IoT, λόγω της ευκολίας ενσωμάτωσής τους στα CubeSats, για την υποστήριξη εφαρμογών χαμηλού κόστους. Οι κεραίες φακών λειτουργούν με την αρχή του χειρισμού της φάσης ενός σφαιρικού κυματομετώπου, κατασκευάζοντας την αποτελεσματική διηλεκτρική κατανομή του φακού. Οι φακοί, γενικά, μπορούν να κατασκευαστούν με σχετικά χαμηλό προφίλ και ελαφρύ υλικό μέσω βελτιστοποίησης προφίλ και τρισδιάστατης εκτύπωσης [82] – [84]. Η σάρωση δέσμης, ωστόσο, συνήθως επιτυγχάνεται μέσω κάποιας μορφής μηχανικής κίνησης του φακού ή της τροφοδοσίας. Η εναλλαγή μεταξύ πολλαπλών τροφοδοσιών είναι επίσης μια δυνατότητα για σάρωση με κεραίες φακών, ο αριθμός των ακτίνων που μπορούν να παραχθούν περιορίζεται από τον αριθμό των ροών. Τύποι στοιχειοκεραίων με ανακλαστήρες (Reflectarray) και ομάδες στοιχειοκεραίων (transmitarray), είναι δύο τύποι κεραιών που αποτελούνται από μια σειρά μεμονωμένων στοιχείων (συνήθως κάθε στοιχείο λειτουργεί σε υπομήκη κύματος). Αυτές μπορούν να σχεδιαστούν για να «διορθώσουν» τοπικά τις φάσεις, έτσι ώστε το διάφραγμα να ακτινοβολεί ξανά με την επιθυμητή κατανομή φάσης. Είτε με μηχανική επανατοποθέτηση ή με ηλεκτρονική εναλλαγή αυτών των στοιχείων, η φάση του διαφράγματος μπορεί να αναδιαμορφωθεί δυναμικά, για συγκεκριμένα σαρώσεις δέσμης. Τα ISARA [85] και MarCO [86] είναι πρόσφατες αποστολές CubeSat, με επικεφαλής το Jet Propulsion Laboratory της NASA, που χρησιμοποιούν ανακλαστήρες για CubeSats.

Στο ISARA, μια ανακλαστική διάταξη ενσωματώθηκε στην κεραία μαζί με το ηλιακό πάνελ και αναπτύχθηκε σε ένα 3U CubeSat, επιτυγχάνοντας κέρδος 33.5 dB στα 26 GHz. Για την υλοποίηση του MarCO, μια κεραία ανακλαστήρα ζώνης X συχνοτήτων με κυκλική πόλωση και απολαβή 29.2 dB, αναπτύχθηκε σε ένα 6U CubeSat, δημιουργώντας μια άμεση σύνδεση μεταξύ του πλανήτη Άρη και της Γης. Η αναπτυσσόμενη ανακλαστική διάταξη έχει διαστάσεις  $60 \times 34 \times 0.23$  cm και ζυγίζει 931 gr. Ωστόσο, αυτός ο επιτυχής σχεδιασμός με ενσωματωμένες κεραίες σταθερής δέσμης, είναι ανεπαρκής σε εφαρμογή CubeSats για χρήση σε σενάρια IoT. Για το IoT, το CubeSat πρέπει να εναλλάσσεται γρήγορα μεταξύ των πολλαπλών χρηστών, και αυτό απαιτεί η κεραία του να είναι ικανή να αναδιαμορφώνει ενεργά την επικοινωνία του σε μακρινό πεδίο. Από την ερευνητική βιβλιογραφία σε επαναδιαμορφώσιμες συστοιχίες ανακλαστικών και μεταδοτικών συστοιχιών [86]–[89], ο στόχος είναι να επισημανθούν τεχνικές που μπορούν να πληρούν τις αντιπροσωπευτικές προδιαγραφές για τα CubeSats που ενεργοποιεί το IoT. Αυτές οι επιλογές αναδιαμόρφωσης θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες.

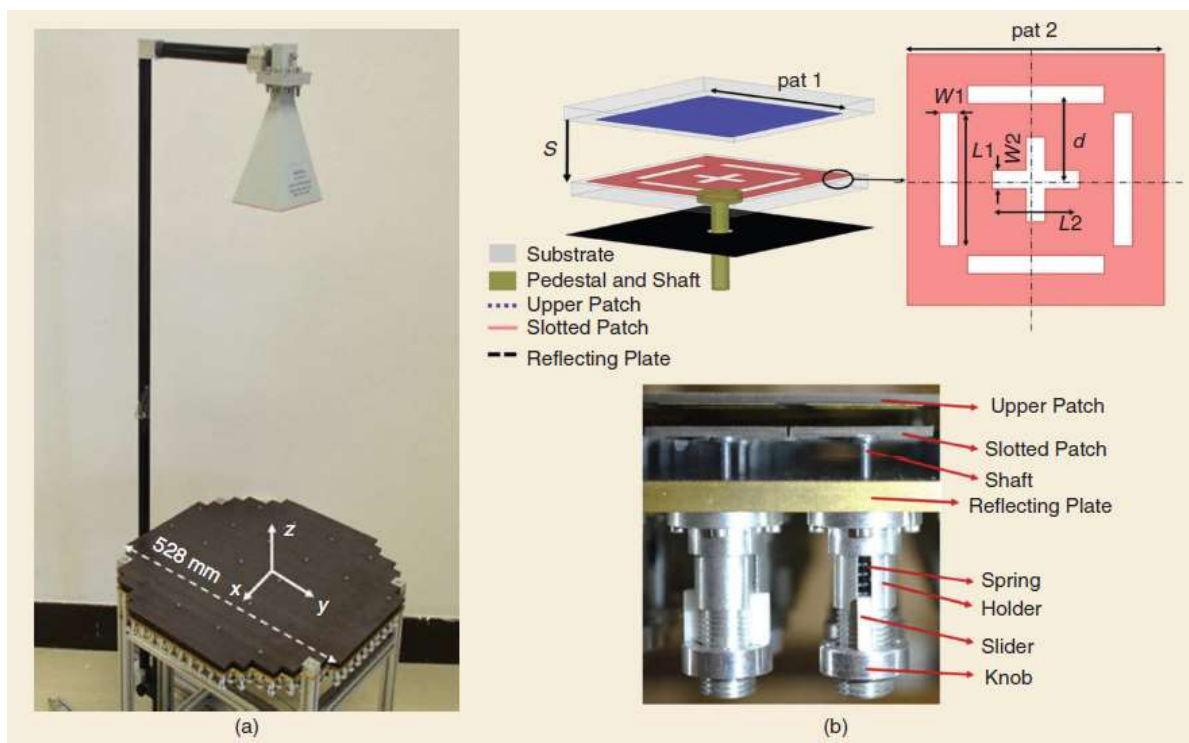
#### **2.4.2 Μηχανικά Κατευθυνόμενες Κεραίες**

Σε αυτή την ενότητα, εστιάζουμε στις αρχιτεκτονικές κεραιών που χρησιμοποιούν κάποιας μορφής μηχανική κίνηση για να επιτευχθεί η επιθυμητή κατανομή του διαγράμματος ακτινοβολίας τους στο χώρο. Ανάλογα με την τεχνική, μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες: με κίνηση των στοιχείων της κεραίας, με κίνηση του διαφράγματος και με μεταβολή φάσης πυροδότησης των στοιχείων τους.

##### **Κίνηση των στοιχείων της κεραίας**

Κεραίες με επιφάνειες εκπομπής που χρησιμοποιούν μηχανική αναδιαμόρφωση μεμονωμένων στοιχείων, παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα. Η δυνατότητα ελέγχου

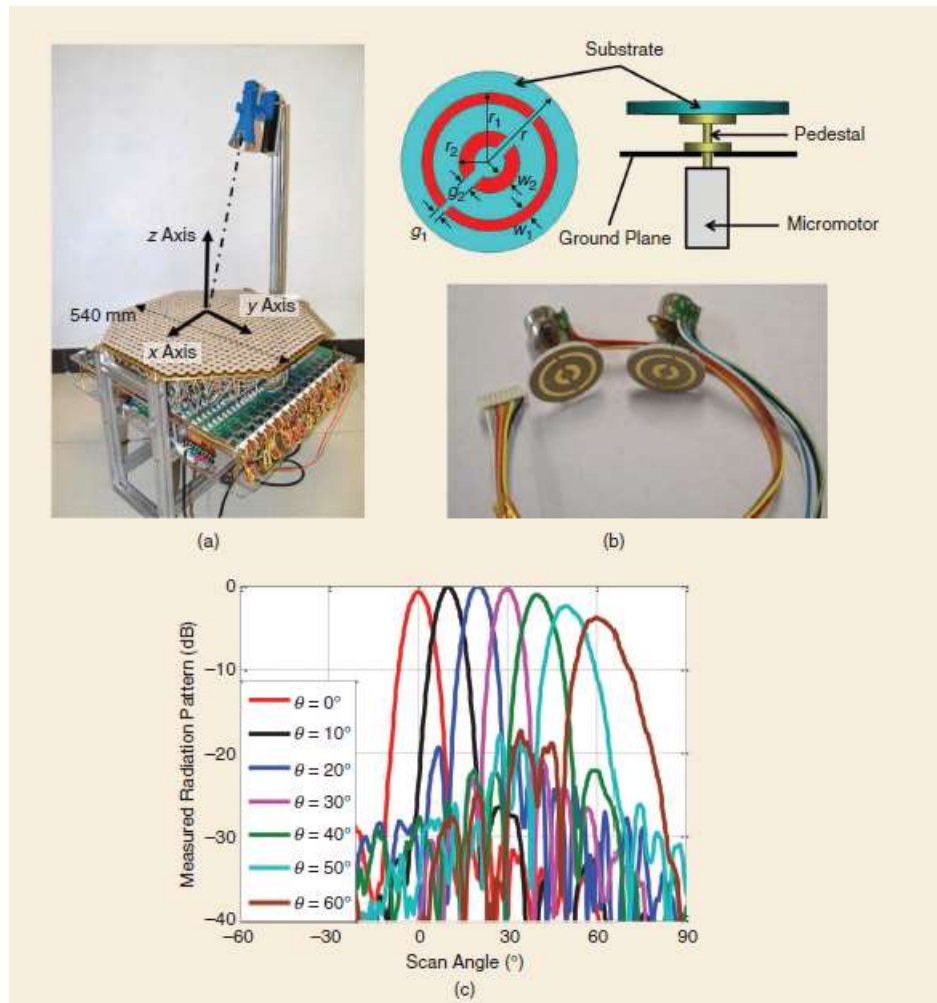
της φάσης του διαφράγματος ποικίλλει όπως εξαρτάται από τη θέση τοποθέτησης των μεμονωμένων κεραιών τύπου patch σε μια διάταξη ανακλαστήρα [90]. Πρόσφατα στην ερευνητική εργασία [91], μια γραμμικά πολωμένη (Linear Polarized - LP) ανακλαστική διάταξη, με δυνατότητα σάρωσης σε  $60^\circ$  (υψόμετρο) για λειτουργία συχνοτήτων στη ζώνη C και εύρος ζώνης 6.2%, υλοποιήθηκε πειραματικά, αποτελούμενη από ένα στοιχείο που ενεργοποιείται στον διηλεκτρικό άξονα της. Όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, το τμήμα εκπομπής αποτελείται από τρία στρώματα: (α) ένα σταθερό τοποθετημένο patch στην επάνω επιφάνεια, (β) ένα κινητό ενδιάμεσο patch με σχισμή και (γ) ένα σταθερό επίπεδο γείωσης στο κάτω μέρος. Τα ενδιάμεσα patches με σχισμή, ενεργοποιούνται ώστε να μεταβάλλουν τις αποστάσεις τους μεταξύ του επάνω και του κάτω στρώματος της διάταξης, για να παρέχουν την απαιτούμενη κατανομή φάσης. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού, το συνολικό προφίλ του ανακλαστήρα παραμένει αμετάβλητο. Αυτή η ιδέα αργότερα προσαρμόστηκε στην ερευνητική εργασία [92], όπου κάθε κεραία τύπου patch έγινε pixel και βελτιστοποιήθηκε για την επίτευξη βελτιωμένων επιδόσεων.



Σχήμα 12: Μία μηχανικά κατευθυνόμενη κεραία με γραμμική πόλωση που προορίζεται για λειτουργία στη ζώνη C συχνοτήτων. (α) το πρωτότυπο σχεδιασμού, (β) το κεντρικό τμήμα εκπομπής [91]

Μια άλλη προσέγγιση της ενεργοποίησης σε επίπεδο στοιχείου, είναι ανά στοιχείο περιστροφής, η οποία υποστηρίζει σε μεγάλο βαθμό τις λειτουργίες κυκλικής πόλωσης CP. Η ιδέα προέρχεται από την ειδική ιδιότητα ότι η μετατόπιση φάσης του συμπολωμένου ανακλώμενου/μεταδιδόμενου στοιχείου CP, έχει γραμμική εξάρτηση από τη φυσική γωνία περιστροφής του στοιχείου σκέδασης [93], [94]. Στην ερευνητική εργασία [46], για την υλοποίηση ενός ανακλαστικού πίνακα CP, με μηχανικά περιστρεφόμενα στοιχεία επιτυγχάνεται σάρωση  $60^\circ$  με προσομοιωμένο εύρος ζώνης 28.6% για λειτουργία στη ζώνη X. Ήταν ένα πρωτότυπο ανακλαστικής διάταξης που ενσωματώνει μηχανοκίνητα στοιχεία και κατασκευάστηκε επίσης για να αποδείξει τη

μηχανική εφαρμογή αυτού του τύπου. Μία τέτοια κεραία παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



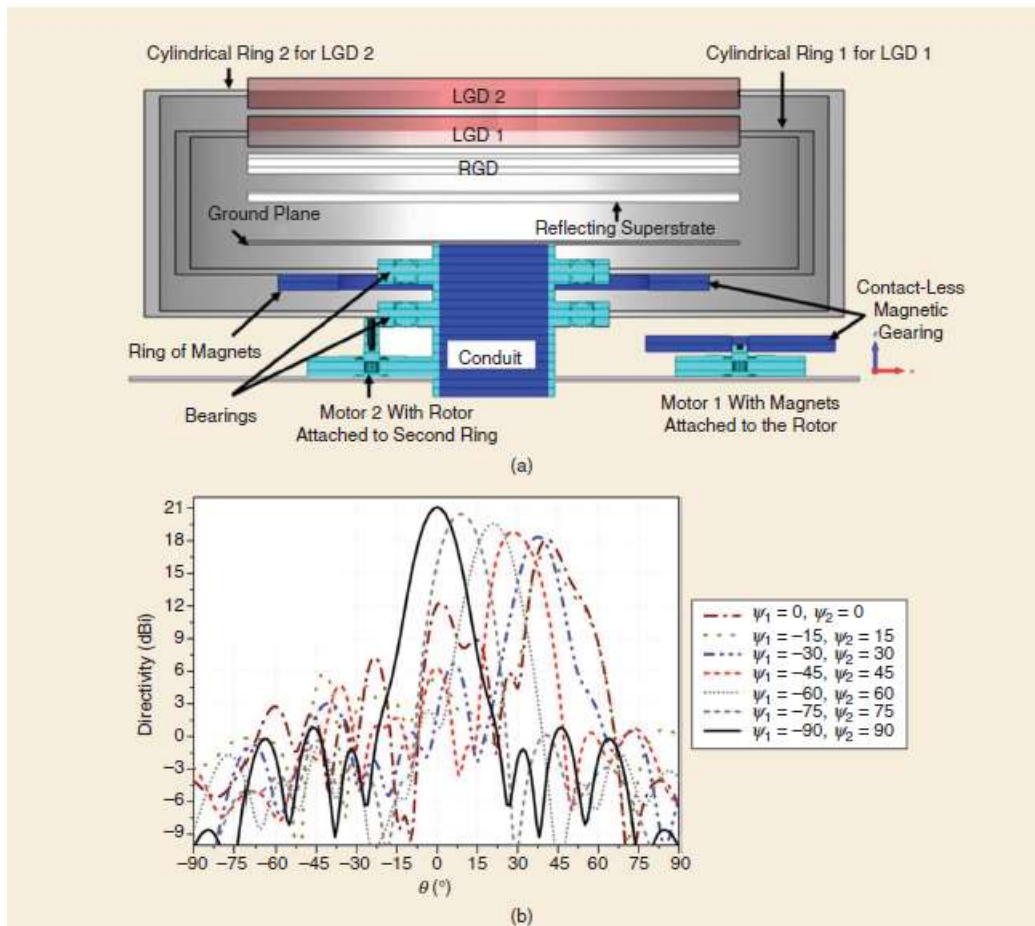
Σχήμα 13: Κεραία με ανακλαστήρα με κινητά περιστρεφόμενα τμήματα, κυκλική πόλωση, προοριζόμενη για λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων X. (a) το πρωτότυπο σχεδιασμού, (b) άποψη από το επάνω τμήμα με έμφαση στο μηχανισμό περιστροφής (c) παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας [95]

Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρά τη μηχανική πολυπλοκότητα, ο τύπος των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στο [95] είναι ισχυροί υποψήφιοι για αποδοτικές και ευρυζωνικές κεραίες συστοιχίας CP, λόγω του μηχανισμού της εγγενώς ανεξάρτητης μετατόπισης φάσης ως προς τη συχνότητα λειτουργίας.

### Κίνηση των στοιχείων ανοίγματος της κεραίας

Υπάρχουν πολλοί τρόποι μηχανικής σάρωσης της δέσμης ακτινοβολίας μιας κεραίας με τοποθέτηση ενός τμήματος διαφράγματος επί της κεραίας. Μεταξύ αυτών, η κεραία πρίσματος Risley (RPA) [96] – [99], είναι μια μοναδική προσέγγιση. Η ιδέα του RPA βασίζεται στην οπτική όπου η περιστροφή ενός ζεύγους πρισμάτων μπορεί να κατευθύνει μια δέσμη laser που διαδίδεται μέσω του συστήματος. Αυτή η ιδέα εφαρμόστηκε αρχικά στον φούρνο μικροκυμάτων που χρησιμοποιεί ένα ζεύγος διηλεκτρικών σφηνών [100]. Πιο πρόσφατα, επίπεδα ζεύγη πομπού έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη

κατευθύνσεως της δέσμης [96] – [98]. Στην ερευνητική εργασία [96], γραμμικές μετατοπιστικές συστοιχίες φάσης χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή εκτροπής της δέσμης ακτινοβολίας με παρόμοιο τρόπο όπως με τα πρίσματα. Στα 30 GHz, η κατασκευασμένη κεραία πέτυχε σάρωση δέσμης πάνω από 70°. Στην ερευνητική εργασία [99], η γραμμικά διαβαθμισμένη διηλεκτρική πλάκα (LGD) ενσωματώθηκε ως πρίσμα, του οποίου ο δείκτης διάθλασης κατασκευάστηκε να παρέχει τη γραμμική μετατόπιση φάσης για την αναμενόμενη εκτροπή της δέσμης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν μια σάρωση έως και 40° στη ζώνη X. Η κεραία παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 14: Παρουσίαση της γραμμικά πολωμένης κεραίας RPA. (a) η πρωτότυπη μηχανική υλοποίηση, (b) προσομοίωση της λειτουργίας που αποδεικνύει τη μεταβολή θέσης της δέσμης [99]

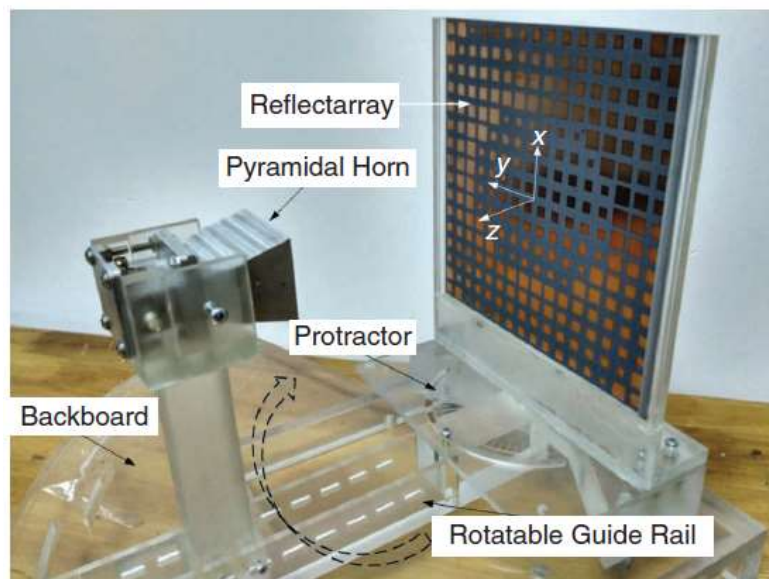
Όλες οι προαναφερόμενες υλοποιήσεις διαθέτουν τη δυνατότητα λειτουργίας κυκλικής πόλωσης - CP. Ένα τυπικό RPA απαιτεί δύο ανεξάρτητες κινήσεις, δηλαδή την εντός επιπέδου περιστροφή του για το πρώτο και το δεύτερο στρώμα. Ένα τέτοιο σύστημα απλοποιεί σημαντικά το κύκλωμα για αναδιαμόρφωση, καθώς δεν απαιτείται έλεγχος στοιχείων. Ωστόσο, υπάρχουν νέα μηχανικά σχέδια για την πρακτική εφαρμογή του RPA [99].

Μια άλλη προσέγγιση για την επίτευξη μηχανικής αναδιαμόρφωσης του διαφράγματος είναι η μετακίνηση εντός επιπέδου, όπως περιγράφηκε στην ερευνητική εργασία [101]. Σε αυτή την περίπτωση, η σάρωση δέσμης πραγματοποιήθηκε με τη μετακίνηση ενός ειδικού σχεδιασμένου πίνακα μετάδοσης με σταθερή τροφοδοσία. Για λειτουργία στη

ζώνη Ka-band, μια σάρωση δέσμης επιτεύχθηκε σε CP έως  $50^\circ$ . Αυτό το σχέδιο μπορεί δυνητικά να επιτρέψει μια σάρωση αζιμουθίου  $360^\circ$  περιστρέφοντας τη διάταξη της κεραίας. Η τεχνική μετακίνησης εντός επιπέδου απαιτεί την κίνηση μόνο ενός στρώματος, σε βάρος ενός μεγαλύτερου φυσικού ανοίγματος.

### **Κίνηση του στοιχείου τροφοδοσίας της κεραίας**

Αυτός ο τύπος μηχανικής αναδιαμόρφωσης χρησιμοποιεί την κίνηση τροφοδοσίας για να επιτύχει μεταβολή σάρωσης της παραγόμενης δέσμης. Αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σάρωση με ανακλαστικές συστοιχίες, μεταδοτικές συστοιχίες και φακούς. Παραδοσιακά, ως σταθερό στοιχείο οι ανακλαστικές συστοιχίες έχουν σχεδιαστεί για μια θέση σταθερής τροφοδοσίας. Η απόδοση για τέτοιες συστοιχίες ανακλαστικών μπορεί να υποβαθμιστεί σημαντικά, εάν το κέντρο φάσης της τροφοδοσίας μετατοπίζεται από την ιδανική θέση, λόγω της ευαισθησίας που σχετίζεται με την απόκριση φάσης των μεμονωμένων στοιχείων [102]. Στην ερευνητική εργασία [103], αναπτύχθηκε μια διαδικασία βελτιστοποίησης για να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα φάσης καθώς η τροφοδοσία κινείται κατά μήκος ενός κυκλικού τόξου πάνω από τον ανακλαστικό πίνακα. Το κατασκευασμένο πρωτότυπο πέτυχε LP σάρωση δέσμης έως  $45^\circ$  σε ένα επίπεδο, μετακινώντας την διάταξη τροφοδοσίας σε κυκλικό ίχνος, με ανακλαστική διάταξη σταθερού στοιχείου. Η κεραία αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 15: Μία μηχανικά ελεγχόμενη κεραία γραμμικής πόλωσης με χρήση μεταβλητής θέσης τροφοδότησης [103]

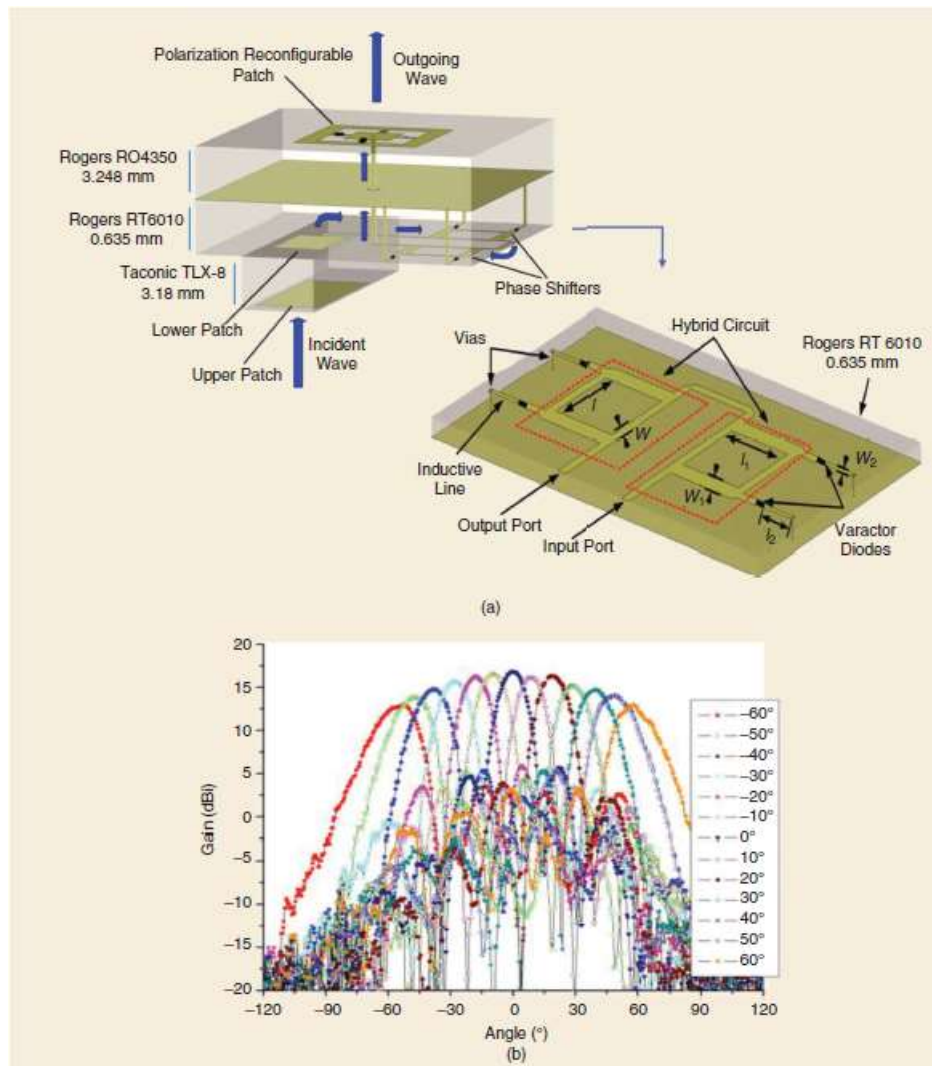
Στην ερευνητική εργασία αποδείχθηκε ότι για λειτουργία στα 12 GHz το εύρος ζώνης 1-dB ήταν περίπου 8%. Αν και η κάλυψη πλήρους δέσμης σε τρισδιάστατο χώρο με την κίνηση τροφοδοσίας μένει να διερευνηθεί, τα πρώτα αποτελέσματα έδειξαν πιθανές δυνατότητες για τις ανακλαστικές συστοιχίες.

### 2.4.3 Ηλεκτρονικά Κατευθυνόμενες Κεραίες

Οι ηλεκτρονικά κατευθυνόμενες κεραίες μπορούν να παρέχουν πολλά επιθυμητά χαρακτηριστικά όπως, η γρήγορη εναλλαγή του διαγράμματος ακτινοβολίας, το χαμηλό βάρος και η χαμηλή μηχανική πολυπλοκότητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά τις καθιστούν κατάλληλες για διαστημικές αποστολές και έχουν στρέψει σε αυτές σημαντικό μέρος της έρευνας. Το τίμημα που καταβάλλεται για τη σχετική ευκολία της μηχανικής ολοκλήρωσης είναι η περιορισμένη σάρωση φάσης. Μια μελέτη στην ερευνητική εργασία [104] έδειξε ότι η σάρωση φάσης 1 bit (δύο καταστάσεις φάσης), οδηγεί σε απώλεια κβαντισμού περίπου 3 dB, ενώ η ανάλυση φάσης 2 bit (κατευθύνσεις τεσσάρων φάσεων), θα μείωνε την απώλεια στο 1 dB. Έχουν αναφερθεί πολυάριθμες εργασίες σε αυτό τον τομέα με ποικίλες προσεγγίσεις λειτουργίας, και συνολικά οι αναδιαμορφώσεις πραγματοποιήθηκαν κυρίως σε επίπεδο μονάδας-κυψέλης. Λαμβάνοντας υπόψιν ειδικούς περιορισμούς στην πολυπλοκότητα, όπως την ισχύ και το κόστος για τα CubeSats, η ταξινόμηση των ηλεκτρονικά κατευθυνόμενων κεραιών, μπορεί να γίνει σε τρεις κύριες κλάσεις με βάση τα ηλεκτρονικά δομικά τους στοιχεία: με χρήση varactor, διόδου p-i-n και διακόπτη μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MicroElectronic Mechanical Systems - MEMS).

#### Varactors

Ένα varactor γενικά χρησιμεύει ως χωρητικός ρυθμιστής με τάση συνεχούς ρεύματος διότι το μεταβλητό φορτίο χωρητικότητας που εισάγει στο σύστημα, ελέγχει τη μετατόπιση φάσης της κεραίας. Δύο μεγάλες διατάξεις κεραιών έχουν διερευνηθεί, στις οποίες ο varactor μεταβάλλει τον συντονισμό της κεραίας [105], [106] ή ελέγχει τη μετατόπιση φάσης ενός εσωτερικού μετατοπιστή φάσης [107], [108]. Κατά την πρώτη προσέγγιση διαμόρφωσης, πραγματοποιείται η παραλλαγή στη φάση του στοιχείου μετατοπίζοντας τη συχνότητα συντονισμού μέσω μεταβαλλόμενης χωρητικότητας του varactor. Λόγω αυτής της φύσης, τέτοια στοιχεία είναι συνήθως στενής ζώνης [109] – [111]. Στοιχεία με πολλαπλούς συντονισμούς έχουν διερευνηθεί για την αύξηση του εύρους ζώνης συντονισμού [112]. Πρόσφατα, ένας ανακλαστικός πίνακας με στοιχείο split-patch φορτωμένο με varactor [113], πέτυχε σάρωση έως και 45° στα 13.58 GHz με εύρος ζώνης 1-dB περίπου στο 10%, όπως προέκυψε από προσομοιώσεις. Στη δεύτερη προσέγγιση διαμόρφωσης, το κελί της μονάδας χρησιμοποιεί μία Διάταξη "Rx (δέκτης) - μετατοπιστής φάσης - Tx (πομπός)", όπου οι varactors (που υπάρχουν στο στάδιο αλλαγής φάσης), ελέγχουν την αλλαγή φάσης. Χρησιμοποιώντας αυτήν την ιδέα, επιτεύχθηκε σε μία συστοιχία κεραιών (transmitarray) στο [108], σάρωση δέσμης LP έως 60° στα 5.4 GHz με εύρος ζώνης 8.5%. Η κεραία αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.

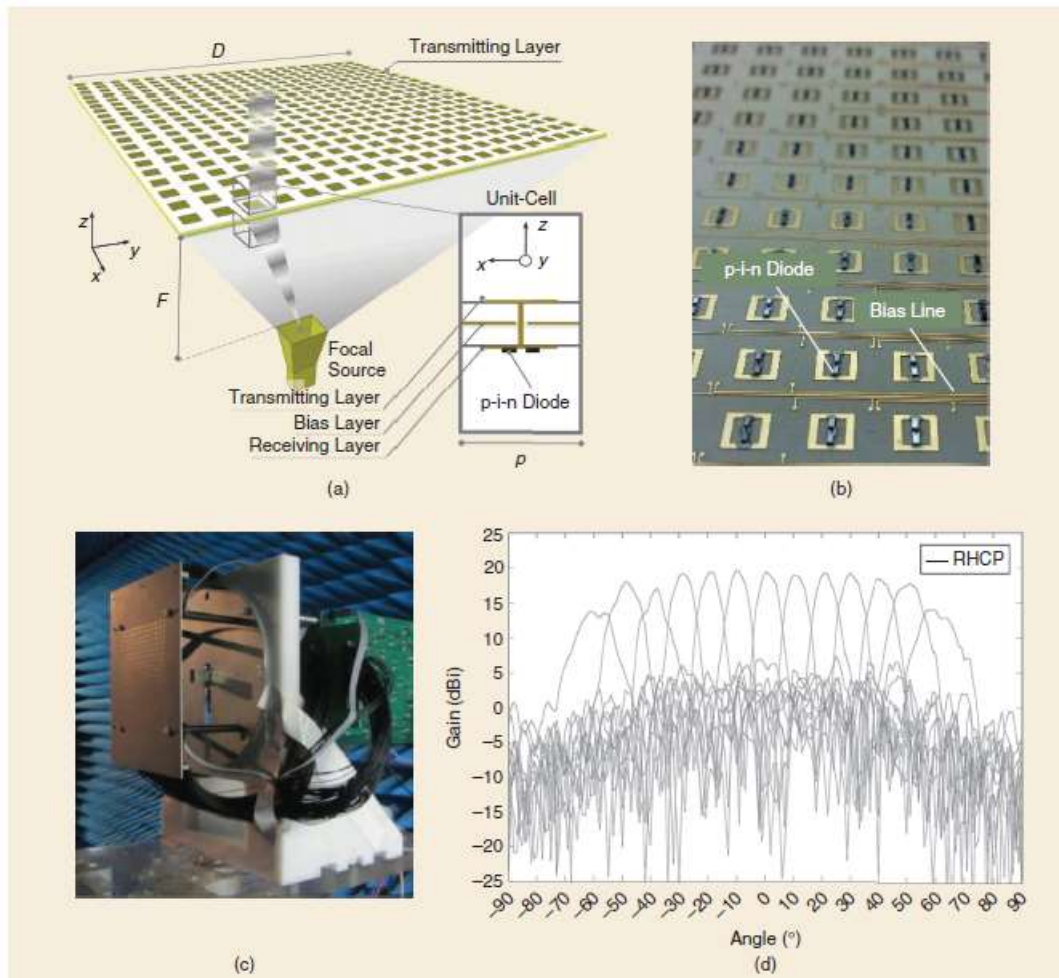


Σχήμα 16: Μία ηλεκτρονικά κατευθυνόμενη κεραία LP για τη ζώνη συχνοτήτων C, με χρήση varactor ολισθητή φάσης (a) κύκλωμα varactor (b) διάγραμμα ακτινοβολία [108]

Στην ερευνητική εργασία [114], έχει μελετηθεί ένας πομποδέκτης CP στη ζώνη 4.75 – 4.85 GHz, ο οποίος επιτυγχάνει ικανότητα σάρωσης έως 45°.

### Δίοδοι P-I-N

Η διάδος p-i-n λειτουργεί ιδανικά ως διακόπτης ελεγχόμενης τάσης και έχει εφαρμοστεί εκτενώς σε αναδιαμορφώσιμες κεραίες. Αλλάζει τη ροή ρεύματος στο στοιχείο, το οποίο τελικά αλλάζει μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων φάσης. Αφού μόνο ένας πεπερασμένος αριθμός των διόδων p-i-n μπορούν να υλοποιηθούν σε ένα κελί μονάδας, αυτό εγγενώς προκαλεί μια διακριτοποίηση στη μετατόπιση φάσης του στοιχείου. Με τη σειρά του οδηγεί σε αντιστάθμιση μεταξύ της αποδοτικότητας της κεραίας και της πολυπλοκότητας της μονάδας κυψέλης. Η επαναδιαμόρφωση φάσης 1 bit συνήθως, αν και όχι απαραίτητα, πραγματοποιείται με μονές ή διπλές διόδους p-i-n [115] – [117]. Κεραίες LP με ηλεκτρονική κατεύθυνση που εφαρμόζουν αυτήν την ιδέα, δίνουν αρκετά ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Επιτυχής υλοποίηση της αναδιαμόρφωσης 1 bit στο [118] πέτυχε σάρωση δέσμης CP έως 60° στη ζώνη Ka μέσα σε ένα εύρος ζώνης 14.6%. Η κεραία παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.

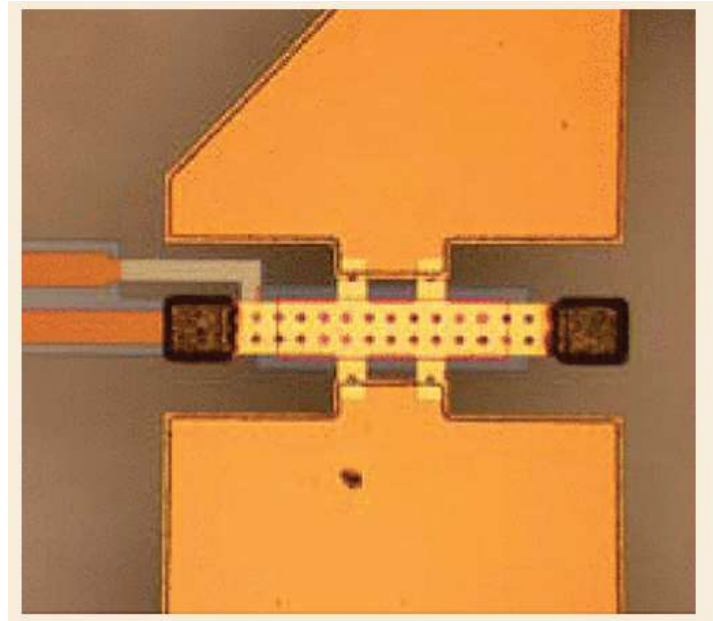


Σχήμα 17: Ηλεκτρονικά κατευθυνόμενα συστοιχία κεραιών CP με χρήση p-i-n διόδων. (a) το πρωτότυπο (b) η πλακέτα σχεδιασμού – ελέγχου με τη χρήση των διόδων (c) μετρήσεις από το πρωτότυπο (d) Τα παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας στα 29 GHz [118]

### Διακόπτες MEMS

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας MEMS επέτρεψε στη μικρογραφία MEMS την κατασκευή διακοπών για να διευκολύνει τις εφαρμογές RF [119]. Ο διακόπτης MEMS είναι εννοιολογικά παρόμοιος με τη δίοδο p-i-n, καθώς και τα δύο στοιχεία συμπεριφέρονται ως ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι διακόπτες. Επομένως, για περιορισμένη σάρωση φάσης μπορεί να εφαρμοστεί μεταγωγή με χρήση MEMS [120]. Τα κύρια πλεονεκτήματα των MEMS διακοπών, είναι η χαμηλή απώλεια, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η ικανότητά τους να ενσωματωθούν. Στο [121], οι διακόπτες MEMS είναι μονολιθικά ενσωματωμένοι σε μια κεραία ανακλαστικής διάταξης, πετυχαίνοντας σάρωση δέσμης 40°. Η κεραία λειτουργούσε στα 25.6 GHz, και η διάσταση του διακόπτη MEMS ήταν μόνο 0.4 × 0.14 mm, που υπογραμμίζει τις μεγάλες δυνατότητες του διακόπτη MEMS για εφαρμογές υψηλής συχνότητας.





Σχήμα 18: Διακόπτης MEMS [121]

## 2.5 Γενικά συμπεράσματα

Οι απαιτήσεις για κεραιές σάρωσης ευρείας ζώνης, CP, και ευρείας γωνίας έχουν εξελιχθεί καθώς η βιομηχανία αγωνίζεται να δημιουργήσει έναν αστερισμό από CubeSats για να υλοποιήσει το διαστημικό IoT. Ενώ πολλές πρόσφατες ερευνητικές εργασίες έχουν δείξει πολλές δυνατότητες, επιτυγχάνοντας όλες αυτές τις RF απαιτήσεις, η ενσωμάτωση των CubeSats παραμένει μια ανοιχτή πρόκληση. Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν δύο γενικές κατηγορίες κεραιών που είναι, οι μηχανικά κατευθυνόμενες και οι ηλεκτρονικά κατευθυνόμενες κεραιές. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που σχετίζονται με καθεμία από αυτές τις κατηγορίες συνοψίζονται στον Πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 4: Σύνοψη των χαρακτηριστικών για μηχανικά και ηλεκτρονικά κατευθυνόμενες κεραιές [86]

TABLE 2. A SUMMARY OF MAJOR STEERABLE ANTENNA ARCHITECTURES REVIEWED IN THIS ARTICLE.						
	Reconfiguration Techniques	Profile Variation	Expected Weight	Control System Complexity	Reconfiguration Speed	Quantization Loss
Mechanical reconfiguration	Element motion	Low	Medium	High	Medium	Low
	Aperture motion	Low/medium	Medium/high	Medium	Slow	N/A
	Feed motion	High	Medium/high	Medium	Slow	N/A
Electronic reconfiguration	Varactor tuned	No	Low	High	Fast	Low
	Diode switched	No	Low	High	Fast	≤ 3 dB
	MEMS switched	No	Low	High	Fast	≤ 3 dB

N/A: not applicable.

Μηχανικά κατευθυνόμενες κεραιές, οι οποίες ενσωματώνουν κάποια μορφή ενεργοποίησης με βάση έναν κινητήρα, μπορεί να είναι επιθυμητοί υποψήφιοι εάν αναπτυχθούν μικροσκοπικοί κινητήρες που πληρούν τις προδιαγραφές μάζας και ισχύος για τα CubeSats. Μέχρι τότε, οι ηλεκτρονικά κατευθυνόμενες κεραιές φαίνονται πιο βολικές για χρήση σε CubeSats. Ωστόσο, μια μεγάλη πρόκληση στα ηλεκτρονικά συστήματα διεύθυνσης, είναι ότι η πολυπλοκότητα του κυκλώματος αυξάνεται δραματικά καθώς ο αριθμός των διακοπών αυξάνεται. Μια επίλυση φάσης μεγαλύτερη από 1 bit είναι απαραίτητη για τον περιορισμό της απώλειας κβαντισμού κάτω από 2 dB. Αυτό συνήθως απαιτεί περισσότερους από δύο διακόπτες ανά μονάδα κελιού. Δεδομένου ότι το μήκος κύματος λειτουργίας είναι της τάξης του ενός εκατοστού, τέτοιες κεραιές μπορεί να έχουν εκατοντάδες τέτοια κελιά μονάδας, καθιστώντας τη φυσική υλοποίηση πολύ περίπλοκη, καθώς η ανοχή κατασκευής είναι πολύ κρίσιμη. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες από τις κεραιές που εξετάζονται σε αυτό το κεφάλαιο πρέπει να είναι σωστά προσαρμοσμένες πριν χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές σε CubeSats.

# 3

## Σχεδιασμός Κεραιών για CubeSats

### 3.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία Cube Satellites (CubeSats) είναι μια ελκυστική και αναδυόμενη εναλλακτική λύση, έναντι των συμβατικών δορυφόρων, με εφαρμογές στη ραδιοαστρονομία, την γήινη παρατήρηση, την πρόγνωση του καιρού, τη διαστημική έρευνα και τις επικοινωνίες. Μελλοντικά η τεχνολογία είναι επίσης πολλά υποσχόμενη, για απρόσκοπτη διαδικτυακή κάλυψη για εφαρμογές IoT. Το μέγεθος των κυκλωμάτων της απαιτούμενης τεχνολογίας, ωστόσο, θέτει πολύ προκλητικούς περιορισμούς στα ίδια τα κυκλώματα και τα εξαρτήματα που απαιτούνται για την υλοποίησή τους. Ένα από τα κύρια συστατικά που απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό για την τεχνολογία των CubeSats, είναι οι κεραιές τους, καθώς απαιτείται να είναι ελαφριές, μικρές σε μέγεθος και συμπαγείς ή επεκτάσιμες ως στοιχειοκεραίες για το σχηματισμό μεγαλύτερων κεραιών με ευρύτερα (όσο το δυνατόν) διαγράμματα ακτινοβολίας. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των απαιτούμενων κεραιών για την εφαρμογή της τεχνολογίας των CubeSats, ως προς την υλοποίηση ενός σχεδιασμού μίας τέτοιας κεραιάς.

Οι διαστάσεις των CubeSats έχουν προτυποποιηθεί σε μετρικές μονάδες U, όπου η πρότυπη μονάδα αντιστοιχεί σε  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ . Οι πρότυπες διαστάσεις των CubeSats εκτείνονται σε 1U, 3U, 6U έως και 12U. Συνήθως οι δορυφόροι αυτού του τύπου τίθενται σε τροχιά χαμηλής πτήσης ως προς τη γη, (Low Earth Orbit – LEO), σε ύψη από 160 Km έως 2000 Km.

Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων επικοινωνίας που βασίζονται στα CubeSats, καθορίζεται από τις εκτιμήσεις για την απώλεια ισχύος (link budget analysis), στις οποίες

επιδρά σημαντικά η απόδοση της κεραίας. Το μέγεθος της κεραίας που τοποθετείται σε ένα CubeSat, καθώς και η δομή της, εξαρτάται από το απαιτούμενο κέρδος και τη λειτουργία της στην καθορισμένη ζώνη συχνοτήτων. Λόγω της ανάγκης για συστοιχίες κεραιών (πολλαπλών στοιχείων) για την ενίσχυση του κέρδους, η χρήση τεχνικών μικρογραφίας (miniaturization) είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση κατάλληλου τελικού μεγέθους της κεραίας, για την εφαρμογή της στις μικρές επιφάνειες που διαθέτει το CubeSat. Επιπλέον, η κεραία πρέπει να παρουσιάζει κατάλληλη πόλωση για να εξασφαλίσει την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτές τις προκλήσεις, αναμένεται οι κεραίες που θα χρησιμοποιηθούν να είναι μάλλον διακριτές τύπου patch, για τη συγκρότηση στοιχειοκεραιών σε σύγκριση με αυτές που εφαρμόστηκαν σε συμβατικούς δορυφόρους.

Οι ζώνες συχνοτικής λειτουργίας συμπεριλαμβάνουν περιοχές από τα VHF, UHF, S και K bands. Εκτός από την ανάγκη για υψηλά κέρδη στη ζώνη των συχνοτήτων λειτουργίας, η πόλωση για μια κεραία CubeSat είναι επίσης σημαντική. Οι κεραίες κυκλικής πόλωσης (CP), χρησιμοποιούνται συνήθως σε διάφορες εφαρμογές δορυφορικής επικοινωνίας, λόγω της ικανότητάς τους να λαμβάνουν τυχαία πολωμένα σήματα καλύτερα από μια γραμμικά πολωμένη κεραία, από διαφορετικές διευθύνσεις. Αυτό είναι πλεονεκτικό για επικοινωνία από απόσταση μεταξύ δορυφόρου – δορυφόρου καθώς και επίγειων σταθμών.

Ίσως το πιο κρίσιμο χαρακτηριστικό για τις κεραίες που χρησιμοποιούνται σε ένα CubeSat, είναι το συμπαγές μικρό μέγεθος τους. Δεν υπάρχει ακόμη μια σειρά τυποποιημένης λειτουργίας των κεραιών στη συχνότητα για τα CubeSats, και είναι σχεδόν αδύνατο να σχεδιαστεί μια «καθολική» κεραία, ικανή να καλύψει όλες τις συχνοτικές ζώνες. Έτσι, οι τεχνικές μικρογραφίας είναι σημαντικές, ειδικά όταν σχεδιάζονται κεραίες που λειτουργούν στη ζώνη των VHF και UHF (λόγω του μεγάλου μήκους κύματος της επικοινωνίας που επιβάλλει συγκρίσιμες διαστάσεις με τα μεγέθη της κεραίας). Οι τεχνικές μικρογραφίας καταλήγουν σε ηλεκτρικά μικρές κεραίες, οι οποίες είναι εξαιρετικά επιθυμητές, ειδικά σε εφαρμογές με περιορισμούς χώρου για την εγκατάστασή τους. Αρκετές περιπτώσεις τέτοιων κεραιών περιλαμβάνουν τεχνικές αναδίπλωσης, σπείρας ή έλικας. Εκτός από το μέγεθος, απαιτούνται επίσης υψηλά κέρδη και κυκλική πόλωση. Μια μέθοδος για να ξεπεραστεί ο περιορισμός χώρου-επιφάνειας, είναι το αναδιπλωμένο στοίβαγμα της κεραίας (stowage) πριν από την ανάπτυξη της στο διαστημικό σταθμό.

Το υλικό είναι μια από τις πιο σημαντικές πτυχές στην ανάπτυξη μια κεραίας. Εκτός από την ανάγκη συμμόρφωσης με τη λειτουργία του διαστημικού περιβάλλοντος, πρέπει επίσης να προσδιοριστεί η επιλογή του κατάλληλου υλικού, σύμφωνα με τη συχνότητα λειτουργίας, τις απαιτήσεις κέρδους, και την ελαστικότητα του, εφόσον απαιτείται μία αναδιπλούμενη κεραία. Πιθανά εύκαμπτα υλικά, όπως το πολυαμίδιο Kαρτον και ταινίες Mylar, αποτελούν ιδανικά υλικά για την τελευταία περίπτωση. Εκτός από αυτά τα εύκαμπτα υλικά, τα συμβατικά άκαμπτα υποστρώματα και οι φακοί (lenses) μπορούν επίσης να επιλεγούν, λόγω καταλληλότητάς τους για χρήση σε διαστημικές εφαρμογές. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κεραιών αυτού του τύπου είναι:

- FR4 boards
- Συμβατικά μέταλλα
- Films
- Μεμβράνες

Για την ανάλυση της συμπεριφοράς των κεραιών στο περιβάλλον CubeSat, απαιτείται προσομοίωση (πριν την κατασκευή και μέτρηση των πρωτοτύπων), για την εξαγωγή των απαιτούμενων αριθμητικών αποτελεσμάτων (ανάλυση πεδίου, διαγράμματα ακτινοβολίας, εύρος ζώνης, σύνθετη αντίσταση, κ.λπ.). Βάση για αυτήν την ανάλυση και σχεδίαση των κεραιών της παρούσας εργασίας, είναι το περιβάλλον HFSS<sup>®</sup>. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του περιβάλλοντος, καθώς θα αποτελέσει το περιβάλλον ανάλυσης για το σχεδιασμό των κεραιών της εργασίας.

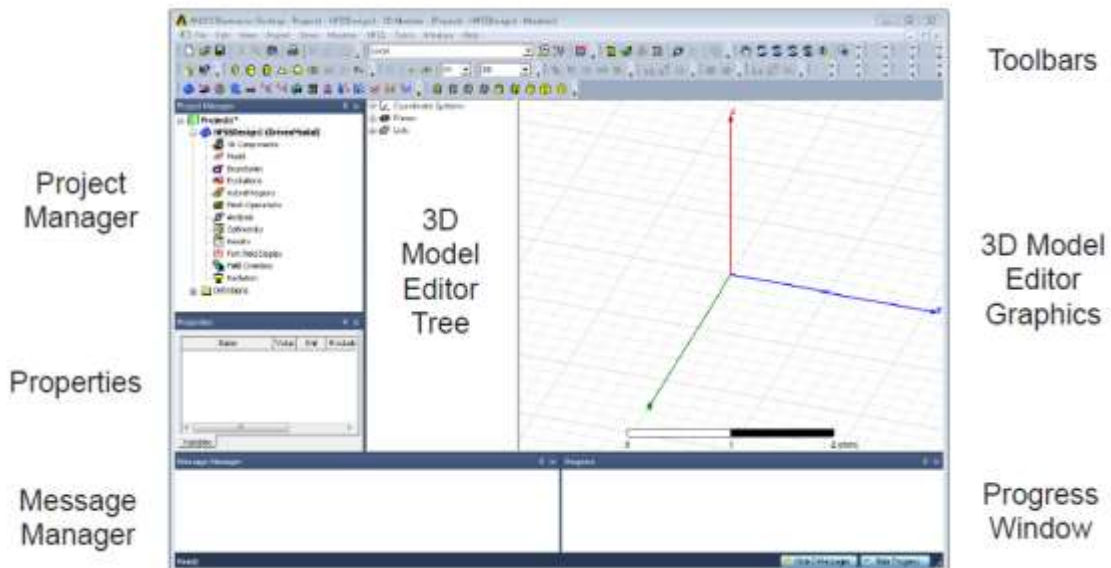
### **3.2 Το περιβάλλον ανάλυσης και προσομοιώσεων HFSS<sup>®</sup>**

Το περιβάλλον HFSS<sup>®</sup> 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 - FEM). 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) [122].

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 τους. Το περιβάλλον HFSS<sup>®</sup> είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο για σχεδιασμό RF και μικροκυματικών (microwave) συστημάτων. Το πακέτο υποστηρίζει [123], [124]:

- 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 διεπαφαιών (connectors)
- Ελέγχους Η/Μ 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<sup>®</sup>:

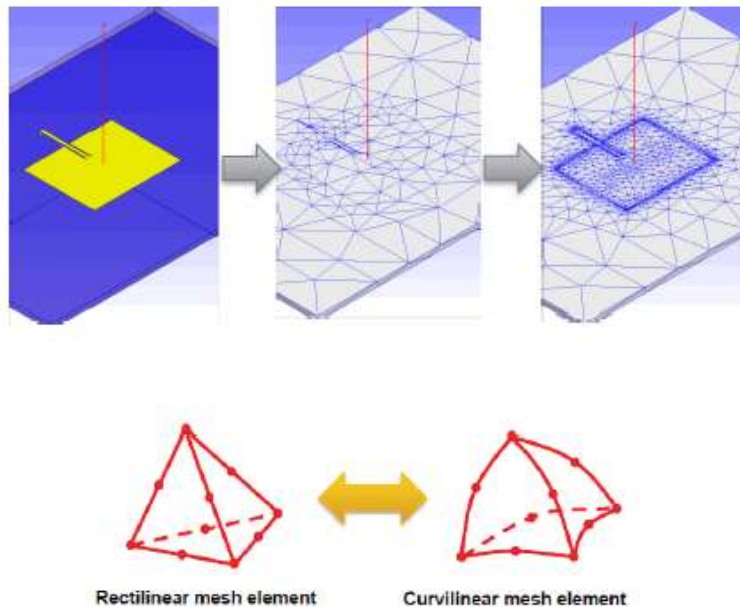


Σχήμα 19: Παρουσίαση του HFSS<sup>®</sup> [124]

Το περιβάλλον προσομοίωσης παρέχει επιλύτες (solvers) για τις ακόλουθες μορφές προβλημάτων [124]:

- 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.
- Επιτρέπει ορισμό Ακροδεκτών για την επιβολή πεδίου διέγερσης της διάταξης δηλαδή, καθοδηγούμενη εκπομπή (Driven Solution).
- Επιτρέπει Ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων των παραγόμενων ρυθμών διέγερσης (TEM).
- Επιτρέπει Υπολογισμό 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.

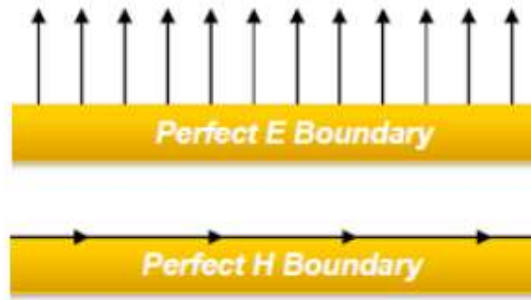


Σχήμα 20: Ο Adaptive Mesh Algorithm του HFSS® [124]

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 [123], [124].

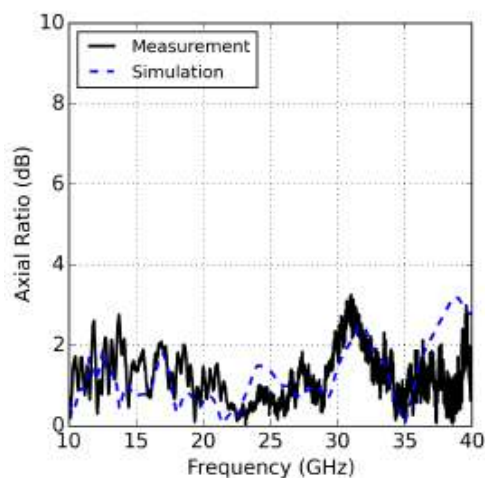
Το περιβάλλον προσομοίωσης του HFSS® για την επίλυση των εξισώσεων, επιτρέπει την χρήση συνοριακών συνθηκών. Οι συνοριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται για να απλοποιήσουν την γεωμετρία, και για να διευκολύνουν την διαδικασία κατασκευής πλέγματος για τον υπολογισμό των πεδίων. Στα υλικά που ορίζονται επί 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 γειωμένων (ηλεκτρικά/μαγνητικά ουδέτερων) επιφανειών (Perfect E/H boundary).



Σχήμα 21: Τέλεια Ηλεκτρικές και Μαγνητικές Επιφάνειες [124]

Το περιβάλλον προσομοίωσης του HFSS<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> 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 22: Σύγκριση Πραγματικά μετρούμενων τιμών και αποτελέσματα προσομοίωσης με το HFSS<sup>®</sup> [124]

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 για τις κεραιές του CubeSat

Το περιβάλλον HFSS<sup>®</sup> χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του συνόλου των κεραιών τύπου Patch, που θα χρησιμοποιηθούν ως βάση για την υλοποίηση του δορυφορικού και του επίγειου καναλιού επικοινωνίας. Από τις προηγούμενες ενότητες έχουν παρουσιασθεί τα χαρακτηριστικά και οι ιδιαιτερότητες μίας τέτοιας διάταξης για την υποστήριξη επικοινωνίας και εφαρμογών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η υφιστάμενη κεραία θα πρέπει να υποστηρίξει τόσο την επικοινωνία μετάδοσης καθώς και λήψης δεδομένων (διαφορετικά κανάλια Tx/Rx). Αυτό συνεπάγεται ένα εύρος ζώνης για την επικάλυψη των παραπάνω καναλιών. Οι ζώνες συχνοτήτων για τη λειτουργία των CubeSats, είναι ανοικτές και μη αυστηρά πρωτυποποιημένες για τη λειτουργία του καναλιού (επιτρέπουν τη χρήση πολλών δεσμών – bands). Για όλους αυτούς τους λόγους για το σχεδιασμό των κεραιών του CubeSat επιλέχθηκε ως βάση φέροντος η ζώνη συχνοτήτων 1 - 10 GHz.

Η παραπάνω ζώνη συχνοτήτων, 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 – 3% της συχνότητας λειτουργίας δηλαδή, παρέχοντας bandwidth 100 – 300 MHz. Η εκλογή της παραπάνω ζώνης συχνοτήτων δεν αποτελεί σημαντική σχεδιαστική δέσμευση, δεδομένου ότι με μικρές μεταβολές του μήκους του κεραιών τύπου Patch και τη σχετική διαδικασία προσομοίωσης, μπορεί να επιτευχθεί οποιαδήποτε άλλη συχνότητα συντονισμού για την διάταξη. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί, ότι ο συντονισμός αφορά ένα σύνολο 4 κεραιών τύπου patch που μετέχουν για το σχηματισμό του δορυφορικού καναλιού, και μίας ακόμη κεραίας τύπου Patch για την υλοποίηση του επίγειου καναλιού μετάδοσης. Η κυκλική πόλωση (CP) για το συνολικό σχεδιασμό της διάταξης, αποτελεί επίσης μία προδιαγραφή, η οποία θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψιν. Ο λόγος χρήσης της CP, είναι η διασφάλιση επικοινωνίας από σήματα που μπορεί να προέρχονται από διαφορετικές κατευθύνσεις. Η ανάλυση των κεραιών που χρησιμοποιούνται στα CubeSats, όπως παρουσιάστηκε και στις προηγούμενες ενότητες, θέτουν την κυκλική πόλωση ως σημαντική προδιαγραφή λειτουργίας των διατάξεων κεραιών των CubeSats.

Επιπλέον απαίτηση για τον σχεδιασμό του δορυφορικού καναλιού μετάδοσης/λήψης είναι η ελαχιστοποίηση κατανάλωσης που θα πρέπει να επιτυγχάνει μικρές καταναλώσεις για δικαιολογημένες αποστάσεις διασύνδεσης σε συνθήκες LOS (Line of Sight). Ο παραγόμενος λοβός και το διάγραμμα ακτινοβολίας της σχεδιαζόμενης διάταξης, θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευρυγώνιος, διασφαλίζοντας διασύνδεση και συνθήκες LOS για όλες τις φάσεις κίνησης του CubeSat. Όλα τα προηγούμενα χαρακτηριστικά σχεδιασμού (προδιαγραφές) συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 5: Προδιαγραφές για την σχεδιαζόμενη διάταξη κεραιών τύπου patch για την υποστήριξη δορυφορικού και επίγειου καναλιού σε CubeSat

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Ζώνη Συχνοτήτων Λειτουργίας Για τα κανάλια Rx/Tx (X/S-band)	1 - 10 GHz
Εύρος Ζώνης (bandwidth)	100 – 300 MHz
Επίπεδα Κατανάλωσης	Ελάχιστο δυνατό

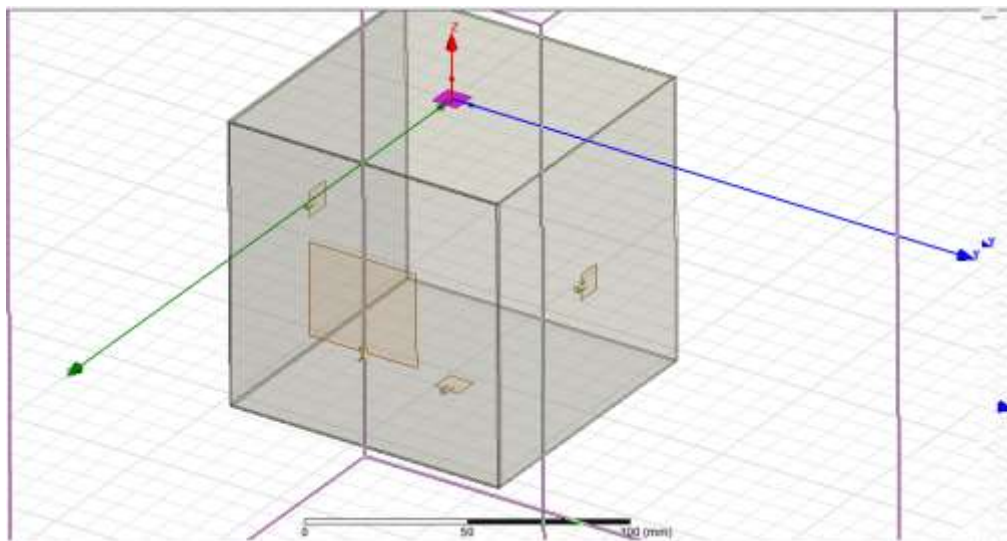
Ισχύος	(συνάρτηση της απόστασης εμβέλειας)
Εύρος Λοβού ακτινοβολίας	Μέγιστο
Διαστάσεις	Κλίμακας cm (επικάθιση σε CubeSat 1U)
Γεωμετρική Μορφή Κεραιών	Ορθογωνική
Πόλωση διάταξης	Κυκλική – CP

Το σχήμα της κεραίας τύπου patch επιλέχθηκε να είναι ορθογωνικό, για απλοποίηση της διαδικασίας σχεδιασμού. Επιπλέον το ορθογωνικό σχήμα είναι εύκολα προσαρμόσιμο στις επιφάνειες του CubeSat. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατανάλωση ισχύος για την διάταξη, είναι πλήρης συνάρτηση των αποστάσεων εκπομπής/λήψης. Η τροφοδότηση της διάταξης θα γίνει από τα άκρα (edge – fed) των κεραιών, από ενέργεια που προέρχεται από τα ηλιακά panels του CubeSat.

Στην συνέχεια οι παραπάνω προδιαγραφές θα ληφθούν υπόψιν για τον σχεδιασμό και την προσομοίωση των λειτουργιών της κεραίας στο περιβάλλον HFSS<sup>®</sup> 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 διάταξης των κεραιών του CubeSat.

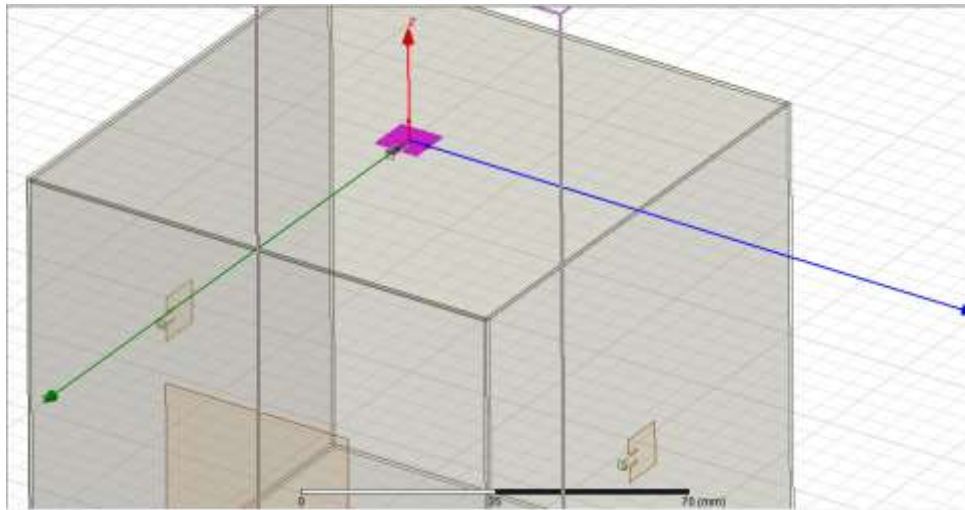
### 3.4 Σχεδιασμός της συνολικής διάταξης κεραιών του CubeSat

Για το σχεδιασμό του συστήματος μετάδοσης – λήψης σημάτων του δορυφορικού και επίγειου καναλιού του CubeSat, χρησιμοποιήθηκε μία πρότυπη διάταξη μεγέθους 1U (10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup>) σχήματος κύβου, επί των επιφανειών της οποίας, τοποθετήθηκε συστοιχία κεραιών τύπου patch. Οι 4 από τις κεραίες τύπου patch, χρησιμοποιούνται για τη δορυφορική επικοινωνία σε συχνότητα 9.1 GHz (X-band) ενώ μία πέμπτη κεραία τοποθετήθηκε σε μία από τις 2 ελεύθερες επιφάνειες (από το σύνολο των 6 επιφανειών του κύβου του CubeSat), για τη διασφάλιση επικοινωνίας με το σταθμό βάσης (επίγειο σταθμό), σε συχνότητα 3.9 GHz (S-band). Η διάταξη όπως υλοποιήθηκε στο περιβάλλον HFSS<sup>®</sup> παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:

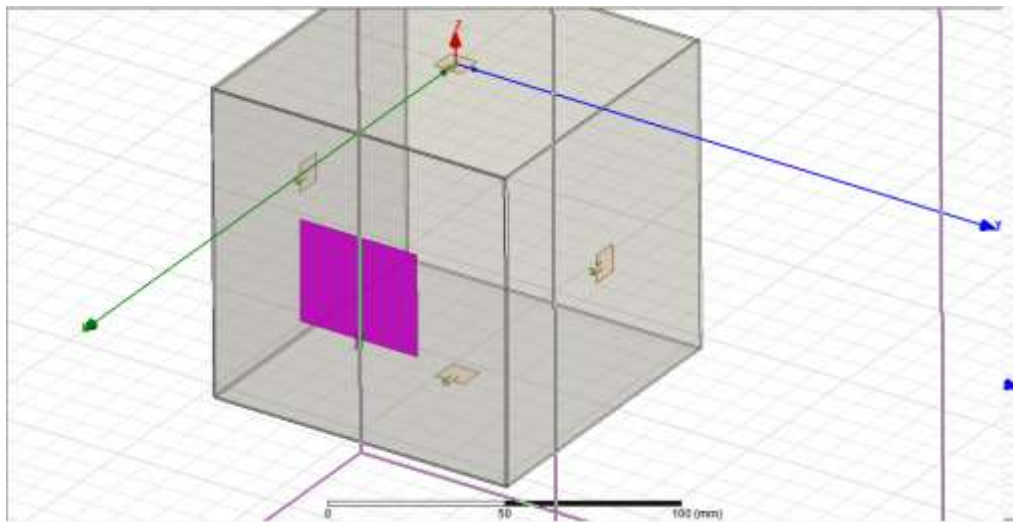


Σχήμα 23: Η διάταξη κεραιών του CubeSat στο περιβάλλον HFSS<sup>®</sup>

Ο κύβος του CubeSat συνίσταται από μεταλλικά περιβλήματα. Επί των πλευρών του κύβου του CubeSat, διακρίνονται οι 4 κεραίες τύπου patch (μικρότερων διαστάσεων) και μία Πέμπτη κεραία, η οποία συντονίζεται σε χαμηλότερη συχνότητα (κεραία τύπου patch μεγαλύτερων διαστάσεων). Οι δύο ζώνες συχνοτήτων για τη μετάδοση/λήψη, έχουν επιλεγεί να είναι διαφορετικές για να μειωθούν τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης – παρεμβολής για τα δύο κανάλια μετάδοσης/λήψης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία πιο αναλυτική άποψη των κεραίων για δορυφορική και επίγεια επικοινωνία:



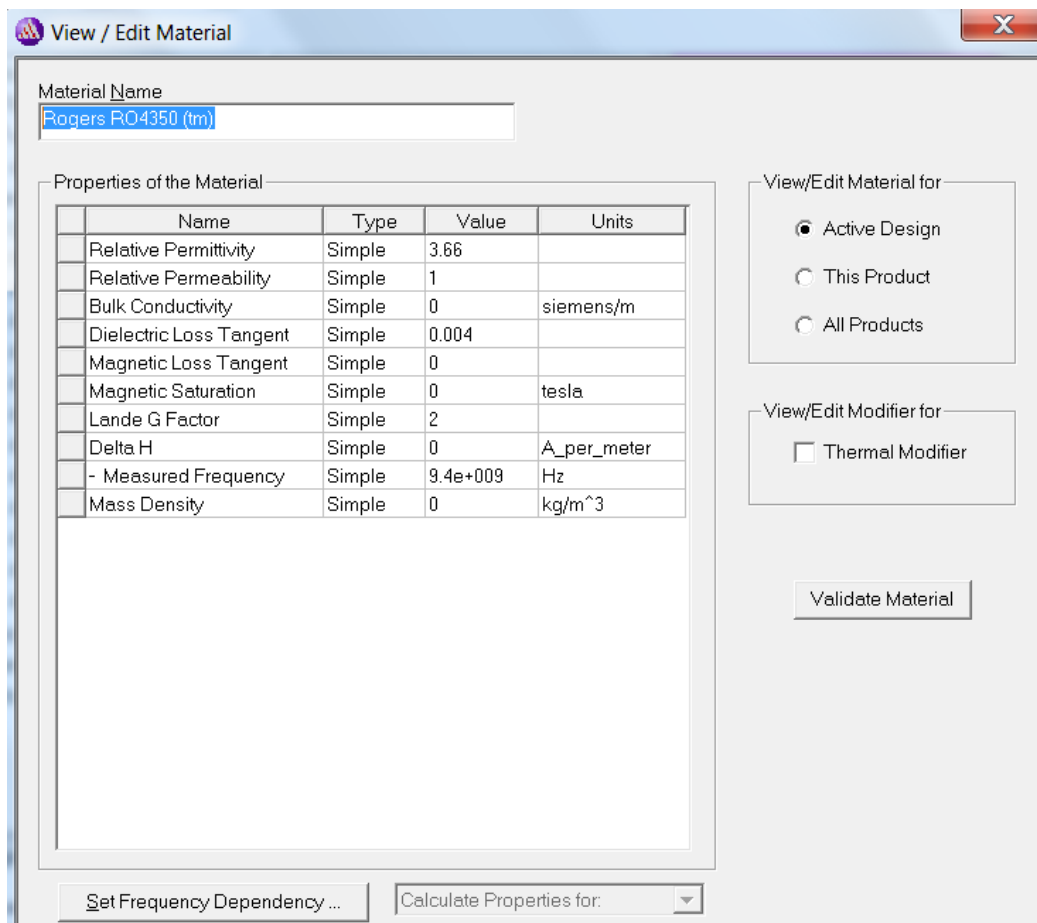
Σχήμα 24: Κεραίες τύπου patch για τη δορυφορική επικοινωνία (επικεντρωμένη άποψη)



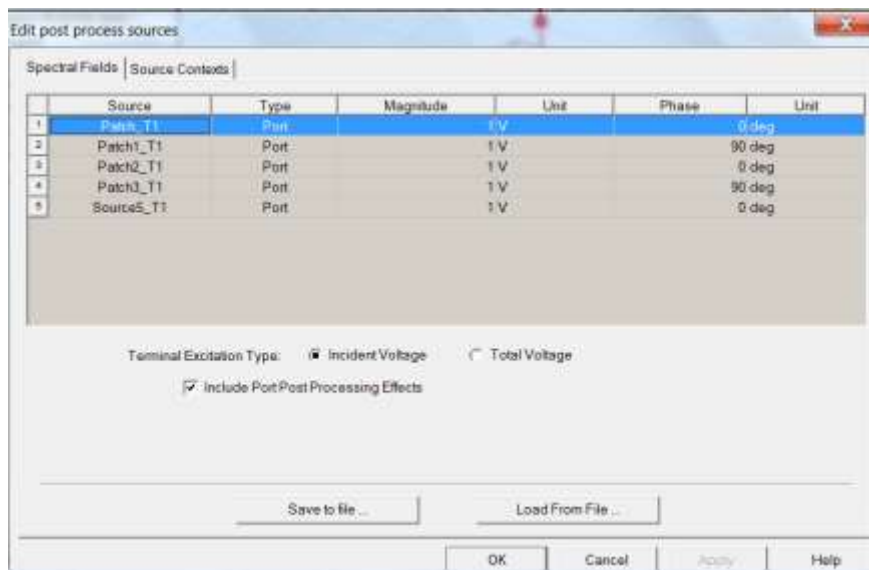
Σχήμα 25: Κεραία τύπου patch για την επίγεια επικοινωνία (επικεντρωμένη άποψη)

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την διαμόρφωση των επιστρώσεων για τις κεραίες τύπου patch επί των επιφανειών του CubeSat, είναι το Rogers RO4350. Το υλικό εμφανίζει ηλεκτρική διαπερατότητα με τιμή 3.66. Τα υπόλοιπα τεχνικά/ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 6: Τεχνικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του υλικού επιστρώσεως Rogers RO 4350



Η πυροδότηση των 4 πλευρικών κεραιών τύπου patch γίνεται ανά ζεύγη με διαφορά φάσεως  $90^\circ$ , με στόχο την επίτευξη κυκλικής πόλωσης (CP) για τη διάταξη της στοιχειοκεραίας που προορίζεται για τη δορυφορική επικοινωνία. Η πέμπτη (μεγαλύτερη σε μέγεθος) κεραία, που προορίζεται για την επικοινωνία με τον επίγειο σταθμό βάσης, πυροδοτείται κανονικά ( $0^\circ$ ). Τα κυκλώματα πυροδότησης έχουν εισαχθεί στο περιβάλλον HFSS<sup>®</sup> ως Lumped Sources, με χαρακτηριστική τυπική αντίσταση της τάξης των 50 Ohm. Τα κυκλώματα διασύνδεσης των κεραιών με τις πηγές σήματος, θεωρούνται ως εσωτερικά στον κύβο που ορίζει το CubeSat, ενώ δεν μελετώνται προβλήματα παρεμβολής μεταξύ τους, καθώς ο κύβος συνίσταται από μεταλλικές επιφάνειες  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  οι οποίες απομονώνουν τα κυκλώματα τροφοδοσίας από το εξωτερικό περίβλημα και τις κεραιές (κλωβός). Η πυροδότηση παρουσιάζεται στον καθορισμό των παραμέτρων στο περιβάλλον HFSS<sup>®</sup>. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι διαφορές φάσεις για τις 4 κεραιές (ανά ζεύγη), ενώ η Πέμπτη κεραία πυροδοτείται χωρίς μεταλλαγή φάσης.



Σχήμα 26: Στοιχεία πυροδότησης των κεραιών του συστήματος CubeSat

Η τροφοδότηση των κεραιών θεωρείται ότι γίνεται από εσωτερικό κύκλωμα το οποίο είναι εγκατεστημένο, εσωτερικά του μεταλλικού περιβλήματος του CubeSat. Οι κεραιές που προορίζονται για τη δορυφορική επικοινωνία έχουν διαστάσεις  $l_p = 8.6$  mm (μήκος) και  $w_p = 9$  mm (πλάτος). Η κεραιά που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με τον επίγειο σταθμό βάσης έχει αντίστοιχες διαστάσεις  $l_{pg} = 33$  mm και  $w_{pg} = 40$  mm. Όλες οι κεραιές είναι τοποθετημένες στα γεωμετρικά κέντρα των παράπλευρων επιφανειών του κύβου του CubeSat.

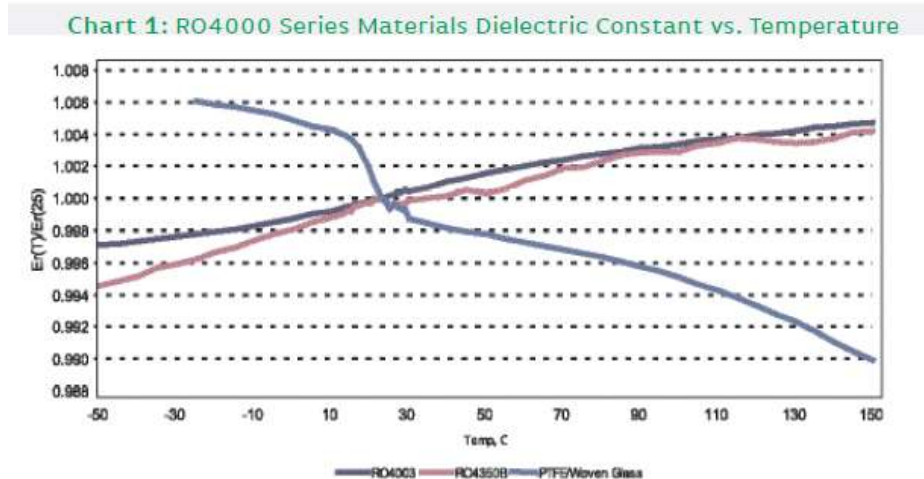
### 3.4.1 Υλικό υποστρώματος

Για το υλικό του υποστρώματος χρησιμοποιήθηκε από τις προσφερόμενες βιβλιοθήκες του HFSS®, το υλικό Rogers RO4350 [125]. 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 (laminiate), 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.

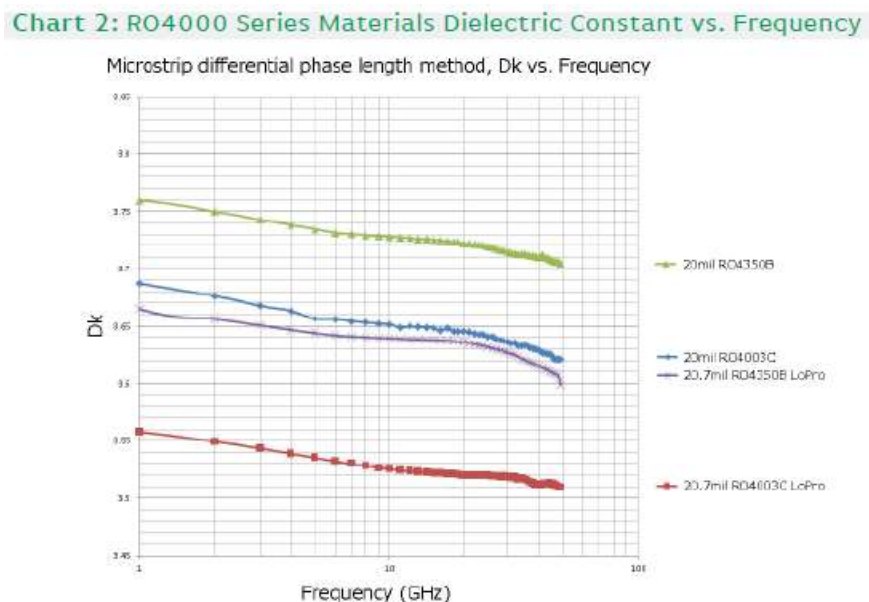
Τα συνήθη υλικά αυτού του τύπου περιορίζουν την λειτουργία τους σε συχνότητες μέχρι 400 MHz. Το συγκεκριμένο υλικό προσφέρει λειτουργία σε μικροκυματικές συχνότητες, και είναι κατάλληλο για την υλοποίηση RF/microwave κυκλωμάτων και γραμμών μεταφοράς. Συνήθως, η λειτουργία των παρεχόμενων διηλεκτρικών 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 κεραιάς, μη μεταβάλλοντας τις φυσικές της διαστάσεις σε μικροκυματική λειτουργία με την

αύξηση της θερμοκρασίας. Το γεγονός αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό, λόγω της υψηλής συχνότητας λειτουργίας των κεραιών τύπου patch του CUbeSat, καθώς λόγω της τοποθέτησης τους είναι σε άμεση επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον του διαστήματος, στο οποίο μπορούν να παρατηρηθούν μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας (εκατοντάδων βαθμών).

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



Σχήμα 27: Διάγραμμα μεταβολής της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού υποστρώματος συναρτήσει της θερμοκρασίας [125]



Σχήμα 28: Διάγραμμα μεταβολής της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού υποστρώματος συναρτήσει της συχνότητας [125]

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι το επιλεγμένο υλικό είναι εξαιρετικά σταθερό σε μεταβολές θερμοκρασίας και συχνότητας. Τα ειδικότερα χαρακτηριστικά του υλικού της σειράς Rogers 4000 παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά του διηλεκτρικού υλικού υποστρώματος Rogers RO 4000 [125]

Property	Typical Value		Direction	Units	Condition	Test Method
	RO4003C	RO4350B				
Dielectric Constant, $\epsilon_r$ , Process	3.38 ± 0.05	<sup>(1)</sup> 3.48 ± 0.05	Z	--	10 GHz/23°C	IPC-TM-650 2.5.5.5 Clamped Stripline
<sup>(1)</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>		MΩ•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>		MΩ	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>(1)</sup> V-0				UL 94
Lead-Free Process Compatible	Yes	Yes				

Η αναλυτική μοντελοποίηση των υλικών βιβλιοθήκης του HFSS<sup>®</sup> παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 8: Προσφερόμενα διηλεκτρικά υποστρώματα κατασκευής από την βιβλιοθήκη του HFSS®

Name	Location	Origin	Relative Permittivity	Relative Permeability	Bulk Conduct
Rogers RO4350 (tm)	Project	Materials	3.66	1	0
Rogers RO4350 (tm)	SysLibrary	Materials	3.66	1	0
Rogers RT/duroid 5870 (tm)	SysLibrary	Materials	2.33	1	0
Rogers RT/duroid 5880 (tm)	SysLibrary	Materials	2.2	1	0
Rogers RT/duroid 6002 (tm)	SysLibrary	Materials	2.94	1	0
Rogers RT/duroid 6006 (tm)	SysLibrary	Materials	6.15	1	0
Rogers RT/duroid 6010/6010LM (tm)	SysLibrary	Materials	10.2	1	0
Rogers TMM 10 (tm)	SysLibrary	Materials	9.2	1	0
Rogers TMM 10i (tm)	SysLibrary	Materials	9.8	1	0
Rogers TMM 3 (tm)	SysLibrary	Materials	3.27	1	0
Rogers TMM 4 (tm)	SysLibrary	Materials	4.5	1	0

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 των κεραιών τύπου patch για τη διάταξη του CubeSat.

### 3.4.2 Γεωμετρικές Διαστάσεις των Κεραιών τύπου Patch

Οι γεωμετρικές διαστάσεις μίας κεραιάς τύπου patch μπορούν να προκύψουν με χρήση σχέσεων υπολογισμού, από τη καθορισμένη συχνότητα λειτουργίας της. Αρχικά υπολογίζουμε το μήκος κύματος για την βασική λειτουργία των 4 κεραιών:

$$c_0 = \lambda_0 * f_0 \quad (1)$$

Άρα έχουμε λοιπόν:

$$\lambda_0 = c_0 / f_0 = 3 \times 10^8 / 9.1 \times 10^9 = 0.0329 \text{ m} = 33 \text{ mm}$$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την ενεργό επιτρεπτικότητα:

$$\epsilon_e = (\epsilon_r + 1) / 2 \quad (2)$$

$$= (3.66 + 1) / 2 = 2.33$$

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



$$\lambda_e = \lambda_0 / \epsilon_e \quad (3)$$

$$= 0.033 \text{ m} / 2.33 = 0.014163 \text{ m} = 14.163 \text{ mm}$$

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

$$\frac{\delta f}{f_{res}} = 1.2 \frac{d}{w} \quad (4)$$

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

$w = 9 \text{ mm}$  (το πλάτος του πετάσματος).

$f_{res} = 9.1 \text{ GHz}$  (η συχνότητα συντονισμού της κεραίας).

Δίνοντας εύρος ζώνης  $\delta f = 0.955 \text{ GHz}$ . Το παραπάνω εκτιμώμενο εύρος είναι καθαρά προσεγγιστικό (και σαφώς υπερεκτιμημένο), 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 patch με κάποιες προσεγγίσεις μπορεί να γίνει με χρήση έτοιμης ρουτίνας υπολογισμού, όπως προσφέρεται στην [126], ο οποίος προσφέρει με βάση τον καθορισμό των παραμέτρων της κεραίας τους απαιτούμενους υπολογισμούς

Πίνακας 9: Αναλυτικοί υπολογισμοί για τις διαστάσεις ορθογωνικής κεραίας τύπου patch (λειτουργία στα 9.1 GHz) [126]

**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.

**Calculation**

Dielectric Constant:

Dielectric Height:

Operation Frequency:

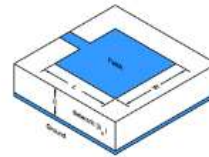
**CALCULATE**

---

**Result:**  
 Width: 10.79 mm  
 Length: 8.610 mm

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

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



Για τους υπολογισμούς παρουσιάζονται οι αναλυτικές σχέσεις, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη 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 (σε τάξη μεγέθους, όπως θα φανεί στην συνέχεια), με τα μικρορυθμιζόμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που προέκυψαν από την διαδικασία προσομοίωσης. Στη συνέχεια επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς για την κεραία Patch που προορίζεται για λειτουργία στη συχνότητα 3.9 GHz.

Πίνακας 10: Αναλυτικοί υπολογισμοί για τις διαστάσεις ορθογωνικής κεραίας τύπου patch (λειτουργία στα 3.9 GHz) [126]

### 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.

**Calculation**

Dielectric Constant:

Dielectric Height:

Operation Frequency:

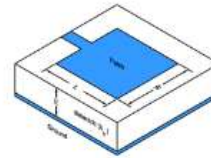
**CALCULATE**

---

**Result:**  
 Width: 25.18 mm  
 Length: 20.09 mm

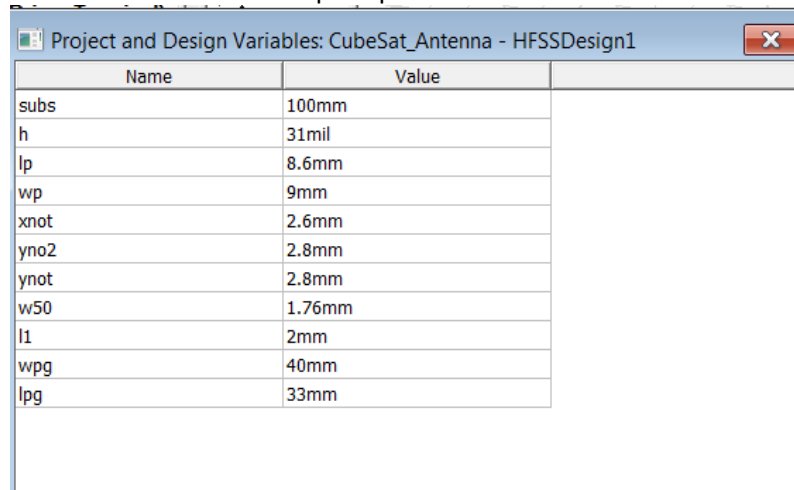
$$Width = \frac{c}{2f_0\sqrt{\frac{\epsilon_R+1}{2}}}; \quad \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_R+1}{2} + \frac{\epsilon_R-1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1+12\left(\frac{h}{W}\right)}} \right]$$

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



Στην συνέχεια οι διαστάσεις εισήχθησαν στο σχεδιασμό μέσω του HFSS και όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μεταβλήθηκαν με στόχο την ικανοποίηση όλων των προδιαγραφών σχεδιασμού για τη διάταξη CubeSat. Αναλυτικά οι γεωμετρικές διαστάσεις των κεραίων τύπου patch, προέκυψαν από τον σχεδιασμό και τις επιβαλλόμενες μικρορυθμίσεις (tuning), και παρουσιάζονται μέσα από τμήμα παραθύρου του σχεδιαστικού περιβάλλοντος HFSS:

Πίνακας 11: Γεωμετρικές Διαστάσεις των κεραιών τύπου patch του CUbeSat από το σχεδιαστικό παράθυρο του HFSS®



Name	Value
subs	100mm
h	31mil
lp	8.6mm
wp	9mm
xnot	2.6mm
yno2	2.8mm
ynot	2.8mm
w50	1.76mm
l1	2mm
wpg	40mm
lpg	33mm

Οι γεωμετρικές διαστάσεις που αφορούν στο μήκος και το πλάτος των κεραιών είναι αντίστοιχα οι  $lp = 8.6 \text{ mm}$  και η  $wp = 9 \text{ mm}$ , ενώ για τη μεγαλύτερη κεραία που προορίζεται για επικοινωνία στη συχνότητα των  $3.9 \text{ GHz}$  είναι τα  $lpg = 33 \text{ mm}$  και  $wpg = 40 \text{ mm}$ . Παρατηρούμε μία σχετική απόκλιση για τον υπολογισμό των διαστάσεων των κεραιών τύπου patch 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, δηλαδή ότι η ακρίβεια αυτών των σχέσεων είναι θεμελιώδης για τον καθορισμό της τάξης μεγέθους των κεραιών, ενώ πιο ακριβείς τιμές προκύπτουν μετά την επιβολή προσομοιώσεων (tuning).

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

### 3.4.3 Χαρακτηριστικά του Άκρου τροφοδότησης

Για την τροφοδότηση των κεραιών 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 εντός της διάταξης κύβου του CubeSat. Η συγκεκριμένη πηγή στο περιβάλλον HFSS® μοντελοποιήθηκε ως lumped port με χαρακτηριστική αντίσταση  $50 \text{ Ohm}$ .

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

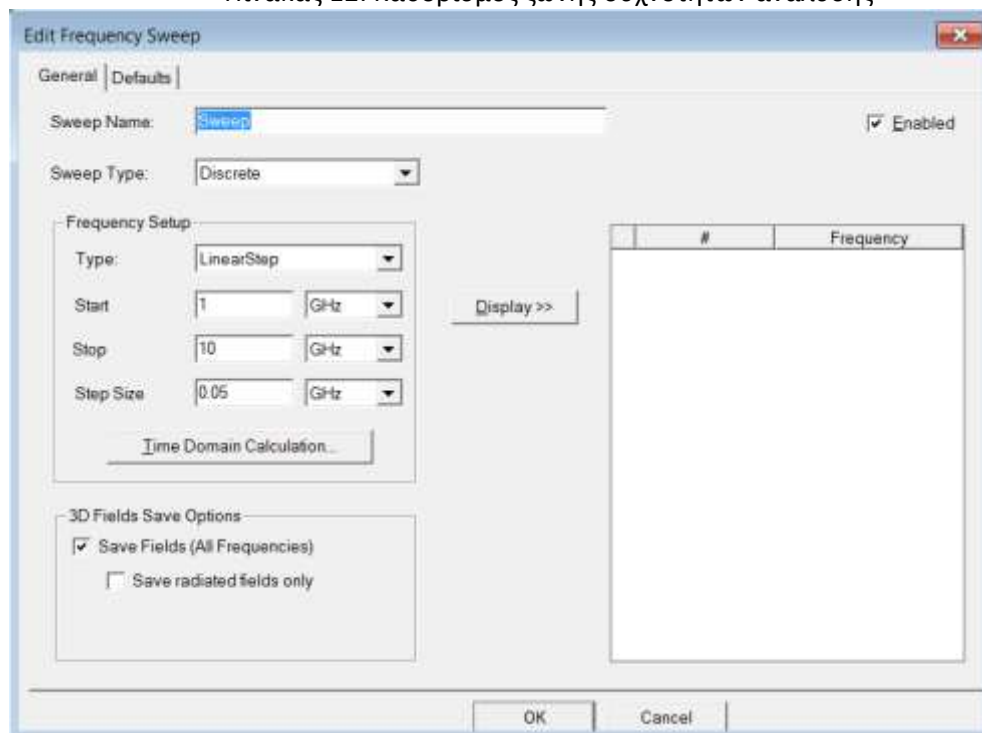
Για την επίλυση του προβλήματος προσδιορισμού των πεδίων, για τις συμπαγείς επιφάνειες, ορίστηκαν τα συνεχή χαρακτηριστικά χωρίς να προκαθορισθεί άλλος επιθυμητός τύπος πλέγματος (mesh). Στην φάση ανάλυσης το περιβάλλον έκανε χρήση των αυτοματοποιημένων αλγορίθμων πλέγματος που διαθέτει για την διαδικασία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

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στο πρόγραμμα προσομοίωσης, αφορούσαν στα γειωμένα υποστρώματα στις πλευρές του κύβου του CubeSat (PerfE\_Ground), στο αγώγιμο υλικό των κεραιών τύπου Patch (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 κεραιάς τύπου Patch περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 12: Καθορισμός ζώνης συχνοτήτων ανάλυσης

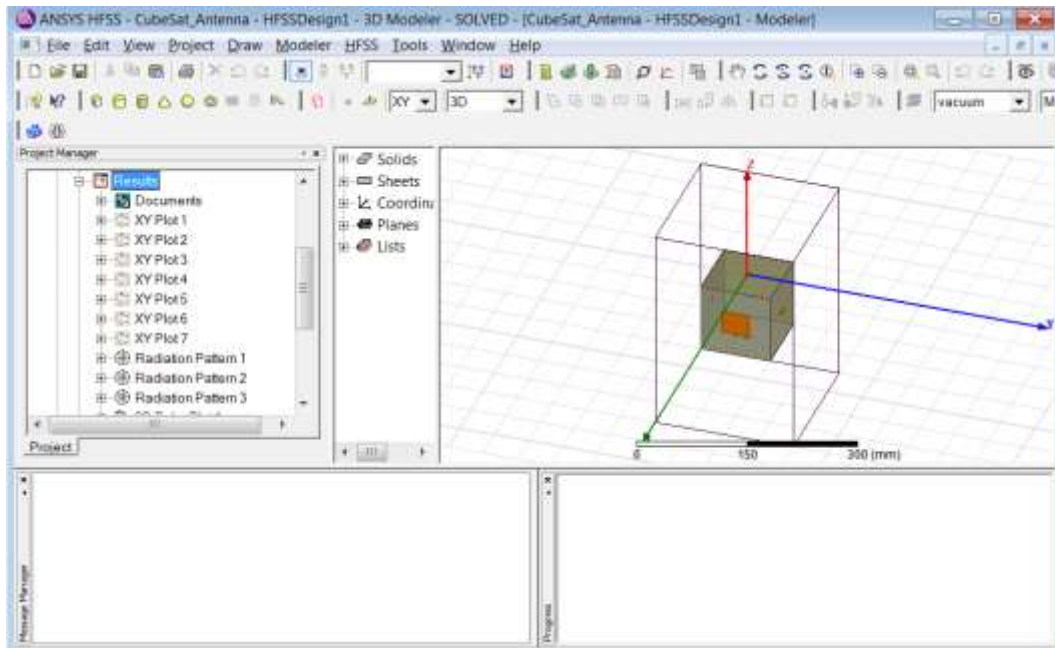


Από τον πίνακα καθορισμού για την ανάλυση συχνοτήτων, καθορίσθηκε η ζώνη 1 – 10 GHz, η οποία περιλαμβάνει εντός του αναφερόμενου διαστήματος, τις συχνότητες συντονισμού των κεραιών της διάταξης (δορυφορικό – επίγειο κανάλι). Για ακρίβεια στην ανάλυση δόθηκε γραμμική σάρωση των συχνοτήτων με βήμα της τάξης των 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 29: 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 αναπαράσταση 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:

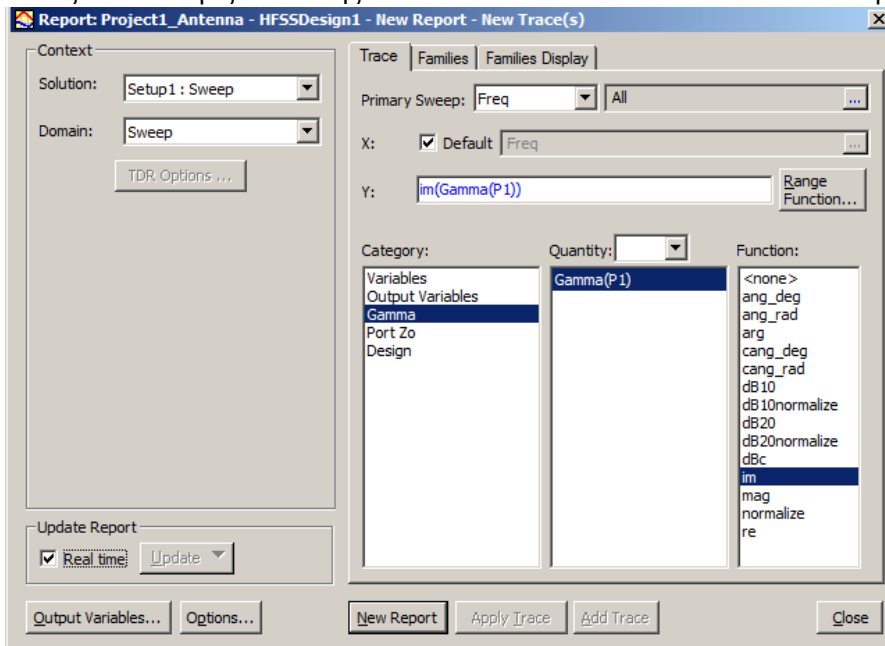
Πίνακας 13: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Terminal Solution Data Report



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

Οι επιλογές δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

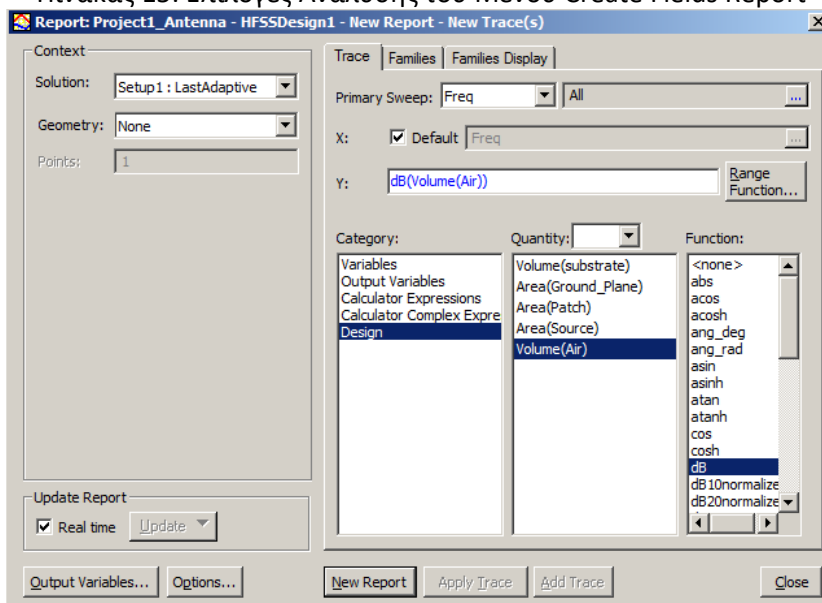
Πίνακας 14: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Modal Solution Data Report



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

Οι επιλογές δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

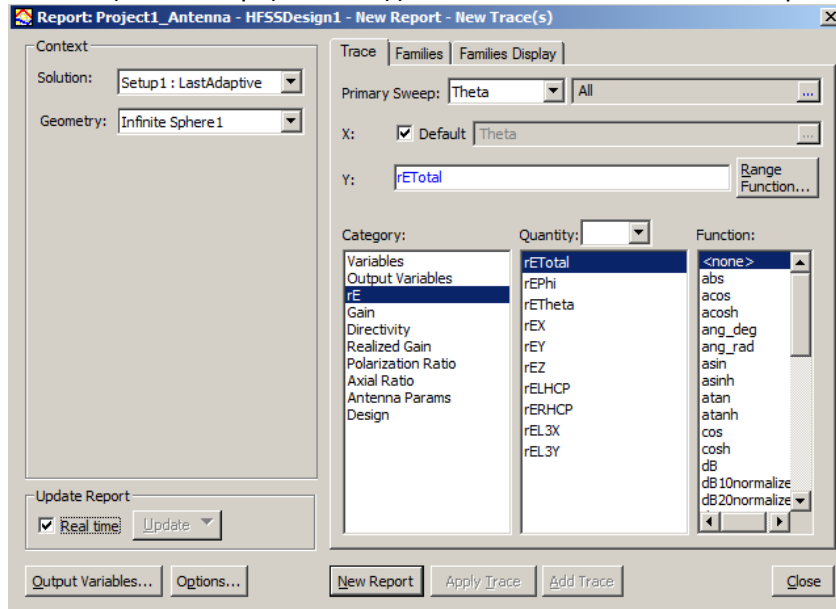
Πίνακας 15: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Fields Report



- 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 διάταξης.

Οι επιλογές δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

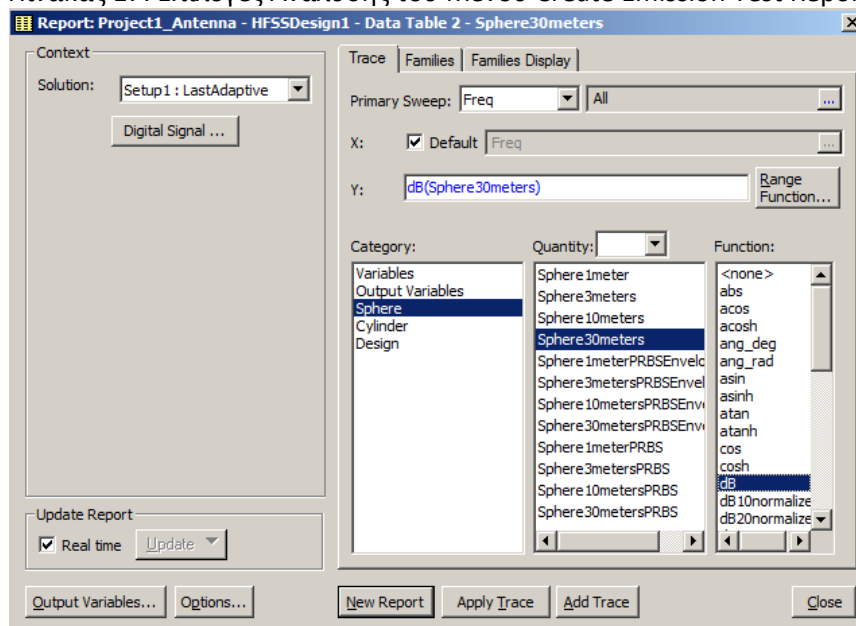
Πίνακας 16: Επιλογές Ανάλυσης του Μενού Create Far Fields Report



- 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 17: 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 του δορυφορικού – επίγειου καναλιού μετάδοσης/λήψης, με χρήση των κεραιών τύπου patch στη διάταξη του CubeSat, καθώς και τον έλεγχο ικανοποίησης των προδιαγραφών. Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν σε κατάλληλα διαγράμματα είτε απευθείας ως αριθμητικές τιμές στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

# 4

## Αποτελέσματα προσομοίωσης της διάταξης κεραιών

του CubeSat

### **4.1 Προσομοίωση στο περιβάλλον HFSS®**

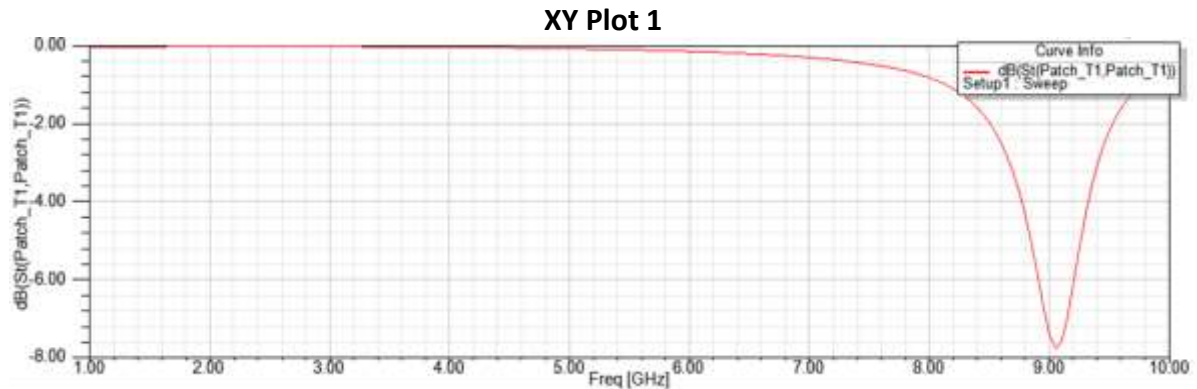
Για το προηγούμενο μοντέλο της διάταξης των κεραιών του CubeSat που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 της εργασίας, η αναλυτική επίλυση καθώς και η προσομοίωση των αποτελεσμάτων έγινε στο περιβάλλον HFSS®. Όπως αναφέρθηκε και στην παρουσίαση του περιβάλλοντος HFSS®, αυτό παρέχει την δυνατότητα για επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων με χρήση είτε αριθμητικών παρουσιάσεων (σε μορφή δεδομένων – data table reports), είτε με 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 διάταξης δίνοντας την δυνατότητα μεταβολής των γεωμετρικών διαστάσεων (ή άλλων παραμέτρων). Από την θεωρητική ανάλυση γνωρίζουμε ότι η στοιχειώδης μεταβολή του μήκους ( $l_p$ ) των κεραιών τύπου patch, έχει άμεση επίδραση στην συχνότητα συντονισμού που επιτυγχάνει η διάταξη.

### **4.2 Διαγράμματα Επίλυσης της διάταξης**

Οι παράμετροι απορρόφησης ισχύος  $S$  για κάθε κεραία του συστήματος του CubeSat, παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν, όπως προέκυψαν από τη διαδικασία

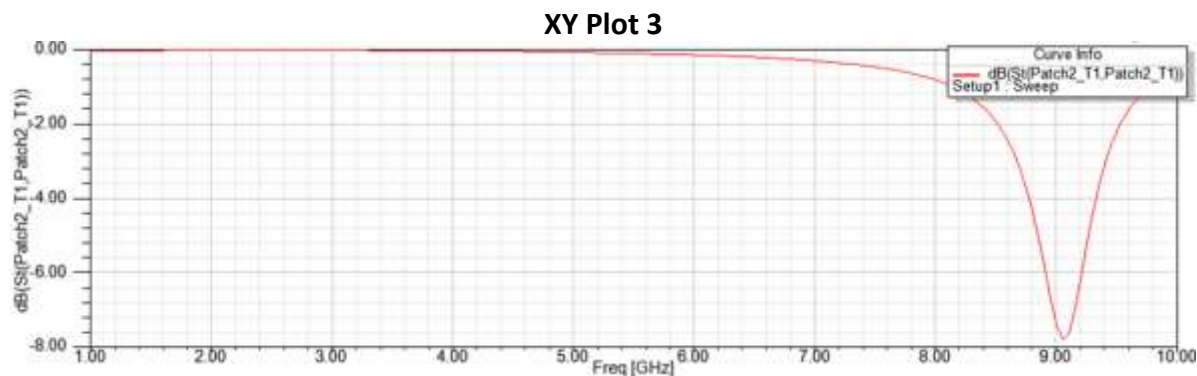
προσομοίωσης στο περιβάλλον HFSS®. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο συντελεστής απορρόφησης κάθε κεραίας της διάταξης, χαρακτηρίζει τη λειτουργία του καναλιού της διάταξης. Για το λόγο αυτό είναι απαίτηση, όλες οι κεραίες τύπου patch που μετέχουν στη συγκρότηση του δορυφορικού καναλιού επικοινωνίας, να συντονίζονται στην ίδια (όσο το δυνατόν) συχνότητα. Αυτό αφενός επιτυγχάνεται με την ομοιογένεια των γεωμετρικών διαστάσεων των κεραιών που μετέχουν στο δορυφορικό κανάλι, τη συμμετρική τους τοποθέτηση ως προς τις πλευρικές επιφάνειες του κύβου του CubeSat, αλλά και στην ομοιογένεια των ηλεκτρικών υποστρωμάτων (ίδιο υλικό) που αποτελεί την βάση εκπομπής – λήψης για το αναπτυσσόμενο σήμα σε κάθε κεραία.



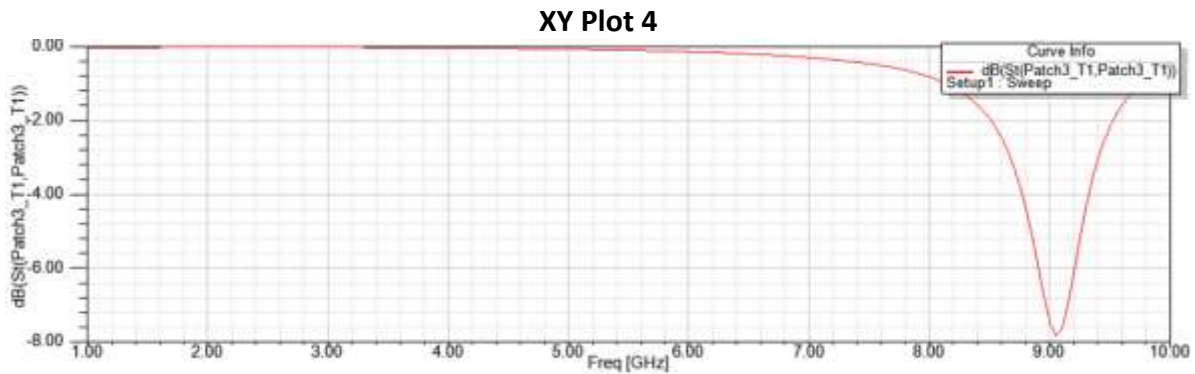
Σχήμα 30: Συντελεστής απορρόφησης ισχύος  $S(1,1)$  για την κεραία 1



Σχήμα 31: Συντελεστής απορρόφησης ισχύος  $S(1,1)$  για την κεραία 2



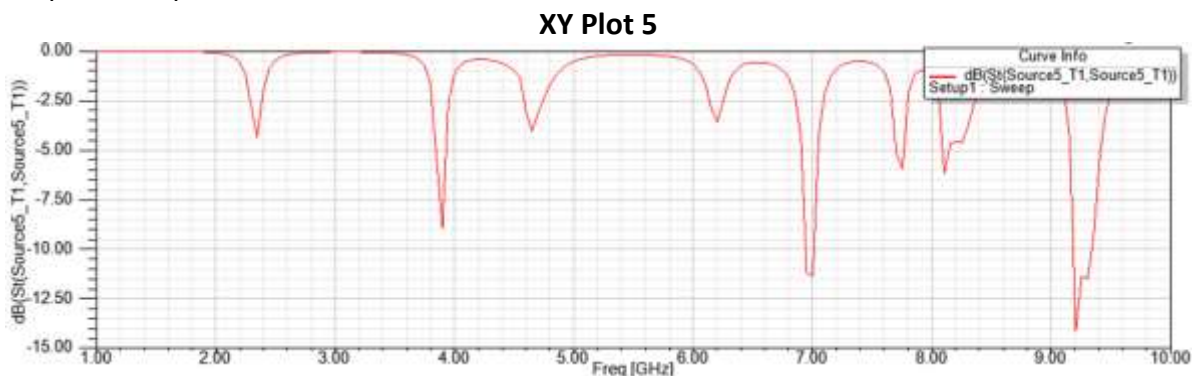
Σχήμα 32: Συντελεστής απορρόφησης ισχύος  $S(1,1)$  για την κεραία 3



Σχήμα 33: Συντελεστής απορρόφησης ισχύος  $S(1,1)$  για την κεραία 4

Από τα διαγράμματα των συντελεστών απορρόφησης  $S(1,1)$  για τις 4 κεραίες που συνιστούν τη στοιχειοκεραία για τη δορυφορική επικοινωνία, παρατηρούμε ότι όλες είναι συντονιζόμενες στη συχνότητα πλησίον των 9.1 GHz για τη λειτουργία του δορυφορικού καναλιού του CubeSat. Το εύρος συντονισμού (με επικέντρωση από το διάγραμμα απορρόφησης) για ζώνη 3 db, δίνει 370 MHz (δηλαδή εκατέρωθεν 165 MHz από την κεντρική συχνότητα συντονισμού των 9.1 GHz). Ως ποσοστό εύρους για τη ζώνη των 3 db αυτό καταλήγει σε τιμή 4%.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα απορρόφησης ισχύος για τη μεγαλύτερη κεραία τύπου patch, η οποία συνιστά τη βάση για την επικοινωνία του CubeSat με τον επίγειο σταθμό.



Σχήμα 34: Συντελεστής απορρόφησης ισχύος  $S(1,1)$  για την κεραία 5 (επίγειο κανάλι)

Από το διάγραμμα απορρόφησης ισχύος της κεραίας που προορίζεται για την υλοποίηση του επίγειου καναλιού επικοινωνίας του CubeSat, παρατηρούμε ότι αυτή εμφανίζει συντονισμούς σε ένα πλήθος διακριτών συχνοτήτων. Συγκεκριμένα στα 3.9, στα 7 και στα 9.1 GHz. Για την υλοποίηση της επικοινωνίας στο επίγειο κανάλι μας ενδιαφέρει η συχνότητα των 3.9 GHz. Ο λόγος είναι ότι η συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων απέχει σημαντικά από τη λειτουργία των υπολοίπων κεραιών. Οι άλλες 4 πλευρικές κεραίες τύπου patch, εμφανίζουν διαγράμματα τα οποία είναι σαφώς και μοναδικά συντονιζόμενα στη συχνότητα πλησίον των 9.1 GHz. Αυτό συντελεί στην απομόνωση των δύο καναλιών (δορυφορικού και επίγειου) του CubeSat και κατά συνέπεια στην αποφυγή παρεμβολών από την παράλληλη λειτουργία δορυφορικού και επίγειου καναλιού επικοινωνίας.

Το εύρος συχνοτήτων για την κεραία του επίγειου καναλιού επιτυγχάνει (3 db ζώνη συντονισμού), στα 100 MHz κεντροκοιμημένα ως προς την συχνότητα συντονισμού των 3.9 GHz. Αυτό καταλήγει σε εύρος ζώνης της τάξης του 2.5%.

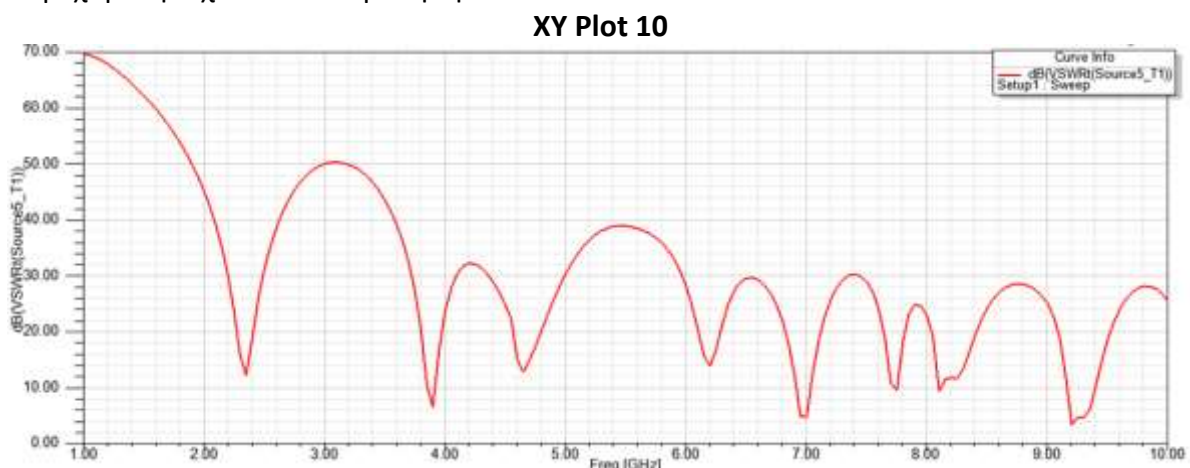
### 4.3 Διαγράμματα λόγου στασίμων κυμάτων VSWR για τις κεραίες της διάταξης

Τα διαγράμματα περιλαμβάνουν απεικόνιση του λόγου στασίμων κυμάτων των κεραιών της διάταξης. Ο λόγος στασίμων κυμάτων παρουσιάζεται για τις 4 κεραίες που συνιστούν το δορυφορικό κανάλι διασύνδεσης και για την κεραία που συνιστά τη διασύνδεση με το επίγειο κανάλι.



Σχήμα 35: Διάγραμμα λόγου στασίμων κυμάτων VSWR για τις κεραίες 1 - 4 συναρτήσει της συχνότητας

Η απεικόνιση του λόγου VSWR είναι σε db. Παρατηρούμε ότι ο λόγος στασίμων κυμάτων παραμένει σε σχετικά χαμηλή τιμή (6 db) για την συχνότητα συντονισμού των 9.1 GHz για τις κεραίες 1 - 4 της διάταξης. 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 τροφοδοτεί, και τόσο καλύτερα απορροφά και εκπέμπει την παρεχόμενη ισχύ σε ακτινοβολήση.



Σχήμα 36: Διάγραμμα λόγου στασίμων κυμάτων VSWR για την κεραία 5 συναρτήσει της συχνότητας

Ομοίως για την κεραία του επίγειου καναλιού, παρατηρούμε ανάλογα μία χαμηλή τιμή (6 db) στην συχνότητα των 3.9 GHz.

#### 4.4 Διαγράμματα Μακράν Πεδίου

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

##### Διάγραμμα Εντάσεως Ηλεκτρικού Πεδίου rE:

Το διάγραμμα περιλαμβάνει στερεοσκοπική απεικόνιση της συνολικής εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου της διάταξης.



Σχήμα 37: Τρισδιάστατο πολικό διάγραμμα εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου για τη συνολική διάταξη κεραιών του CubeSat

Από την τρισδιάστατη απεικόνιση της συνολικής εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου, παρατηρούμε ότι το εκπεμπόμενο πεδίο εμφανίζει κάθετα μέτωπα στην επιφάνεια του CubeSat (όπως αναμενόταν και από την θεωρητική ανάλυση των κεραιών τύπου patch). Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι ορισμένη σε mV. Τα υψηλά επίπεδα της έντασης παρουσιάζονται για αζιμουθιακές γωνίες  $\theta$  της τάξης  $0^\circ - 45^\circ$  προσεγγιστικά όπως παρουσιάζεται από την στερεοσκοπική (τρειςδιάστατη απεικόνιση) των λοβών του πεδίου, ως προς τις πλευρικές επιφάνειες του κύβου του CubeSat.

##### Διάγραμμα Συνολικού Κέρδους (GainTotal) της διάταξης:

Το διάγραμμα περιλαμβάνει στερεοσκοπική απεικόνιση του συνολικού κέρδους της διάταξης.

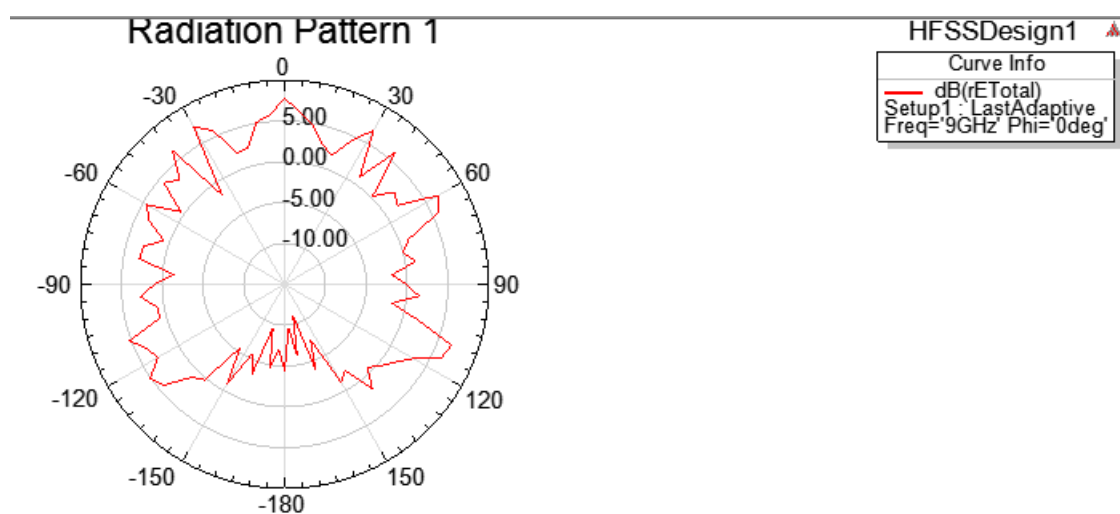


Σχήμα 38: Τρισδιάστατο πολικό διάγραμμα συνολικού κέρδους για τη διάταξη κεραιών του CubeSat

Από την τρισδιάστατη αναπαράσταση του συνολικού κέρδους της διάταξης, παρατηρούμε ότι αυτό λαμβάνει τις υψηλότερες τιμές του στις 4 πλευρές του κύβου του CubeSat που χρησιμοποιούν τις αντίστοιχες κεραιές τύπου patch για το δορυφορικό κανάλι. Το κέρδος είναι σχεδόν ομοιόμορφο σε όλες τις πλευρές με μέγιστη τιμή 6.95 db. Το συνολικό διάγραμμα κατευθυντικότητας (Directivity) της διάταξης είναι ανάλογο του τρισδιάστατου διαγράμματος κέρδους (όπως ήταν και θεωρητικά αναμενόμενο).

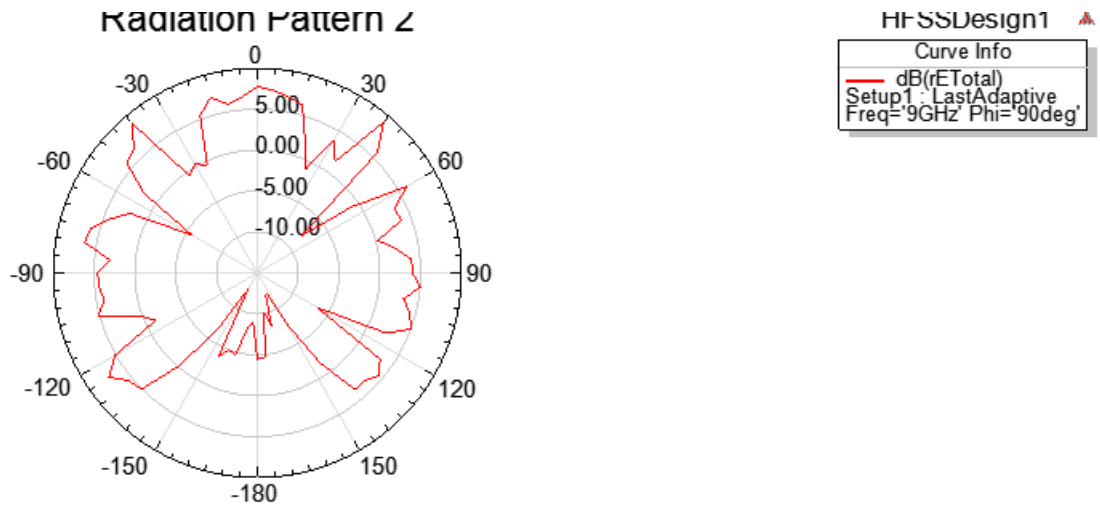
#### 4.5 Το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της διάταξης

Το διάγραμμα ακτινοβολίας παρουσιάζει τις κατευθύνσεις στο χώρο, για την εκπομπή και λήψη ισχύος από το σύστημα των κεραιών. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας εξαρτώνται από τις τιμές (θ,φ). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας ως συναρτήσεις της γωνίας θ για δεδομένες τιμές της γωνίας φ.

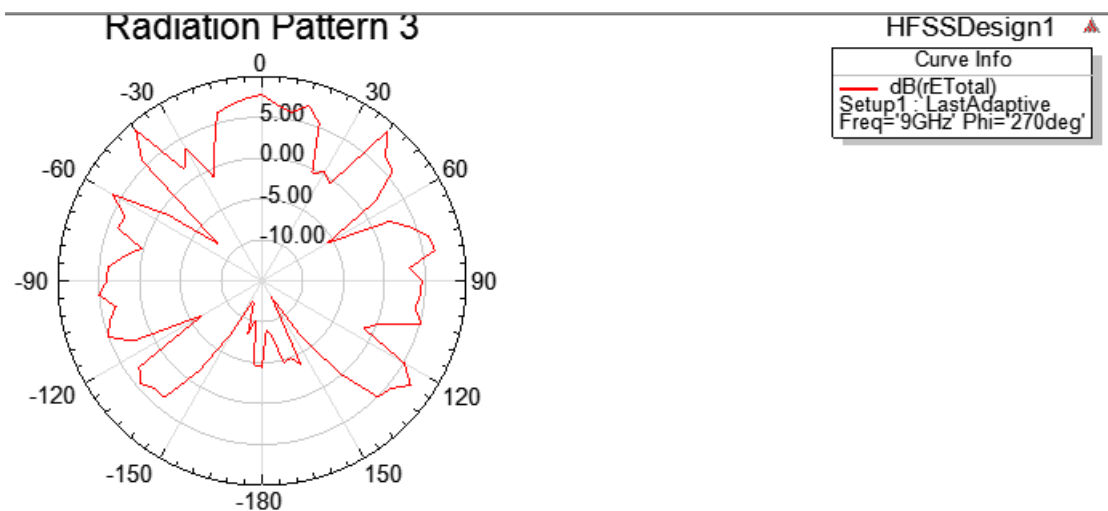


Σχήμα 39: Διάγραμμα ακτινοβολίας της συνολικής διάταξης για τη γωνία  $\phi=0^\circ$

Το διάγραμμα ακτινοβολίας για τη γωνία  $\phi=0^\circ$  αφορά την εκπομπή και λήψη από τον επίγειο σταθμό (η μεγαλύτερη κεραία του συστήματος που προφανώς στρέφεται με θέαση προς τη γη). Παρατηρούμε ότι για τη γωνία  $\theta = 120^\circ$  το διάγραμμα εμφανίζει τοπικό μέγιστο (όπως επίσης αντίστοιχα μέγιστα εμφανίζει και στις κατευθύνσεις  $\theta=30^\circ$  και  $60^\circ$ ), το οποίο διευκολύνει τη στόχευση επίγειων σταθμών (στην επιφάνεια της γης), με τιμή γύρω στα 6.5db.



Σχήμα 40: Διάγραμμα ακτινοβολίας της συνολικής διάταξης για τη γωνία  $\phi=90^\circ$



Σχήμα 41: Διάγραμμα ακτινοβολίας της συνολικής διάταξης για τη γωνία  $\phi=270^\circ$

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας για τις γωνίες  $\phi=90^\circ$  και  $270^\circ$  αφορούν στη δορυφορική ζεύξη με χρήση των πλαϊνών κεραιών του CubeSat (που στοχεύουν σε επικοινωνία με τα γειτονικά CubeSats, δεξιά – αριστερά της διάταξης). Τα διαγράμματα ακτινοβολίας εμφανίζουν τοπικό μέγιστο για τη γωνία  $\theta=90^\circ$  σε τιμή 5db, επιτρέποντας ικανοποιητική ζεύξη με τους δορυφόρους οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι σε ανάλογο ύψος.

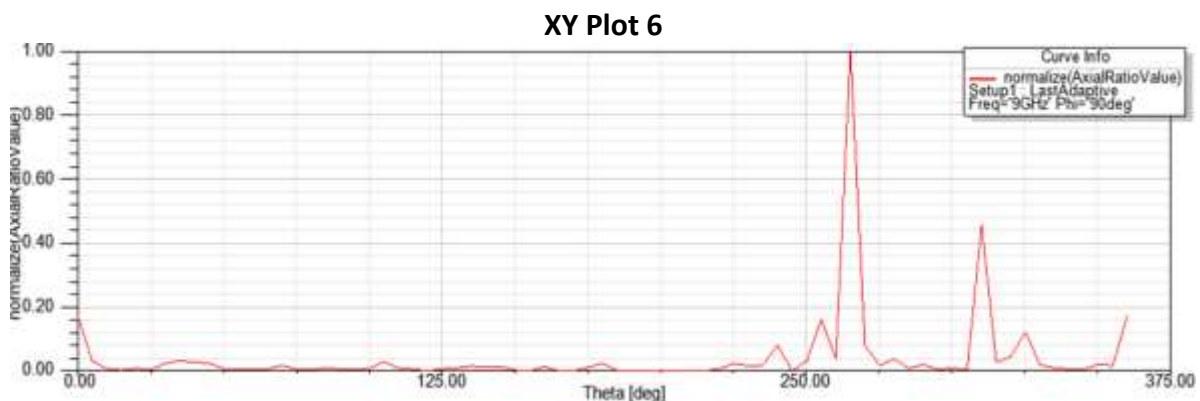
Γενικά το θέμα του προσανατολισμού και της σωστής εγκατάστασης ενός CubeSat σε τροχιά, είναι ένα σημαντικό θέμα διότι επηρεάζει σημαντικά τα επίπεδα επικοινωνίας είτε με τα επίγεια είτε με τα δορυφορικά κανάλια. Για το λόγο αυτό στο κεφάλαιο 2,



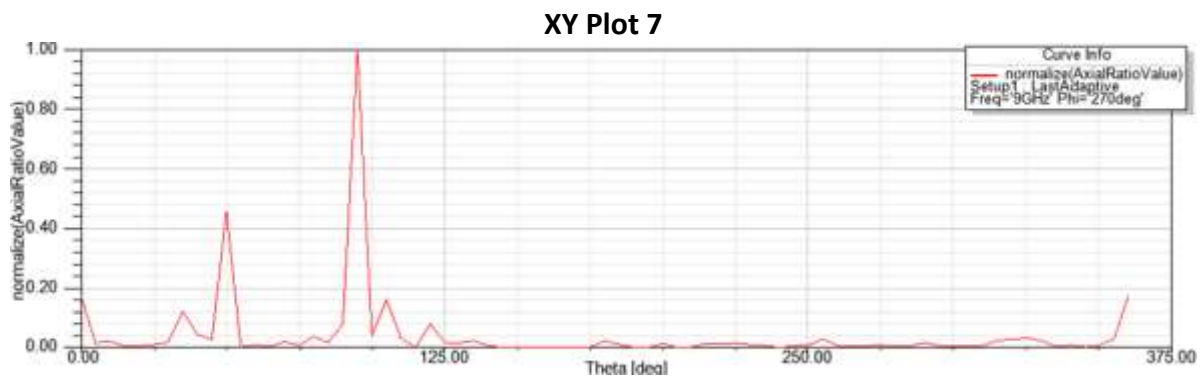
παρουσιάστηκαν και οι τεχνικές μηχανικής/ηλεκτρονικής κατεύθυνσης του διαγράμματος ακτινοβολίας των κεραιών μίας διάταξης, έτσι ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική σάρωση για ένα εύρος γωνιών αζιμουθίου. Η διάταξη που σχεδιάστηκε δεν προσομοιώθηκε για αναδιαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας της. Αυτό θα μπορούσε να γίνει ελέγχοντας τις πυροδοτήσεις των πλευρικών κεραιών, εισάγοντας επιπλέον διατάξεις μεταβολής φάσης στη διέγερση τους.

#### 4.6. Η κυκλική πόλωση για τη διάταξη δορυφορικής επικοινωνίας

Η κυκλική πόλωση (CP) είναι μία σημαντική απαίτηση επικοινωνίας για την υλοποίηση του δορυφορικού καναλιού, όπως παρουσιάστηκε και από την ανάλυση και παρουσίαση των χαρακτηριστικών των CubeSats. Για τον έλεγχο της κυκλικής πόλωσης χρησιμοποιείται η μεταβλητή Axial Ratio (AR), η οποία υπολογίζεται από το περιβάλλον HFSS<sup>®</sup> για τη συνολική διάταξη. Όταν η παράμετρος AR έχει τιμή κοντά στο μηδέν η πόλωση είναι γραμμική (LP). Όταν η παράμετρος εκτείνεται στο διάστημα μεταξύ (0,1) τότε η πόλωση που επιτυγχάνεται είναι ελλειπτική (EP), ενώ στην περίπτωση που έχει τιμή 1 τότε η πόλωση είναι κυκλική (CP). Η κυκλική πόλωση ενδιαφέρει να επιτρεσθεί σε καθορισμένες αζιμουθιακές γωνίες ( $\phi, \theta$ ), έτσι ώστε να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ γειτονικών CubeSats που μετέχουν στη συγκρότηση του δορυφορικού δικτύου επικοινωνίας. Για το λόγο αυτό η παράμετρος AR σχεδιάζεται για καθορισμένες γωνίες  $\phi$  με μεταβλητή τη γωνία  $\theta$  του συστήματος συντεταγμένων.



Σχήμα 42: Axial Ratio – AR για τη γωνία  $\phi=90^\circ$



Σχήμα 43: Axial Ratio – AR για τη γωνία  $\phi=270^\circ$

Από τα διαγράμματα AR συναρτήσει της γωνίας  $\theta$ , παρατηρούμε ότι η κυκλική πόλωση εμφανίζεται στις  $\theta = \pm 90^\circ$ . Η κυκλική πόλωση σε αυτές τις κατευθύνσεις διασφαλίζει επικοινωνία με τα γειτονικά CubeSats τα οποία βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο διαστημικής τροχιάς μεταξύ τους (δεξιά και αριστερά από το CubeSat για αυτό το λόγο ενδιαφερόμαστε για τις γωνίες  $\phi = 90^\circ$  και  $270^\circ$ ). Κατά συνέπεια η λειτουργία του δορυφορικού καναλιού επιτυγχάνεται με βάση τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Η κυκλική πόλωση διασφαλίζει τη μεγιστοποίηση λήψεως των σημάτων από αυτές τις διευθύνσεις.

#### 4.7. Συμπεράσματα από το σχεδιασμό

Από τη σχεδίαση της διάταξης των κεραιών του CubeSat παρατηρούμε ότι το δορυφορικό κανάλι επικοινωνίας επιτυγχάνεται με χρήση 4 κεραιών τύπου patch (μικρές κεραιές), ενώ η ζεύξη με τον επίγειο σταθμό γίνεται με χρήση της πέμπτης κεραιάς (η μεγαλύτερη κεραιά σε μέγεθος στη διάταξη). Η πόλωση που επιτυγχάνεται είναι κυκλική για τις διευθύνσεις στις γωνίες  $\phi = 90^\circ$  και  $270^\circ$ , επιτρέποντας την ζεύξη μεταξύ γειτονικών CubeSats στη γωνία  $\theta = 90^\circ$ . Η γωνία επικοινωνίας με τον επίγειο σταθμό βασίζεται στη γωνία των  $\phi = 0^\circ$ . Τα διαγράμματα ακτινοβολίας εμφανίζουν ικανοποιητικές τιμές στις επιθυμητές διευθύνσεις. Τα κυκλώματα τροφοδότησης της διάταξης θεωρούνται εσωτερικά του μεταλλικού περιβλήματος του CubeSat, οπότε δεν επιδρούν στη διαμόρφωση της επικοινωνίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί, χωριζόμενα για το δορυφορικό και το επίγειο κανάλι επικοινωνίας:

Πίνακας 18: Αποτελέσματα από την προσομοίωση της διάταξης των κεραιών τύπου patch για την υποστήριξη δορυφορικού και επίγειου καναλιού σε CubeSat

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Ζώνη Συχνοτήτων Λειτουργίας Για τα κανάλια Rx/Tx (X/S-band)	9.1 GHz (Δορυφορικό) 3.9 GHz (Επίγειο)
Εύρος Ζώνης (bandwidth)	330 MHz (Δορυφορικό) 100 MHz (Επίγειο)
Επίπεδα Κατανάλωσης Ισχύος	συνάρτηση της απόστασης εμβέλειας
Εύρος Λοβού ακτινοβολίας	60° (Δορυφορικό) 60° (Επίγειο)
Διαστάσεις	8.6 mm x 9mm (Δορυφορικό) 33 mm x 40 mm (Επίγειο)
Κέρδος	6.75 db (Δορυφορικό) 6 db (Επίγειο)
Γεωμετρική Μορφή Κεραιών	Ορθογωνική
Πόλωση διάταξης	Κυκλική – CP $\phi = 90^\circ/270^\circ$ και $\theta = 90^\circ$

Για την περαιτέρω ενίσχυση των τιμών κέρδους της διάταξης, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ομάδες από κεραιές τύπου patch, οι οποίες λόγω του μικρού τους μεγέθους μπορούν να τοποθετηθούν και τροφοδοτηθούν παράλληλα σε κάθε πλευρά του CubeSat. Επομένως οι κεραιές θα λειτουργούσαν ως μία στοιχειοκεραία ανά πλευρά της

διάταξης, αυξάνοντας το κέρδος για κάθε κανάλι (με ίδιες συνθήκες πυροδότησης ανά πλευρά). Μεγαλύτερο πλήθος κεραιών συμβάλλει σε μεγαλύτερη επίδοση κέρδους αλλά και σε κατανάλωση ισχύος για τη διάταξη.

Ένα σημαντικό θέμα επίσης, είναι η σωστή τοποθέτηση του δορυφόρου CubeSat σε τροχιά. Ο λόγος είναι ότι τα προκύπτοντα διαγράμματα ακτινοβολίας εμφανίζουν τα τοπικά μέγιστα σε καθορισμένες αζιμουθιακές γωνίες. Κατά συνέπεια, οι μικρές διαταραχές προσανατολισμού ενός CubeSat, συμβάλλουν καθοριστικά στην επικοινωνία της διάταξης. Τα συστήματα μηχανικής/ηλεκτρονικής σάρωσης (αναδιαμόρφωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας) που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, επιβαρύνουν τις διατάξεις των κεραιών με πρόσθετο εξοπλισμό, αυξάνοντας επιπλέον την κατανάλωση ισχύος για το συνολικό σύστημα.

Οι γενικές επιδόσεις της διάταξης του CubeSat, είναι ικανοποιητικές, δεδομένης της χρήσης μόνο 5 κεραιών τύπου patch, για τη διαμόρφωση και λειτουργία των δορυφορικών και επίγειων καναλιών.

# 5

## Γενικά Συμπεράσματα από τη σχεδίαση διάταξης

### κεραιών για CubeSat

#### **5.1 Συμπεράσματα από την υποστήριξη δορυφορικών και επίγειων καναλιών σε CubeSats**

Τα CubeSats αποτελούν τις σύγχρονες επεκτάσεις της δορυφορικής επικοινωνίας. Λόγω του μικρού τους μεγέθους, και κατά συνέπεια του μικρότερου κόστους για την υποστήριξη διασυνδέσεων δεδομένων, καθώς και του μικρότερου τους κόστους και της τεχνικής πολυπλοκότητας για την εγκατάστασή τους σε τροχιά, αποτελούν επιλογές, οι οποίες αναμένεται να συντελέσουν σημαντικά στο άμεσο μέλλον. Οι μικρές τους διαστάσεις σε συνδυασμό με το μικρό τους βάρος μειώνουν σημαντικά τα έξοδα αποστολής και εγκατάστασης τέτοιων δορυφόρων. Οι εφαρμογές τους είναι πολλές, όπως παρουσιάστηκε και στις προηγούμενες ενότητες της εργασίας, και κυμαίνονται από την απλή παρατήρηση και συλλογή – επεξεργασία δεδομένων, μετεωρολογικές

παρατηρήσεις, έρευνα του διαστήματος, μέχρι εφαρμογές IoT για την εγκατάσταση συνδέσεων μετάδοσης δεδομένων για γεωγραφικές περιοχές όπου η εγκατάσταση των συμβατικών δικτύων μετάδοσης είναι δύσκολη έως αδύνατη. Η προσβασιμότητα και η ικανότητα παρακολούθησης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών μπορεί να βοηθήσει την απρόσκοπτη και συνεχή κάλυψη χρηστών που διασυνδέονται στον παγκόσμιο ιστό μετάδοσης δεδομένων. Τα κανάλια δορυφορικής και επίγειας επικοινωνίας προορίζονται για εφαρμογή σε ζώνες συχνοτήτων, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα μεγάλου εύρους ζώνης για την υποστήριξη όλων των μέχρι τώρα υπηρεσιών, που είναι απαιτητικές σε όγκο δεδομένων.

Η παράλληλη διασύνδεση πολλών CubeSats μεταξύ τους, με χρήση των δορυφορικών καναλιών επιτρέπουν γρήγορη μετάδοση των δεδομένων σε γεωγραφικές περιοχές, οι οποίες μπορεί ακόμη και να μην επιτρέπουν απευθείας οπτική επαφή μεταξύ τους. Η δομή των CubeSats (μορφή κύβου), μπορεί να επιτρέψει την εγκατάσταση διαφόρων τύπων κεραιών. Τα μεγέθη τους ποικίλουν σε πολλαπλάσιες γεωμετρικές της βασικής μετρικής μονάδας 1U, δίνοντας την επιλογή για την ανάπτυξη διαφόρων τύπων ανάλογα με τα μεγέθη και την απαιτούμενη ισχύ των κεραιών τους. Η τροφοδότηση τους, όπως και των υπολοίπων δορυφόρων, απαιτεί παράλληλη εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών (panels), οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη των ποσών ισχύος που απαιτούνται για τη λειτουργία ελέγχου και μετάδοσης. Οι τροχιές πτήσεως τους ποικίλουν επίσης, δίνοντας την δυνατότητα για ζεύξη τόσο LEO όσο και GEO εφαρμογών. Η συγκρότηση των CubeSats σε ευρύτερα σμήνη (αστερισμοί), δίνει τη δυνατότητα της παράλληλης διασύνδεσης τους, μεταφέροντας την επικοινωνία σε διαφορετικά ύψη και περιοχές. Η ραδιοκάλυψη δεν υπόκειται σε ατμοσφαιρικά αλλά κυρίως διαστημικά φαινόμενα, όσον αφορά στην απόσβεση των σημάτων και την ανάλυση απωλειών ισχύος.

Ο προσανατολισμός τους αποτελεί ένα σημαντικό θέμα, διότι οι κεραιές που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τον τύπο τους, απαιτούν σωστή κατευθυντικότητα των διαγραμμάτων ακτινοβολίας για τη διασφάλιση της επικοινωνίας τόσο με το επίγειο όσο και με τα δορυφορικά κανάλια.

Τα προβλήματα των CubeSats και οι τεχνολογικές τους απαιτήσεις αποτελούν ένα σύνθετο τεχνικό θέμα για πολλούς παράγοντες, όπως: η τεχνολογία και ο τύπος των κεραιών που θα χρησιμοποιηθούν, οι τεχνολογίες και τα υλικά κατασκευής των κεραιών, οι ζώνες συχνοτήτων λειτουργίας από το ραδιοφάσμα, οι τύποι πόλωσης του πεδίου των κεραιών της διάταξης, η σάρωση των λοβών και των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, η κατανάλωση ισχύος, και τέλος ο προσανατολισμός των ίδιων των CubeSats.

Στα πλαίσια της εργασίας παρουσιάστηκαν όλες οι ερευνητικές πτυχές που αφορούν στα παραπάνω θέματα, καθώς και οι μελέτες που εφαρμόζονται για την επίλυση των προβλημάτων σχεδιασμού και εφαρμογών.

## **5.2 Επιλογές Κεραιών και άλλα τεχνικά θέματα για την υποστήριξη intersatellite links δορυφορικών και επίγειων καναλιών σε CubeSats**

Οι επιλογές των κεραιών αποτελούν ένα σύνθετο θέμα για τη λειτουργία ενός CubeSat. Οι κεραιές απαιτείται να παρουσιάζουν ένα σημαντικό κατευθυντικό κέρδος (όσο το δυνατόν πιο ευρυγώνιο αλλά με σταθερή απόδοση), με διαστάσεις οι οποίες επιτρέπουν την εύκολη εγκατάσταση τους επί ενός CubeSat. Πολλοί από τους υπάρχοντες τύπους των κεραιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν (κεραίες μονοπόλου, διπόλου, ελικοειδείς,

σπειροειδείς, τύπου patch, κ.λπ.). Κάθε ένας από τους τύπους των κεραιών εισάγει τόσο σημαντικά πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Το μεγαλύτερο όμως θέμα για την επιλογή των κεραιών επικοινωνίας είναι ο καθορισμός της συχνοτικής ζώνης λειτουργίας. Το ραδιοφάσμα που επιτρέπεται για χρήση από δορυφόρους είναι μεγάλο και εκτείνεται σε ζώνες δεκάδων GHz. Όμως όσο οι συχνότητες λειτουργίας των κεραιών αυξάνουν, τα γεωμετρικά μήκη τους σαφώς μειώνονται και αυτό αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα, αλλά αυξάνονται οι απαιτήσεις ισχύος για μετάδοση σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Από την άλλη πλευρά η χρήση ζωνών συχνότητας όπως είναι οι VHF και UHF απαιτούν σημαντικά μεγαλύτερες διαστάσεις των κεραιών στο CubeSat. Ο χώρος και οι διαστάσεις είναι περιορισμένος, και για το λόγο αυτό η ανάπτυξη κεραιών με μεγάλες διαστάσεις επιλύει τα προβλήματα χρήσης των ζωνών χαμηλών συχνοτήτων αλλά εισάγει το θέμα της ανάπτυξης μίας κεραιάς, όταν ο δορυφόρος εγκατασταθεί στην τροχιά του. Το πρόβλημα ανάπτυξης των κεραιών μετά την εγκατάσταση σε τροχιά κάνει χρήση πολλών ερευνητικών μεθόδων όπως η χρήση ελατηρίων, οι τεχνικές φουσκώματος – ομπρέλας. Κάθε μία από τις επιλεγόμενες λύσεις εισάγει επιπλέον πολυπλοκότητα στα απαιτούμενα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα, τα οποία θα πρέπει να εγκατασταθούν επί του CubeSat. Επιπλέον τα εξαρτήματα που απαιτούνται θα πρέπει να μελετηθούν ως προς τη συμπεριφορά τους στο πεδίο της συχνότητας, μετά την ανάπτυξη της κεραιάς. Αυτό απαιτεί σημαντικές διαδικασίες προσομοίωσης καθώς και αξιόπιστα μηχανολογικά συστήματα ανάπτυξης.

Τα υλικά και οι τεχνολογίες εκτύπωσης των κεραιών οδηγούν σε επιλογές οι οποίες θα πρέπει να είναι ανθεκτικές στα διαστημικά περιβάλλοντα. Οι θερμοκρασίες μπορεί να περιλαμβάνουν διαστήματα μεταβολής αρκετών εκατοντάδων βαθμών κελσίου. Η ανάπτυξη αυτών των θερμοκρασιών δεν θα πρέπει να επιδράσει στη λειτουργία των κεραιών του CubeSat. Η σύγχρονη τεχνολογία παρέχει ικανοποιητικές λύσεις με υλικά υποστρώματος (μεμβράνες, films), τα οποία είναι ανθεκτικά και διατηρούν σταθερά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές. Οι τεχνολογίες εκτύπωσης, ανάλογα με τις εκτυπώσεις των πολυστρωματικών καρτών στο FR-4 επιτρέπουν την χρήση τεχνικών μικρογραφίας, που είναι ακριβείς σε γεωμετρικές διαστάσεις χαμηλής κλίμακας.

Η μικρογραφία κεραιών επιτρέπει την παράλληλη ανάπτυξη πολλαπλών κεραιών – για τη συγκρότηση στοιχειοκεραιών, οι οποίες μπορούν να συνδυάσουν τη λειτουργία τους και να επιφέρουν βελτίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας των καναλιών. Η κατανάλωση ισχύος όμως αυξάνει καθώς αυξάνει το πλήθος των στοιχειοκεραιών που μετέχουν στη συνολική διάταξη του CubeSat.

Η πόλωση των κεραιών αποτελεί επίσης ένα σημαντικό θέμα. Η ερευνητική βιβλιογραφία έχει καταλήξει στο συμπέρασμα, ότι η χρήση της κυκλικής πόλωσης (CP) επιτρέπει την βέλτιστη λειτουργία, δεδομένου ότι δίνει την δυνατότητα λήψης σημάτων από τυχαίας διευθύνσεις. Για την επίτευξη των κυκλικών πολώσεων χρησιμοποιούνται κυρίως τεχνικές πυροδότησης της ομάδας των κεραιών με διαφορά φάσης 90°.

Ο προσανατολισμός του δορυφόρου – CubeSat, και η κατεύθυνση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των κεραιών του, απαιτεί επίσης ακρίβεια για την αποδοτική ανάπτυξη καναλιών επικοινωνίας. Ο προσανατολισμός των λοβών ακτινοβολίας μπορεί να γίνει είτε με μεταβολές των στοιχείων και των ανακλαστικών επιφανειών που χρησιμοποιούν οι κεραιάς (μηχανική σάρωση), είτε με ηλεκτρονικό τρόπο, δηλαδή ελέγχοντας τις πυροδοτήσεις των κεραιών που συνιστούν το κανάλι επικοινωνίας. Η πυροδότηση με καθορισμένες διαφορές φάσεις μπορεί να γίνει με διαφορετικές τεχνικές (varactors,

δίοδοι, διακόπτες MEMS), αλλά οι μέθοδοι αυτές εισάγουν επιπλέον πολυπλοκότητα και στοιχεία στην ανάπτυξη των CubeSats. Το ευρυγώνιο και η σάρωση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας (αναδιαμόρφωση) για την διόπτευση άλλων θέσεων, αποτελεί ένα σημαντικό θέμα. Στόχος είναι ο σωστός προσανατολισμός της κατευθυντικότητας των κεραιών του CubeSat, τόσο με τα γειτονικά κανάλια άλλων δορυφόρων CubeSats, όσο και με επίγειους σταθμούς βάσης (εφόσον αυτό απαιτείται).

Οι εφαρμογές στις οποίες καλούνται να ανταποκριθούν τα CubeSats ποικίλουν και επηρεάζουν, όπως αναφέρθηκε, την επιλογή τους. Άμεσα οι εφαρμογές επηρεάζουν τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Αυτοί με τη σειρά τους επηρεάζουν τη ζώνη συχνοτικής λειτουργίας και την επιλογή κεραιών. Όλες οι υπόλοιπες σχεδιαστικές παράμετροι προκύπτουν από την αναγκαιότητα για επίλυση των παραπάνω θεμάτων.

Κατά συνέπεια όπως γίνεται εμφανές η τεχνολογία των κεραιών που χρησιμοποιούνται σε ένα CubeSat έχει να αντιμετωπίσει ένα σημαντικό αριθμό προβλημάτων και επιλογών. Οι επιλογές αυτές υποστηρίζονται στα ερευνητικά πλαίσια από τις υπάρχουσες και προφανώς τις μελλοντικές τάσεις της τεχνολογίας.

Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε μία διάταξη κεραιών για την υποστήριξη δορυφορικών και επίγειων καναλιών. Η διάταξη αποτελείται από 5 κεραίες τύπου Patch, οι οποίες εγκαταστάθηκαν στις πλευρικές επιφάνειες ενός CubeSat 1U. Οι επιδόσεις του συστήματος μελετήθηκαν με ανάλυση στην ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στο περιβάλλον HFSS®. Από την ανάλυση προέκυψε η υποστήριξη δορυφορικών καναλιών με εύρος ζώνης άνω των 300 MHz και επίγειου καναλιού της τάξης των 100 MHz. Η πόλωση που επιτεύχθηκε για τη διάταξη είναι κυκλική για καθορισμένες διευθύνσεις (επικοινωνίας των γειτονικών δορυφορικών καναλιών). Η διάταξη εμφανίζει διαγράμματα ακτινοβολίας με σταθερές διευθύνσεις και λοβούς μεγίστου. Τα κέρδη για το δορυφορικά και το επίγειο κανάλια είναι της τάξης των 6 db. Τα παραπάνω κέρδη μπορούν να αυξηθούν περαιτέρω με χρήση επιπλέον κεραιών στις πλευρικές επιφάνειες του CubeSat. Οι μικρές γεωμετρικές διαστάσεις των κεραιών τύπου patch, επιτρέπουν αυτήν την επιλογή. Η συνολική διάταξη δεν επιτρέπει την αναδιαμόρφωση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, διότι κάνει χρήση σταθερών συστημάτων πυροδότησης των κεραιών. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η συνολική διαδικασία της προσομοίωσης για την επίτευξη των τεχνικών χαρακτηριστικών είναι απαιτητική και απαιτεί επεξεργαστική ισχύ και χρόνο για την επιβολή των μικρορυθμίσεων και βελτιώσεων. Το περιβάλλον HFSS® είναι μία σημαντική βάση υπολογισμών, χωρίς την οποία δεν θα ήταν δυνατή η ακριβής προσομοίωση της διάταξης.

### **5.3 Μελλοντικές Τάσεις και Ανοικτά Ερευνητικά Θέματα για υποστήριξη καναλιών σε CubeSats**

Τα CubeSats όπως παρουσιάστηκε και στις προηγούμενες ενότητες της εργασίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία πληθώρα εφαρμογών. Το IoT αποτελεί επίσης μία σημαντική εφαρμογή, η οποία φιλοδοξεί σε μία παγκόσμια προσφορά ραδιοκάλυψης για όλους τους χρήστες του πλανήτη. Οι εφαρμογές που ανοίγονται από το IoT, αφορούν σε δυνατότητες παγκόσμιου ελέγχου συσκευών και επικοινωνίας. Η πρόκληση για τα CubeSats και τις ζεύξεις είναι πού μεγάλη. Οι υπάρχουσες τεχνολογίες των κεραιών δίνουν την δυνατότητα ανάπτυξης αποδοτικών κεραιών, επιλύοντας κάποια και δημιουργώντας κάποια νέα προβλήματα. Οι τεχνολογίες μικρογραφίας, οι οποίες συνεχώς εξελίσσονται ήδη επιτρέπουν και αναμένεται να επιτρέψουν περαιτέρω στο

άμεσο μέλλον, την εγκατάσταση πολύ μεγάλου αριθμού κεραιών επί των επιφανειών ενός CubeSat. Ο χειρισμός των διαγραμμάτων ακτινοβολίας (αναδιαμόρφωση) καθώς και οι πολώσεις είναι ένα σύνθετο θέμα που αναμένεται να βελτιωθεί καθώς νέες τεχνικές και τεχνολογίες παράγονται για την υποστήριξη – επίλυση του προβλήματος.

Η κατανάλωση ισχύος και η διασφάλιση χαμηλού επιπέδου απωλειών κατά τη μετάδοση των ΗΜ σημάτων, είναι επίσης ένα θέμα που θα βελτιώνεται καθώς πιο αποδοτικά συστήματα μετάδοσης σχεδιάζονται. Η χρήση ηλιακών συλλεκτών υψηλής απόδοσης και συσσωρευτών για την υποστήριξη τους, αναμένεται να βελτιώσει τον προσδόκιμο χρόνο συνεχούς λειτουργίας των CubeSats.

Η σχεδίαση και η επιλογή των κεραιών ενός CubeSat αποτελεί μία σημαντική πρόκληση για τους σύγχρονους ερευνητές και σχεδιαστές κεραιών και δορυφορικών συστημάτων. Τα υπολογιστικά συστήματα για την ανάλυση και την προσομοίωση των διατάξεων εκτελούν ένα εκτενές πλήθος αριθμητικών υπολογισμών για την επίλυση του πεδιακού προβλήματος. Κατά συνέπεια η εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων και των αλγορίθμων, αναμένεται να συντελέσουν σημαντικά στην αριθμητική επίλυση και τους υπολογισμούς. Καλύτερα συστήματα ΗΜ επίλυσης, θα επιτρέψουν επίσης την μοντελοποίηση και το σχεδιασμό πιο πολύπλοκων διατάξεων κεραιών σε ένα CubeSat. Τα συνολικά μοντέλα ραδιοκάλυψης με χρήση αστερισμών CubeSats, θα επιτρέψουν καλύτερη μελέτη των καναλιών επικοινωνίας και της ζεύξης, συμβάλλοντας στον σαφή καθορισμό των επιπέδων σήματος. Με τη σειρά τους, τα μοντέλα αυτά αναμένεται να συνεισφέρουν σημαντικά σε εφαρμογές IoT/IoS, οι οποίες στοχεύουν σε μία καθολική ζεύξη όλων των ηλεκτρονικών συσκευών σε παγκόσμιο επίπεδο.

Τα οφέλη που θα προκύψουν αναμένεται να είναι εξαιρετικά σημαντικά σε τομείς όπως η επικοινωνία και η εξερεύνηση του διαστήματος.



# Παραρτήματα

## Παράρτημα Α – Κεραίες του Δορυφορικού Καναλιού

### A-1 Πίνακας Κερδών

Data Table 1							HFSSDesign1
Theta [deg]	dB(GainTotal) Setup1: LastAdaptive Freq=9GHz Phi=0deg	dB(GainTotal) Setup1: LastAdaptive Freq=9GHz Phi=5deg	dB(GainTotal) Setup1: LastAdaptive Freq=9GHz Phi=10deg	dB(GainTotal) Setup1: LastAdaptive Freq=9GHz Phi=15deg	dB(GainTotal) Setup1: LastAdaptive Freq=9GHz Phi=20deg	dB(GainTotal) Setup1: LastAdaptive Freq=9GHz Phi=25deg	
1	0.000000	4.601391	4.601391	4.601391	4.601391	4.601391	4.601391
2	5.000000	3.088995	3.151376	3.289082	3.262909	3.314790	3.367368
3	10.000000	1.615182	1.765016	1.769549	1.633468	1.377114	1.039590
4	15.000000	-0.380962	0.759093	1.430556	1.639924	1.414877	0.820499
5	20.000000	-1.350492	-0.395087	0.620773	1.413461	1.762863	1.628613
6	25.000000	1.251371	0.969465	0.072275	-1.240198	-2.648501	-4.160674
7	30.000000	3.604091	4.328442	5.097435	5.643289	5.921949	5.962617
8	35.000000	-2.099646	-2.105516	-2.353894	-1.900878	-0.990619	-0.273111
9	40.000000	2.953190	2.658339	2.105880	1.893964	2.363687	2.642377
10	45.000000	-2.915195	-1.701478	-3.965789	-9.224188	-2.400876	0.426817
11	50.000000	-0.589790	-0.337612	-1.228179	-2.458355	-1.214127	1.556278
12	55.000000	-1.316476	0.267923	-1.490362	-4.644514	-0.656158	1.612179
13	60.000000	3.603668	3.623306	3.073325	2.840566	3.807336	4.347526
14	65.000000	2.548685	2.350986	0.048748	-0.306385	0.964069	0.850483
15	70.000000	-1.993061	-1.844942	-3.944991	-2.735264	-1.620045	-3.193232
16	75.000000	-3.168678	-2.124875	-7.054851	-4.243617	-2.266650	-4.237825
17	80.000000	-1.845608	-1.308802	-5.538793	-4.932195	-1.759876	-2.760733
18	85.000000	-4.971706	-2.641749	-9.760761	-6.234168	-1.949318	-3.417884
19	90.000000	-3.195816	-0.925843	-4.643991	-3.110026	0.266623	-1.209511
19	90.000000	-3.195816	-0.925843	-4.643991	-3.110026	0.266623	-1.209511
20	95.000000	-1.646281	-0.810279	-3.766488	-2.626340	0.134805	-0.929303
21	100.000000	-4.820614	-2.443815	-9.397940	-4.759089	-1.364679	-4.143440
22	105.000000	-1.209478	0.042479	-1.214751	0.210619	1.315658	-0.952941
23	110.000000	3.600472	3.627355	2.942187	2.907119	2.932901	2.154205
24	115.000000	3.069255	2.921362	1.126100	-0.066697	0.673796	0.775576
25	120.000000	-0.012257	0.696428	-1.477624	-5.094400	-3.309395	-2.262412
26	125.000000	-1.545037	0.587204	-0.201799	-4.317106	-3.061560	-0.326272
27	130.000000	-2.682437	-0.899279	-2.071002	-6.187584	-4.774254	-1.633702
28	135.000000	-3.799192	-4.069235	-4.638215	-5.397645	-6.344268	-5.037897
29	140.000000	-1.473679	-1.607476	-2.992954	-4.459660	-4.066495	-3.030874
30	145.000000	-5.252081	-4.527807	-4.728918	-4.898262	-4.477940	-4.038254
31	150.000000	-4.290773	-3.621269	-3.526968	-4.170294	-4.803273	-4.624357
32	155.000000	-10.688072	-7.001413	-5.951908	-6.454806	-7.069445	-6.593304
33	160.000000	-7.081941	-6.158845	-5.175471	-4.758114	-5.085352	-6.246474
34	165.000000	-14.203314	-11.334724	-10.101020	-10.216372	-11.495849	-13.002886
35	170.000000	-9.275296	-10.107506	-11.867336	-12.146273	-13.141277	-13.612731
36	175.000000	-12.792811	-12.545370	-12.308520	-12.068249	-11.811882	-11.530210
37	180.000000	-7.635689	-7.635689	-7.635689	-7.635689	-7.635689	-7.635689

## Βιβλιογραφία

- [1] J. Puig-Suari, C. Turner, and W. Ahlgren, "Development of the standard CubeSat deployer and a CubeSat class picosatellite," in *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, vol. 1, pp. 1347–1353, March 2001.
- [2] J. Puig-Suari, C. Turner, and R. J. Twiggs, "CubeSat: the development and launch support infrastructure for eighteen different satellite customers on one launch," in *Proceedings of the 15th Annual AIAA/Utah State University Conference on Small Satellites*, pp. 1–5, 2001.
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Low\\_Earth\\_orbit](https://en.wikipedia.org/wiki/Low_Earth_orbit).
- [4] B. Klofas and K. Leveque, "A survey of CubeSat communication systems: 2009–2012," in *Proceedings of the 10th Annual CubeSat Developers Workshop*, pp. 1–41, Cal Poly State University, San Luis Obispo, Calif, USA, September 2012.
- [5] Y. Rahmat-Samii and A. C. Densmore, "Technology trends and challenges of antennas for satellite communication systems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 4, part 1, pp. 1191–1204, 2015.
- [6] A. Toorian, K. Diaz, and S. Lee, "The CubeSat approach to space access," in *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference (AC '08)*, pp. 1–14, March 2008.
- [7] B. Klofas, J. Anderson, and K. Leveque, "A survey of CubeSat communication system," in *Proceedings of the CubeSat Developers Conference*, 2008.
- [8] S. Gao, K. Clark, M. Unwin et al., "Antennas for modern small satellites," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 51, no. 4, 2009.
- [9] A. R. Aslan, H. B. Yagci, M. E. Umit et al., "Development of a LEO communication CubeSat," in *Proceedings of the 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST '13)*, pp. 637–641, June 2013.
- [10] A. Babuscia, B. Corbin, M. Knapp, R. Jensen-clem, M. Van De Loo, and S. Seager, "Inflatable antenna for cubesats: motivation for development and antenna design," *Elsevier*, vol. 91, pp. 322–332, 2013.
- [11] A. Babuscia, M. Van de Loo, Q. J. Wei, S. Pan, S. Mohan, and S. Seager, "Inflatable antenna for CubeSat: fabrication, deployment and results of experimental tests," in *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, IEEE, Big Sky, Mont, USA, March 2014.
- [12] N. Chahat, J. Sauder, M. Thomson, R. Hodges, and Y. Rahmat-Samii, "CubeSat deployable Ka-band reflector antenna for Deep Space missions," in *Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APS '15)*, pp. 2185–2186, July 2015.

- [13] C. Antenna, Y. He, S. Member, W. He, and H. Wong, "A wideband circularly polarized," *IEEE Xplore: IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 67–70, 2014.
- [14] Y. Luo, Q.-X. Chu, and L. Zhu, "A low-profile wide-beam width circularly-polarized antenna via two pairs of parallel dipoles in a square contour," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 3, pp. 931–936, 2015.
- [15] Y. Luo, Q.-X. Chu, and L. Zhu, "A miniaturized wide-beam width circularly polarized planar antenna via two pairs of folded dipoles in a square contour," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 8, pp. 3753–3759, 2015.
- [16] Nasimuddin, K. P. Esselle, and A. K. Verma, "Wideband high gain circularly polarized stacked microstrip antennas with an optimized C-type feed and a short horn," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 2, pp. 578–581, 2008.
- [17] V. Rafii, J. Nourinia, J. Pourahmadazar, and F. Jalili, "Circularly polarized circular slot antenna array using sequentially rotated feed network," *Journal of Communication Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 37–45, 2012.
- [18] S.-K. Lin and Y.-C. Lin, "A compact sequential-phase feed using uniform transmission lines for circularly polarized sequential rotation arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 7, pp. 2721–2724, 2011.
- [19] C. Deng, Y. Li, Z. Zhang, and Z. Feng, "A wideband sequential phase fed circularly polarized patch array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 7, pp. 3890–3893, 2014.
- [20] A. Nascetti, E. Pittella, P. Teofilatto, and S. Pisa, "High-gain S-band patch antenna system for earth-observation CubeSat satellites," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 434–437, 2015.
- [21] Nasimuddin, X. Qing, and Z. N. Chen, "Compact circularly polarized symmetric-slit microstrip antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 53, no. 4, pp. 63–75, 2011.
- [22] I. Park, S. X. Ta, J. J. Hin, and R. W. Ziolkowski, "Applications of circularly polarized crossed dipole antennas," in *Proceedings of the International Workshop on Antenna Technology*, pp. 3–5, Sydney, Australia, March 2014.
- [23] S. X. Ta, I. Park, and R. W. Ziolkowski, "Circularly polarized crossed dipole on an HIS for 2.4/5.2/5.8-GHz WLAN applications," *IEEE Xplore: IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1464–1467, 2013.
- [24] F. E. Shelton, "Cross-dipole antenna configurations," *United States Patent*, vol. 2, no. 12, 2012.

- [25] H. H. Tran and I. Park, "Compact crossed dipole antenna for a broadband UHF-RFID tag," in *Proceedings of the International Workshop on Antenna Technology (iWAT '15)*, pp. 379–380, Seoul, Republic of Korea, 2013.
- [26] J. Costantine, Y. Tawk, A. Ernest, and C. G. Christodoulou, "Deployable antennas for CubeSat and space communications," in *Proceedings of the 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP '12)*, pp. 837–840, Prague, Czech Republic, March 2012
- [27] D. Misman, I. A. Salamat, M. F. Abdul Kadir et al., "The study of meander line for microstrip and planar design," in *Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Transport System Telecommunications (ITST '08)*, pp. 24–28, October 2008.
- [28] D. Ochoa, K. Hummer, and M. Ciffone, "Deployable helical antenna for nano-satellites," in *Proceedings of the 28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, pp. 1–7, Logan, Utah, USA, August 2014.
- [29] C. J. Vourch and T. D. Drysdale, "V-Band 'Bull's Eye' antenna for CubeSat applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1092–1095, 2014.
- [30] H.-T. Liu, S. Gao, and T.-H. Loh, "Electrically small and low cost smart antenna for wireless communication," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 3, pp. 1540–1549, 2012.
- [31] M. T. Islam, M. Cho, M. Samsuzzaman, and S. Kibria, "Compact antenna for small satellite applications [Antenna Applications Corner]," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 57, no. 2, pp. 30–36, 2015.
- [32] C. J. Vourch and T. D. Drysdale, "Inter-CubeSat communication with V-band 'Bull's eye' antenna," in *Proceedings of the 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP '14)*, pp. 3545–3549, April 2014.
- [33] H.-J. Wang, F. Bin, Y. Min et al., "Inflatable antenna for space-borne microwave remote sensing," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 58–70, 2012.
- [34] W. You-Wei and G. Fu-Ling, "Design and fabrication of a folding-and-rolling reflectarray antenna," in *Proceedings of the 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE '08)*, pp. 54–57, November 2008.
- [35] A. Chauraya, W. G. Whittow, Y. C. Vardaxoglou et al., "Inkjet printed dipole antennas on textiles for wearable communications," *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 7, no. 9, pp. 760–767, 2013.
- [36] H. R. Khaleel, H. M. Al-Rizzo, D. G. Rucker, and S. Mohan, "A compact polyimide-based UWB antenna for flexible electronics," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 564–567, 2012.

- [37] S. Ahmed, F. A. Tahir, A. Shamim, and H. M. Cheema, "A compact kapton-based inkjet-printed multiband antenna for flexible wireless devices," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 1802–1805, 2015.
- [38] H. R. Khaleel, H. M. Al-Rizzo, and D. G. Rucker, "Compact polyimide-based antennas for flexible displays," *IEEE/OSA Journal of Display Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 91–96, 2012.
- [39] Y. Xu and F.-L. Guan, "Structure design and mechanical measurement of inflatable antenna," *Acta Astronautica*, vol. 76, pp. 13–25, 2012.
- [40] S. Cakaj, B. Kamo, A. Lala, and A. Rakipi, "The coverage analysis for low earth orbiting satellites at low elevation," *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, vol. 5, no. 6, pp. 6–10, 2014.
- [41] T. Inamori, K. Otsuki, Y. Sugawara, P. Saisutjarit, and S. Nakasuka, "Three-axis attitude control by two-step rotations using only magnetic torquers in a low Earth orbit near the magnetic equator," *Acta Astronautica*, vol. 128, pp. 696–706, 2016.
- [42] T. F. C. Leao, V. Mooney-Chopin, C. W. Trueman, and S. Gleason, "Design and implementation of a diplexer and a dual band VHF/UHF antenna for nanosatellites," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1098–1101, 2013.
- [43] Y. Tsuda, N. Sako, T. Eishima et al., "University of Tokyo's CubeSat project: its educational and technological significance," in *Proceedings of the 15th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites (SSC '01)*, pp. 1–8, 2001.
- [44] J. Costantine, Y. Tawk, C. G. Christodoulou, J. Banik, and S. Lane, "CubeSat deployable antenna using bitable composite tape-springs," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 285–288, 2012.
- [45] N. Chahat, R. E. Hodges, J. Sauder, M. Thomson, E. Peral, and Y. Rahmat-Samii, "CubeSat deployable Ka-band mesh reflector antenna development for earth science missions," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 6, pp. 2083–2093, 2016.
- [46] R. E. Hodges, M. J. Roadway, A. Toorian, D. J. Hoppe, B. Shah, and A. E. Kaman, "ISARA—integrated solar array and reflectarray CubeSat deployable Ka-band antenna," in *Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APS '15)*, pp. 2141–2142, July 2015.
- [47] H. Heidt, P. J. Puig-Suari, P. A. S. Moore, P. S. Nakasuka, and P. R. J. Twiggs, "CubeSat: a new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation," in *Proceedings of the 14th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, pp. 1–19, 2013.

- [48] R. E. Freeland, G. D. Bilyeu, and G. R. Veal, "Development of flight hardware for a large, inflatable-deployable antenna experiment," *Acta Astronautica*, vol. 38, no. 4–8, pp. 251–260, 1996.
- [49] R. S. Pappa, L. R. Giersch, and J. M. Quagliaroli, *Photogrammetry of a 5m Inflatable Space Antenna with Consumer Digital Cameras*, NASA, 2000.
- [50] E. Flint, G. Bales, and R. Glaese, "Experimentally characterizing the dynamics of 0.5m+ diameter doubly curved shells made from thin films," in *Proceedings of the 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA 2003-1831, pp. 1–11, 2003.
- [51] R. S. Pappa, J. O. Lassiter, and B. P. Ross, "Structural dynamics experimental activities in ultra-lightweight and inflatable space structures," in *Proceedings of the 42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, vol. 1263, pp. 1–18, Seattle, Wash, USA, April 2001.
- [52] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, "Internet of Things for smart cities," *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014. Doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328.
- [53] L. D. Xu, W. He, and S. Li, "Internet of Things in industries: A survey," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, 2014. Doi: 10.1109/TII.2014.2300753.
- [54] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015. Doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [55] G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, "A survey on 5G networks for the Internet of Things: Communication technologies and challenges," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3619–3647, Dec. 2018. Doi: 10.1109/ACCESS.2017.2779844.
- [56] M. D. Sanctis, E. Cianca, G. Araniti, I. Bisio, and R. Prasad, "Satellite communications supporting internet of remote things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 3, no. 1, pp. 113–123, 2016. Doi: 10.1109/JIOT.2015.2487046.
- [57] I. F. Akyildiz and A. Kak, "The Internet of Space Things/CubeSats," vol. 33, no. 5, pp. 212–218, 2019. Doi: 10.1109/MNET.2019.1800445.
- [58] H. Zhou, L. Liu, and H. Ma, "Coverage and capacity analysis of LEO satellite network supporting Internet of Things," in *Proc. ICC 2019—2019 IEEE Int. Conf. Communications (ICC)*, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICC.2019.8761682.
- [59] "Tech giants race to build orbital internet," *IEEE Spectrum*, vol. 55, no. 6, pp. 10–11, 2018. Doi: 10.1109/MSPEC.2018.8362213.

- [60] R. M. Rodriguez-Osorio and E. F. Ramírez, "A hands-on education project: Antenna design for inter-cubesat communications," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, pp. 211–224, Oct. 2012. Doi: 10.1109/MAP.2012.6348155.
- [61] F. E. Tubbal, R. Raad, and K. W. Chin, "A survey and study of planar antennas for pico-satellites," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2590–2612, Dec. 2015. Doi: 10.1109/ACCESS.2015.2506577.
- [62] Y. Rahmat-Samii, V. Manohar, and J. M. Kovitz, "For satellites, think small, dream big: A review of recent antenna developments for cubesats," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 59, no. 2, pp. 22–30, Apr. 2017. Doi: 10.1109/MAP.2017.2655582.
- [63] S. Gao, Y. Rahmat-Samii, R. E. Hodges, and X. Yang, "Advanced antennas for small satellites," *Proc. IEEE*, vol. 106, no. 3, pp. 391–403, 2018. doi: 10.1109/JPROC.2018.2804664.
- [64] Y. Rahmat-Samii, V. Manohar, and, and J. M. Kovitz, "Novel antenna concepts and developments for CubeSats," in *Developments in Antenna Analysis and Design*. Vol. 2, R. Mittra, Ed., Stevenage, England: IET, 2018, pp. 361–401.
- [65] A. H. Lokman et al., "A review of antennas for picosatellite applications," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2017, pp. 1–17, Apr. 2017. Doi: 10.1155/2017/4940656.
- [66] N. Chahat, R. E. Hodges, J. Sauder, M. Thomson, E. Peral, and Y. Rahmat-Samii, "CubeSat deployable Ka-band mesh reflector antenna development for earth science missions," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 6, pp. 2083–2093, June 2016. Doi: 10.1109/TAP.2016.2546306.
- [67] N. Chahat, R. E. Hodges, J. Sauder, M. Thomson, and Y. Rahmat-Samii, "The deep-space network telecommunication CubeSat antenna: Using the deployable Ka-band mesh reflector antenna," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 59, no. 2, pp. 31–38, Apr. 2017. Doi: 10.1109/MAP.2017.2655576.
- [68] Y. Rahmat-Samii, V. Manohar, J. M. Kovitz, R. E. Hodges, G. Freebury, and E. Peral, "Development of highly constrained 1 m Ka-band mesh deployable offset reflector antenna for next generation CubeSat radars," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 10, pp. 6254–6266, Oct. 2019. Doi: 10.1109/TAP.2019.2920223.
- [69] N. Chahat et al., "Advanced CubeSat antennas for deep space and earth science missions: A review," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 61, no. 5, pp. 37–46, Oct. 2019. Doi: 10.1109/MAP.2019.2932608.
- [70] N. Chahat, J. Sauder, M. Mitchell, N. Beidleman, and G. Freebury, "Onemeter deployable mesh reflector for deep-space network telecommunication at X-band and Ka-band," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 2, pp. 727–735, Feb. 2020. Doi: 10.1109/TAP.2019.2943394.

- [71] J. F. Sauder et al., "Deployment mechanisms for high packing efficiency one-meter reflectarray antenna (Omera)," in *Proc. AIAA Scitech 2019 Forum*, pp. 1–9. doi: 10.2514/6.2019-0755.
- [72] "The use of the frequency bands 27.5–30.0 GHz and 17.3–20.2 GHz by satellite networks," Electronic Communications Committee within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, Gothenburg, Sweden, Tech. Rep., 2010. [Online]. Available: <https://www.ecodocdb.dk/download/880cf9ed-9e1e/ECCREP152.PDF>
- [73] K. Y. Kapusuz, O. A. Civi, and A. G. Yarovoy, "A dual-band wide-angle scanning phased array antenna in K/Ka bands for satellite-on-the-move applications," in *Proc. 11th European Conf. on Antennas and Propagation, EUCAP 2017*, 2017, pp. 1898–1902. Doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928682.
- [74] A. Cuttin et al., "A Ka-band transceiver for CubeSat satellites: Feasibility study and prototype development," in *Proc. 48th European Microwave Conf., Emu 2018*, 2018, pp. 930–933. doi: 10.23919/EuMC.2018.8541695.
- [75] A. Gregorio and F. Alimenti, "CubeSats for future science and internet of space: Challenges and opportunities," in *Proc. 25th IEEE Int. Conf. Electronics Circuits and Systems, ICECS 2018*, 2019, pp. 169–172. Doi: 10.1109/ICECS.2018.8617947.
- [76] A. Clemente, L. D. Palma, F. Diaby, L. Dussopt, K. Pham, and R. Sauleau, "Electronically-steerable transmitarray antennas for Ka-band," in *Proc. 13th European Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2019*, 2019, vol. 2, pp. 1–4.
- [77] Y. Rahmat-Samii and R. Haupt, "Reflector antenna developments: A perspective on the past, present and future," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 57, no. 2, pp. 85–95, Apr. 2015. Doi: 10.1109/MAP.2015.2414534.
- [78] Y. Rahmat-Samii, "Reflector antennas," in *Antenna Handbook*, Y. Lo and S. Lee, Eds. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993, ch. 15.
- [79] "Quick Scatterometer (QuikSCAT)," Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, NASA Jet Propulsion Lab. Accessed on: Jan. 18, 2019. [Online]. Available: <https://podaac.jpl.nasa.gov/QuikSCAT>
- [80] W. Hong et al., "Multibeam antenna technologies for 5G wireless communications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6231–6249, 2017. Doi: 10.1109/TAP.2017.2712819.
- [81] G. Buttazzoni, M. Comisso, A. Cuttin, M. Fragiaco, R. Vescovo, and R. Vincenti Gatti, "Reconfigurable phased antenna array for extending Cube- Sat operations to Ka-band: Design and feasibility," *Acta Astronaut.*, vol. 137, pp. 114–121, Aug. 2017. Doi: 10.1016/j.actaastro.2017.04.012.



- [82] J. Budhu and Y. Rahmat-Samii, "A novel and systematic approach to inhomogeneous dielectric lens design based on curved ray geometrical optics and particle swarm optimization," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 6, pp. 3657–3669, June 2019. Doi: 10.1109/TAP.2019.2902737.
- [83] J. Budhu, Y. Rahmat-Samii, R. E. Hodges, D. C. Hofmann, D. F. Ruffatto, and K. C. Carpenter, "Three-dimensionally printed, shaped, engineered material inhomogeneous lens antennas for next-generation space borne weather radar systems," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 17, no. 11, pp. 2080–2084, 2018. Doi: 10.1109/LAWP.2018.2848263.
- [84] A. Papathanasopoulos, Y. Rahmat-Samii, N. C. Garcia, and J. D. Chisum, "A novel collapsible flat-layered metamaterial gradient-refractive-index lens antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 1312–1321, Mar. 2020. Doi: 10.1109/TAP.2019.2944546.
- [85] R. E. Hodges, M. J. Radway, A. Toorian, D. J. Hoppe, B. Shah, and A. E. Kalman, "ISARA: Integrated solar array and reflectarray CubeSat deployable Ka-band antenna," in *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2015*, vol. 2015, pp. 2141–2142. Doi: 10.1109/APS.2015.7305460
- [86] R. E. Hodges, N. Chahat, D. J. Hoppe, and J. D. Vacchione, "A deployable high-gain antenna bound for Mars," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 59, no. 2, pp. 39–49, 2017. Doi: 10.1109/MAP.2017.2655561.
- [87] P. Nayeri, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni, "Beam-scanning reflectarray antennas: A technical overview and state of the art," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 57, no. 4, pp. 32–47, 2015. Doi: 10.1109/MAP.2015.2453883.
- [88] S. V. Hum and J. Perruisseau-Carrier, "Reconfigurable reflect arrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 1, pp. 183–198, Jan. 2014. Doi: 10.1109/TAP.2013.2287296.
- [89] J. R. Reis, M. Vala, and R. F. S. Caldeirinha, "Review paper on transmitarray antennas," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 94,171–94,188, June 2019. Doi: 10.1109/ACCESS.2019.2924293.
- [90] J. P. Gianvittorio and Y. Rahmat-Samii, "Reconfigurable patch antennas for steerable reflectarray applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 5, pp. 1388–1392, 2006. Doi: 10.1109/TAP.2006.874311.
- [91] X. Yang et al., "A mechanically reconfigurable reflectarray with slotted patches of tunable height," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 17, no. 4, pp. 555–558, 2018. Doi: 10.1109/LAWP.2018.2802701.
- [92] C. Li, S. Xu, F. Yang, and M. Li, "Design and optimization of a mechanically reconfigurable reflectarray antenna with pixel patch elements using genetic algorithm," in

*Proc. 2019 IEEE MTT-S Int. Wireless Symp. (IWS)*, 2019, vol. 1, pp. 1–3. Doi: 10.1109/IEEE-IWS.2019.8804092.

[93] P. Naseri, S. A. Matos, J. R. Costa, and C. A. Fernandes, “Phase-delay versus phase-rotation cells for circular polarization transmit arrays application to satellite Ka-band beam steering,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 3, pp. 1236–1247, Mar. 2018. Doi: 10.1109/TAP.2017.2787540.

[94] L. Zhang, S. Gao, Q. Luo, W. Li, Y. He, and Q. Li, “Single-layer wideband circularly polarized high-efficiency reflectarray for satellite communications,” vol. 65, no. 9, pp. 4529–4538, 2017. Doi: 10.1109/TAP.2017.2722824.

[95] X. Yang et al., “A broadband high-efficiency reconfigurable reflectarray antenna using mechanically rotational elements,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 8, pp. 3959–3966, 2017. Doi: 10.1109/TAP.2017.2708079.

[96] N. Gagnon and A. Petosa, “Using rotatable planar phase shifting surfaces to steer a high-gain beam,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 6, pp. 3086–3092, 2013. Doi: 10.1109/TAP.2013.2253298.

[97] M. U. Afzal and K. P. Esselle, “Steering the beam of medium-to-high gain antennas using near-field phase transformation,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 4, pp. 1680–1690, Apr. 2017. Doi: 10.1109/TAP.2017.2670612.

[98] T. Lou, X. X. Yang, H. Qiu, Z. Yin, and S. Gao, “Compact dual-polarized continuous transverse stub array with 2-D beam scanning,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 5, pp. 3000–3010, 2019. Doi: 10.1109/TAP.2019.2896554.

[99] M. U. Afzal, A. Lalbakhsh, and K. P. Esselle, “Electromagnetic-wave beam scanning antenna using near-field rotatable graded-dielectric plates,” *J. Appl. Phys.*, vol. 124, no. 23, pp. 1–11, 2018. Doi: 10.1063/1.5049204.

[100] H. Griffiths and M. Khan, “Antenna beam steering technique using dielectric wedges,” *IEE Proc. H Microwaves, Antennas Propagation*, vol. 136, no. 2, pp. 126–131, 1989. Doi: 10.1049/ip-h-2.1989.0023.

[101] E. B. Lima, S. A. Matos, J. R. Costa, C. A. Fernandes, and N. J. Fonseca, “Circular polarization wide-angle beam steering at Ka-band by in-plane translation of a plate lens antenna,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 12, pp. 5443–5455, 2015. Doi: 10.1109/TAP.2015.2484419.

[102] S. R. Rengarajan, “Scanning and defocusing characteristics of microstrip reflect arrays,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 9, pp. 163–166, Mar. 2010. Doi: 10.1109/LAWP.2010.2045217.

- [103] G. B. Wu, S. W. Qu, and S. Yang, "Wide-angle beam-scanning reflectarray with mechanical steering," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 1, pp. 172–181, 2018. Doi: 10.1109/TAP.2017.2775282.
- [104] H. Yang et al., "A study of phase quantization effects for reconfigurable reflectarray antennas," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 302–305, May 2017. Doi: 10.1109/LAWP.2016.2574118.
- [105] S. V. Hum, M. Okoniewski, and R. J. Davies, "Modeling and design of electronically tunable reflect arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 8, pp. 2200–2210, 2007. Doi: 10.1109/TAP.2007.902002.
- [106] J. Y. Lau and S. V. Hum, "A planar reconfigurable aperture with lens and reflectarray modes of operation," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 58, no. 12, pp. 3547–3555, 2010. Doi: 10.1109/TMTT.2010.2086373.
- [107] P. Padilla, A. Muñoz-Acevedo, M. Sierra-Castañer, and M. Sierra-Pérez, "Electronically reconfigurable transmitarray at Ku band for microwave applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 8, pp. 2571–2579, 2010. Doi: 10.1109/TAP.2010.2050426.
- [108] C. Huang, W. Pan, X. Ma, B. Zhao, J. Cui, and X. Luo, "Using reconfigurable transmitarray to achieve beam-steering and polarization manipulation applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 11, pp. 4801–4810, 2015. Doi: 10.1109/TAP.2015.2479648.
- [109] T. Jiang et al., "Low-DC voltage-controlled steering-antenna radome utilizing tunable active metamaterial," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 60, no. 1, pp. 170–178, 2012. Doi: 10.1109/TMTT.2011.2171981.
- [110] J. R. Reis, R. F. Caldeirinha, A. Hammoudeh, and N. Copner, "Electronically reconfigurable FSS-inspired transmitarray for 2-D beam steering," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 9, pp. 4880–4885, 2017. Doi: 10.1109/TAP.2017.2723087.
- [111] M. Frank, F. Lurz, R. Weigel, and A. Koelpin, "Electronically reconfigurable 6 x 6 element transmitarray at K-band based on unit cells with continuous phase range," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 18, no. 4, pp. 796–800, 2019. Doi: 10.1109/LAWP.2019.2903338.
- [112] C. Liu and S. V. Hum, "An electronically tunable single-layer reflectarray antenna element with improved bandwidth," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 9, no. 8, pp. 1241–1244, 2010. Doi: 10.1109/LAWP.2011.2104934.
- [113] G. Liu, H. Wang, F. Xue, D. Zhu, and X. Dong, "A wideband reconfigurable reflectarray antenna using single-layer varactor-loaded split patch elements," in *Proc. 12th European Conf. Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*, 2018, pp. 1–4. Doi: 10.1049/cp.2018.1127.

- [114] C. Huang, W. Pan, and X. Luo, "Low-loss circularly polarized transmitarray for beam steering application," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 10, pp. 4471–4476, 2016. Doi: 10.1109/TAP.2016.2586580.
- [115] Y. Wang, S. Xu, F. Yang, and M. Li, "Design of a 1-bit reconfigurable transmitarray element using an equivalent magnetic dipole," in *Proc. IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp. and USNC/URSI Nat. Radio Science Meeting, APSURSI 2018*, 2018, pp. 481–482. Doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609269.
- [116] Y. Zhong, H. Luyen, and N. Behdad, "Electronically reconfigurable reflectarray antenna," in *Proc. 13th European Conf. Antennas Propagation (EuCAP)*, 2019, pp. 1–3.
- [117] J. Han, L. Li, G. Liu, Z. Wu, and S. Yan, "A wideband 1-bit  $12 \times 12$  reconfigurable beam-scanning reflectarray: Design, fabrication, and measurement," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 18, no. 6, pp. 1–1, 2019. Doi: 10.1109/LAWP.2019.2914399.
- [118] L. Dussopt, L. D. Palma, P. Pouliguen, A. Clemente, P. Potier, and R. Sauleau, "Circularly-polarized reconfigurable transmitarray in Ka-band with beam scanning and polarization switching capabilities," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 2, pp. 529–540, 2016. Doi: 10.1109/TAP.2016.2633067.
- [119] H. Rajagopalan, Y. Rahmat-Samii, and W. A. Imbriale, "RF MEMS actuated reconfigurable reflectarray patch-slot element," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 12, pp. 3689–3699, 2008. Doi: 10.1109/TAP.2008.2007388.
- [120] B. Wu, A. Sutinjo, M. E. Potter, and M. Okoniewski, "On the selection of the number of bits to control a dynamic digital MEMS reflectarray," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 183–186, 2008. Doi: 10.1109/LAWP.2008.920908.
- [121] O. Bayraktar, O. A. Civi, and T. Akin, "Beam switching reflectarray monolithically integrated with RF MEMS switches," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 2, pp. 854–862, 2012. Doi: 10.1109/TAP.2011.2173099.
- [122] P. Alitalo, Introduction to Ansoft HFSS Helsinki University of Technology 17.4.2007
- [123] An Introduction to HFSS: Fundamental, Principles, Concepts and Use, © 2009 Ansoft, LLC
- [124] M. Jones, Ansys High Frequency Structure Simulator (HFSS) Tutorial, P.Northwest National Laboratory, 1/10/17
- [125] Rogers Corporation, RO4000 Series, High Frequency Circuit Materials
- [126] [Microstrip Patch Antenna Calculator https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip-ant.aspx](https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip-ant.aspx)