



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Μελέτη, Σχεδίαση και Προσομοίωση Κεραιών για
Εφαρμογές Εποπτείας Φάσματος σε Μικρούς Δορυφόρους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Σιούλα Θεόδωρου

Επιβλέπων : Δ. Βουγιούκας

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: Δ. Βουγιούκας – Κ. Μαλιάτσος – Χ. Μεσαριτάκης

Σάμος, Οκτώβριος 2022

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

© 2022

του

Σιούλα Θεόδωρου

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Περίληψη

Οι μικροί δορυφόροι και πιο συγκεκριμένα οι CubeSats εξελίσσονται με γρήγορους ρυθμούς και είναι μια ελκυστική επιλογή λόγω του χαμηλότερου κόστους κατασκευής και της ευκολότερης και πιο σύντομης ανάπτυξής τους σε σχέση με άλλους κοινούς δορυφόρους. Χρησιμοποιούνται για εκπαιδευτικούς και επιστημονικούς σκοπούς, τηλεπικοινωνίες, παρατήρηση της γης, πρόγνωσης καιρού, εποπτεία φάσματος, διαστημική έρευνα και ραδιοαστρονομία. Το μικρό μέγεθος των CubeSat δημιουργεί πολλούς περιορισμούς στον σχεδιασμό του δορυφόρου και κυρίως στη σχεδίαση των κεραιών τους. Οι κεραίες πρέπει να διατηρούν το μέγεθος και το βάρος τους στο ελάχιστο, ενώ παράλληλα να είναι ανθεκτικές, έτσι ώστε να αντέξουν στις δύσκολες συνθήκες του διαστήματος, και να έχουν τις απαραίτητες επιδόσεις για την σωστή επικοινωνία. Κατά τον σχεδιασμό κεραιών για CubeSat χρησιμοποιούνται τεχνικές σμίκρυνσης, όπως μηχανισμοί επέκτασης, οι οποίοι όμως αυξάνουν το βάρος, το κόστος και την πολυπλοκότητα της κεραίας. Συνεπώς, υπάρχουν πάντα κάποιοι συμβιβασμοί κατά την σχεδίαση μια κεραίας ή ενός συστήματος κεραιών.

Το ραδιοφάσμα είναι ένας πολύτιμος και περιορισμένος πόρος για τις ασύρματες επικοινωνίες. Με την εποπτεία φάσματος διασφαλίζει τη σωστή χρήση και τήρηση των προτύπων ραδιοεπικοινωνιών, καθώς και την αποδοτική χρήση του φάσματος χωρίς παρεμβολές. Επίσης, με την εποπτεία φάσματος μπορούμε να εντοπίσουμε μια πηγή που προκαλεί παρεμβολές είτε λόγω λάθος χειρισμού, βλάβης ή παράνομης χρήσης. Οι δορυφόροι και πιο συγκεκριμένα οι «αστερισμοί» (Constellations) δορυφόρων είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την εποπτεία φάσματος, διότι μπορούν να προσφέρουν παγκόσμια κάλυψη. Στο παρελθόν, ένας μεγάλος στόλος δορυφόρων θα είχε πολύ μεγάλο κόστος, όμως με τους CubeSats μπορούμε να παρέχουμε τις απαραίτητες λειτουργίες με πολύ χαμηλότερο κόστος.

Σε αυτή την διπλωματική, αναφέρονται τα ζητούμενα μιας αποστολής CubeSat εποπτείας φάσματος, αναλύονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των CubeSat και αναλύονται και συγκρίνονται κεραίες που χρησιμοποιήθηκαν σε αποστολές CubeSat στο παρελθόν ή κεραίες που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί αλλά είναι συμβατές για λειτουργίες μιας δορυφορικής αποστολής εποπτείας φάσματος.

Επίσης, σχεδιάστηκαν τρεις κεραίες που είναι συμβατές με CubeSats και προσφέρουν χαμηλό, μέτριο και υψηλό κέρδος αντίστοιχα.

Τέλος, γίνεται προσομοίωση και ανάλυση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας των κεραιών αυτών και αναφέρονται προτάσεις βελτίωσης για ένα σύστημα κεραιών εποπτείας φάσματος.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Δορυφορικές Επικοινωνίες, CubeSats, Κεραίες, Εποπτεία Φάσματος

ABSTRACT

In the last years CubeSats have been growing in popularity and are becoming an attractive option because of the low cost and faster production and developing time compared to conventional satellites. CubeSats are used for educational, scientific, communication, earth observation, weather forecasting, spectrum monitoring, space exploration and radio astronomy missions. One of the biggest issues on a CubeSat platform is the limited space which is very important for design of the antenna. CubeSat antennas should be as light and as small as possible, while being very sturdy and resilient so they can withstand the harsh space environment and still providing good radiation characteristics and performance. In CubeSat antenna design miniaturization techniques or stowage mechanisms are being used to reduce the weight and size, but mechanical mechanisms increase the total weight, cost, and complexity of the antenna. Therefore, there are always tradeoffs while designing an antenna or an antenna system for a CubeSat.

Spectrum is a sparse and valuable resource for wireless communications. Spectrum monitoring ensures proper and efficient usage of the spectrum without interference and that communication standards are being met. Geolocation is part of spectrum monitoring, where the interfering signals are being located. Interference can be created from improper usage, failed equipment or malicious activities. Satellite constellations are a very useful tool for spectrum monitoring applications because they can provide global coverage. In the past, the cost of a big constellation would be very expensive, however CubeSats could offer the required functionality at a fraction of the cost.

In this thesis the CubeSat spectrum monitoring mission requirements and CubeSat characteristics will be analyzed. Additionally, this thesis includes a comprehensive comparison of antenna design of antennas that have been used in a mission in the past or antennas that are compatible with the CubeSat platform.

Three antennas have been designed to be compatible with a CubeSat, which provide low, medium, and high gain respectively.

The last chapter includes a parametric simulation, performance analysis for the three antennas and future steps for a spectrum monitoring antenna system.

Keywords: Satellite Communications, CubeSats, Antennas, Spectrum Monitoring

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Δημοσθένη Βουγιούκα για την συνεχόμενη βοήθεια σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου και για την ευκαιρία εκπόνησης μιας διπλωματικής εργασίας με βάση τα ενδιαφέροντά μου.

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή	1
1.1. Γενικά.....	1
1.2. Αντικείμενο διπλωματικής.....	2
1.3. Δομή της διπλωματικής	2
2. Δορυφόροι CubeSats	3
2.1. Κατηγορίες CubeSat	4
2.2. Αποστολές CubeSat	6
2.3. Υποσυστήματα CubeSat	7
2.3.1. Attitude Determination and Control Subsystem (ADCS)	7
2.3.2. Command and Data Handling (C&DH)	7
2.3.3. Σύστημα προώθησης.....	7
2.3.4. Σύστημα Ισχύος.....	7
2.3.5. Τηλεπικοινωνιακό υποσύστημα.....	8
2.4. CubeSats - Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί	9
3. Εποπτεία Φάσματος.....	10
3.1. Γενικά.....	10
3.2. Συστήματα Εποπτείας Φάσματος	11
3.3. Αστερισμοί Δορυφόρων – Constellations.....	17
3.4. Εποπτεία Φάσματος και Τεχνικές Γεωεντοπισμού.....	19
3.5. Προηγούμενες Αποστολές CubeSat Εποπτείας Φάσματος.....	23
4. Κεραίες CubeSat	26
4.1. Γενικά.....	26
4.2. Γραμμικές Κεραίες (Wired Antennas).....	27
4.2.1. Δίπολα, Μονόπολα, Turnstile	27
4.2.2. Μηχανικά χαρακτηριστικά.....	28
4.2.3. Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας.....	29
4.2.4. Παραδείγματα	31
4.3. Κεραίες Yagi-Uda.....	32
4.3.1. Παράδειγμα.....	32
4.3.2. Μηχανικά χαρακτηριστικά (NorSAT-2 Deployable Crossed Yagi-Uda)	34
4.3.3. Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας (NorSAT-2 Deployable Crossed Yagi-Uda).....	36
4.4. Ελικοειδείς Κεραίες	37

4.5.	Βροχοκεραία	39
4.5.1.	Μηχανικά χαρακτηριστικά (Loop antenna – MarCO)	39
4.5.2.	Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας (Loop antenna – MarCO)	41
4.6.	Κεραίες Planar (Patch, Patch Array, Slot)	42
4.6.1.	Μηχανικά Χαρακτηριστικά	42
4.6.2.	Slot Κεραίες	44
4.6.3.	Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας	45
4.6.4.	Παραδείγματα	48
4.6.4.1.	GomX-3 - 3U Cubesat	49
4.6.4.2.	ASTERIA 6U CubeSat	50
4.6.4.3.	Μεταλλική 8x8 Patch Array – NASA JPL	51
4.6.4.4.	X-Band 8x8 Patch Array – (NeaScout, Biosentinel, CuSP)	51
4.7.	Κεραίες Ανακλαστήρα	53
4.7.1.	Μηχανικά Χαρακτηριστικά	54
4.7.2.	Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας	57
4.7.3.	Παραδείγματα	58
4.7.3.1.	RainCube	58
4.7.3.2.	One-Meter Deployable Mesh Reflector	63
4.7.3.3.	X-Band Mesh Reflector	64
4.7.3.4.	Ka-Band	66
4.8.	Φουσκωτές Κεραίες	68
4.8.1.	Μηχανικά Χαρακτηριστικά	68
4.8.2.	Χαρακτηριστικά Ακτινοβολίας	69
4.8.3.	Παραδείγματα	69
4.9.	Κεραίες Ανακλαστικής Διάταξης (Reflectarrays)	81
4.9.1.	Μηχανικά Χαρακτηριστικά	83
4.9.2.	Χαρακτηριστικά Ακτινοβολίας	87
4.9.3.	Παραδείγματα	91
4.9.3.1.	ISARA	91
4.9.3.2.	Mars Cube One	92
4.9.3.3.	Omera - One Meter Reflectarray Antenna	97
4.10.	Φασικές Στοιχειοκεραίες (Retrodirective & Self-Steering)	103
4.11.	Transmitarrays	105
4.12.	Κεραίες Μεμβράνης	107
4.13.	Horn	110
4.14.	Σπειροειδείς Κεραίες	111

4.14.1. Archimedean & Equiangular Spiral Backed by a Shallow Cavity with Absorbing Strips	111
4.14.2. Conical Log-Spiral Antenna.....	114
4.15. Metasurface.....	116
4.15.1. Metal-Only Modulated Metasurface Antenna.....	116
4.15.2. Si/GaAs holographic metasurface antenna.....	117
4.16. Isoflux	119
5. Συγκριτική μελέτη	123
5.1. Αποστολές CubeSat και οι Κεραίες τους.....	123
5.2. Κεραίες Χαμηλού Κέρδους – LGA	129
5.2.1. Γραμμικές κεραίες (Μονόπολα - Δίπολα – Loop)	129
5.2.2. Κεραίες LGA Planar - Patch.....	132
5.2.3. Ελικοειδείς Κεραίες LGA.....	134
5.2.4. Συγκριτικός πίνακας κεραιών χαμηλού κέρδους	138
5.3. Κεραίες Μεσαίου Κέρδους – MGA.....	141
5.3.1. Ελικοειδείς Κεραίες MGA.....	141
5.3.2. Κεραίες Yagi-Uda MGA.....	143
5.3.3. Στοιχειοκεραίες MGA (Arrays)	144
5.3.1. Συγκριτικός Πίνακας Κεραιών Μεσαίου Κέρδους	145
5.4. Κεραίες Υψηλού Κέρδους – HGA.....	148
5.4.1. Συγκριτικός Πίνακας Κεραιών Υψηλού Κέρδους.....	149
6. Επιλογή Κεραίας CubeSat για Εποπτεία Φάσματος.....	151
6.1. Κριτήρια επιλογής κεραιών	151
6.2. Σχεδίαση και Προσομοίωση Κεραιών	154
6.3. Κεραία Χαμηλού Κέρδους Υπέρ-ευρείας Ζώνης Συχνοτήτων – Archimedean Spiral with Absorber-lined Cavity Backing (UWB).....	154
6.3.1. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Archimedean Spiral with Absorber-lined Cavity Backing	155
6.3.2. Συμπεράσματα προσομοίωσης	165
6.4. Κεραία Μεσαίου Κέρδους – 2x2 Patch Array (S-Band).....	166
6.4.1. Γενικά	166
6.4.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης	168
6.4.3. Συμπεράσματα Προσομοίωσης	177
6.5. Κεραία Υψηλού Κέρδους – 4x4 Patch Array (X-Band).....	178
6.5.1. Συμπεράσματα Προσομοίωσης	184
7. Συμπεράσματα.....	185

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: 3U Cubesat CSSWE (Colorado Student Space Weather Experiment) (κάτω αριστερά) και το P-POD του (πάνω δεξιά). [1]	3
Εικόνα 2: Εκτόξευση CubeSat από τον ISS [1]	4
Εικόνα 3: Κατηγορίες δορυφόρων με βάση το μέγεθος [2]	5
Εικόνα 4: Μεγέθη CubeSat σε μονάδες U	5
Εικόνα 5: α) Αισθητήρας ηλίου, β) τροχοί αντίδρασης	7
Εικόνα 6: Παραδείγματα κεραιών σταθερών σταθμών [5]	11
Εικόνα 7: Παράδειγμα κινητού επίγειου σταθμού [5]	12
Εικόνα 8: Παραδείγματα κινητών σταθμών εποπτείας φάσματος [5]	12
Εικόνα 9: Σύστημα UWB σπειροειδής κεραία της αγοράς για κινητούς σταθμούς εποπτείας φάσματος και γεωεντοπισμού 500MHz - 18GHz. [www.crfs.com]	13
Εικόνα 10: Σταθμός εποπτείας φάσματος μεγάλου υψομέτρου [5]	14
Εικόνα 11: Πλαίσιο χρήσης HAP με επίγειους και δορυφορικούς σταθμούς. [6]	15
Εικόνα 12: α) Walker Constellation (GNSS) β) Street-of-Coverage (πολική τροχιά)	17
Εικόνα 13: Flower Constellation	18
Εικόνα 14: Απεικόνιση constellation σε τροχιά	18
Εικόνα 15: Απεικόνιση συστήματος γεωεντοπισμού TDOA σε σχέση με την επιφάνεια της γης	20
Εικόνα 16: Διάγραμμα γεωεντοπισμού 2 δορυφόρων βασισμένο σε T/FDOA [9]	20
Εικόνα 17: Διάγραμμα συστήματος γεωεντοπισμού 2 δορυφόρων βασισμένο σε T/FDOA [9]	21
Εικόνα 18: Γεωεντοπισμός με line-of-sight με έναν δορυφόρο	21
Εικόνα 19: Γεωεντοπισμός με line-of-sight με έναν δορυφόρο	22
Εικόνα 20: Δορυφόρος Hawkeye 360	24
Εικόνα 21: Απεικόνιση CubeSat - Kleos Space	24
Εικόνα 22: Μέρη του δορυφόρου NorSat-3 [15]	25
Εικόνα 23: Απεικόνιση CubeSat 6U - MilSpace2	25
Εικόνα 24: Disaster Monitoring Constellation Micro Satellite by Surrey Satellite Technology Ltd, UK [16]	26
Εικόνα 25: α) Δίπολο, μονόπολο χωρίς πεδίο γείωσης, γ) Μονόπολο με πεδίο γείωσης	27
Εικόνα 26: Μηχανισμός επέκτασης. (Project Xatcobeo prototype)	29
Εικόνα 27: Endurosat deployable UHF turnstile κεραία. Ανοιχτή (αριστερά) και κλειστή (δεξιά)	29
Εικόνα 28: Διάγραμμα ακτινοβολίας δίπολου $\lambda/2$. [25]	30
Εικόνα 29: Διάγραμμα ακτινοβολίας turnstile κεραίας σε 2U CubeSat (GOMX-1). [26]	30
Εικόνα 30: ISIS deployable VHF/UHF Turnstile antenna	31
Εικόνα 31: Τρόπος λειτουργίας NorSat2 για VDES υπηρεσίες [33]	33
Εικόνα 32: Deployable Cross Yagi-Uda model	34
Εικόνα 33: Μηχανισμός αποθήκευσης και επέκτασης κεραιών (Yagi-Uda & μονόπολο)	35
Εικόνα 34: Στάδια επέκτασης κεραίας	35
Εικόνα 35: Διάγραμμα Ακτινοβολίας VDES Yagi-Uda (RHCP)	36
Εικόνα 36: Deployable Helical Antenna by Oxford Space Systems	37
Εικόνα 37: Deployed helical antenna of GOMX-1 Cubesat	38
Εικόνα 38: Helios deployable HQA antenna	38
Εικόνα 39: SwampSat II CubeSat with 16m ² loop antenna	39
Εικόνα 40: UHF Loop κεραία - Εκτεταμένη και κλειστή	40
Εικόνα 41: Μηχανισμός απελευθέρωσης/ανάπτυξης με θερμαντικό σύρμα	40
Εικόνα 42: Εκτεταμένη UHF Loop κεραία	41

Εικόνα 43: Διάγραμμα ακτινοβολίας και κέρδους ανάλογα τις γωνίες ανύψωσης και αζιμουθίου	41
Εικόνα 44: Θεωρητική απεικόνιση patch κεραίας [25]	43
Εικόνα 45: 8x8 patch array	44
Εικόνα 46: Slot Antenna [44]	45
Εικόνα 47: Διπλή πόλωση με χρήση 4 εισόδους τροφοδοσίας [16]	46
Εικόνα 48: Patch κεραία κυκλικής πόλωσης με χρήση μονής τροφοδοσίας και κομμένες γωνίες [25]	46
Εικόνα 49: Patch κεραία κυκλικής πόλωσης μονής τροφοδοσίας και κυκλικό ενεργό στοιχείο με εγκοπές ή προεξοχές.	47
Εικόνα 50: Patch κεραία κυκλικής πόλωσης με χρήση 4 ορθογώνιων εισόδων τροφοδοσίας	47
Εικόνα 51: Οι κεραίες του GOMX-3 CubeSat	49
Εικόνα 52: Φυσικά χαρακτηριστικά της L-Band patch κεραία του GOMX-3 Cubesat	49
Εικόνα 53: S-Band Patch antenna (Vulcan Wireless Inc) - ASTERIA CubeSat [45]	50
Εικόνα 54: Πλήρως μεταλλική Dual Band RHCP X-Band 8x8 Patch Array [3]	51
Εικόνα 55: NeaScout X-Band 8x8 Patch Array [3]	52
Εικόνα 56: NeaScout X-Band 8x8 Patch Array με μηχανισμό επέκτασης.....	52
Εικόνα 57: Κεραία 12 μέτρων με ανακλαστήρα πλέγματος - NASA-ISRO SAR.....	54
Εικόνα 58: a) Cassegrain b) Gregorian [3]	54
Εικόνα 59: Απεικόνιση κεραία ανακλαστήρα πλέγματος 1 μέτρου για 12U CubeSats	56
Εικόνα 60: Κεραία ανακλαστήρα πλέγματος του 6U CubeSat RainCube.....	56
Εικόνα 61: TENSAR High Aspect Ratio SAR κεραία με στερεά πάνελ.....	57
Εικόνα 62: Διαδικασία αναδίπλωσης παραβολικού κατόπτρου με στερεές επιφάνειες	57
Εικόνα 63: Δορυφόρος RainCube με κεραία ανακλαστήρα πλέγματος σε αναπτυγμένη θέση.....	58
Εικόνα 64: Διαδικασία ανάπτυξης της κεραίας	59
Εικόνα 65: Διαστάσεις και γεωμετρία της κεραίας σε αποθηκευμένη και αναπτυγμένη μορφή	60
Εικόνα 66: Στάδια επέκτασης της κεραίας ανακλαστήρα 1μ [3].....	63
Εικόνα 67: Διαδικασία αναδίπλωσης του πλέγματος [54].....	63
Εικόνα 68: Κατασκευή κεραίας ανακλαστήρα πλέγματος - Tendeg Katenna [54].....	64
Εικόνα 69: Γεωμετρία του Dual-Band X-Band feed LHCP (διαστάσεις σε mm)	65
Εικόνα 70: Πειραματική φουσκωτή κεραία 14μ του δορυφόρου STS-77 -1996 [45].....	68
Εικόνα 71: Στάδια φουσκώματος της κεραίας	70
Εικόνα 72: Κεραία μπαλονιού πάνω σε δορυφόρο. Το σύστημα της κεραίας αποτελείται από 1) το Mylar με μεταλλική επίστρωση, 2) το υπόλοιπο διάφανο μέρος Mylar, 3) το ενεργό στοιχείο (patch), 4) και ο χώρος που καταλαμβάνει στον δορυφόρο [59]	71
Εικόνα 73: Κωνικό(αριστερά) και κυλινδρικό(δεξιά) σχήμα για την κατασκευή της φουσκωτής κεραίας [60]	71
Εικόνα 74: Κωνικό (αριστερά) και κυλινδρικό(δεξιά) σχήμα για την κατασκευή της φουσκωτής κεραίας [60]	72
Εικόνα 75: Μικρότερο μπαλόνι όπου μεγαλώνει με την πίεση (αριστερά) και επίπεδο μπαλόνι όπου παίρνει παραβολικό σχήμα υπό πίεση (δεξιά)	72
Εικόνα 76: Εσοχές του μπαλονιού όπου κυλάει η UV ρητίνη και δοχείο όπου αποθηκεύεται η σκόνη εξάχνωσης [46]	73
Εικόνα 77: Βελτιωμένο σχέδιο σφαιρικής κεραία μπαλονιού πάνω σε δορυφόρο. Το σύστημα της κεραίας αποτελείται από 1) το Mylar με μεταλλική επίστρωση, 2) το υπόλοιπο διάφανο μέρος Mylar, 3) Μεμβράνη όπου κρατάει το ενεργό στοιχείο, 4) το ενεργό στοιχείο (patch) 5) και ο χώρος που καταλαμβάνει στον δορυφόρο [46].....	74
Εικόνα 78: Απεικόνιση φουσκωτής κεραίας πάνω σε δορυφόρο	77
Εικόνα 79: Διαστάσεις πρωτότυπου φουσκωτής κεραίας [47].....	77
Εικόνα 80: Σχήμα κύριου ανακλαστήρα πριν την θερμική διαμόρφωση (αριστερά) και μετά (δεξιά)	79
Εικόνα 81: Διάταξη κεραίας ReflectArray	81
Εικόνα 82: Κεραία ReflectArray με Patch feed και μηχανισμό ανάπτυξης - Αντίγραφο μοντέλου CubeSat M-Argo [64]	84

Εικόνα 83: Φυσικά χαρακτηριστικά κεραίας Reflectarray.....	84
Εικόνα 84: Διαφορετικά σχήματα των στοιχείων: α) διάφορα μήκη γραμμών φάσης, β) διαφορετική γεωμετρία σε μορφή διπόλου ή βρόγχου, γ) διαφορετικά μεγέθη στοιχείων, δ) διαφορετικές γωνίες κλίσης.....	85
Εικόνα 85: Διάταξη πολυεπίπεδης κεραίας reflectarray για αύξηση του εύρους ζώνης	85
Η δεύτερη τεχνική κατασκευής των RA, είναι σε μορφή μεμβράνης. Τα αρχικά πρωτότυπα που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιούσαν φουσκωτούς μηχανισμούς ανάπτυξης [61]. Στη Εικόνα 86 φαίνεται η X-Band κεραία μεμβράνης RA με φουσκωτούς θαλάμους. Η κεραία αποτελούταν από τους θαλάμους που σχεδιάζουν τους τρεις βραχίονες, το περιμετρικό δακτύλιο που σταθεροποιεί και τεντώνει την μεμβράνη και τον μικρότερο δακτύλιο στον οποίο υποστηρίζεται η ενεργή χοανοκεραία.	86
Εικόνα 87: X-Band φουσκωτή RA με διάμετρο 1μ.....	86
Εικόνα 88: Εικονικό σχέδιο κεραίας RA μεμβράνης με μηχανισμό ανάπτυξης με κεραία τροφοδοσίας πάνω στον δορυφόρο α) Πρωτότυπο του 1999, β) RA – DaHGR, μοντέλο της MMA Design (2016)	87
Εικόνα 89: Στοιχείο κεραίας σε γεωμετρία SSR (Single Slot Ring) για κυκλική πόλωση.....	89
Εικόνα 90: Στοιχεία κεραίας λειτουργίας δύο συχνοτήτων με στοιχεία διαφορετικού μεγέθους για α), β) κυκλική ή διπλή γραμμική πόλωση, γ) κυκλική πόλωση, δ) γραμμική πόλωση.....	89
Εικόνα 91: Στοιχεία κεραίας λειτουργίας δύο συχνοτήτων με δύο επίπεδα υποστρώματος	90
Εικόνα 92: Στοιχεία διπλού υποστρώματος με X-band crossed-dipole επάνω από Ka-Band patches .	90
Εικόνα 93: Στάδια επέκτασης της κεραίας [67].....	91
Εικόνα 94: Μοντέλο δορυφόρου ISARA με κεραίες Reflectarray με patch array feed και SGA (Standard Gain Antenna) 4x4 patch array ως κεραία αναφοράς.....	92
Εικόνα 95: Διαδικασία επέκτασης της κεραίας ReflectArray των δορυφόρων MarCO.....	93
Εικόνα 96: Μεντεσέδες με ενωσματομένα ελατήρια (αριστερά) και η κεραία σε θέση αποθήκευσης στην επιφάνεια του δορυφόρου (δεξιά)	93
Εικόνα 97: Γεωμετρία της κεραίας RA επάνω στον δορυφόρο.....	94
Εικόνα 98: MarCo reflectarray S-curve της ανάκλασης φάσης ανά μήκος στοιχείου για γωνία πρόσπτωσης 23°	95
Εικόνα 99: Κεραία τροφοδοσίας patch array, α) Γεωμετρία του πρώτου επιπέδου και διαστάσεις στοιχείων, β) Επίπεδο γείωσης του πρώτου υποστρώματος, γ) ταινιογραμμή (stripline) τροφοδοσίας με κατανομή Taylor δ) διάταξη υποστρωμάτων	96
Εικόνα 100: Πρωτότυπο Ka ReflectArray - OMERA.....	98
Εικόνα 101: Κατασκευή τηλεσκοπικού μηχανισμού της χοανοκεραίας σε θέση αποθήκευσης	98
Εικόνα 102: Στάδια επέκτασης κεραίας.....	99
Εικόνα 103: Μέρη του μηχανισμού επέκτασης της χοανοκεραίας, των κυματοδηγών και του ανακλαστήρα, σε πλήρη αναπτυγμένη θέση.....	99
Εικόνα 104: Μεντεσέδες σύνδεσης των επιφανειών ανακλαστήρα, με βίδες αυξομείωσης απόστασης για έλεγχο της γωνίας μεταξύ των επιφανειών, α) όταν οι επιφάνειες είναι κλειστές και β) όταν είναι αναπτυγμένες	100
Εικόνα 105: Διαδικασία επέκτασης των έξι επιφανειών ανακλαστήρα	100
Εικόνα 106: Μέρη υποστρωμάτων των επιφανειών ανακλαστήρα	101
Εικόνα 107: α) Απαιτούμενη καθυστέρηση φάσης των στοιχείων ανακλαστήρα, β) Γωνία προσπίπτοντος κύματος στα στοιχεία του ανακλαστήρα.....	101
Εικόνα 108: Διάγραμμα κεραίας Phased Array (όπου Φ οι ολισθητές φάσης)	104
Εικόνα 109: Phased Array με ηλεκτρικά ελεγχόμενη δέσμη ακτινοβολίας, του δορυφόρου CESIUM 6U [68].....	104
Εικόνα 110: Διαφορά ακτινοβολίας μεταξύ RA και TA.	105
Εικόνα 111: Διάταξη κεραίας TA και feed για επικοινωνία μεταξύ γειτονικών δορυφόρων και με επίγειους σταθμούς.	106
Εικόνα 112: Γεωμετρία των στοιχείων patch της κεραίας TA	106
Εικόνα 113: Πρωτότυπο κεραία μεμβράνης 16x16 patch 1.73m ²	107
Εικόνα 114: Βήματα ανάπτυξης κεραίας μεμβράνης 16x16 patch.....	108

Εικόνα 115: Ka-Band horn και polarizer -One Meter Mesh Reflector.....	110
Εικόνα 116: Vivaldi-fed conical horn ultrawideband. [A deployable Vivaldi-fed conical horn antenna for CubeSats]	110
Εικόνα 117:Στοιχειοκεραία σπειροειδούς κεραίας AO-DF [75]	111
Εικόνα 118: Στοιχειοκεραία σπειροειδούς κεραίας για γεωεντοπισμό [76]	112
Εικόνα 119: Σπειροειδής στοιχειοκεραία με διαστάσεις 10x10cm για CubeSat	112
Εικόνα 120: Ισογώνια σπειροειδής κεραία με (α) δύο βραχίονες και με (β) 4 βραχίονες και (γ) αρχιμήδεια σπειροειδής κεραία.....	113
Εικόνα 121: Ισογώνια σπειροειδή κεραία υποστηριζόμενης κοιλότητας (Spiral-CV) (α) και ισογώνια σπειροειδή κεραία υποστηριζόμενης κοιλότητας και απορροφητικό δακτύλιο (Spiral-ABS).....	113
Εικόνα 122: Conical log	114
Εικόνα 123: Προσομοίωση κατευθυντικότητας CLSA στις συχνότητες α) 2.2GHz και β) 3.3GHz..	114
Εικόνα 124: Μοντέλο modulated MTS κεραίας.....	117
Εικόνα 125: Πλήρως μεταλλική Ka-Band modulated MTS κεραία.....	117
Εικόνα 126: Si/GaAs Holographic metasurface κεραία. α) Silicon Wafer στη μέση στη διαδικασία χαράγματος β) χαραγμένο metasurface στρώμα επάνω στο GaAs διηλεκτρικό υπόστρωμα γ) ολοκληρωμένη κεραία τοποθετημένη σε μεταλλική κατασκευή.....	118
Εικόνα 127: Γεωμετρία μεταξύ LEO δορυφόρου και της επιφάνεια της γης [ESA].....	119
Εικόνα 128: Λοβός ακτινοβολίας Isoflux [97]	120
Εικόνα 129: Isoflux X-Band κεραία κυκλικής πόλωσης για νανο-δορυφόρους [98]	121
Εικόνα 130: QHA Isoflux κεραία με μηχανισμό επέκτασης [92].....	122
Εικόνα 131: PIFA κεραία επάνω σε μοντέλο δορυφόρου [99].....	129
Εικόνα 132: Μοντέλο γραμμικής κεραίας εγκατεστημένη πάνω στον δορυφόρο [100]	130
Εικόνα 133: Κεραία του δορυφόρου FUNcube από την ISIS. Αποτελείται από 2 δίπολα σε συχνότητες VHF και UHF.	130
Εικόνα 134: Μοντέλα CubeSat BIRDS2 και BIRDS3 [101].....	131
Εικόνα 135: Εσωτερικό του συστήματος κεραιών με μηχανισμό ανάπτυξης CubeSat BIRDS3.....	131
Εικόνα 136: Γραμμικές κεραία X-Band, σχεδιασμένες με αυτόματες αλγοριθμικές τεχνικές [18] ...	132
Εικόνα 137: Ηλεκτρικά μικρή κεραία UHF εγκατεστημένη σε μια πλευρά ενός CubeSat [102]	133
Εικόνα 138: Κατανομή ρεύματος ως διανυσματικό πεδίο.....	133
Εικόνα 139: Προτεινόμενη QHA α) Γεωμετρία της κεραίας με 4 έλικες διαφορετικού μήκους β) S11 διάγραμμα [107].....	134
Εικόνα 140: Κεραία CLSA τοποθετημένη πάνω σε δορυφόρο 6U.	136
Εικόνα 141: Μηχανισμός ανάπτυξης κεραίας.	136
Εικόνα 142: Μοντέλο VHF/UHF Tri-Filar κεραία με μηχανισμό ανάπτυξης (stowage <1U) [109] .	137
Εικόνα 143: Μοντέλο κεραίας Origami Conical Spiral [133].....	141
Εικόνα 144: Κέρδος κεραίας σε διαφορετικές συχνότητες συντονισμού (Προσομοίωση) [133]	142
Εικόνα 145: Πρωτότυπο κεραίας Yagi-Uda ενσωματωμένη στα φωτοβολταϊκά. [135].....	143
Εικόνα 146: Προσομοίωση κέρδους Yagi-Uda UHF εγκατεστημένη επάνω σε φωτοβολταϊκά [135]	143
Εικόνα 147: Γεωμετρία 4x4 patch array α) η πλευρά της κεραίας β) ενεργά στοιχεία με το δίκτυο τροφοδοσίας γ) επιπρόσθετα patch στοιχεία [136].....	144
Εικόνα 148: Απεικόνιση μοντέλου δορυφόρου με κεραίες προς το διάστημα.....	151
Εικόνα 149: Διαφορετικές δέσμες ακτινοβολίας κεραιών δορυφόρου.....	152
Εικόνα 150: Klopfenstein Balun [77].....	154
Εικόνα 151: Προσομοίωση Αρχιμήδεια σπειροειδούς κεραίας	154
Εικόνα 152: Προσομοίωση Αρχιμήδεια σπειροειδούς κεραίας	155
Εικόνα 153: Γεωμετρία και παράμετροι Αρχιμήδεια σπειροειδούς κεραίας	156
Εικόνα 154: Διάγραμμα κέρδους - συχνότητας	162
Εικόνα 155: Προσομοίωση 2x2 Patch Array S-Band μεσαίου κέρδους για CubeSats.....	166
Εικόνα 156: Γεωμετρία 2x2 Patch Array.....	167

Εικόνα 157: Προσομοίωση 4x4 X-band Patch Array	178
Εικόνα 158: Γεωμετρία 4x4 patch array	179

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1:Κατηγορίες CubeSat. Διαστάσεις και βάρος.....	4
Πίνακας 2: Σύγκριση τύπων πλατφόρμας εποπτείας φάσματος [7]	16
Πίνακας 3: Ζώνες συχνοτήτων	26
Πίνακας 4: Μετρήσεις κεραίας Yagi-Uda - VDES.....	36
Πίνακας 5: Κατασκευαστές Patch κεραιών και τα χαρακτηριστικά τους [27].....	48
Πίνακας 6: Πίνακας κέρδους και απωλειών της κεραίας παραβολικού ανακλαστήρα πλέγματος σε συχνότητα 35.75GHz.	62
Πίνακας 7:Κέρδος και απώλειες X-Band mesh reflector	66
Πίνακας 8: Κέρδος και απώλειες mesh reflector Ka-Band με 30 OPI ανακλαστήρα.....	67
Πίνακας 9:Τιμές κέρδους σε σχέση με την πίεση	75
Πίνακας 10: Πίνακας αποστολών CubeSat και οι κεραίες τους (οι κεραίες με * δεν έχουν μηχανισμό επέκτασης)	126
Πίνακας 11: Συγκριτικός πίνακας κεραιών χαμηλού κέρδους.....	140
Πίνακας 12: Συγκριτικός πίνακας κεραιών υψηλού κέρδους.....	150
Πίνακας 13: Παράμετροι τελικού σχεδίου σπειροειδούς κεραίας	161
Πίνακας 14: Παράμετροι κεραίας προσομοίωσης	176

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας - Patch S-Band ISIS RHCP	45
Διάγραμμα 2: Διάγραμμα ακτινοβολίας S-Band Patch antenna (Vulcan Wireless Inc) - ASTERIA CubeSat [45]	50
Διάγραμμα 3: Διάγραμμα ακτινοβολίας της χοανοκεραίας (feed) με $\varphi = 45^\circ$	61
Διάγραμμα 4: Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας RainCube, με κέρδος συνολικό κέρδος 42.62dBi στη συχνότητα 35.75GHz.	62
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα S11 του X-Band Feed	65
Διάγραμμα 6: Διάγραμμα ακτινοβολίας X-Band κεραία ανακλαστήρα πλέγματος σε συχνότητες α) 7.1675GHz και β) 8.425GHz (προσομοίωση σε μαύρο χρώμα και μετρήσεις σε κόκκινο)	66
Διάγραμμα 7: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας με μέγιστο κέρδος (71.3cm ανακλαστήρα) και κεραίας με ευκολότερη κατασκευή (81.9cm)	75
Διάγραμμα 8: Διάγραμμα ακτινοβολίας σε σχέση με τη πίεση	76
Διάγραμμα 9: α) Διάγραμμα ακτινοβολίας (κέρδος) ενεργού στοιχείου horn-lens (10GHz) b) Διάγραμμα ακτινοβολίας (κατευθυντικότητα) ολοκληρωμένης κεραίας (10GHz)	80
Διάγραμμα 10: Αριθμός άρθρων για ReflectArray κεραίες που δημοσιεύτηκαν στο IEEE. (Ημερομηνία διαγράμματος: Σεπτέμβριος 2022)	83
Διάγραμμα 11: Διάγραμμα S11 της κεραίας τροφοδοσίας	96
Διάγραμμα 12: Διάγραμμα ακτινοβολίας της ισχύος προς γωνία α) αζιμουθίου και β) ανύψωσης, της κεραίας τροφοδοσίας (feed)	97
Διάγραμμα 13: Διάγραμμα ακτινοβολίας της ισχύος προς γωνία α) αζιμουθίου και β) ανύψωσης της κεραίας RA	97
Διάγραμμα 14: Διάγραμμα ακτινοβολίας τηλεσκοπικής χοανοκεραίας σε συχνότητα 35.75GHz για α) $\varphi = 0$ και β) $\varphi = 90$	102
Διάγραμμα 15: Διάγραμμα ακτινοβολίας προσομοίωσης και μετρήσεων πρωτότυπου RA ενός μέτρου, σε συχνότητα 35.75GHz για α) $\varphi = 0$ και β) $\varphi = 90$	102
Διάγραμμα 16: Διάγραμμα ακτινοβολίας TA για συχνότητα 24.6GHz ($\varphi=0$)	106
Διάγραμμα 17: Διάγραμμα ακτινοβολίας patch μεμβράνης αναλόγως την ένταση που ασκείται στην μεμβράνη	109
Διάγραμμα 18: Σύγκριση τύπων κεραιών με βάση το κέρδος και το εύρος ζώνης. [84]	115
Διάγραμμα 19: Διάγραμμα ακτινοβολίας για διαφορετικά υψόμετρα	120
Διάγραμμα 20: Διάγραμμα ακτινοβολίας Isoflux X-band κυκλικής πόλωσης	121
Διάγραμμα 21: Στατιστικά πλήθος Cubesat ανά οργανισμό - Erik Kulu, Nanosat Database [63]	127
Διάγραμμα 22: Στατιστικά μεγέθους CubeSat [63]	127
Διάγραμμα 23: Στατιστικά ζωνών συχνοτήτων λειτουργίας CubeSat [63]	128
Διάγραμμα 24: Διάγραμμα ακτινοβολίας QHA για συχνότητα 250MHz [107]	135
Διάγραμμα 25: Διάγραμμα κέρδους ανά συχνότητα Tri-Filar κεραίας. [109]	137
Διάγραμμα 26: S11 για διάφορες τιμές διαμέτρου D_i	156
Διάγραμμα 27: S11 για διάφορες τιμές διαμέτρου D_o	157
Διάγραμμα 28: Κέρδος ανα συχνότητα για διάφορες τιμές διαμέτρου	157
Διάγραμμα 29: Αξονικός λόγος για διαφορετικές τιμές διαμέτρου D_o	158
Διάγραμμα 30: Κέρδος ανα συχνότητα για διάφορες τιμές περιστροφών N	158
Διάγραμμα 31: S11 για διάφορες τιμές ύψους H_c	159
Διάγραμμα 32: Κέρδος ανά συχνότητα για διάφορες τιμές ύψους H_c	160
Διάγραμμα 33: Ιδανικό Far field διάγραμμα ακτινοβολίας σε συχνότητα 2.35GHz	162
Διάγραμμα 34: Ιδανικό Far field διάγραμμα ακτινοβολίας σε συχνότητα 12GHz	163
Διάγραμμα 35: Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης σπειροειδούς κεραίας	163
Διάγραμμα 36: Διάγραμμα λόγου στάσιμων κυμάτων σπειροειδούς κεραίας	164
Διάγραμμα 37: Διάγραμμα εμπέδισης (impedance) σπειροειδούς κεραίας	164

Διάγραμμα 38: Πρόβλεψη διαγράμματος ακτινοβολίας ρεαλιστικού μοντέλου σπειροειδούς κεραίας[77]	165
Διάγραμμα 39: Συντελεστή ανάκλασης με διαφορετικές τιμές ύψους.....	168
Διάγραμμα 40: Συντελεστής ανάκλασης με διαφορετικές τιμές εσοχής L_n	168
Διάγραμμα 41: S_{11} για διάφορες τιμές πλάτους εσοχής W_n	169
Διάγραμμα 42: S_{11} για διάφορες τιμές D_f	169
Διάγραμμα 43: S_{11} για διάφορες τιμές S_f	170
Διάγραμμα 44: S_{11} για διάφορες τιμές διηλεκτρικού	170
Διάγραμμα 45: S_{11} για διάφορες τιμές μήκους και πλάτους S_x , S_y	171
Διάγραμμα 46: Τιμές κέρδους για διαφορετικά μήκη και πλάτη.....	172
Διάγραμμα 47: Σύγκριση κέρδους κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς.....	172
Διάγραμμα 48: Σύγκριση κέρδους κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς.....	173
Διάγραμμα 49: VSWR κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς	173
Διάγραμμα 50: S_{11} κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς	174
Διάγραμμα 51: Impedance κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς.....	174
Διάγραμμα 52: Smith Chart κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς	175
Διάγραμμα 53: Κέρδος ανά συχνότητα κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς.....	175
Διάγραμμα 54: Κέρδος και διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας με διαφορετικές παραμέτρους	180
Διάγραμμα 55: Λοβός ακτινοβολίας.....	180
Διάγραμμα 56: VSWR για διαφορετικές γεωμετρίες.	181
Διάγραμμα 57: Χαρακτηριστική αντίσταση προσαρμοσμένης κεραίας.....	182
Διάγραμμα 58: Συντελεστής ανάκλασης προσαρμοσμένης κεραίας.....	182
Διάγραμμα 59: Λόγος στάσιμων κυμάτων προσαρμοσμένης κεραίας	183
Διάγραμμα 60: Διάγραμμα ακτινοβολίας προσαρμοσμένης κεραίας	183

Ακρωνύμια

CubeSat	Cube Satellite
AOA	Angle Of Arrival
TDOA	Time Difference Of Arrival
FDOA	Frequency Difference Of Arrival
LOB	Line Of Bearing
SDR	Software Defined Radio
RA	Reflect Array
TA	Transmit Array
AIS	Automatic Identification System
VTS	Vessel Traffic Service
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance– Broadcast
VDES	VHF Data Exchange System
VHF	Very High Frequency
UHF	Ultra High Frequency
UWB	Ultra Wide Band
QHA	Quadrifilar Helical Antenna
CLSA	Conical Log Spiral Antenna
TT&C	Telemetry, Tracking & Command
ADCS	Attitude Determination And Control System
C&DH	Command and Data Handling
GPS	Global Positioning System
GNSS	Global Navigation Satellite System
UFV	Unmanned Flying Vehicle
HAP	High Altitude Platform
P-POD	Poly-Pico-satellite Orbital Deployer
ISS	International Space Station
XPD	Cross Polarization Discrimination
UV	Ultraviolet
ISL	Inter-Satellite Link
DSN	Deep Space Network
LGA	Low Gain Antenna
MGA	Medium Gain Antenna
HGA	High Gain Antenna
ITU	International Telecommunications Union

1. Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Οι δορυφόροι αποτελούν πλέον ένα αναπόσπαστο μέρος των τηλεπικοινωνιών και των εφαρμογών του διαστήματος. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, οι διαστάσεις των ωφέλιμων φορτίων των δορυφόρων έχουν μειωθεί σημαντικά, δημιουργώντας νέες δυνατότητες για αποστολές διαστήματος χρησιμοποιώντας μικρότερους και πιο φθηνούς δορυφόρους. Με την χρήση προτύπων μεγέθους και βάρους των δορυφόρων CubeSat επιτυγχάνεται η μείωση του κόστους κατασκευής και εκτόξευσης. Η χρήση προτύπων επιτρέπει επίσης ταχύτερους ρυθμούς σχεδίασης και ανάπτυξης, με περισσότερες έτοιμες επιλογές δορυφορικών συστημάτων στην αγορά.

Μια από τις εφαρμογές των δορυφόρων είναι η εποπτεία φάσματος όπου χρησιμοποιείται για να εξασφαλίζεται η σωστή χρήση του φάσματος χωρίς παρεμβολές. Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της δορυφορικής εποπτείας φάσματος είναι η δυνατότητα παγκόσμιας κάλυψης, όμως για την σωστή λειτουργία του απαιτούνται συνήθως πάνω από τρεις δορυφόρους σε ίδια τροχιά ή ένα σμήνος δορυφόρων (constellation). Σε περιπτώσεις όπου ένα δορυφορικό σύστημα χρειάζεται πολλούς δορυφόρους για την λειτουργία του, το χαμηλότερο κόστος των CubeSat είναι ακόμη πιο σημαντικό πλεονέκτημα, μειώνοντας δραματικά το συνολικό κόστος του συστήματος.

Οι κεραίες είναι ένα από τα σημαντικότερα μέρη ενός δορυφόρου και για την αποστολή του, καθώς με αυτές επιτυγχάνεται η επικοινωνία του δορυφόρου με τους επίγειους σταθμούς. Ενώ το μέγεθος των περισσότερων υποσυστημάτων ενός δορυφόρου μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξη της τεχνολογίας, η μείωση του μεγέθους των κεραιών είναι αρκετά περίπλοκη διαδικασία, διότι πρέπει να προσαρμοστεί στις πολύ μικρές διαστάσεις των CubeSat με πολλούς περιορισμούς. Το πρόβλημα του μεγέθους των κεραιών είναι μεγαλύτερο για χαμηλότερες συχνότητες λειτουργίας όπου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερο.

1.2. Αντικείμενο διπλωματικής

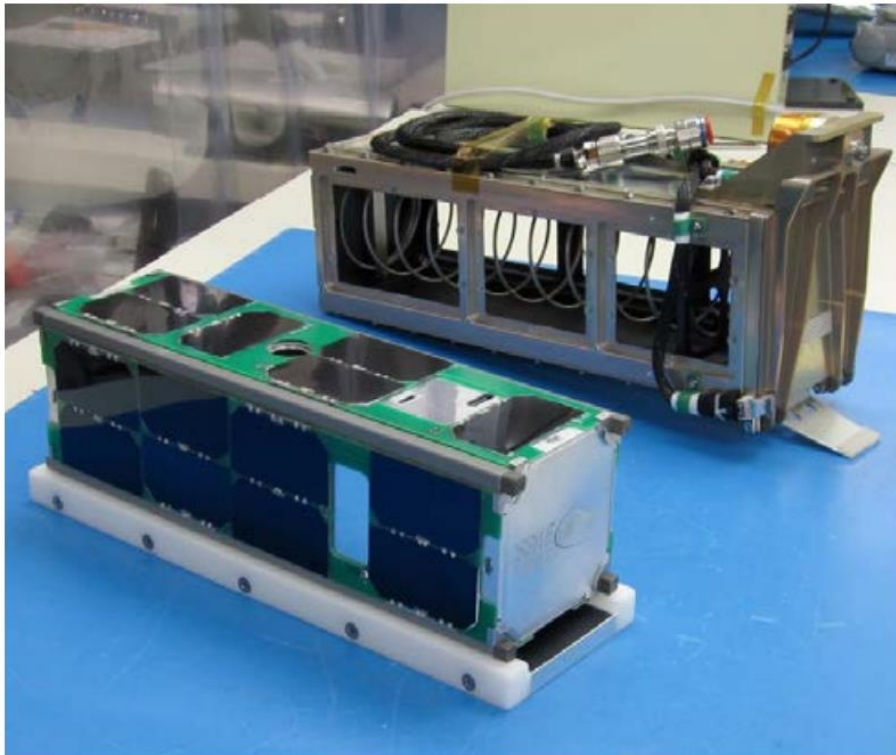
Σε αυτή την διπλωματική αναλύονται τα βασικά είδη κεραιών και τα χαρακτηριστικά τους, και γίνεται μια συγκριτική μελέτη των κεραιών όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε έναν CubeSat δορυφόρο για εφαρμογές εποπτεία φάσματος. Ο στόχος της διπλωματικής είναι η καλύτερη κατανόηση των ζητούμενων μιας αποστολής εποπτείας φάσματος και των επιλογών των κεραιών που μπορούν να εγκατασταθούν σε έναν μικρό δορυφόρο (CubeSat). Τέλος, προτείνονται τρεις κεραίες για μικρούς δορυφόρους για διαφορετικές συχνότητες και λειτουργίες.

1.3. Δομή της διπλωματικής

Στη πρώτη ενότητα αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των CubeSat και τους περιορισμούς τους. Στη συνέχεια αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά και τα ζητούμενα μιας δορυφορικής αποστολής εποπτείας φάσματος. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά είδη κεραιών, τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Στη τρίτη ενότητα γίνεται μια συγκριτική μελέτη κεραιών που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν σε αποστολές και κεραίες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές αποστολές. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προτάσεις κεραιών και τέλος αναφέρονται συμπεράσματα και πιθανές βελτιώσεις.

2. Δορυφόροι CubeSats

Οι Cube Satellites (CubeSat) είναι ένας τύπος μικρού δορυφόρου κατηγορίας minisatellite, microsatellite, nanosatellite, picosatellite και femptosatellite, οι οποίοι τηρούν συγκεκριμένα πρότυπα διαστάσεων, σχήματος και βάρους. Το μέγεθος των CubeSat ορίζεται με τη βασική μονάδα «Unit» (1U), όπου ορίζεται ο όγκος 10 x 10 x 10 cm, με βάρος περίπου 1 με 1.3kg. Το πρόγραμμα των CubeSat δορυφόροι ξεκίνησε το 1999, με την κατασκευή φθηνών δορυφόρων κυρίως για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Οι CubeSats είναι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς (low earth orbit - LEO) και εκτοξεύονται από τον ISS (International Space Station) ή από πυραύλους ως δευτερεύον ωφέλιμο φορτίο με την χρήση ειδικών θαλάμων (Poly-Pico-satellite Orbital Deployer P-PODs) στα οποία αποθηκεύεται ο CubeSat.



Εικόνα 1: 3U Cubesat CSSWE (Colorado Student Space Weather Experiment) (κάτω αριστερά) και το P-POD του (πάνω δεξιά). [1]



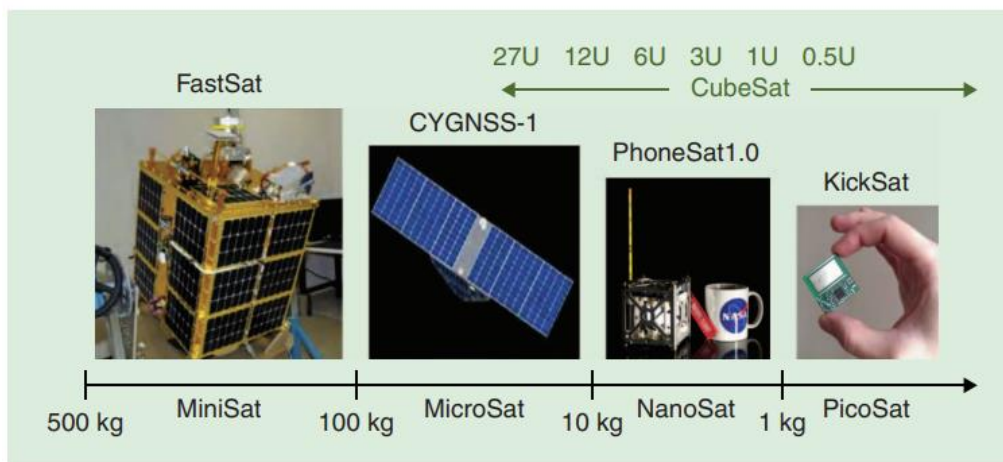
Εικόνα 2: Εκτόξευση CubeSat από τον ISS [1]

2.1.Κατηγορίες CubeSat

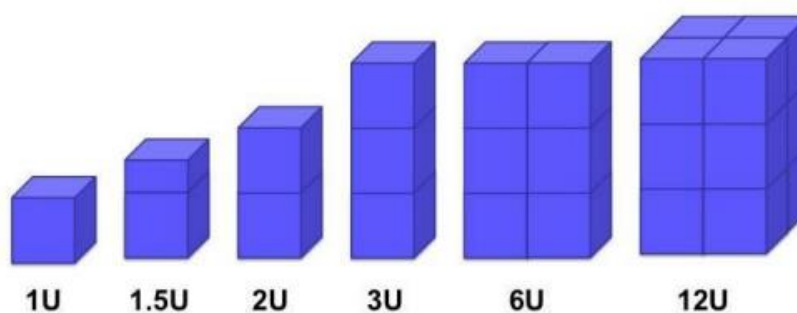
- Μεγάλοι δορυφόροι: >1000 kg
- Δορυφόροι μεσαίου μεγέθους : 500 to 1000 kg
- Μικροί Δορυφόροι: < 500 kg
 - Minisatellites: 100 to 500 kg
 - Microsatellites: 10 to 100 kg
 - Nanosatellites: 1 to 10 kg
 - Picosatellites: 100 g – 1 kg
 - Femtosatellites: 10 g – 100 g
 - Attosatellites: 1 g – 10 g

Μέγεθος	Διαστάσεις	Βάρος
1U	10cm x 10cm x 10cm	1.3kg
2U	10cm x 10cm x 20cm	2.6kg
3U	10cm x 10cm x 30cm	3.9kg
6U	10cm x 20cm x 30cm	7.8kg
12U	10cm x 20cm x 60cm	15.6kg

Πίνακας 1:Κατηγορίες CubeSat. Διαστάσεις και βάρος



Εικόνα 3: Κατηγορίες δορυφόρων με βάση το μέγεθος [2]



Εικόνα 4: Μεγέθη CubeSat σε μονάδες U

2.2.Αποστολές CubeSat

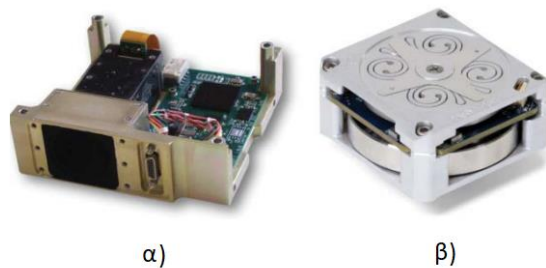
Εκτός από τους εκπαιδευτικούς σκοπούς και αποστολές για δοκιμή και επίδειξη τεχνολογιών, από το 2012 υπήρξαν πολλές άλλες κατηγορίες αποστολών CubeSat. Παρά τον μικρό όγκο τους, πλέον οι CubeSat είναι ένα σημαντικό εργαλείο για τις δορυφορικές αποστολές και ειδικά σε τοπολογίες τύπου constellation. Οι βασικές κατηγορίες αποστολών είναι οι παρακάτω:

- Δοκιμή - παρουσίαση τεχνολογίας
- Εκπαιδευτικές αποστολές
- Τηλεπικοινωνίες
- Επιστημονικές έρευνες (τηλεσκόπια, βιολογικά πειράματα κ.α.)
- 5G & IoT
- Επιτήρηση (Surveillance)
- Τηλεαχνίχνευση (Remote Sensing, SAR)
- AIS-VTS, ADS-B
- SDR
- Εποπτεία φάσματος
- Διαπλανητικές αποστολές (Space Exploration, Astrophysics, Radio Astronomy)

2.3. Υποσυστήματα CubeSat

2.3.1. Attitude Determination and Control Subsystem (ADCS)

Το σύστημα ADCS είναι υπεύθυνο για τον προσανατολισμό του δορυφόρου. Είναι πολύ σημαντικό μέρος του δορυφόρου διότι χωρίς σωστό προσανατολισμό, ο δορυφόρος θα μπορούσε να χάσει την επικοινωνία με τον επίγειο σταθμό σε περίπτωση που χρησιμοποιούσε κατευθυντική κεραία. Κατά την εκτόξευση του δορυφόρου στο διάστημα, ο προσανατολισμός του πιθανόν να μην είναι σωστός και να πρέπει να γίνουν διορθώσεις. Το σύστημα ADCS περιλαμβάνει τροχούς αντίδρασης, μαγνητοσκοπητές, προωθητές, αισθητήρες εντοπισμού αστεριών, αισθητήρες ήλιου και δέκτες GPS. [3]. Εάν ένας δορυφόρος χρησιμοποιεί κεραίες υψηλού κέρδους (υψηλής κατευθυντικότητας) τότε η ποιότητα και η ακρίβεια του συστήματος ADCS είναι ακόμη πιο σημαντικός παράγοντας.



Εικόνα 5: α) Αισθητήρας ηλίου, β) τροχοί αντίδρασης

2.3.2. Command and Data Handling (C&DH)

Το υποσύστημα C&DH αποτελεί τον βασικό σύστημα επεξεργασίας δεδομένων, συντονίζοντας τα υπόλοιπα υποσυστήματα του δορυφόρου για την σωστή λειτουργία του. Συνήθως χρησιμοποιούνται μικροελεγκτές και μικροεπεξεργαστές όπως οι ARMA, PC-104 και H8S-2674R. [4]

2.3.3. Σύστημα προώθησης

Λόγω του χαμηλού όγκου των CubeSat, συνήθως δεν υπάρχει κάποιο σύστημα προώθησης. Για αποστολές που χρειάζονται κάποιο είδος προώθησης (πχ. αποστολή του CubeSat MarCO), υπάρχουν μικρά υποσυστήματα προώθησης ψυχρού αερίου, χημική και ηλεκτρική προώθηση ή ακόμη και ηλιακά πανιά (solar sails).

2.3.4. Σύστημα Ισχύος

Τα βασικά μέρη του υποσυστήματος ισχύος είναι τα φωτοβολταϊκά και οι μπαταρίες ιόντων λιθίου. Τα φωτοβολταϊκά μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρισμό και αποθηκεύουν αυτή την ενέργεια στις μπαταρίες, έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργεί ο δορυφόρος ακόμη και όταν δεν έχει επαφή με τον ήλιο ή όταν χρειαστεί επιπλέον ισχύ σε λειτουργία μεγάλου φόρτου. Τα φωτοβολταϊκά μπορούν να εγκατασταθούν στις πλευρές του δορυφόρου, αλλά για καλύτερη αποδοτικότητα και εξοικονόμηση χώρου μπορεί να έχουν μηχανισμούς επέκτασης. Ο προσανατολισμός του δορυφόρου επηρεάζει την απόδοση των φωτοβολταϊκών και των κατευθυντικών κεραιών.

2.3.5. Τηλεπικοινωνιακό υποσύστημα

Το τηλεπικοινωνιακό σύστημα αποτελείται από όλα τα μέρη ώστε να λειτουργεί μια επικοινωνιακή ζεύξη και η τηλεμετρία, εντοπισμό και έλεγχο (Telemetry, Tracking and Command – TT&C), που περιλαμβάνει τους πομποδέκτες, ενισχυτές και κεραίες.

2.4.CubeSats - Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί

Τα δύο βασικά πλεονεκτήματα των CubeSat είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής και ο σύντομος χρόνος σχεδιασμού και υλοποίησης. Το κόστος κατασκευής των CubeSat είναι από 10 έως 100 φορές χαμηλότερο σε σχέση με άλλες επιλογές μεγαλύτερων δορυφόρων. Ο χρόνος σχεδιασμού ενός CubeSat δορυφόρου είναι κυμαίνεται περίπου από 9 μήνες έως 24 μήνες, ενώ η υλοποίηση ενός μεγαλύτερου δορυφόρου μπορεί να χρειαστεί από 3 έως 7 χρόνια. Αυτός είναι ένας πάρα πολύ σημαντικός παράγοντας για μια αποστολή, ενώ παράλληλα διατηρεί το κόστος του σχεδιασμού και μελέτης ακόμη πιο χαμηλό (research and development – R&D). Επίσης προσφέρονται στην αγορά έτοιμες προτάσεις υποσυστημάτων ή και ολοκληρωμένες λύσεις δορυφόρων. Χάρη στον χαμηλό όγκο και βάρος τους, το κόστος εκτόξευσης μειώνεται και αυτό σημαντικά.

Οι βασικοί περιορισμοί των CubeSat είναι τα χαμηλά επίπεδα ισχύος, ο περιορισμένος χώρος, η απώλεια προωθητικών συστημάτων και η διάρκεια ζωής τους. Με αυτούς τους αυστηρούς περιορισμούς είναι δύσκολο να προστεθούν εφεδρικά συστήματα ή μηχανισμοί επηρεάζοντας το ποσοστό επιτυχημένων αποστολών και την συνολική διάρκεια ζωής τους. Επίσης, οι CubeSats χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντα σε LEO τροχιές λόγω των παραπάνω περιορισμών. Ενώ οι δυνατότητες των CubeSat είναι χαμηλότερες σε σχέση με άλλους δορυφόρους κατηγορίας minisatellites ή μεγαλύτερους, δίνεται η ευκαιρία σε μικρότερες εταιρίες, πανεπιστήμια ή οργανισμούς με χαμηλότερα κεφάλαια να αποκτήσουν έναν δορυφορικό σύστημα και με χαμηλότερο ρίσκο. Η δημιουργία constellations δεκάδων ή εκατοντάδων δορυφόρων είναι πλέον εφικτή σε πολύ χαμηλότερο κόστος σε σχέση με το παρελθόν.

3. Εποπτεία Φάσματος

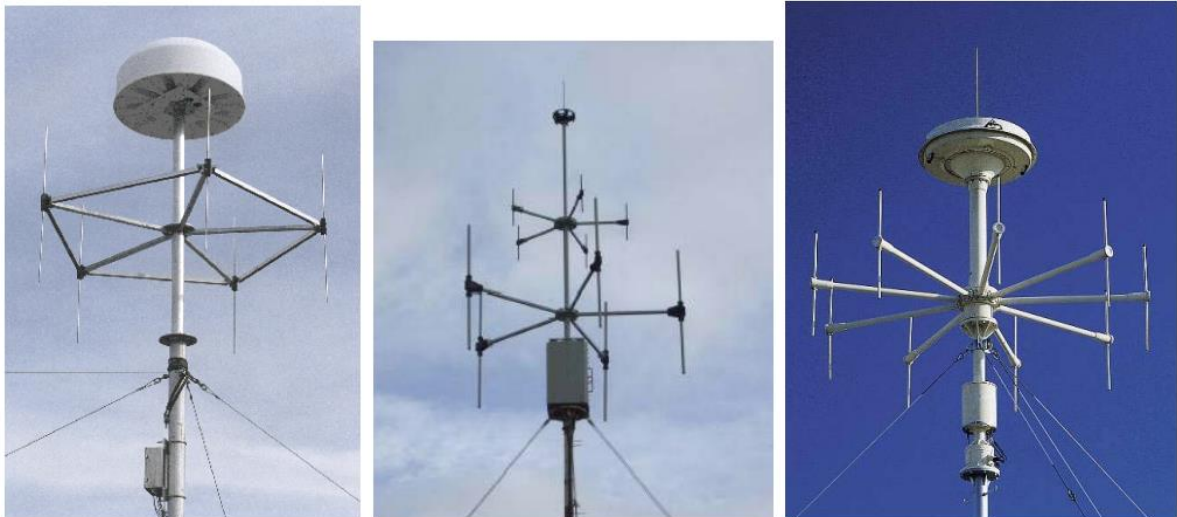
3.1. Γενικά

Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων χρησιμοποιείται για πολλές εφαρμογές ασύρματων τηλεπικοινωνιών. Με την αύξηση των ασύρματων συσκευών όπως ηλεκτρικές συσκευές καταναλωτών, συσκευές IoT και άλλα ασύρματα συστήματα (δορυφορικά δίκτυα, δίκτυα 5G, συστήματα πρώτων βοηθειών, ασφάλειας, στρατιωτικά), η χρήση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αυξάνεται συνεπώς η εποπτεία φάσματος είναι πιο σημαντική από ποτέ. Η εποπτεία φάσματος αποτελεί μια από τις βασικές λειτουργίες του εθνικού συστήματος διαχείρισης φάσματος από την ITU (International Telecommunications Union), με την οποία διασφαλίζεται η σωστή χρήση του φάσματος. Πιθανές πηγές παρεμβολών μπορεί να προκαλούνται από λανθασμένη χρήση, κακή διαχείριση του φάσματος ή για κακόβουλους σκοπούς. Εκτός από την ανίχνευση παρεμβολών η εποπτεία φάσματος προσφέρει δεδομένα όπου διευκολύνει τον συντονισμό και την αποδοτική διαχείριση του φάσματος. Μέρος της εποπτείας φάσματος είναι και ο γεωεντοπισμός όπου εντοπίζεται η πηγή του σήματος πιθανής παρεμβολής. Ο γεωεντοπισμός μπορεί να γίνει σε μικρή κλίμακα, με τοπικούς μεθόδους εποπτείας, ή σε μεγαλύτερες κλίμακες με χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων (Unmanned Flying vehicle - UFV) ή πλατφόρμες μεγάλου υψομέτρου (High Altitude Platform - HAP) όπως σταθμοί μπαλονιού. Τα επίγεια συστήματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά σε μεγάλη κλίμακα, ενώ οι απαιτήσεις συστημάτων εποπτείας αυξάνονται. Η παγκόσμια εποπτεία φάσματος είναι μια πολύ πιο περίπλοκη αλλά και πιο αποδοτική λύση σε σχέση με τους επίγειους σταθμούς. Χρησιμοποιώντας δορυφόρους μπορούμε να επιτύχουμε παγκόσμια κάλυψη εποπτείας φάσματος με δυνατότητες γεωεντοπισμού και «χαρτογράφησης» ραδιοσυχνοτήτων.

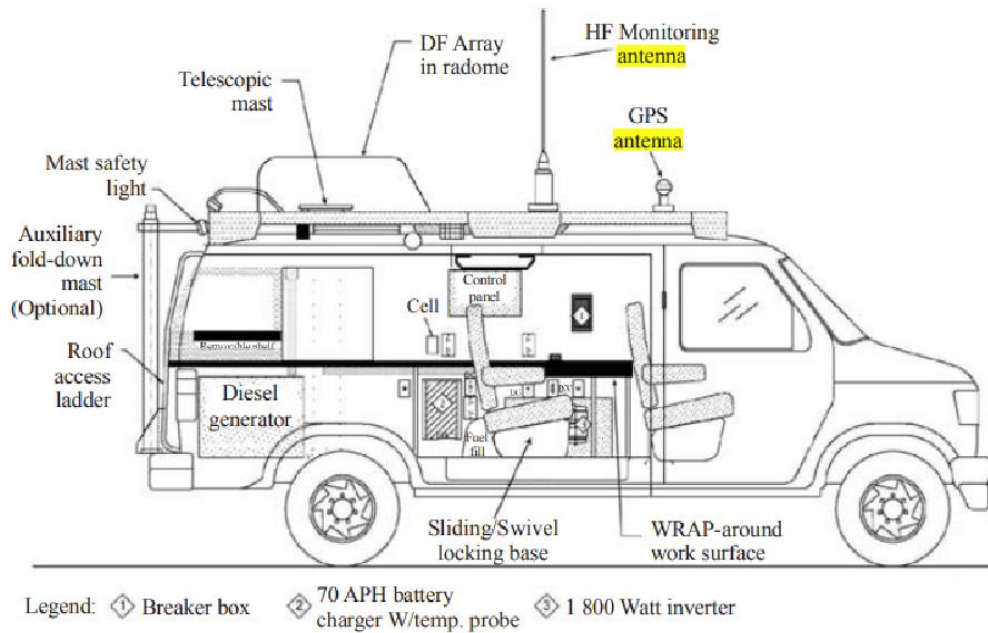
3.2.Συστήματα Εποπτείας Φάσματος

Τα συστήματα εποπτείας φάσματος είναι τα επίγεια, υψομέτρου και τα δορυφορικά. Η πιο παλιά και πιο συχνή μέθοδος εποπτείας φάσματος είναι η επίγεια είτε με χειροκίνητη αναζήτηση είτε με αισθητήρες. Οι σταθμοί μπορεί να είναι σταθεροί ή κινητοί και προσφέρουν καλή ακρίβεια, τοπική κάλυψη και πολύ μεγάλη ευελιξία στην επιλογή του εξοπλισμού. Οι σταθεροί σταθμοί μπορούν να έχουν καλές εγκαταστάσεις με μεγάλες κεραίες για εντοπισμό σημάτων με μεγάλο μήκος κύματος (χαμηλότερο από 300MHz – VHF).

Οι κινητοί σταθμοί προσφέρουν πιο αποδοτική εποπτεία σε μεγαλύτερη περιοχή χρησιμοποιώντας οχήματα με εγκατεστημένο τον απαραίτητο εξοπλισμό. Τα οχήματα που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι διάφορων κατηγοριών, από απλό όχημα με τον εξοπλισμό εγκατεστημένο στην οροφή, έως μεγάλα φορτηγά με δυνατότητες κίνησης εκτός δρόμου και αρκετό χώρο για μερικά άτομα.



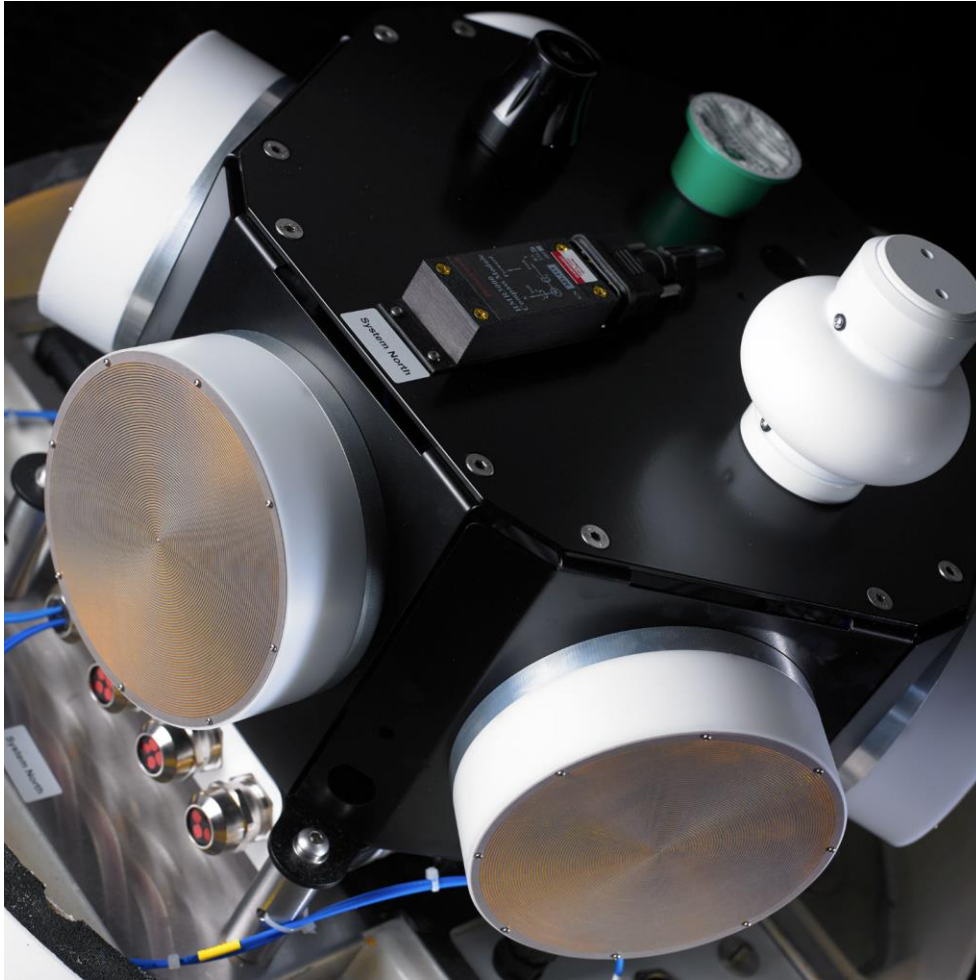
Εικόνα 6: Παραδείγματα κεραιών σταθερών σταθμών[5]



Εικόνα 7: Παράδειγμα κινητού επίγειου σταθμού[5]



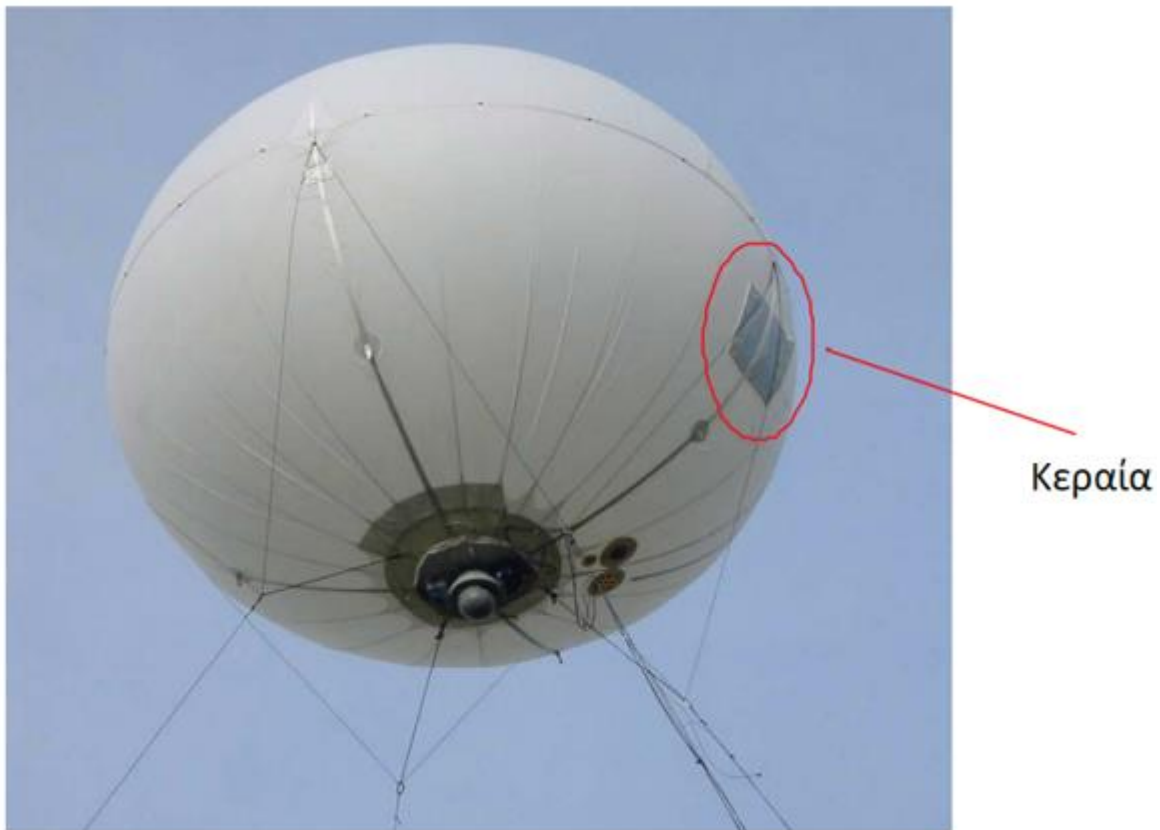
Εικόνα 8: Παραδείγματα κινητών σταθμών εποπτείας φάσματος [5]



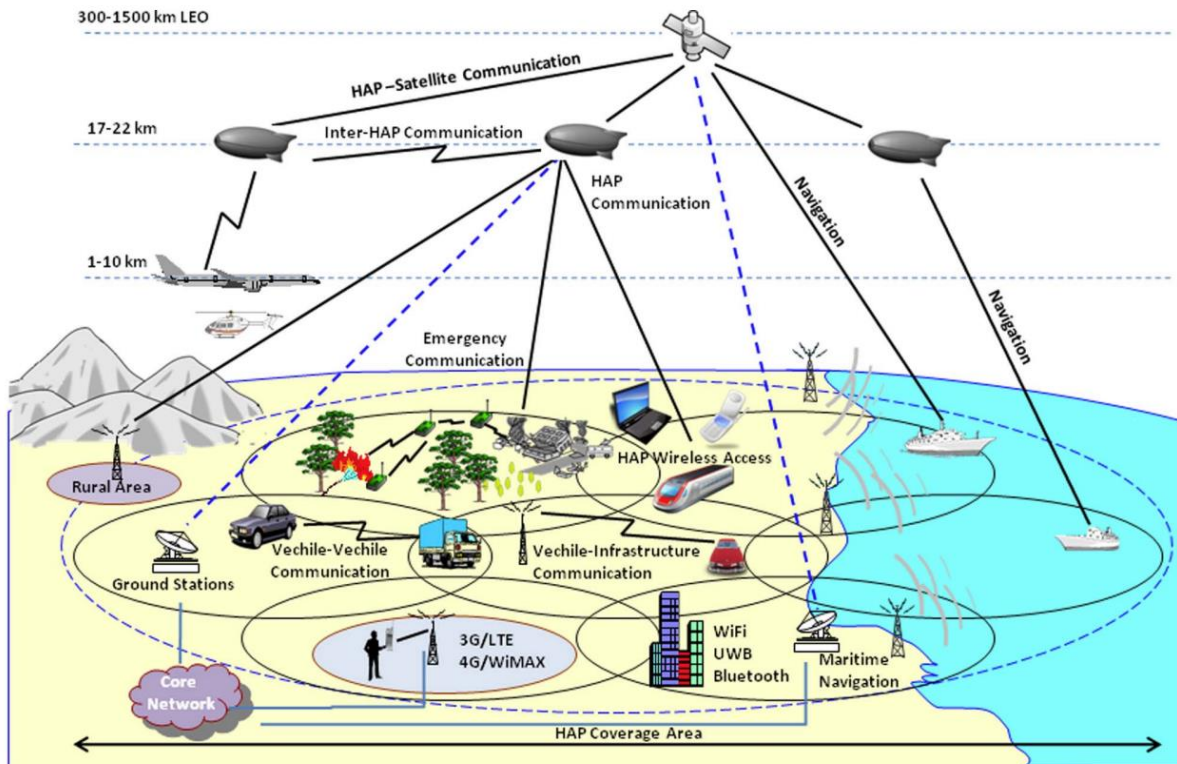
Εικόνα 9: Σύστημα UWB σπειροειδής κεραία της αγοράς για κινητούς σταθμούς εποπτείας φάσματος και γεωεντοπισμού 500MHz - 18GHz. [www.crfs.com]

Τα ιπτάμενα συστήματα μπορεί να είναι πλατφόρμες σταθμών μεγάλου υψομέτρου (High Altitude Platform) μπαλονιού ή τύπου Zeppelin ή μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα. (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) [3D Spectrum Mapping Based on ROI-Driven UAV Deployment] [Satellite-Based Radio Spectrum Monitoring: Architecture, Applications, and Challenges]. Αυτοί οι σταθμοί προσφέρουν καλύτερη κάλυψη σε σχέση με τους επίγειους σταθμούς και μπορούν να επεκταθούν σε μη προσβάσιμες τοποθεσίες από άλλα οχήματα, όπως επάνω από θάλασσες, λίμνες ή βουνά.

Τα οχήματα τύπου drone έχουν περιορισμένο χρόνο πτήσης και περιορισμένες δυνατότητες λόγω διαθέσιμου χώρου και βάρους, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα και να καλύψουν γρήγορα μεγάλες εκτάσεις. Οι πλατφόρμες μεγάλου υψομέτρου μπορούν να τοποθετηθούν σε στρατηγικά σημεία και να καλύπτουν σταθερά μεγάλες περιοχές για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Και στις δύο περιπτώσεις των συστημάτων υψομέτρου, η υλοποίηση ενός συστήματος μεγάλης κλίμακας δεν θα ήταν πρακτικό λόγω μεγάλου κόστους και δυσκολίας εγκατάστασης πολλαπλών μονάδων.



Εικόνα 10: Σταθμός εποπτείας φάσματος μεγάλου υψομέτρου [5]



Εικόνα 11: Πλαίσιο χρήσης HAP με επίγειους και δορυφορικούς σταθμούς. [6]

Τα δορυφορικά συστήματα και πιο συγκεκριμένα ένα constellation δορυφόρων χαμηλής τροχιάς, μπορούν να προσφέρουν πολύ μεγάλη κάλυψη (ακόμη και παγκόσμια κάλυψη) εποπτεία φάσματος. Η καταγραφή δεδομένων για την παγκόσμια χρήση του ραδιοφάσματος σε σχέση με τον χρόνο, την συχνότητα και την τοποθεσία είναι χρήσιμα για τη σωστή και πιο αποδοτική χρήση του, επαναχρησιμοποιώντας συχνότητες που δεν χρησιμοποιούνται αρκετά (ή καθόλου) σε μερικά μέρη του κόσμου και επιπλέον γίνεται πιο αποδοτική επαλήθευση ότι τηρούνται οι όροι χρήσης φάσματος. Σε αντίθεση με επίγειους σταθμούς, τα δορυφορικά συστήματα δεν επηρεάζονται από εμπόδια στο έδαφος όπως κτήρια, δέντρα και λόφους και μπορούν να λάβουν σήματα από τους ωκεανούς. Τα προβλήματα ενός δορυφορικού συστήματος είναι ότι η ανίχνευση χαμηλών σημάτων μπορεί να είναι περίπλοκη, διότι χρειαζόμαστε κεραιές μεγάλης ευαισθησίας και κέρδους, αλλά η δέσμη ακτινοβολίας θα είναι αρκετά στενή. Επίσης λόγω του υψομέτρου χαμηλής τροχιάς (περίπου 500km) του δορυφόρου η ταχύτητά του θα είναι αρκετά μεγάλη και η δέσμη ακτινοβολίας της κεραιάς θα στοχεύει ένα μικρό μέρος της επιφάνειας της γης. Επίσης τα σήματα που θέλουμε να ανιχνεύσουμε μπορεί να μην ακτινοβολούνται σε μεγάλες γωνίες ανύψωσης (προς τον ουρανό/διάστημα) και να χρειαστεί να στραφεί ο δορυφόρος προς σταθμούς με μικρές γωνίες ανύψωσης ή να χρησιμοποιηθούν κεραιές με ακτινοβολία προς διαφορετικά μέρη. Περισσότερα για την χρήση κεραιών θα αναλυθούν στο κεφάλαιο με τα κριτήρια επιλογής κεραιών.

Τύποι	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Κόστος Συστήματος Μεγάλης Κλίμακας
Επίγειοι σταθμοί	• Ευελιξία • Τοπικές εφαρμογές	• Περιορισμένη κάλυψη • Δύσκολη εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα	Υψηλό
Sensors	• Υψηλή ανάλυση	• Δύσκολη εφαρμογή σε μεγάλες περιοχές	Πολύ Υψηλό
UAVs	• Καλή Κάλυψη	• Περιορισμένες δυνατότητες • Περιορισμοί πτήσης	Υψηλό
HAPs	• Καλή Κάλυψη	• Δύσκολη εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα • Δύσκολη επαναχρησιμοποίηση	Μέτριο
Δορυφορικά	• Καλή Κάλυψη • Spectrum Sharing • Εύκολη υλοποίηση γεωεντοπισμού (μεγάλης κλίμακας)	• Δυσκολία ανίχνευσης σημάτων χαμηλής ισχύος • Προβλήματα καθυστέρησης	Χαμηλό

Πίνακας 2: Σύγκριση τύπων πλατφόρμας εποπτείας φάσματος [7]

3.3. Αστερισμοί Δορυφόρων – Constellations

Οι αστερισμοί των δορυφόρων ή αλλιώς constellations είναι μια ομάδα δορυφόρων με στρατηγικά οργανωμένες τροχιές για την εκπλήρωση του στόχου της αποστολής. Η επιλογή της τροχιάς constellation είναι εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας και εξαρτάται πάντα από την αποστολή και ποιες περιοχές χρειάζονται κάλυψη. Τα constellations που μπορούν να παρέχουν παγκόσμια κάλυψη είναι τρεις βασικές κατηγορίες [8]:

- Walker Constellation

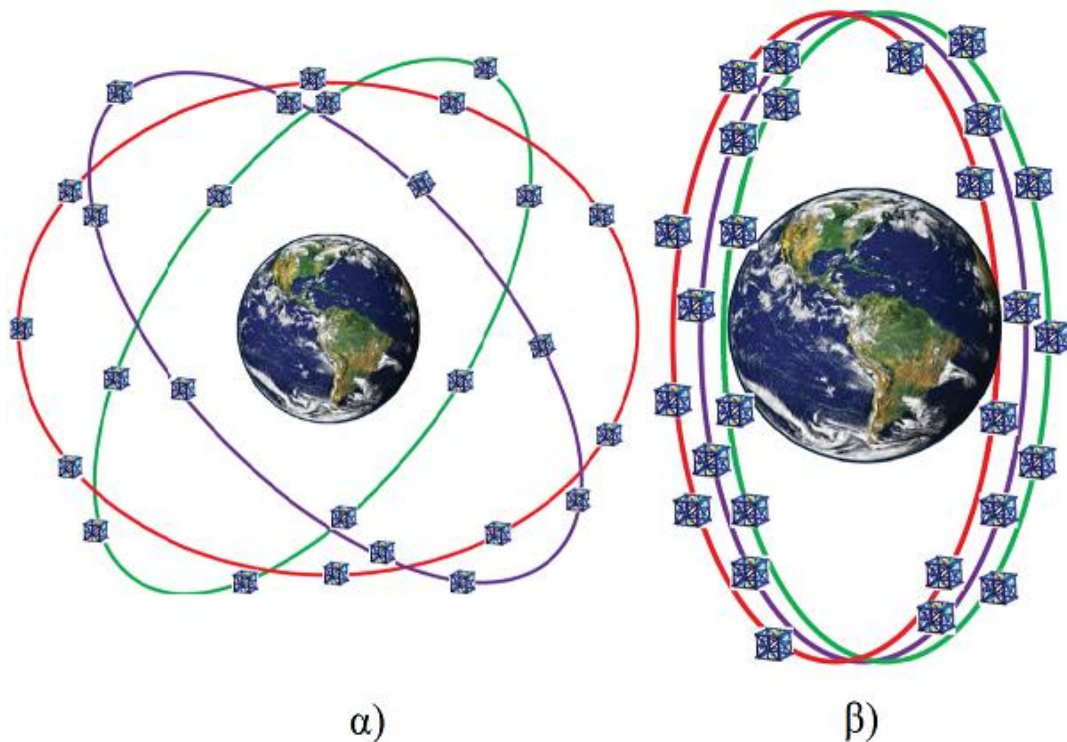
Οι δορυφόροι σε walker constellations ακολουθούν το ίδιο τροχιακό επίπεδο με ίδια κλίση και γεωγραφικό πλάτος. Τα τροχιακά επίπεδα μπορεί να είναι πολλά για την πλήρη κάλυψη της γης. Οι αποστάσεις μεταξύ των δορυφόρων (γωνία αληθούς ανωμαλίας) πρέπει να οριστούν κατάλληλα έτσι ώστε ο ζητούμενος αριθμός δορυφόρων να έχει οπτική επαφή με ένα σημείο στη γη.

- Street-of-Coverage Constellation

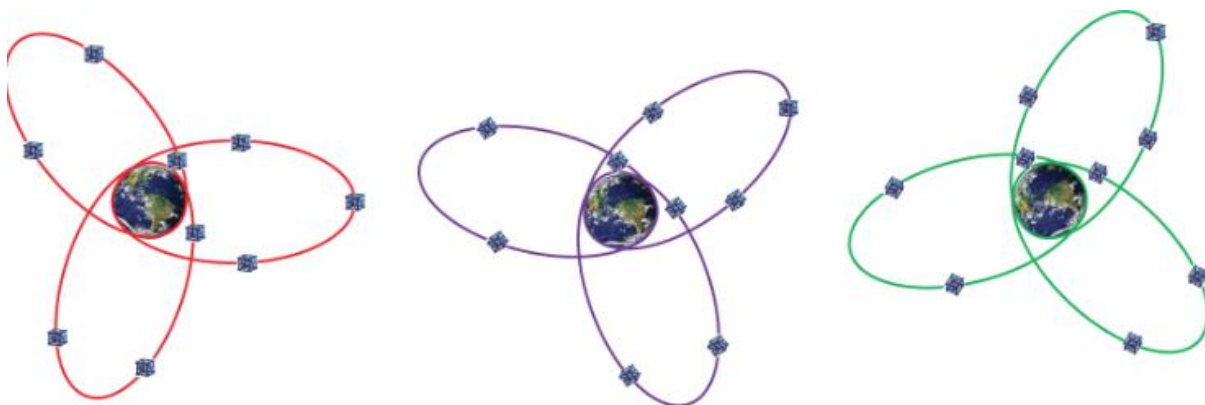
Βασίζονται κυρίως σε πολικές τροχιές χρησιμοποιώντας την περιστροφή της γης για να καλύψουν όλη την επιφάνειά της. Οι βασικές χρήσεις τέτοιων τροχιών είναι η χαρτογράφηση και τηλεανίχνευση. Αυτές οι τροχιές δεν είναι αποδοτικές για συνεχόμενη κάλυψη στον ισημερινό, γιατί λόγω της περιστροφής της γης οι δορυφόροι μένουν περισσότερο χρόνο στους δύο πόλους και λιγότερο στον ισημερινό.

- Flower Constellation

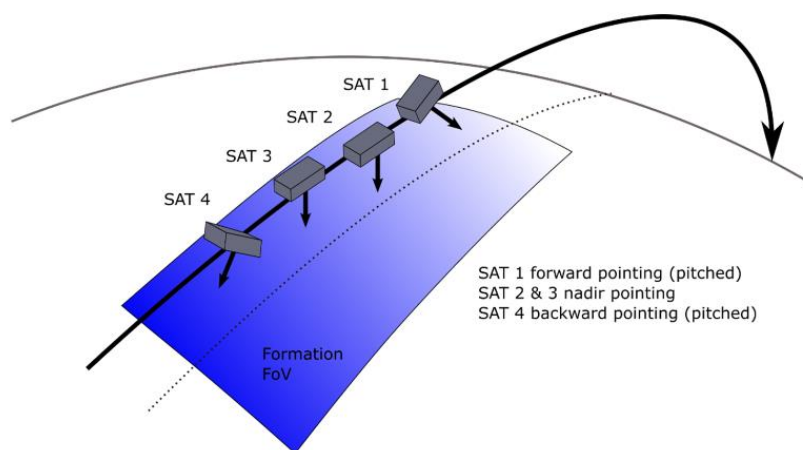
Χρησιμοποιούν μεγάλες ελλειπτικές τροχιές. Η ταχύτητα των δορυφόρων και το υψόμετρό τους ως προς τη γη αυξομειώνεται αναλόγως την τροχιακή θέση.



Εικόνα 12: α) Walker Constellation (GNSS) β) Street-of-Coverage (πολική τροχιά)



Εικόνα 13: Flower Constellation



Εικόνα 14: Απεικόνιση constellation σε τροχιά

3.4.Εποπτεία Φάσματος και Τεχνικές Γεωεντοπισμού

Μέρος της εποπτείας φάσματος είναι και ο γεωεντοπισμός, δηλαδή η αναζήτηση της τοποθεσίας ενός πομπού. Σε περίπτωση γεωεντοπισμού με περισσότερους από έναν δορυφόρους θα πρέπει να υπάρχει διαδορυφορική επικοινωνία. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν περιληπτικά οι τεχνικές γεωεντοπισμού και πως μπορεί να επηρεάσει την επιλογή για ένα σύστημα κεραιών σε CubeSats.

Οι βασικές τεχνικές για τον γεωεντοπισμό είναι οι:

- Angle of Arrival (AOA)

Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότεροι δέκτες δημιουργώντας μια τομή Line of Bearing (LoB) ως προς την θέση του πομπού. Χρησιμοποιώντας στοιχειοκεραίες (δύο ή περισσότερες κεραίες) μπορούμε να πραγματοποιήσουμε τον εντοπισμό ενός σήματος μετρώντας το πλάτος του. Εάν έχουμε τον απαραίτητο χώρο στον δορυφόρο, μπορούμε να υλοποιήσουμε τον εντοπισμό σήματος με έναν δορυφόρο. (Amplitude Comparison Direction Finding Technique) [SPACE ELECTRONIC RECONNAISSANCE]. Εάν δεν υπάρχει χώρος σε έναν δορυφόρο για στοιχειοκεραίες, τότε απαιτούνται τουλάχιστον δύο δορυφόροι με κατευθυντικές κεραίες.

- Time Difference of Arrival (TDOA)

Για τον εντοπισμό ενός σήματος με βάση την διαφορά χρόνου χρειαζόμαστε συνολικά τρεις ή περισσότερους δορυφόρους. Για τον εντοπισμό σε τρισδιάστατο χώρο θα χρειαζόμασταν τέσσερις δέκτες αλλά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή την τεχνική με έναν λιγότερο δορυφόρο χρησιμοποιώντας τα δεδομένα ότι το σήμα θα προέρχεται από την γη και πως οι κεραίες του δορυφόρου είναι κατευθυντικές και στρέφονται προς τη γη. Έτσι η καμπύλη της γης λειτουργεί ως η τρίτη απαραίτητη υπερβολή για τον εντοπισμό του σήματος. Σε αυτή την περίπτωση είναι σημαντικό να ορίσουμε το μοντέλο έλλειψης της γης (πχ. WGS-84).

- Frequency Difference of Arrival (FDOA)

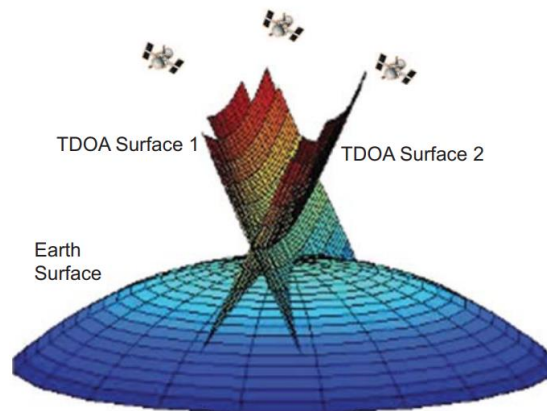
Μετρώντας την διαφορά και ολίσθηση της συχνότητας που συμβαίνει καθώς ο δορυφόρος κινείται στη τροχιά (differential Doppler), μπορούμε να υπολογίσουμε την απόστασή του από τον πομπό. Η μέθοδος βασίζεται το φαινόμενο Doppler, το οποίο συμβαίνει στους LEO δορυφόρους καθώς κινούνται με ταχύτητα περίπου 7.500km/s.

- Συνδυασμός TDOA και FDOA ή TDOA και AOA

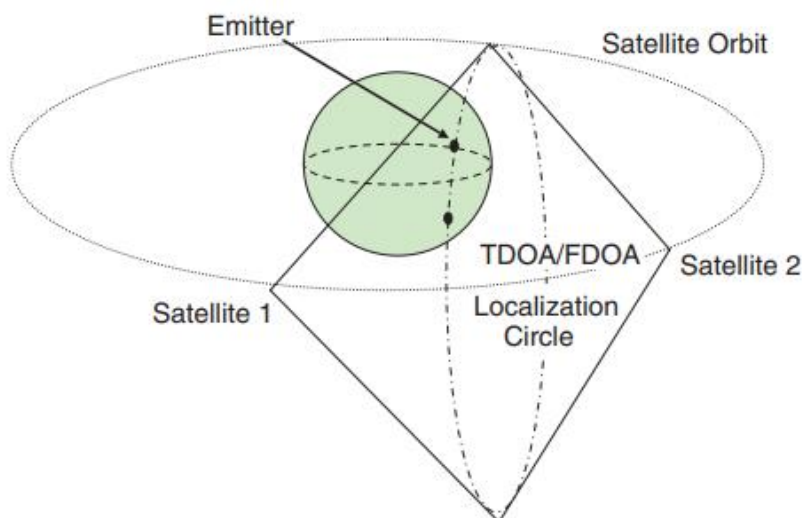
Η χρήση υβριδικών μεθόδων όπως TDOA και FDOA ή TDOA και AOA προσφέρει τα πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου προσπαθώντας να μειώσει τα μειονεκτήματα τους. Για παράδειγμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δύο δορυφόρους με T/FDOA, βελτιώνοντας την ακρίβεια ενός TDOA με έναν λιγότερο δορυφόρο, ενώ μειώνει την περιπλοκότητα σε σχέση με συστήματα ενός δορυφόρου.

- Line of Sight (LOS)

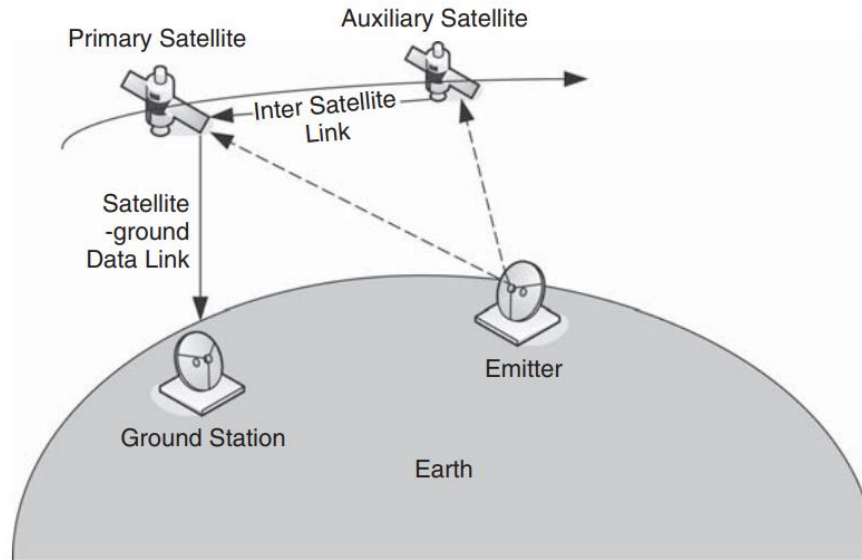
Δυνατότητα γεωεντοπισμού με έναν δορυφόρο με γνώση των γωνιών ανύψωσης και αζιμουθίου, την ακριβή τροχιακή θέση και τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας.



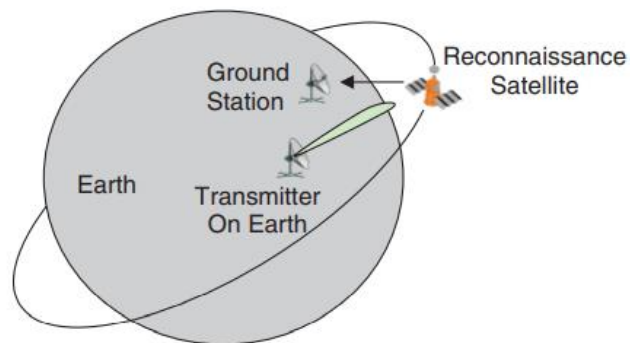
Εικόνα 15: Απεικόνιση συστήματος γεωεντοπισμού TDOA σε σχέση με την επιφάνεια της γης



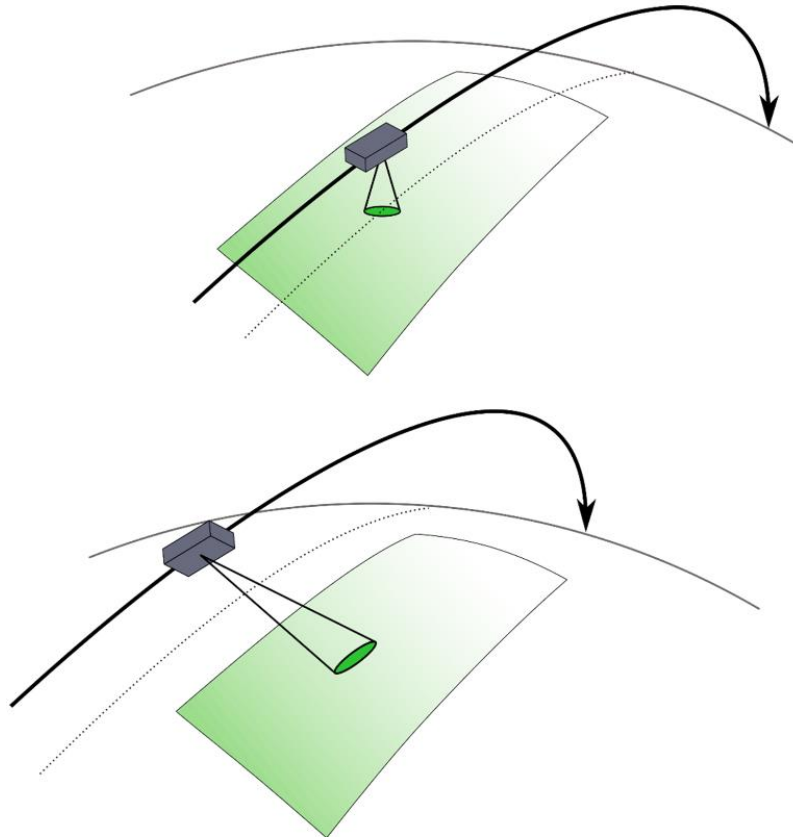
Εικόνα 16: Διάγραμμα γεωεντοπισμού 2 δορυφόρων βασισμένο σε T/FDOA [9]



Εικόνα 17: Διάγραμμα συστήματος γεωεντοπισμού 2 δορυφόρων βασισμένο σε T/FDOA [9]



Εικόνα 18: Γεωεντοπισμός με line-of-sight με έναν δορυφόρο.



Εικόνα 19: Γεωεντοπισμός με line-of-sight με έναν δορυφόρο.

3.5. Προηγούμενες Αποστολές CubeSat Εποπτείας Φάσματος

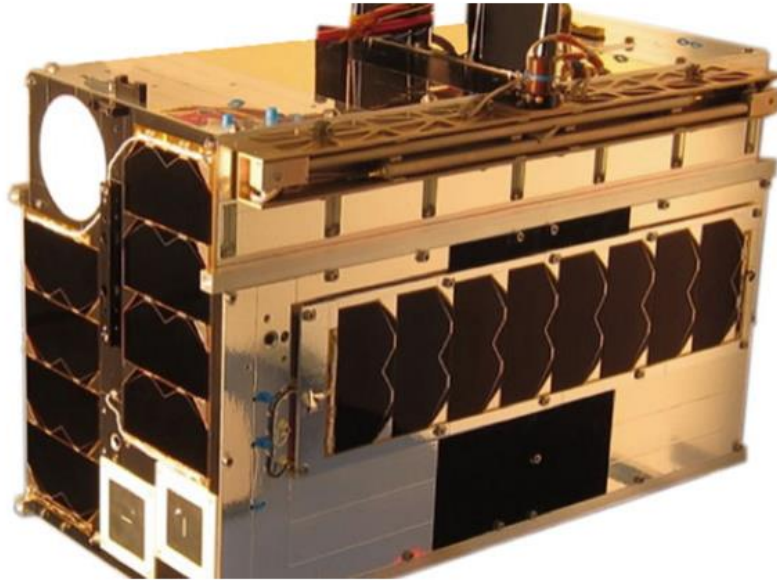
Η εποπτεία φάσματος δεν αποτελεί σύνηθες αποστολή για CubeSats σε σχέση με άλλου είδους αποστολές κυρίως λόγω των περιορισμών χώρου και ικανοτήτων των CubeSat. Ενώ υπάρχουν μελέτες και αποστολές εποπτείας φάσματος σε πολύ μικρούς δορυφόρους [10] [11] [12] είναι αρκετά περιορισμένων δυνατοτήτων.

Οι πιο ενδεικτικές αποστολές εποπτείας φάσματος συμπεριλαμβανομένου και μεγαλύτερων δορυφόρων από τα μέγιστα πρότυπα των CubeSat (27U) και είναι οι παρακάτω:

- Hawkeye 360 Constellation
Constellation ομάδας τριών δορυφόρων με Software Defined Radio (SDR) με δυνατότητα λειτουργίας σε συχνότητες από 144MHz έως 15GHz (VHF έως Ku-Band). Η εποπτεία φάσματος περιλαμβάνει σήματα ραδιοσυνχοτήτων πλοίων, AIS, push-to-talk ραδιοπομπούς, κινητές συσκευές L-Band, συχνότητες έκτακτης ανάγκης και συστήματα radar σε συχνότητες S-Band και X-Band. [13]
- NorSat-1 , 2 και 3
Οι δορυφόροι NorSar-1,2 και 3 είναι μεγέθους 20x30x40cm και βάρους 17kg με στόχο αποστολής την εποπτεία σημάτων AIS, VDES. Για την βασική λειτουργία ανίχνευσης σημάτων AIS χρησιμοποιείται κεραία Yagi-Uda σε VHF συχνότητες. Ο δορυφόρος NorSat-3 χρησιμοποιεί κεραία Navigation Radar Detector (NRD) με στόχο τον γεωεντοπισμό μέσω AoA.
- Kleos Space
Constellation τεσσάρων δορυφόρων 8kg για εποπτεία σημάτων AIS VHF.
- AISSAT-1 και 2
Δορυφόρος διαστάσεων 20x20x20cm και βάρους 7kg για λειτουργία εντοπισμού σημάτων AIS.
- MilSpace2
Δορυφόροι 6U με δυνατότητες γεωεντοπισμού μέσω TDOA και AOA, σε πολική τροχιά και μέγιστο υψόμετρο 600km.
- All-Bravo (Bravo)
CubeSats 6U για καταγραφή πληροφοριών ραδιοφάσματος.
- BRO 1 – 6
CubeSats 6U για εποπτεία φάσματος, επίβλεψη ναυτιλίας και καταγραφή πληροφοριών ραδιοφάσματος.

- SAMSON

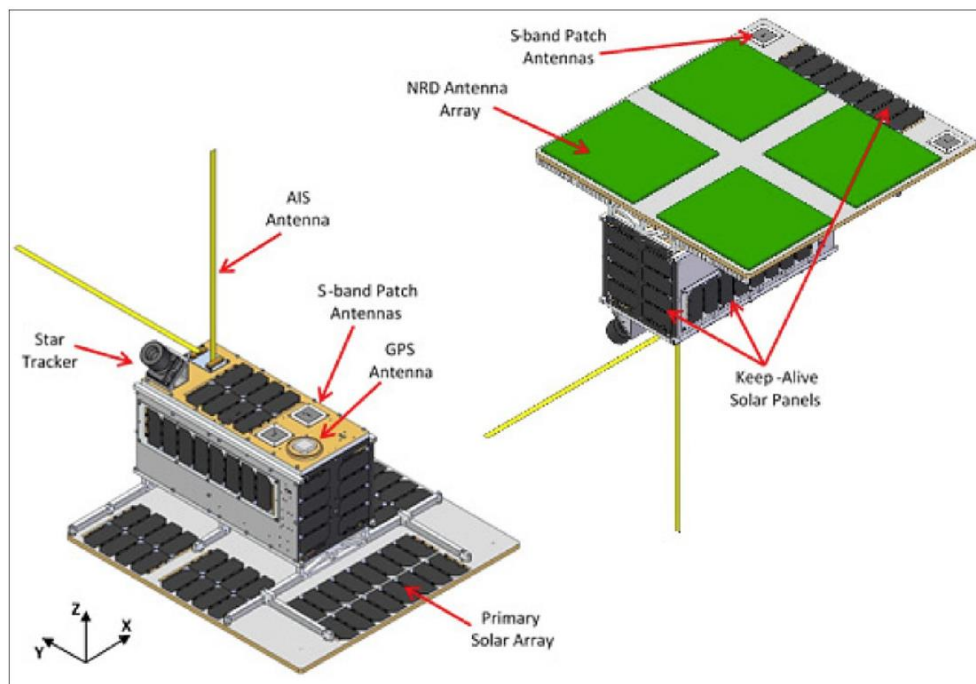
Εκπαιδευτική αποστολή SAMSON (Satellite Mission for Swarming and Geolocation) όπου αποτελείται από τρεις 6U CubeSats ίδιου τροχιακού επιπέδου με δυνατότητες γεωεντοπισμού βασισμένο σε τεχνική TDOA και FDOA[14].



Εικόνα 20: Δορυφόρος Hawkeye 360



Εικόνα 21: Απεικόνιση CubeSat - Kleos Space



Εικόνα 22: Μέρη του δορυφόρου NorSat-3 [15]

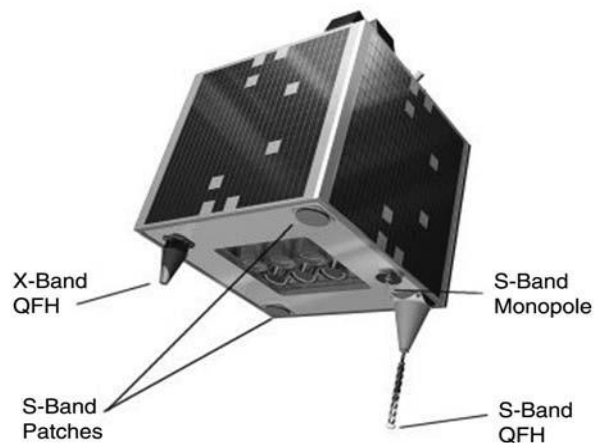


Εικόνα 23: Απεικόνιση CubeSat 6U - MilSpace2

4. Κεραίες CubeSat

4.1. Γενικά

Το σύστημα επικοινωνίας είναι από τα κύρια μέρη ενός δορυφόρου, όπου επιτρέπει τη λήψη και τη εκπομπή τηλεπικοινωνιακών σημάτων (payload data), τα δεδομένα TT&C, τα δεδομένα τοποθεσίας GPS/GNSS και τις διαδορυφορικές ζεύξεις (Intersatellite links). Το σύστημα επικοινωνίας προσαρμόζεται αναλόγως τις υπηρεσίες του δορυφόρου και συνήθως απαιτούνται διαφορετικοί τύποι κεραιών για τη σωστή λειτουργία του. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν τα βασικά είδη κεραιών και τα χαρακτηριστικά τους.



Εικόνα 24: Disaster Monitoring Constellation Micro Satellite by Surrey Satellite Technology Ltd, UK [16]

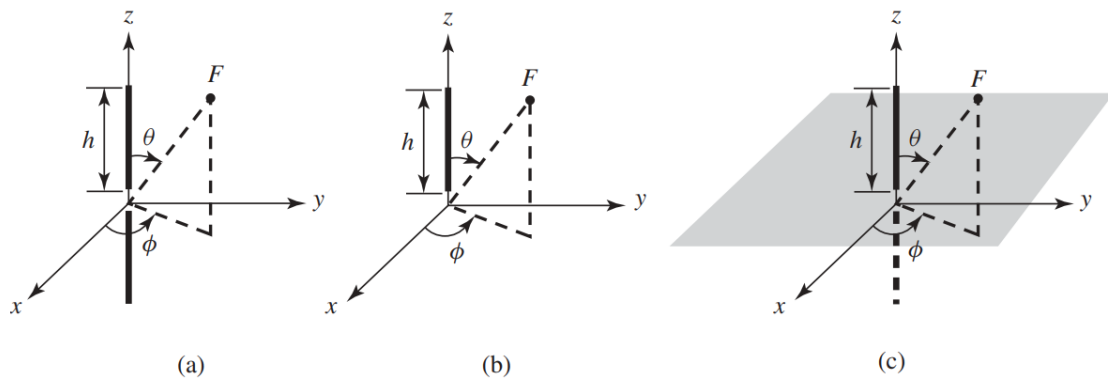
Band	Εύρος Συχνοτήτων
HF	0.003 to 0.03 GHz
VHF	0.03 to 0.3 GHz
UHF	0.3 to 1 GHz
L	1 to 2 GHz
S	2 to 4 GHz
C	4 to 8 GHz
X	8 to 12 GHz
K _u	12 to 18 GHz
K	18 to 27 GHz
K _a	27 to 40 GHz
V	40 to 75 GHz
W	75 to 110 GHz
mm or G	110 to 300 GHz

Πίνακας 3: Ζώνες συχνοτήτων

4.2. Γραμμικές Κεραίες (Wired Antennas)

4.2.1. Δίπολα, Μονόπολα, Turnstile

Τα μονόπολα και δίπολα χρησιμοποιούνται από τους περισσότερους CubeSats καθώς είναι από τις πιο απλές, αξιόπιστες και οικονομικές μορφές κεραιών. Χρησιμοποιούνται συνήθως για τις TT&C λειτουργίες (telemetry, tracking, and control) και λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων VHF και UHF. Οι VHF και UHF συχνότητες απαιτούν σχετικά μεγάλου μήκους κεραίες, αλλά η απλή κατασκευή και το χαμηλό βάρος των γραμμικών κεραιών επιτρέπει την εύκολη εγκατάσταση ακόμη και σε μικρούς δορυφόρους. Η εγκατάσταση τέτοιων κεραιών μπορεί να γίνει εξωτερικά του δορυφόρου, είτε με μηχανισμούς επέκτασης είτε χωρίς.



Εικόνα 25: α) Δίπολο, μονόπολο χωρίς πεδίο γείωσης, γ) Μονόπολο με πεδίο γείωσης

Αυτές οι κεραίες έχουν χαμηλό κέρδος αλλά εκπέμπουν ομοιοκατευθυντικά το οποίο είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου ο δορυφόρος δεν έχει τον κατάλληλο προσανατολισμό. Τέτοιες ομοιοκατευθυντικές κεραίες χρησιμοποιούνται για δορυφόρους στο παρελθόν, όπου δεν υπήρχαν συστήματα σταθεροποίησης. Οι ομοιοκατευθυντικές κεραίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες και για μοντέρνους μικρούς δορυφόρους, αφού συνήθως δεν διαθέτουν ακριβείς μηχανισμούς σταθεροποίησης. Οι δορυφόροι κατά την είσοδό τους στην τροχιά μπορεί να μην έχουν τον σωστό προσανατολισμό, με αποτέλεσμα οι υπόλοιπες κατευθυντικές κεραίες του δορυφόρου να μην είναι στην βέλτιστη θέση, επηρεάζοντας αρνητικά την αποδοτικότητα του συστήματος επικοινωνίας ή στην χειρότερη περίπτωση να είναι αδύνατη η επικοινωνία επίγειου σταθμού με τον δορυφόρο. Μετά την σταθεροποίηση του δορυφόρου, η επικοινωνία μπορεί να γίνει με την χρήση κεραιών μεγαλύτερου κέρδους με καλύτερη απόδοση και κατανάλωση ισχύος, διότι ο δορυφόρος θα μπορεί να επικεντρώνει το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας προς τη γη και όχι προς όλες τις κατευθύνσεις. Το σχεδόν σφαιρικό διάγραμμα ακτινοβολίας τους, επιτρέπει και την εύκολη επικοινωνία μεταξύ δορυφόρων (inter-sat communication).

Σε χαμηλές τροχιές, υπάρχουν φαινόμενα ή μπορεί να προκύψουν τεχνικά προβλήματα όπου επηρεάζουν την τροχιά του δορυφόρου, όπως η ατμοσφαιρική έλξη (οπισθέλκουσα)[17] και να χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν οι TT&C ομοιοκατευθυντικές κεραίες για την επαναφορά

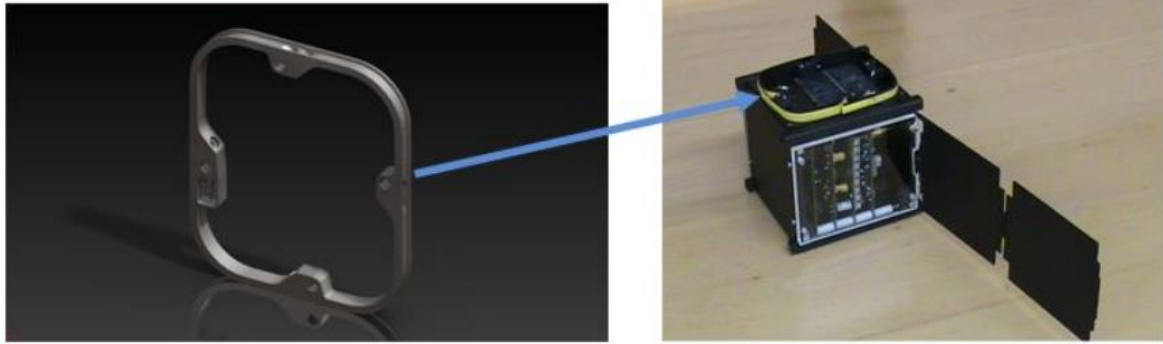
του δορυφόρου στην σωστή τροχιά και κατεύθυνση. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εφεδρικές κεραιές σε περίπτωση κάποιου προβλήματος στο κύριο σύστημα επικοινωνίας. Έτσι η λειτουργία των κεραιών σε VHF/UHF συχνότητες είναι χρήσιμες καθ' όλη την διάρκεια ζωής του δορυφόρου.

Το χαμηλό κέρδος, οι χαμηλές συχνότητες λειτουργίας και το μικρό εύρος ζώνης των γραμμικών κεραιών είναι αποτρεπτικός παράγοντας για υπηρεσίες όπου απαιτούνται μεγάλες ταχύτητες επικοινωνίας ή όπου ο δορυφόρος έχει μεγάλη απόσταση από τη γη, όπως για παράδειγμα σε αποστολές εξερεύνησης του διαστήματος και πλανητών. Οι γραμμικές κεραιές μπορούν να λειτουργήσουν και σε υψηλότερες συχνότητες, μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης, υψηλότερο κέρδος και κυκλική πόλωση, διατηρώντας παράλληλα το κόστος και τον χρόνο έρευνας και κατασκευής στο ελάχιστο [18].

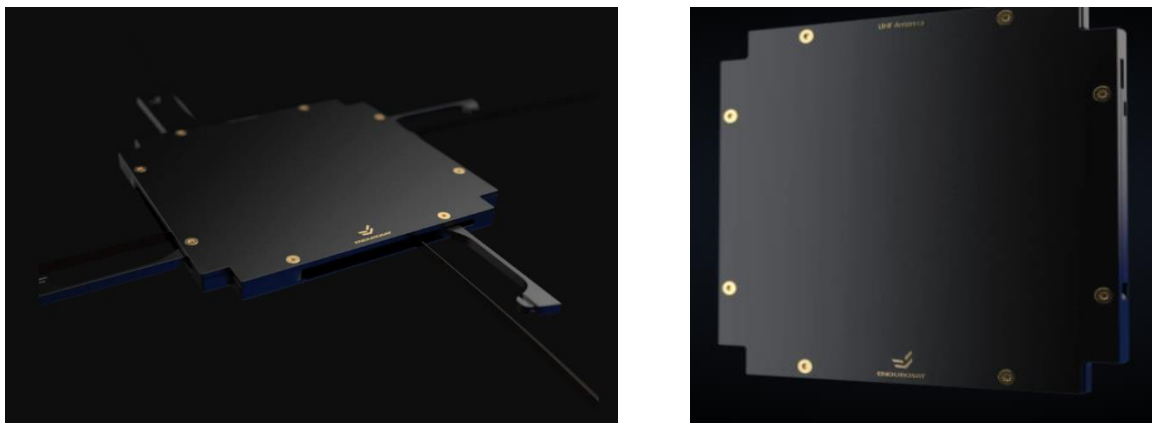
Στην κατηγορία γραμμικών κεραιών ανήκουν και οι ανεξαρτήτου συχνότητας διπολικές λογαριθμικές - περιοδικές κεραιές (LPDA), αλλά λόγω της γραμμικής τους πόλωσης και του μεγάλου μεγέθους κατασκευής, δεν χρησιμοποιούνται σε δορυφόρους. Ένας τρόπος για την κατασκευή LPDA κεραιών θα ήταν με χρήση σύνθετων ελατηρίων (tape-springs) [19]. Η εταιρία MMA Design παρέχει επεκτάσιμες LPDA κεραιές με χρήση μεμβράνης για συχνότητες UHF έως L-band [20]. Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός προσφέρει σχετικά χαμηλό βάρος, μικρό όγκο και κέρδος >6dBi. Θεωρητικά είναι μια καλή επιλογή κεραίας, αλλά έχουν δοκιμαστεί ελάχιστα.

4.2.2. Μηχανικά χαρακτηριστικά

Οι γραμμικές κεραιές προσφέρουν από τα πιο απλά μηχανικά χαρακτηριστικά κεραιών, αλλά επειδή η χρήση τους γίνεται κυρίως σε συχνότητες VHF και UHF, το μήκος τους μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο και μερικές φορές μεγαλύτερο από τον ίδιο τον δορυφόρο. Για παράδειγμα, για την συχνότητα UHF (430Mhz) ένα μονόπολο θα έχει μήκος περίπου 17cm, ενώ για VHF συχνότητες το μήκος της κεραίας ξεπερνάει τα 50cm. Λόγω των αυστηρών περιορισμών του χώρου, η εγκατάσταση των γραμμικών κεραιών γίνεται κυρίως με μηχανισμούς ανάπτυξης, όπου κρατάνε την κεραία κλεισμένη κατά την εκτόξευση και την ξεδιπλώνουν αφού μπει σε τροχιά. Η κατασκευή των μονόπολων είναι παρόμοια με τα ελάσματα των μετροταινιών. Τα ελάσματα αυτά είναι τυλιγμένα και δεμένα σε νήμα (nylon), διατηρώντας την ελαστική τους ενέργεια. Όταν ο δορυφόρος εισέλθει στην τροχιά, θερμαίνεται ένα σύρμα (NiChrome) όπου κόβει το νήμα και απελευθερώνει την κεραία. [21] [3] [22].



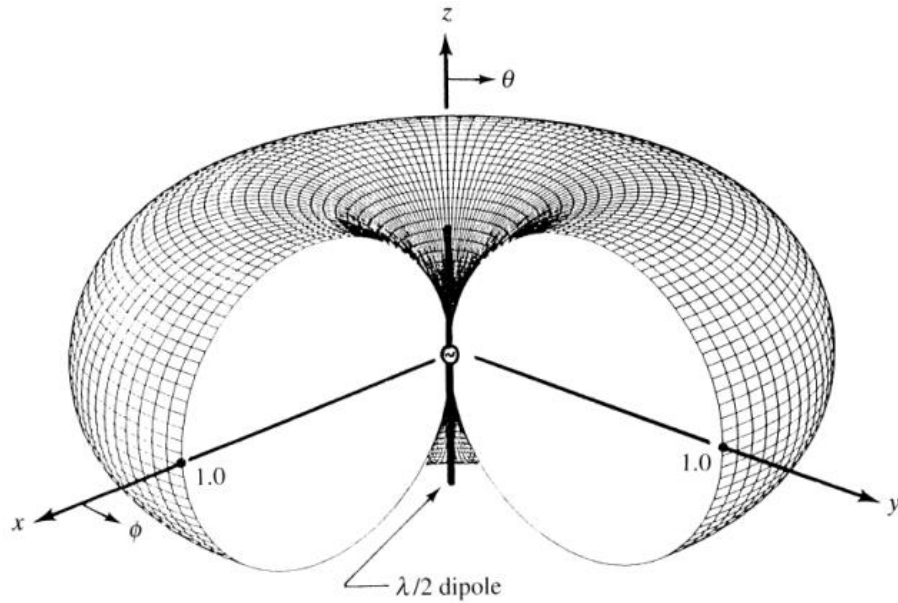
Εικόνα 26: Μηχανισμός επέκτασης. (Project Xatcobeo prototype)



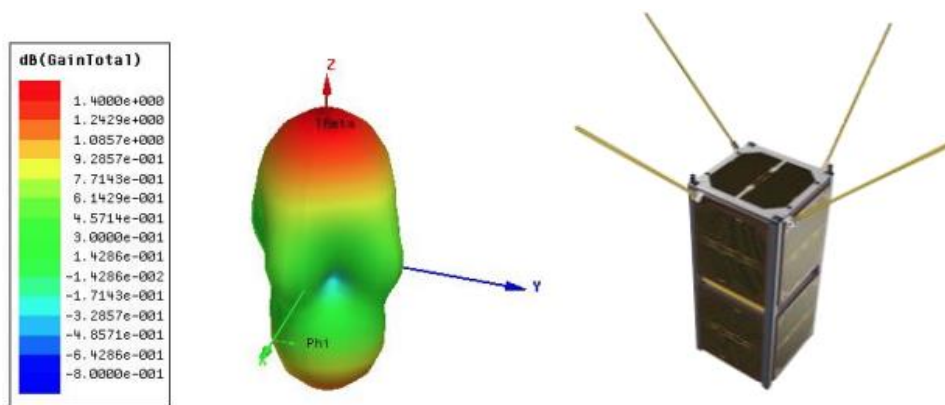
Εικόνα 27: Endurosat deployable UHF turnstile κεραία. Ανοιχτή (αριστερά) και κλειστή (δεξιά)

4.2.3. Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας

Το μέγιστο κέρδος τους είναι 2.15dBi για δίπολα και 5.15dBi για μονόπολα με χρήση γείωσης, ενώ σε κανονικές συνθήκες δεν ξεπερνάνε τα 3dBi. Τα μονόπολα με πεδίο γείωσης θεωρητικά προσφέρουν το διπλάσιο κέρδος (+3dBi) σε σχέση με τα δίπολα επειδή η ακτινοβολία κατευθύνεται αντίθετα από το πεδίο γείωσης και διπλασιάζεται η ακτινοβολούμενη ισχύς [23]. Οι turnstile κεραίες προσφέρουν χαμηλότερο κέρδος (-7dBi έως 1.5dBi) αλλά παρέχουν κυκλική πόλωση [24], σε αντίθεση με τα δίπολα και μονόπολα όπου έχουν γραμμική πόλωση.



Εικόνα 28: Διάγραμμα ακτινοβολίας δίπολου $\lambda/2$. [25]

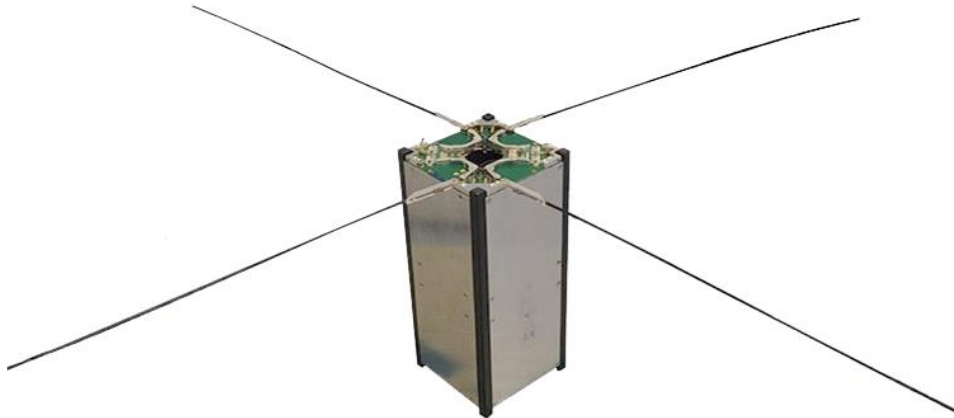


Εικόνα 29: Διάγραμμα ακτινοβολίας turnstile κεραίας σε 2U CubeSat (GOMX-1). [26]

4.2.4. Παραδείγματα

ISIS VHF/UHF Turnstile

Ένα παράδειγμα VHF/UHF κεραίας που έχει δοκιμαστεί σε CubeSats, με TRL 9 (Technology Readiness Levels), είναι το αναπτυσσόμενο σύστημα από την ISISPACE για δορυφόρους μεγέθους από 1U έως 3U [27].



Εικόνα 30: ISIS deployable VHF/UHF Turnstile antenna.

Το σύστημα κεραίας αποτελείται από έως 4 ελάσματα τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν σε διάφορες συνθέσεις κεραιών (έως τέσσερα μονόπολα, έως δύο δίπολα, ένα διασταυρούμενο δίπολο ή κάποιος συνδυασμός δίπολου και μονόπολων). Το κέρδος της κεραίας είναι 0dBi, VSWR < 2:1 και το εύρος ζώνης είναι 10MHz και 50MHz για VHF και UHF αντίστοιχα. Η πόλωση είναι γραμμική σε συνθέσεις μονόπολων και δίπολων, είτε κυκλική με σύνθεση turnstile.

Η επέκταση των ελασμάτων γίνεται με το κάψιμο των νημάτων όπου τα κρατάνε και γίνεται είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα, όταν ο δορυφόρος εισέλθει στην τροχιά. Η λειτουργία επέκτασης, καθώς ο έλεγχος και η αναφορά της σωστής λειτουργίας του συστήματος, γίνεται με την χρήση μικροελεγκτών. Οι διαστάσεις του συστήματος είναι 98 x 98mm, 6mm ύψος και 89g βάρος. Η κατασκευή είναι από αλουμίνιο ενώ τα ελάσματα είναι κατασκευασμένα από κράμα νικελίου και τιτανίου (Nitinol wire), το οποίο έχει χαρακτηριστικά υπερελαστικότητας και διατηρεί καλύτερα το σχήμα του μετά από παραμορφώσεις σε σχέση με απλά ελατήρια [28].

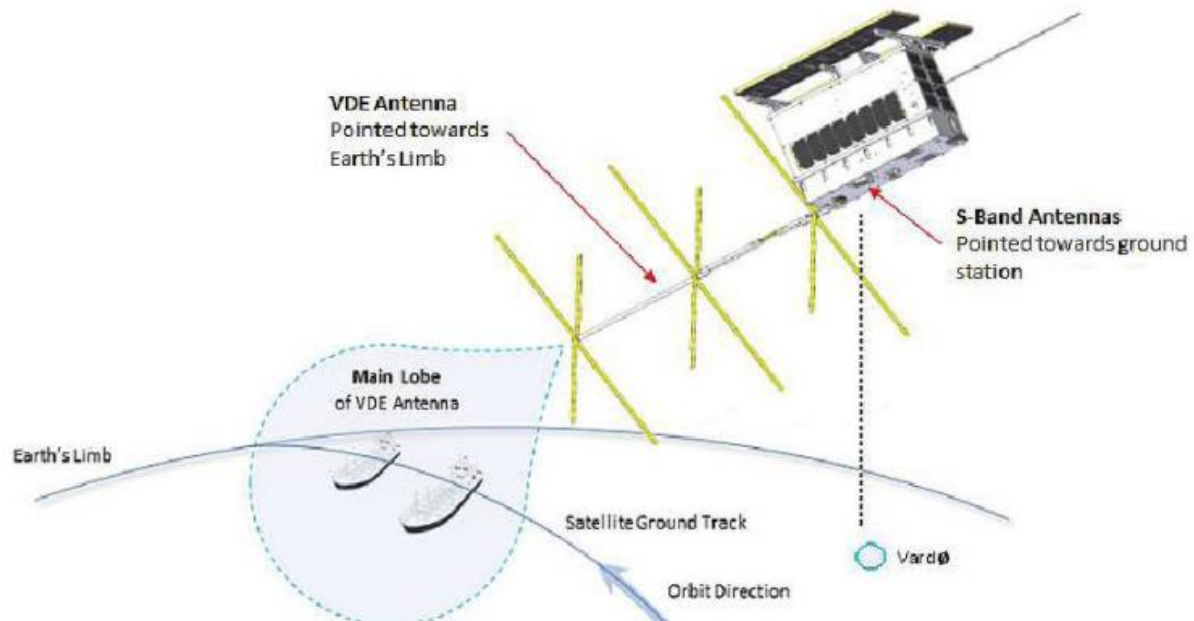
4.3.Κεραίες Yagi-Uda

Οι Yagi-Uda κεραίες χρησιμοποιούνται πολύ συχνά ως κεραίες γενικού σκοπού, όπως κεραίες τηλεόρασης ή σε επίγειους σταθμούς, αλλά η χρήση τους σε δορυφόρους είναι περιορισμένη. Επειδή λειτουργούν στις συχνότητες 3 – 3000MHz το μέγεθός τους μπορεί να ξεπερνάει ένα μικρό δορυφόρο. Για την χρήση τέτοιων κεραιών απαιτείται κάποιος μηχανισμός ανάπτυξης, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα «τύπωσης» της κεραίας σε διηλεκτρικό υπόστρωμα για συχνότητες μεγαλύτερες από 1.3GHz. [29] [30][31]. Για λειτουργίες TT&C όπου δεν χρειάζεται μεγάλο εύρος ζώνης ή κέρδος, τα απλά δίπολα προσφέρουν ικανοποιητικές επιδόσεις. Σε περιπτώσεις όμως όπου τα σήματα μπορεί να είναι πιο αδύναμα, όπως τα σήματα AIS (Automatic Identification System) στις συχνότητες 156MHz-163MHz, είναι αναγκαία μια πιο ευαίσθητη κατευθυντική κεραία. Οι Yagi-Uda μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις ενός συστήματος (κέρδος, συχνότητα), αλλά η τοποθέτησή τους σε μικρούς δορυφόρους είναι μια αρκετά περίπλοκη διαδικασία. Η πόλωσή τους είναι γραμμική, αλλά χρησιμοποιώντας διασταυρούμενα δίπολα και ορθογώνια φάση τροφοδοσίας, εκπέμπουν με κυκλική πόλωση. Η σχεδίαση κεραιών Yagi-Uda με κυκλική πόλωση αυξάνει σημαντικά το μέγεθος και την περιπλοκότητα της κεραίας. Για αυτό τον λόγο συνήθως επιλέγεται η χρήση ελικοειδών κεραιών.

4.3.1. Παράδειγμα

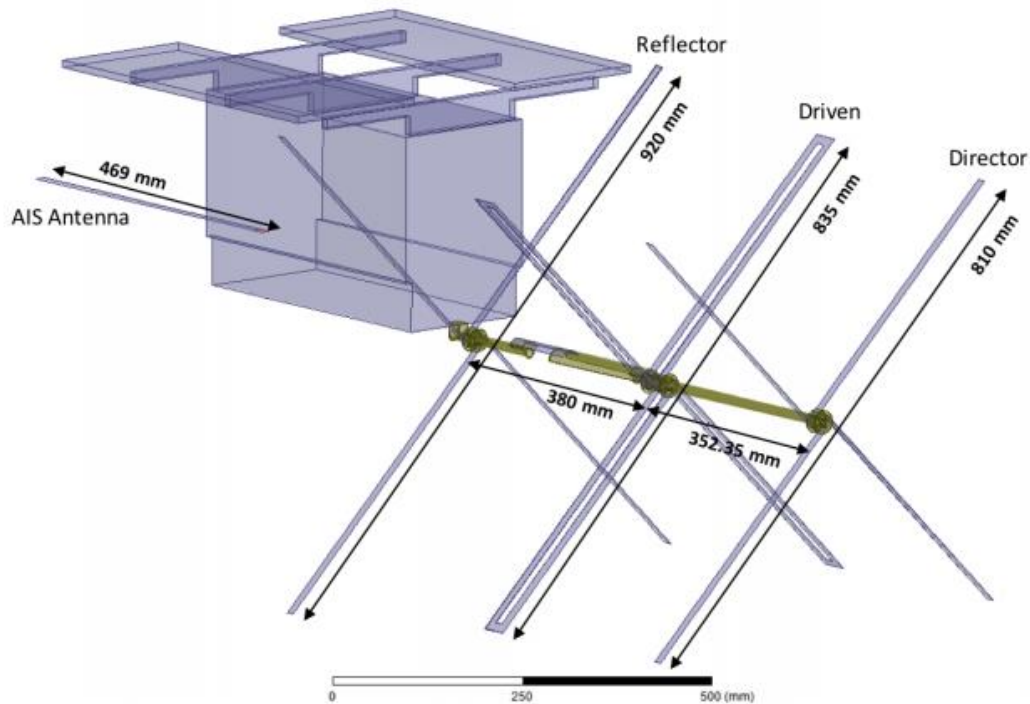
NorSAT-2 Deployable Crossed Yagi-Uda Antenna

Ο NorSAT-2 είναι ένας μικροδορυφόρος όπου παρέχει υπηρεσίες προηγμένης παρακολούθησης πλοίων (AIS – Automatic Identification System) και VHF ανταλλαγή δεδομένων. (VDES – VHF Data Exchange System). Για τις AIS υπηρεσίες χρησιμοποιήθηκε ένα ομοιοκατευθυντικό μονόπολο μήκους 476mm με μηχανισμό ανάπτυξης. Οι λειτουργίες του συστήματος VDES απαιτούν καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με τα μονόπολα και για αυτό χρησιμοποιήθηκε μια VHF Yagi-Uda κεραία [32].



Εικόνα 31: Τρόπος λειτουργίας NorSat2 για VDES υπηρεσίες [33]

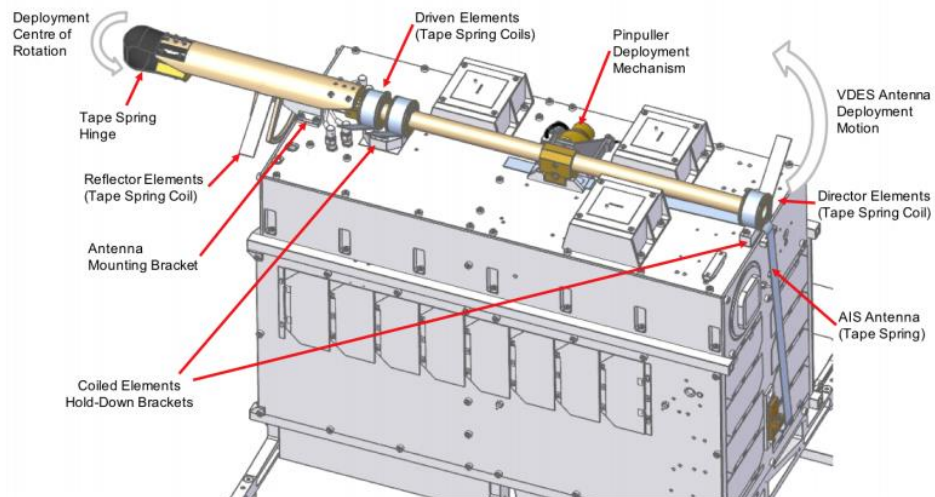
Οι λειτουργίες VDES χρησιμοποιούν τις συχνότητες 157.1875 έως 157.3375MHz για λήψη και 161.7875 έως 161.9375MHz για αποστολή μηνυμάτων. Επίσης η κεραία θα πρέπει να εκπέμπει κατευθυντικά με κέρδος πάνω από 7dBi. Για να ικανοποιούνται οι παραπάνω απαιτήσεις χρειαζόμαστε μια κεραία αρκετά μεγάλων διαστάσεων σε σχέση με τον δορυφόρο. Οι προτεινόμενες ιδέες κεραιών συμπεριλάμβαναν ελικοειδείς, βροχοειδείς ή γραμμικές Yagi-Uda , είτε με μηχανισμό ανάπτυξης είτε χωρίς. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης μηχανισμού επέκτασης είναι το χαμηλότερο κόστος λόγω μειωμένου όγκου και οι περισσότερες επιλογές σκαφών για την εκτόξευση. Στην περίπτωση που δεν θα γινόταν χρήση μηχανισμού επέκτασης θα έπρεπε τα στοιχεία της κεραίας να είναι αρκετά πιο ανθεκτικά για να αντέξουν την απογείωση. Η εναλλακτική επιλογή κεραίας ήταν μια επεκτάσιμη ελικοειδής κεραία, η οποία όμως θα χρειαζόταν πεδίο γείωσης, σε αντίθεση με μια Crossed-Yagi.



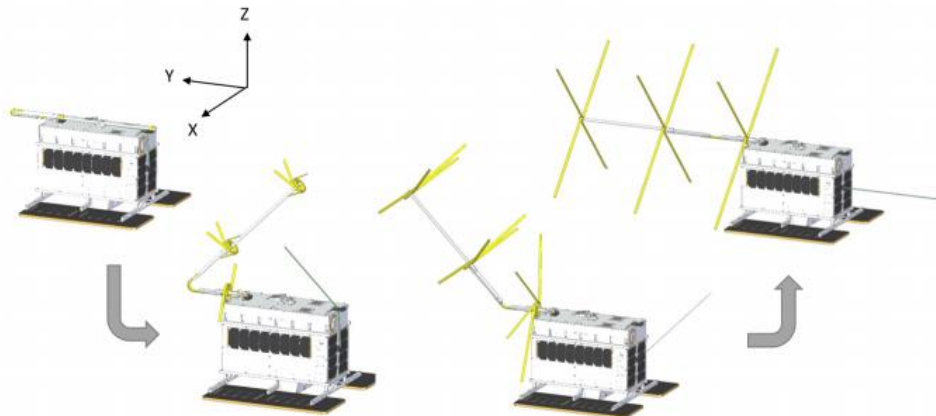
Εικόνα 32: Deployable Cross Yagi-Uda model.

4.3.2. Μηχανικά χαρακτηριστικά (NorSAT-2 Deployable Crossed Yagi-Uda)

Ο μηχανισμός επέκτασης αποτελείται από δύο άξονες, έναν σταθερό και έναν κινητό, όπου συνδέονται με ένα έλασμα (τύπου μετροταινίας). Πάνω στους άξονες αποθηκεύονται τυλιγμένα τα στοιχεία της κεραίας (δίπολα, ανακλαστήρας και κατευθυντήρας). Κατά την εκτόξευση η κεραία αποθηκεύεται κοντά στην επιφάνεια του δορυφόρου. Όταν ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός απελευθέρωσης, ο άξονας και τα στοιχεία της επεκτείνονται λόγω της αποθηκευμένης ελαστικής δυναμικής ενέργειας. Η επέκταση του μονόπολου AIS, γίνεται ταυτόχρονα με την επέκταση της Yagi-Uda και των αξόνων [32]



Εικόνα 33: Μηχανισμός αποθήκευσης και επέκτασης κεραιών (Yaagi-Uda & μονόπολο)



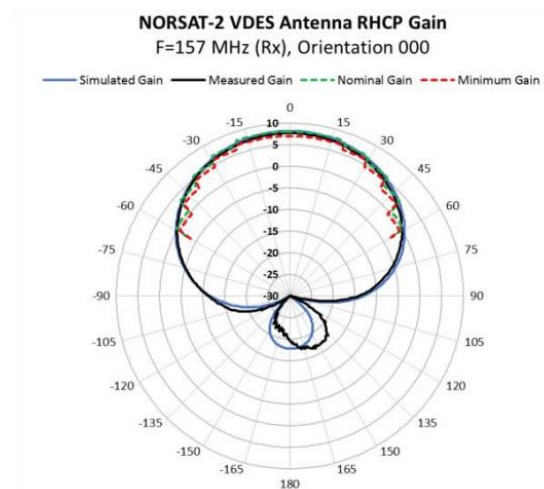
Εικόνα 34: Στάδια επέκτασης κεραιάς

4.3.3. Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας (NorSAT-2 Deployable Crossed Yagi-Uda)

Η κεραία ικανοποιεί το απαραίτητο κέρδος και δεξιόστροφη κυκλική πόλωση για τις λειτουργίες VDES όπως φαίνεται στον πίνακα 1. Το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι καλό, με σχεδόν ημισφαιρικό κύριο λοβό και μικρό οπίσθιο λοβό [Εικόνα 35].

Comm. Frequency	TinSat Orientation	Test Measurements	Requirements			
		Maximum Gain [dB]	Nominal Gain [dB]	Difference [dB]	Minimum Gain [dB]	Difference [dB]
Rx (157 MHz)	000°	7.72	8	-0.28	7	0.72
	+045°	7.77		-0.23		0.77
	+090°	8.20		0.20		1.20
	-045°	7.48		-0.52		0.48
Tx (162 MHz)	000°	8.03	8	0.03	7	1.03
	+045°	8.42		0.42		1.42
	+090°	8.60		0.60		1.60
	-045°	8.22		0.22		1.22

Πίνακας 4: Μετρήσεις κεραίας Yagi-Uda - VDES



Εικόνα 35: Διάγραμμα Ακτινοβολίας VDES Yagi-Uda (RHCP)

4.4.Ελικοειδείς Κεραίες

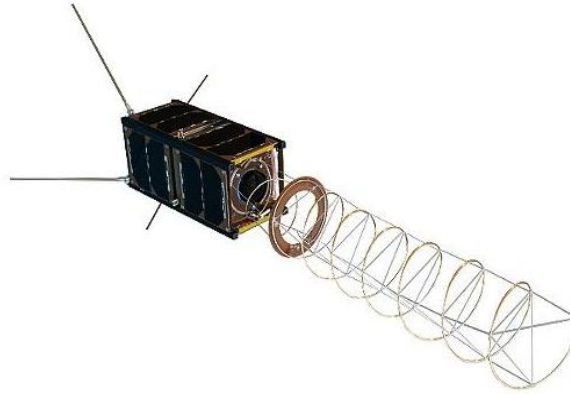
Οι ελικοειδείς κεραίες χρησιμοποιούνται συχνά στις δορυφορικές επικοινωνίες, από VHF έως και X band συχνότητες όταν απαιτείται μεγαλύτερο κέρδος σε σχέση με τα μονόπολα ή δίπολα, είτε όταν απαιτείται κυκλική πόλωση.

Οι ελικοειδείς κεραίες περιλαμβάνουν κυρίως τις απλές ελικοειδείς, τις bifilar, trifilar και Quadrifilar Helical Antennas (QHA) με μια, δύο, τρεις και τέσσερις σπείρες αντίστοιχα, καθώς και οι κωνικές και ημισφαιρικές κεραίες.

Οι πιο συχνές χρήσεις τους είναι για το σύστημα γεωγραφικού προσδιορισμού θέσης (GPS), δεδομένα ADS-B (Automatic dependent surveillance broadcast) και για τις TT&C και AIS (automatic identification system) λειτουργίες [34]. Οι ελικοειδείς κεραίες χρησιμοποιούνται κυρίως σε axial-mode για τις δορυφορικές επικοινωνίες, με ημισφαιρικό διάγραμμα ακτινοβολίας, κυκλική πόλωση, καλή αποδοτικότητα, μεσαίο ή υψηλό κέρδος και σχετικά μεγάλο εύρος ζώνης. Το εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος (HPBW) είναι αρκετά πλατύ και προσφέρει ικανοποιητική κάλυψη ακόμη και σε πιο δύσκολες συνθήκες[35]. Επίσης μπορούν να προσαρμοστούν αρκετά εύκολα σε διαφορετικές συχνότητες και διαγράμματα ακτινοβολίας, αλλάζοντας απλώς τις διαστάσεις του αγωγίμιου υλικού και το πεδίο γείωσης. Οι πιο συχνές χρήσεις ελικοειδών κεραιών γίνονται στις συχνότητες VHF έως L-band.



Εικόνα 36: Deployable Helical Antenna by Oxford Space Systems



Εικόνα 37: Deployed helical antenna of GOMX-1 Cubesat

Από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα αυτών των κεραιών είναι το μεγάλο μέγεθός τους και πιο συγκεκριμένα το μήκος τους. Το κέρδος της κεραίας εξαρτάται από τις στροφές της έλικας και έτσι η κατασκευή μιας ελικοειδούς κεραίας με μέτριο κέρδος (MGA) μπορεί να είναι μη πρακτική επιλογή για έναν μικρό δορυφόρο. Για την τοποθέτηση μιας τέτοιας κεραίας σε μικρό δορυφόρο (πχ. 3U ή 6U) είναι απαραίτητη η χρήση ενός μηχανισμού ανάπτυξης. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η δυσκολία να κατασκευαστεί μια εύκαμπτη ελικοειδής κεραία όπως τα μονόπολα ή τα δίπολα [16] όπου μπορούν να ξεδιπλωθούν, αφού εισέλθουν στην τροχιά, εύκολα και χωρίς παρεκκλίσεις. Για να παραμείνουν αναλλοίωτες οι διαστάσεις της κεραίας, απαιτείται κάποιος εξειδικευμένος και περίπλοκος μηχανισμός όπου αυξάνει το μέγεθος, το κόστος και το βάρος του δορυφόρου.

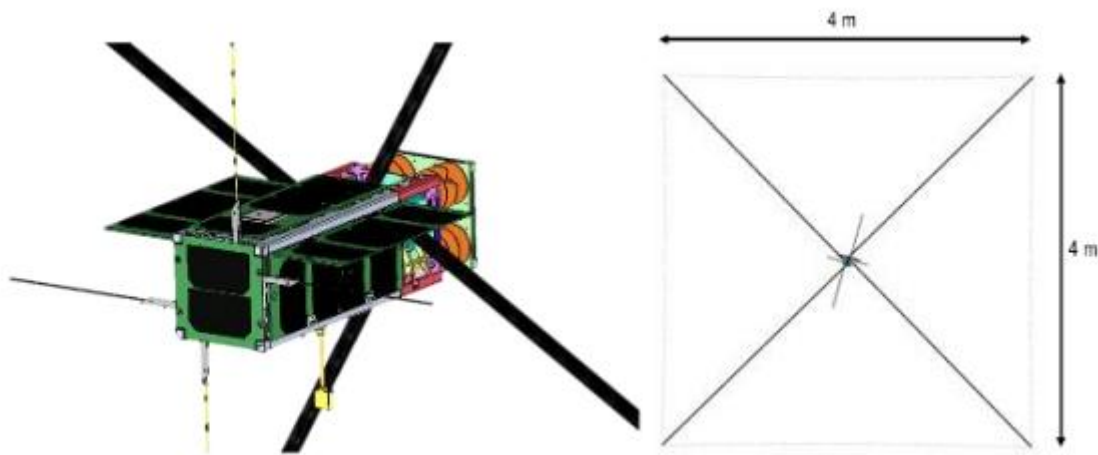
Multi-filar κεραίες όπως quadrifilar helical antennas (QHA) προσφέρουν πολύ καλύτερα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά καθώς είναι σημαντικά μικρότερες σε μήκος. Συνήθως οι QHA έχουν μικρότερο εύρος ζώνης σε σχέση με τις απλές ελικοειδείς κεραίες μιας σπείρας (monofilar helical), αλλά με τον ανάλογο σχεδιασμό και τις απαιτήσεις, μπορούν να διατηρήσουν όλα τα πλεονεκτήματα των απλών ελικοειδών κεραιών, όπως κυκλική πόλωση και ημισφαιρικό διάγραμμα ακτινοβολίας, και για αυτό τον λόγο χρησιμοποιούνται ευρέως για λειτουργίες TT&C και Global Positioning Systems (GPS) [36]. Επιπλέον μπορούν να προσαρμοστούν για διαφορετικούς τύπους κάλυψης, όπως ημισφαιρική ή isoflux[37]



Εικόνα 38: Helios deployable HQA antenna

4.5.Βροχοκεραία

Οι βροχοκεραίες (loop antennas) λειτουργούν σε VLF έως S-band συχνότητες, αλλά δεν χρησιμοποιούνται συχνά σε μικρούς δορυφόρους λόγω του πιο περίπλοκου κατασκευαστικού μέρους τους σε σχέση με τα δίπολα, μονόπολα και turnstile. Ένα παράδειγμα χρήσης loop κεραίας σε VLF συχνότητες είναι ο CubeSat SwampSat II [Εικόνα 39] [38]. Για τις χαμηλές συχνότητες από 3kHz έως 30kHz οι loop κεραίες προσφέρουν καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με άλλους τύπους κεραιών, αλλά βασίζονται σε πιο περίπλοκους μηχανισμούς ανάπτυξης με μεγαλύτερο βάρος και όγκο.



Εικόνα 39: SwampSat II CubeSat with 16m² loop antenna

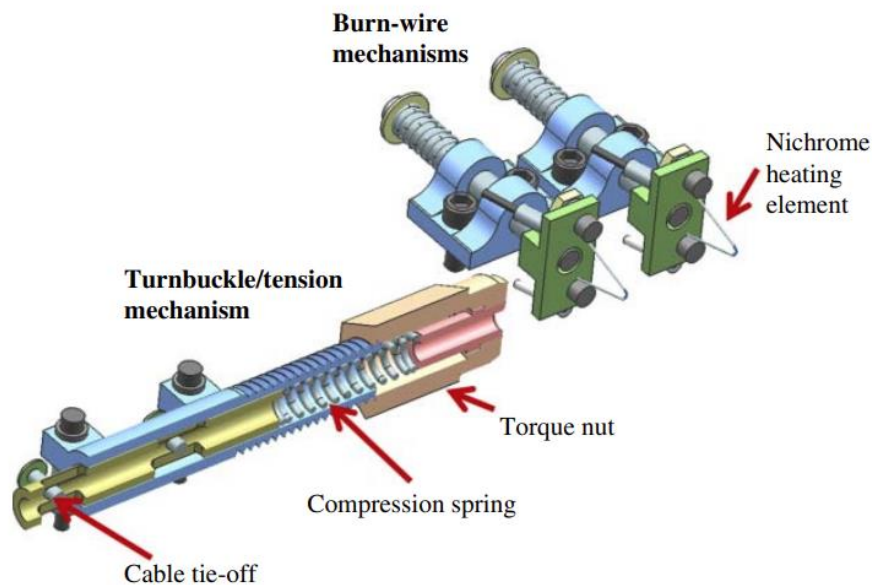
Μια ακόμη πετυχημένη χρήση loop κεραίας είναι αυτή στους δύο 6U CubeSats, με όνομα MarCO [3]. Η χρήση της loop κεραίας έγινε για την επικοινωνία (τηλεμετρία) των δορυφόρων με το διαστημικό ερευνητικό σκάφος InSight κατά την διαδικασία EDL (Entry, Descent and Landing) στην επιφάνεια του Άρη.

4.5.1. Μηχανικά χαρακτηριστικά (Loop antenna – MarCO)

Για την καλή επίδοση της κεραίας έπρεπε να τοποθετηθεί 80mm μακριά από την κατασκευή του δορυφόρου και λόγω των περιορισμών χώρου έπρεπε να κατασκευαστεί ένας μηχανισμός επέκτασης. Η κεραία μένει στην αποθηκευμένη θέση της με χρήση νήματος, ενώ κατά την επέκτασή της καίγεται το νήμα θερμαίνοντας ένα σύρμα (NiChrome) χρησιμοποιώντας ρεύμα (εικόνα 19).

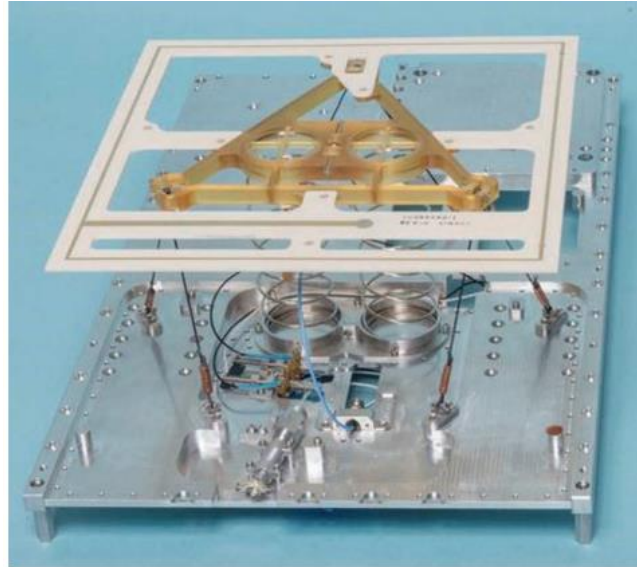


Εικόνα 40: UHF Loop κεραία - Εκτεταμένη και κλειστή



Εικόνα 41: Μηχανισμός απελευθέρωσης/ανάπτυξης με θερμαντικό σύρμα

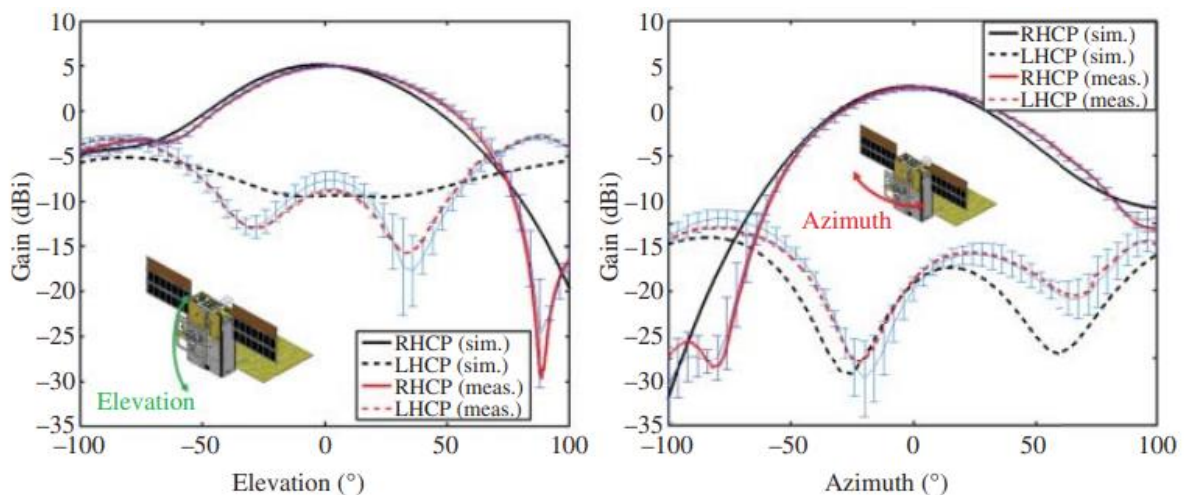
Η επέκταση της κεραίας γίνεται με χρήση ελατηρίων όπου απωθούν την κεραία από το κέντρο της, ενώ ταυτόχρονα 6 νήματα (Vectran) κρατάνε σταθερή την κατασκευή. Η κατασκευή της loop κεραίας έγινε με χρήση διηλεκτρικού υποστρώματος 200x200mm² RT Duroid 4003 και τοποθετήθηκε πάνω σε τριγωνική υποστηρικτική κατασκευή από πλαστικό (ULTEM).



Εικόνα 42: Εκτεταμένη UHF Loop κεραία.

4.5.2. Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας (Loop antenna – MarCO)

Η κεραία χρησιμοποιούσε κυκλική πόλωση, αλλά μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και με γραμμική πόλωση $\pm 45^\circ$ αναλόγως τον τρόπο τροφοδοσίας. Η κεραία λειτουργεί σε συχνότητα 401.6MHz και πετυχαίνει μέγιστο κέρδος 5dBi, 90% αποδοτικότητα, XPD > 10.5dB, Axial Ratio < 4dB (0.3dB για γωνίες $\pm 30^\circ$ ανύψωσης και αζιμουθίου) και επιτρέπει επικοινωνία με ταχύτητες έως 8kbps.



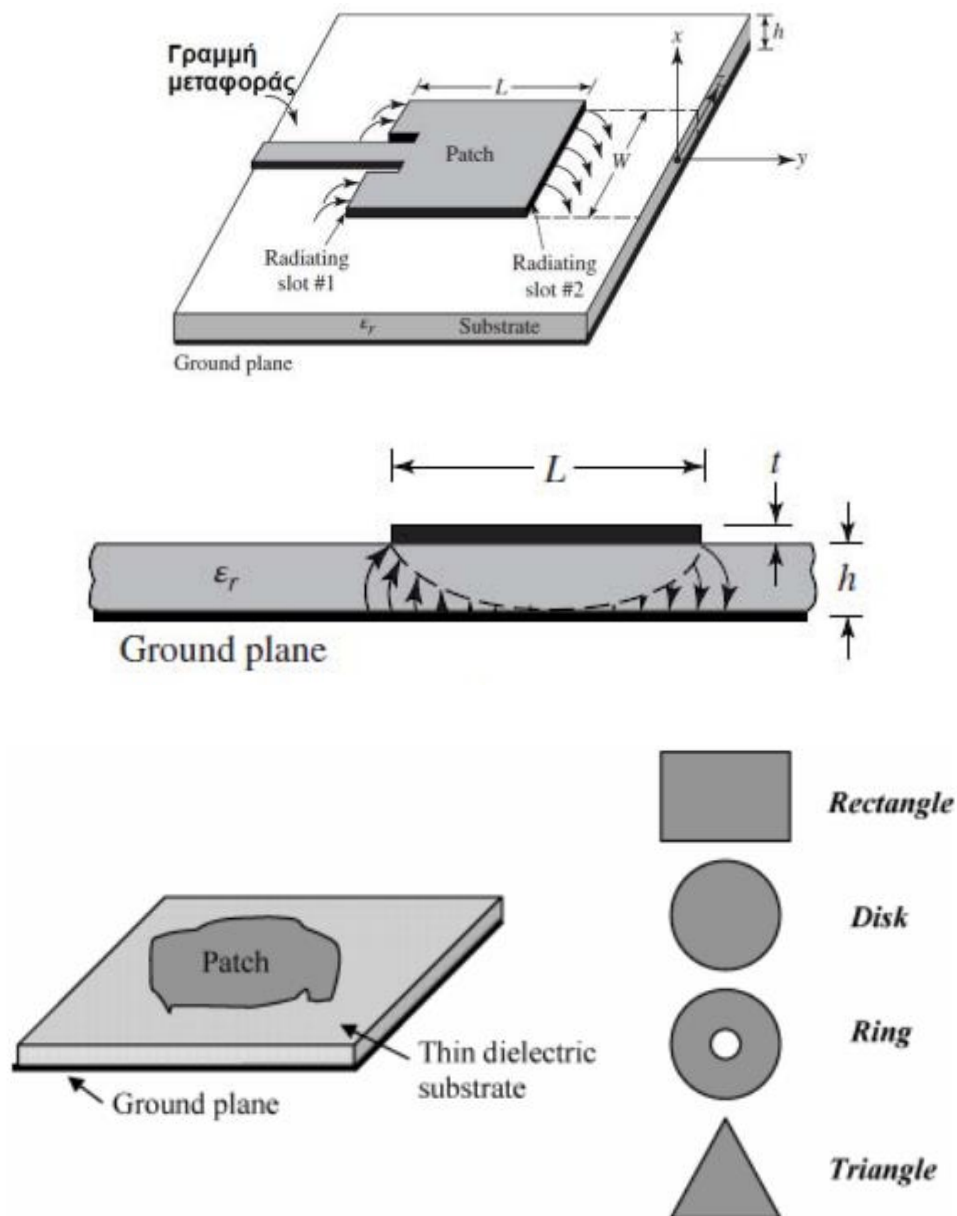
Εικόνα 43: Διάγραμμα ακτινοβολίας και κέρδους ανάλογα τις γωνίες ανύψωσης και αζιμουθίου

4.6.Κεραίες Planar (Patch, Patch Array, Slot)

Οι planar κεραίες είναι μια από τις πιο σύνηθες επιλογές για το σύστημα τηλεπικοινωνιών μικρών δορυφόρων. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε συχνότητες από UHF έως X Band και έχουν μικρό έως μέτριο κέρδος (5dBi – 13dBi) [39]. Οι μικροί δορυφόροι είναι κυρίως χαμηλής τροχιάς και δεν απαιτείται υψηλό κέρδος κεραίας, το οποίο ικανοποιείται πολλές φορές από τις planar κεραίες. Σε περιπτώσεις όπου η απόσταση του δορυφόρου είναι μεγαλύτερη ή απαιτείται μεγαλύτερο κέρδος για την αποστολή του δορυφόρου (πχ. αποστολές διαστήματος), μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλά patch στοιχεία (Patch Array). Από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των planar κεραιών είναι το σχετικά μικρό μέγεθός τους, η ανθεκτικότητά τους και η εγκατάστασή τους χωρίς μηχανισμούς επέκτασης. Το χαμηλό τους ύψος επιτρέπει να εγκατασταθεί σε μια πλευρά ενός δορυφόρου, δημιουργώντας μια πολύ στιβαρή κατασκευή με ελάχιστες πιθανότητες σφάλματος κατά την εκτόξευση, ενώ παράλληλα επιτυγχάνονται σχετικά εύκολα τα πρότυπα όγκου των CubeSat. Η σχεδίαση και η κατασκευή γίνεται με γνωστές τεχνικές PCB όπου είναι σχετικά εύκολη και φθηνή. Για αυτούς τους λόγους, είναι μια καλή επιλογή για μικρούς δορυφόρους, ακόμη και για picosatellites [40]. Οι planar κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βασική επικοινωνία δορυφόρου-επίγειου σταθμού, για δεδομένα τηλεμετρίας, GPS, για την επικοινωνία με άλλους δορυφόρους ή άλλες βοηθητικές λειτουργίες. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες από μια planar κεραίες σε διάφορα μέρη του δορυφόρου (για παράδειγμα μπορεί να γίνει εγκατάσταση δύο patch κεραιών σε δύο πλευρές του δορυφόρου). Κάτι τέτοιο όμως θα μείωνε σημαντικά τον ελεύθερο χώρο του δορυφόρου για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ.

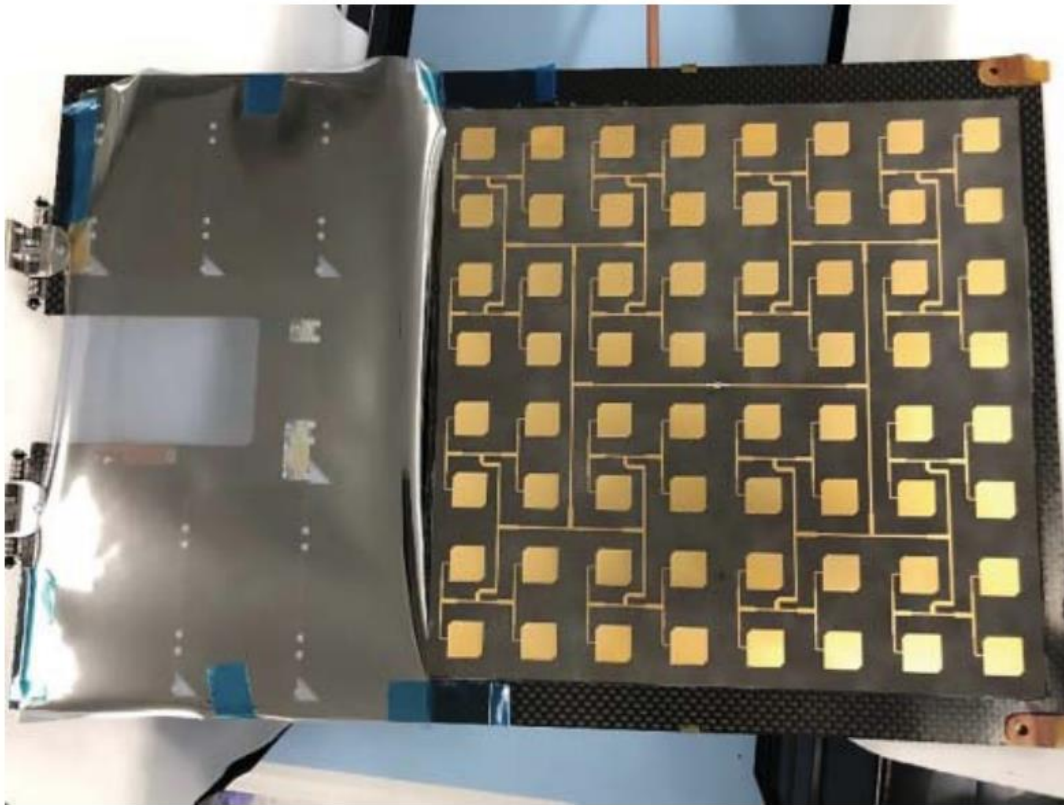
4.6.1. Μηχανικά Χαρακτηριστικά

Οι Patch κεραίες είναι ελαφριές και λεπτές επιφάνειες οι οποίες αποτελούνται από το μεταλλικό ενεργό στοιχείο, το υπόστρωμα διηλεκτρικού υλικού (substrate) και το επίπεδο γείωσης. Το ενεργό στοιχείο μπορεί να έχει διάφορα σχήματα, όπως τετράγωνο, ορθογώνιο, ελλειπτικό ή άλλα σχήματα με εγκοπές. Σε υψηλές συχνότητες, η κεραία μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα σε μια πλευρά του δορυφόρου με διαστάσεις μικρότερες από 10cm x 10cm. Για χαμηλότερες συχνότητες όπως VHF ή UHF, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τεχνικές σμίκρυνσης. Η σμίκρυνση μπορεί να γίνει επιλέγοντας τα απαραίτητα διηλεκτρικά υλικά με υψηλή επιτρεπτότητα, προσθέτοντας εγκοπές στο αγωγίμο υλικό, ενώνοντας το ενεργό στοιχείο με την γείωση ή επιλέγοντας μεταλλικά[41]. Αυτές οι μετατροπές όμως, μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των κεραιών και να αυξήσουν την περιπλοκότητα.



Εικόνα 44: Θεωρητική απεικόνιση patch κεραίας [25]

Οι patch στοιχειοκεραίες έχουν μεγαλύτερο μήκος και πλάτος σε σχέση με τις patch κεραίες ενός στοιχείου, αλλά το ύψος μπορεί να παραμείνει εξίσου χαμηλό. Τα στοιχεία μπορεί να έχουν διάφορες διατάξεις, όπως 1x4, 2x2, 4x4 κλπ. Ακόμη και διατάξεις των 8x8 στοιχείων, μπορούν να εγκατασταθούν σε έναν 6U Cubesat χωρίς την χρήση μηχανισμών επέκτασης. [3]

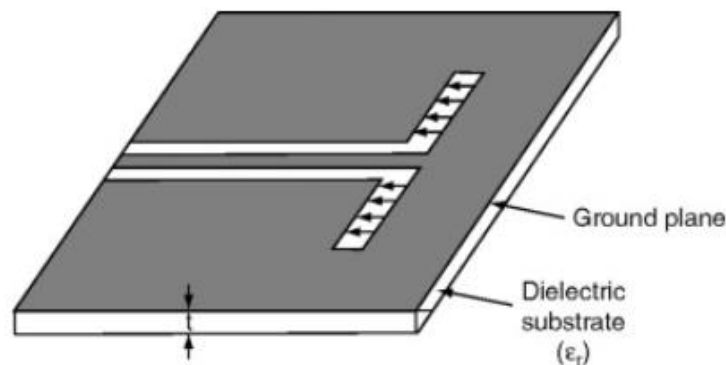


Εικόνα 45: 8x8 patch array

4.6.2. Slot Κεραίες

Οι κεραίες Slot έχουν μια εγκοπή επάνω στο πεδίο της γείωσης. Έχουν παρόμοια φυσικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις patch, με την κύρια διαφορά ότι οι slot κεραίες χρειάζονται κάποια κοιλότητα ή ανακλαστήρα για να εκπέμπουν κατευθυντικά, με αποτέλεσμα να καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο. Μια τεχνική για την μείωση του όγκου των slot κεραιών είναι να χρησιμοποιηθεί η επιφάνεια του δορυφόρου ως ανακλαστήρας [42][42]. Μια άλλη τεχνική μείωσης όγκου είναι η δημιουργία εγκοπών στην επιφάνεια του δορυφόρου, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το «σώμα» του δορυφόρου σαν slot κεραία[43]. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται και μείωση του βάρους από τον σκελετό του δορυφόρου, αλλά ενσωματώνει παράλληλα και την κεραία στην επιφάνεια του.

Αυτές οι τεχνικές για την βελτίωση των slot κεραιών εξαρτώνται από τις φυσικές ιδιότητες του κάθε δορυφόρου και έτσι δεν υπάρχουν έτοιμες λύσεις από κατασκευαστές.



Εικόνα 46: Slot Antenna [44]

4.6.3. Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας

Οι patch κεραίες προσφέρουν κέρδος από 5dBi έως 13dBi και εκπέμπουν κατευθυντικά με έναν κύριο λοβό. Το εύρος ζώνης τους συνήθως είναι σχετικά χαμηλό σε σχέση με άλλες κεραίες, στα 6 MHz, αλλά μπορεί να αυξηθεί σε μεγαλύτερο από 200 MHz με τον απαραίτητο σχεδιασμό.

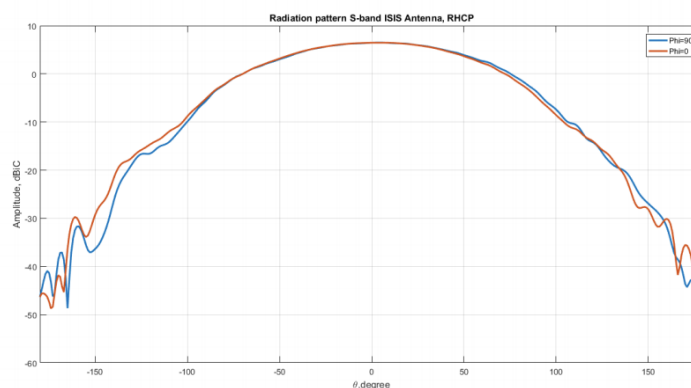
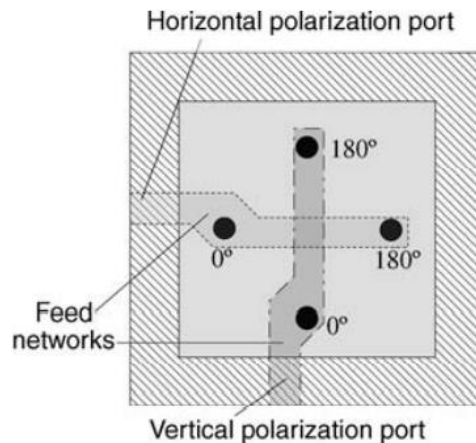


Figure 1 Typical co-polar radiation pattern at 2245 MHz

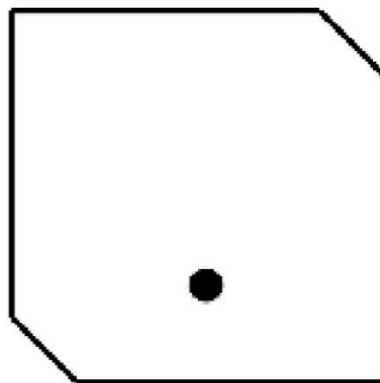
Διάγραμμα 1: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας - Patch S-Band ISIS RHCP

Μπορούν να κατασκευαστούν είτε με γραμμική είτε με κυκλική πόλωση. Χρησιμοποιώντας ορθογώνιες τροφοδοσίες με 180° διαφορά φάσης, η κεραία θα έχει διπλή γραμμική πόλωση (κάθετη και οριζόντια).

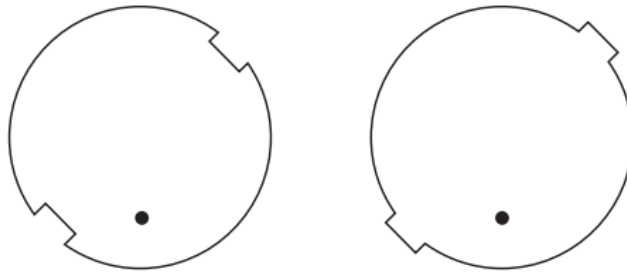


Εικόνα 47: Διπλή πόλωση με χρήση 4 εισόδους τροφοδοσίας [16]

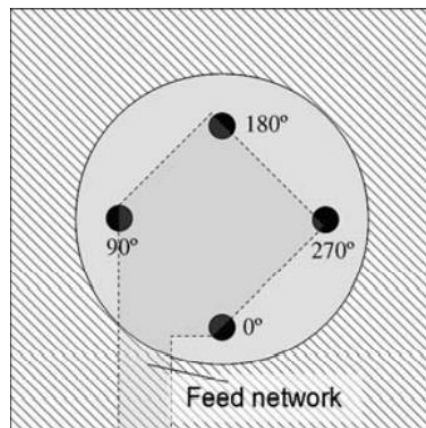
Για τους μικρούς δορυφόρους, με όχι τόσο ακριβή ADCS συστήματα, είναι πιο πρακτική η χρήση κυκλικής πόλωσης. Για την κυκλική πόλωση γίνεται χρησιμοποιώντας δύο τροφοδοσίες ίσες σε πλάτος και ορθογώνιες μεταξύ τους, με διαφορά φάσης 90° . Οι κύριες τεχνικές για την κυκλική πόλωση είναι η παραμετροποίηση των φυσικών χαρακτηριστικών του ενεργού στοιχείου (πχ. χρήση εγκοπών) και η χρήση πολλαπλών τροφοδοσιών. Οι patch κεραίες με κυκλική πόλωση που χρησιμοποιούν μονή τροφοδοσία είναι αρκετά απλές, με χαμηλές απώλειες της γραμμής μεταφοράς, αλλά έχουν πολύ μικρό εύρος ζώνης [25]. Η χρήση πολλαπλών ορθογώνιων εισόδων τροφοδοσίας προσφέρει μεγαλύτερο εύρος ζώνης και καλύτερη απομόνωση και καθαρότητα πόλωσης (Polarization Purity), αυξάνοντας όμως την περιπλοκότητα και το μέγεθος στο δίκτυο τροφοδοσίας.



Εικόνα 48: Patch κεραία κυκλικής πόλωσης με χρήση μονής τροφοδοσίας και κομμένες γωνίες [25]



Εικόνα 49: Patch κεραία κυκλικής πόλωσης μονής τροφοδοσίας και κυκλικό ενεργό στοιχείο με εγκοπές ή προεξοχές.



Εικόνα 50: Patch κεραία κυκλικής πόλωση με χρήση 4 ορθογώνιων εισόδων τροφοδοσίας

4.6.4. Παραδείγματα

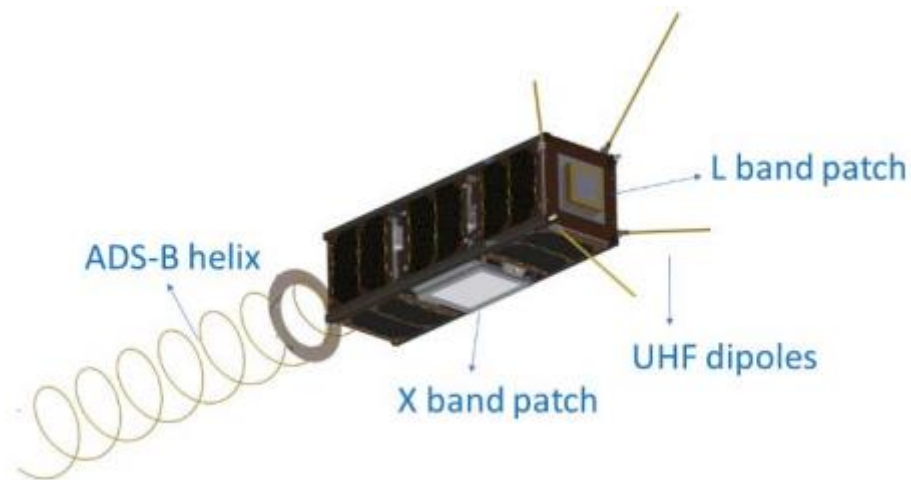
Το μικρό μέγεθος, το χαμηλό βάρος, η φθηνή κατασκευή και η εύκολη προσαρμογή των patch κεραιών, τις κάνουν μια από τις πιο διαδεδομένες επιλογές σε μικρούς δορυφόρους. Οι patch κεραιές χρησιμοποιούνται από δορυφόρους 1U χαμηλού κόστους με χρήση ενός patch στοιχείου, έως και μεγάλους δορυφόρους πολύ υψηλού κόστους σε μορφή μεγάλης στοιχειοκεραίας [16] [3]. Επιπλέον υπάρχουν έτοιμες επιλογές από κατασκευαστές όπως EnduroSat, Vulcan Wireless, Syrlinks κ.α.

Κατασκευαστής	Κεραία	Τύπος	Συχνότητα λειτουργίας	Ζώνη Συχνοτήτων	Κέρδος	Πόλωση	Βάρος	Διαστάσεις	Δοκιμασμένες σε αποστολή
---	---	---	[MHz]	--	[dBi]	--	[g]	[cm]	---
Vulcan Wireless	ANT-S/S Unified S-Band	Patch	2025-2300	S	6.5	Circular	76	8x8x1	Ναι
EnduroSat	S-band Patch	Patch	2025-2110	S	7	Circular	64	10x10	Ναι
Syrlinks	SPAN-S-T3	Patch	2025-2290	S	4.8	Circular	117	8x8x1 1	Ναι
IQ Spacecom	S-band Patch	Patch	2100-2500	S	6	Circular	49	7x7x1	Ναι
ISISPACE	S-Band Patch	Patch	2200-2290	S	6.5	RHCP	50	8x8x1	Όχι
Haigh-Farr, Inc.	S-band Patch	Patch	2245-2245	S	--	RHCP	48	4.8x6.5x6.5	Ναι
IQ Spacecom	X-Band Quad Patch	Patch	7145 - 8400	X	10	Circular	20	6x4x1 .8	-
EnduroSat	X-band Patch	Patch	8025-8400	X	6	RHCP	2.2	--	Ναι
Syrlinks	SPAN-X-T2	Patch	8025-8450	X	7.6	RHCP	68	10x10x7	Ναι
Syrlinks	SPAN-X-T3	Patch	8025-8400	X	11.5	Circular	65	7.3x7.3x11	Ναι

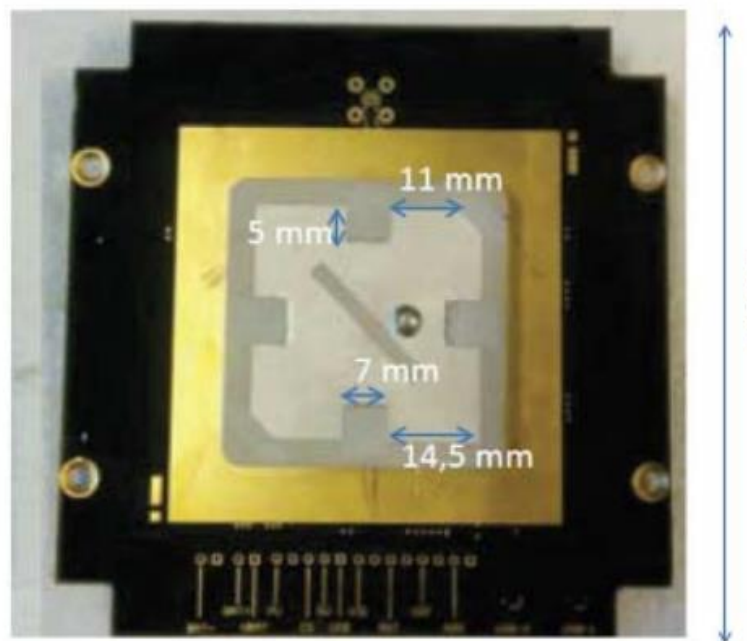
Πίνακας 5: Κατασκευαστές Patch κεραιών και τα χαρακτηριστικά τους [27]

4.6.4.1. GomX-3 - 3U Cubesat

Ο CubeSat χρησιμοποιεί συνολικά 5 κεραιές (ADS-B Helix, X-Band Patch, L-Band Patch, UHF Dipoles και GPS). Η L band patch κεραία είναι εγκατεστημένη στην μια πλευρά των 10cm x 10cm του δορυφόρου. Η κεραία χρησιμοποιεί υψηλή διηλεκτρική σταθερά για να μειωθεί το μέγεθος της κεραιάς στα 36mm. Η συχνότητα λειτουργίας της είναι 1.525:1.565 GHz και το κέρδος της στα 5.5dB.



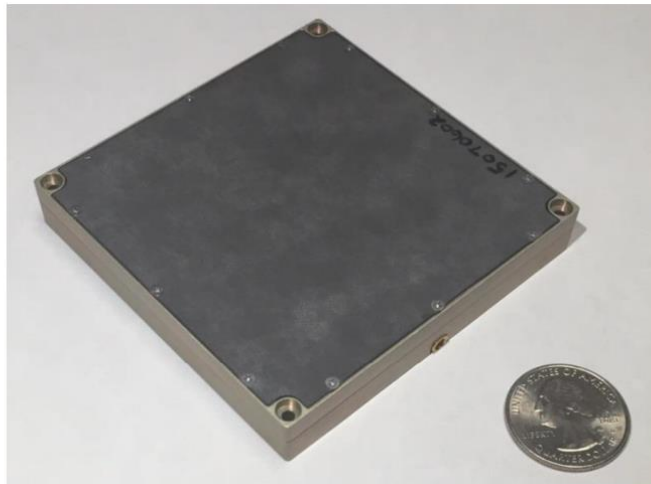
Εικόνα 51: Οι κεραιές του GOMX-3 CubeSat



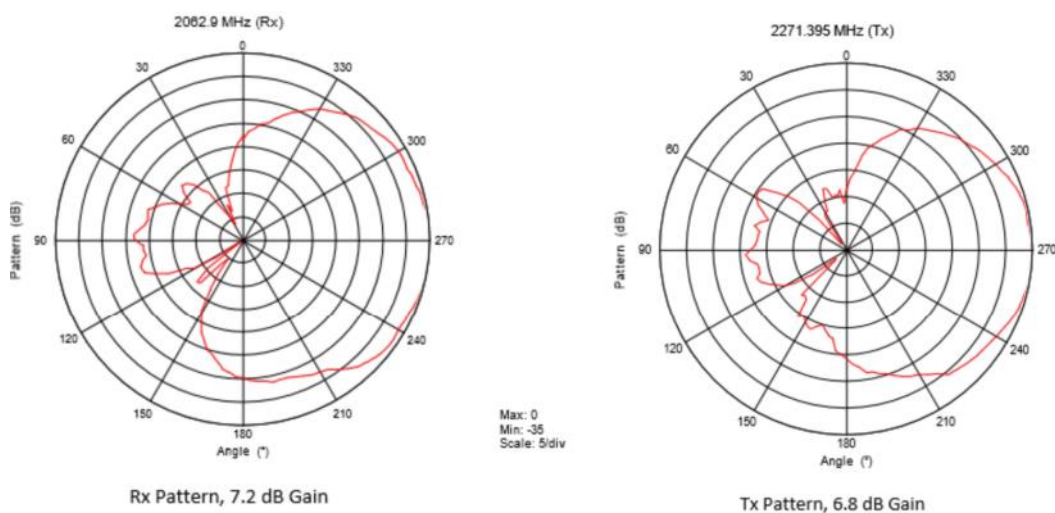
Εικόνα 52: Φυσικά χαρακτηριστικά της L-Band patch κεραιά του GOMX-3 Cubesat

4.6.4.2. ASTERIA 6U CubeSat

Το σύστημα τηλεπικοινωνίας του δορυφόρου χρησιμοποιεί δύο ίδιες S-Band patch κεραίες χαμηλού κέρδους. Οι δύο κεραίες έχουν εγκατασταθεί στα δύο αντίθετα μέρη του δορυφόρου για καλύτερη κάλυψη. Λειτουργούν με RHCP και μέγιστο κέρδος 7dBi στις συχνότητες 2.0-2.11 GHz (για λήψη). Οι διαστάσεις τους είναι 82mm x 82mm x 12mm και βάρος 76γρ.



Εικόνα 53: S-Band Patch antenna (Vulcan Wireless Inc) - ASTERIA CubeSat [45]

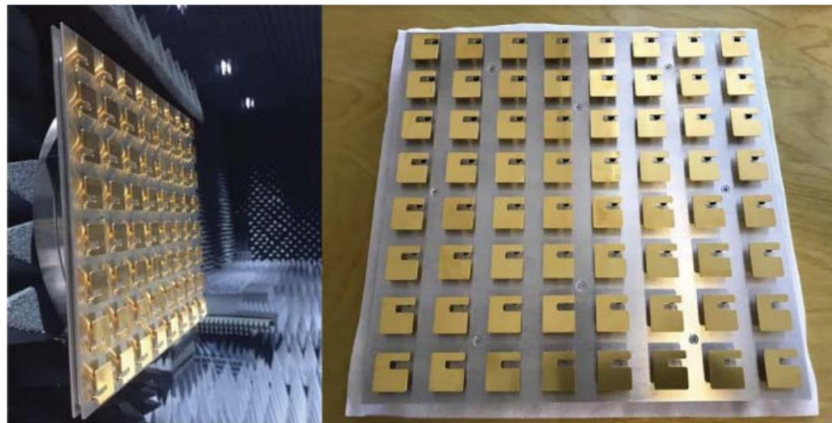


Διάγραμμα 2: Διάγραμμα ακτινοβολίας S-Band Patch antenna (Vulcan Wireless Inc) - ASTERIA CubeSat [45]

4.6.4.3. Μεταλλική 8x8 Patch Array – NASA JPL

Η πλήρως μεταλλική patch array κεραία κατασκευάστηκε για αποστολές του διαστήματος, όπου οι συνθήκες είναι ιδιαίτερα σκληρές, με υψηλή ακτινοβολία και χαμηλές θερμοκρασίες (αποστολή Europa Lander).

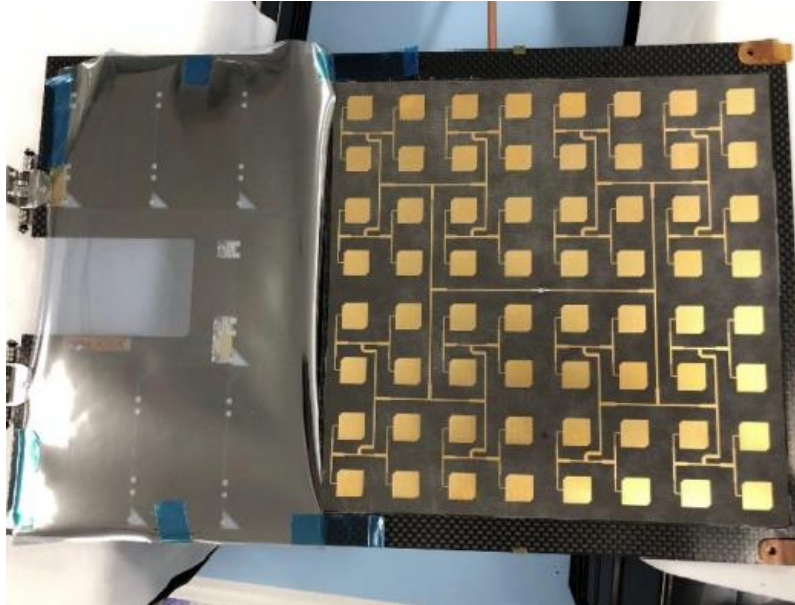
Η κεραία λειτουργεί στις συχνότητες uplink (7.145-7.190GHz) και downlink (8.40-8.45 GHz) στις ζώνες συχνοτήτων Deep Space Network (DSN). Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτής της κεραίας είναι η μεγάλη αποδοτικότητα ανοίγματος (Aperture efficiency) >80% και κέρδος 25.3dBic. Μια τέτοια κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε CubeSats με μέγεθος μεγαλύτερο από 6U. Η μεταλλική κατασκευή έχει μεγαλύτερο βάρος σε σχέση με μια patch κεραία κατασκευασμένη σε PCB, αλλά ένα σημαντικό ποσοστό του βάρους μπορεί να παραληφθεί χρησιμοποιώντας την πλευρά του δορυφόρου ως μέρος της κεραίας (γείωση)



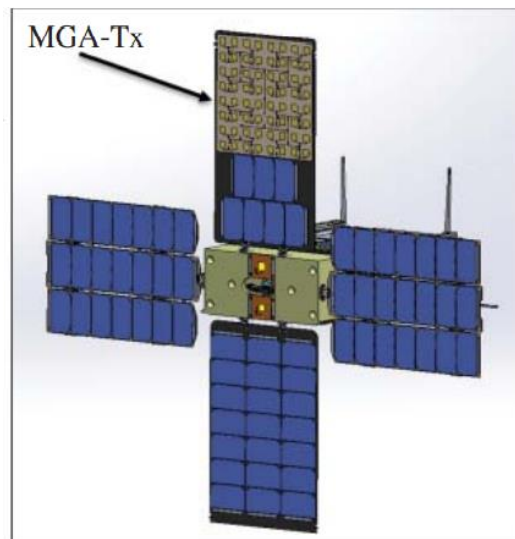
Εικόνα 54: Πλήρως μεταλλική Dual Band RHCP X-Band 8x8 Patch Array [3]

4.6.4.4. X-Band 8x8 Patch Array – (NeaScout, Biosentinel, CuSP)

Για τις αποστολές των CubeSat NeaScout, Biosentinel, CuSP χρησιμοποιήθηκαν patch array κεραίες, διάταξης 8x8, με κυκλική πόλωση και κέρδος 23.4dBic. Πιο συγκεκριμένα η κεραία του NeaScout είναι ενσωματωμένη σε επεκτεινόμενη βάση από ανθρακονήματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο NeaScout δορυφόρος χρησιμοποιεί 2 patch για ξεχωριστή εκπομπή και λήψη στις δύο αντίθετες πλευρές του δορυφόρου (συνολικά 4 patch κεραίες χαμηλού κέρδους και μια 8x8 patch array)



Εικόνα 55: NeaScout X-Band 8x8 Patch Array [3]



Εικόνα 56: NeaScout X-Band 8x8 Patch Array με μηχανισμό επέκτασης

4.7.Κεραίες Ανακλαστήρα

Οι περισσότεροι Cubesat δορυφόροι είναι χαμηλής τροχιάς και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο μικρές κεραίες χαμηλού κόστους, βάρους και όγκου όπως δίπολα και patch. Η τεχνολογική εξέλιξη των CubeSat δημιουργεί νέες δυνατότητες για αποστολές στο διάστημα (Deep Space), αλλά παράλληλα αυξάνονται οι απαιτήσεις του συστήματος τηλεπικοινωνιών. Για τις αποστολές στο διάστημα το σύστημα τηλεπικοινωνιών λειτουργεί στις ζώνες συχνοτήτων X ή Ka για να υποστηρίξουν το δίκτυο της NASA (NASA Deep Space Network). Επίσης, ένα τέτοιο σύστημα απαιτεί κεραία υψηλού κέρδους και κατευθυντικότητας.

Οι κεραίες με ανακλαστήρα είναι η πιο διαδεδομένη επιλογή στις περιπτώσεις που απαιτείται υψηλό κέρδος και κατευθυντικότητα, ενώ εξακολουθεί να είναι η βασική επιλογή για τους επίγειους σταθμούς. Η ανάκλαση του σήματος γίνεται με την χρήση παθητικών παραβολικών κάτοπτρων, τοποθετημένα σε διάφορες διατάξεις (μονό παραβολικό κάτοπτρο, Gassegrainian, Gregorian), όπου επικεντρώνουν την ακτινοβολία στο σημείο τροφοδοσίας (συνήθως σε χοανοκεραία). Το κέρδος των κεραιών εξαρτάται άμεσα από την διάμετρο του ανακλαστήρα. Έτσι, τέτοιες κεραίες μπορούν να πετύχουν υψηλό κέρδος και χαμηλό κόστος, με βασικό μειονέκτημα τον μεγαλύτερο όγκο. Ο όγκος που απαιτείται συνήθως δεν είναι σημαντικός παράγοντας για επίγειους σταθμούς, αλλά για δορυφόρους και συγκεκριμένα CubeSats, η εγκατάστασή τους είναι ιδιαίτερα περίπλοκη ή και αδύνατη. Σε κάθε περίπτωση, η εγκατάσταση κεραιών ανακλαστήρα απαιτούν κάποιου είδους μηχανισμού επέκτασης. Ο βασικός λόγος που οι κεραίες ανακλαστήρα είναι σπάνιες επιλογές για CubeSat είναι ότι το βάρος της κεραίας με τον μηχανισμό της, αποτελεί ένα μεγάλο ποσοστό του συνολικού βάρους και όγκου του δορυφόρου. Επίσης ο μηχανισμός επέκτασης είναι ένα ευάλωτο σημείο του δορυφόρου, ο οποίος μπορεί να δυσλειτουργήσει και να προκαλέσει σημαντική υποβάθμιση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας της κεραίας ή ακόμη και να μην αναπτυχθεί καθόλου, καθιστώντας αδύνατη την χρήση της κύριας κεραίας.

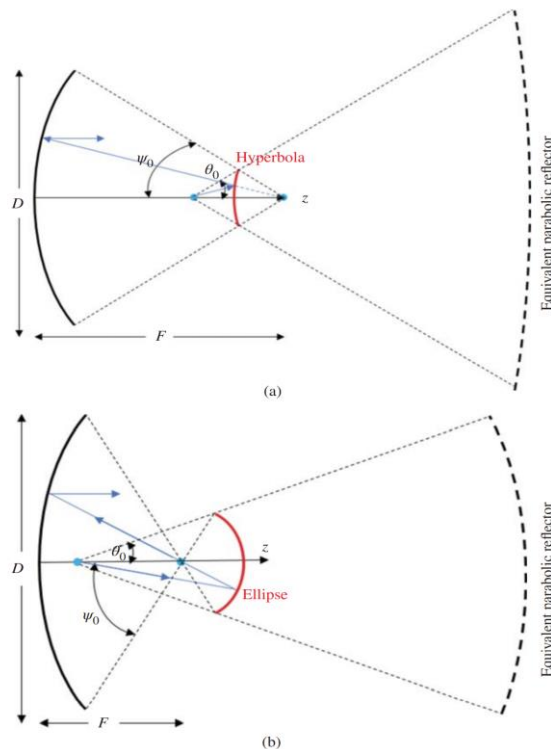
Οι κεραίες ανακλαστήρα έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν με επιτυχία σε μεγάλους δορυφόρους, όπως δορυφόρους τηλεπικοινωνιών, αναμετάδοσης, τηλεανίχνευσης (remote sensing), αποστολές του διαστήματος κ.α. (πχ Mars Reconnaissance Orbiter). Αυτά τα σχέδια όμως δεν μπορούν να προσαρμοστούν στους σημαντικά μικρότερους CubeSat δορυφόρους.



Εικόνα 57:Κεραία 12 μέτρων με ανακλαστήρα πλέγματος - NASA-ISRO SAR

4.7.1. Μηχανικά Χαρακτηριστικά

Οι κεραίες ανακλαστήρα επικεντρώνουν την ακτινοβολία από μια πηγή προς το ενεργό στοιχείο με χρήση παραβολικού κάτοπτρου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και με δύο ανακλαστήρες σε γεωμετρίες Cassegrain ή Gregorian. Το μέγεθος του παραβολικού κάτοπτρου εξαρτάται από τις απαιτήσεις της αποστολής του κάθε δορυφόρου.



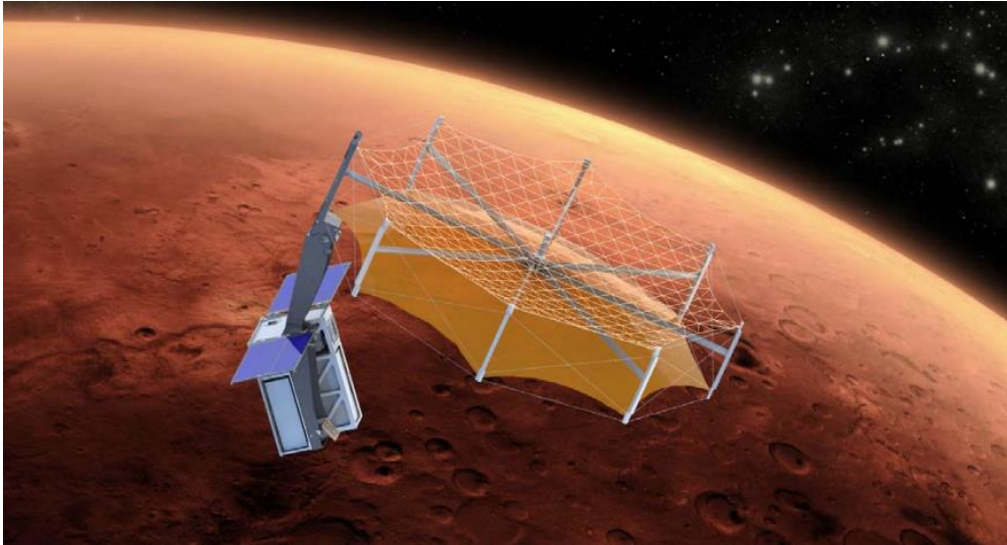
Εικόνα 58: a) Cassegrain b) Gregorian [3]

Ο ανακλαστήρας ιδανικά θα ήταν πλήρως μεταλλικός (ή άλλο αγωγίμο υλικό όπως ανθρακονήματα) σχηματίζοντας ένα τέλειο παραβολικό κάτοπτρο και θα ανακλά πλήρως την ακτινοβολία στις ζητούμενες συχνότητες. Όμως, ένα παραβολικό κάτοπτρο που δεν μπορεί να διπλώσει, δεν θα ήταν κατάλληλο για μικρούς δορυφόρους. Έτσι, η κατασκευή του ανακλαστήρα γίνεται με μεταλλικά πλέγματα ή πάνελ όπου μπορούν να διπλώσουν μέσα σε έναν περιορισμένο χώρο και να αναπτυχθούν όταν ο δορυφόρος μπει σε τροχιά. Επίσης, έχουν γίνει μελέτες για φουσκωτούς ανακλαστήρες, οι οποίοι προσφέρουν πολύ μεγάλο ποσοστό σμίκρυνσης και πολύ χαμηλότερο βάρος και κόστος σε σχέση με παραβολικά κάτοπτρα με μηχανισμούς [46][47]. Οι φουσκωτοί ανακλαστήρες είναι μια ιδιαίτερη προσέγγιση για την δημιουργία κεραιών υψηλού κέρδους για CubeSats, αλλά παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα όπως διαρροές, σχισίματα, ατέλειες στην επιφάνεια του υλικού και μεγάλους πλευρικούς λοβούς ακτινοβολίας.

Τα υλικά της κεραίας θα πρέπει να έχουν καλές μηχανικές αντοχές και καλές επιδόσεις ανάκλασης ακτινοβολίας. Οι μηχανισμοί των παραβολικών κάτοπτρων αποτελούνται από πολλά μηχανικά κινούμενα μέρη, με αποτέλεσμα να είναι πιο ευάλωτες σε εξωτερικές δυνάμεις. Η κεραία και ο μηχανισμός της θα πρέπει να αντέξει τις δυνάμεις επιτάχυνσης, τις έντονες δονήσεις και τις διαφορές θερμοκρασίας που θα της ασκηθούν κατά την εκτόξευση. Θα πρέπει επίσης να παραμείνει στην αναμενόμενη θέση μέσα στον δορυφόρο και τέλος να αναπτυχθεί δημιουργώντας το παραβολικό κάτοπτρο με μεγάλη ακρίβεια. Η κεραία θα πρέπει να είναι κατασκευασμένη από υλικά ανθεκτικά στις μεγάλες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και στην έντονη ακτινοβολία του διαστήματος. Επίσης, εάν η κεραία χρησιμοποιηθεί σε χαμηλή τροχιά θα πρέπει να είναι ανθεκτική στην διάβρωση από το ατομικό οξυγόνο. [48].

Το παραβολικό κάτοπτρο μπορεί να έχει διάφορα σχήματα για να μπορέσει να προσαρμοστεί σε περιορισμένο χώρο, αλλά συνήθως είναι στρογγυλά. Το ενεργό στοιχείο της κεραίας μπορεί να βρίσκεται είτε στον ίδιο άξονα με το παραβολικό κάτοπτρο ή να βρίσκεται υπό γωνία (offset-fed reflector). Το πλεονέκτημα των κεραιών με offset-feed, είναι ότι το ενεργό στοιχείο δεν εμποδίζει την ακτινοβολία που ανακλάται στο παραβολικό κάτοπτρο και δεν προκαλεί σκέδαση που σήματος [48].

Ο τρόπος κατασκευής του παραβολικού κάτοπτρου χωρίζεται πρακτικά σε τρεις κατηγορίες. Η κατασκευή με μηχανισμό ομπρέλας, οι ανακλαστήρες πλέγματος και μπαλονιού. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των κατόπτρων ομπρέλας, πλέγματος και μπαλονιού αναλύονται στην παράγραφο με τα παραδείγματα.

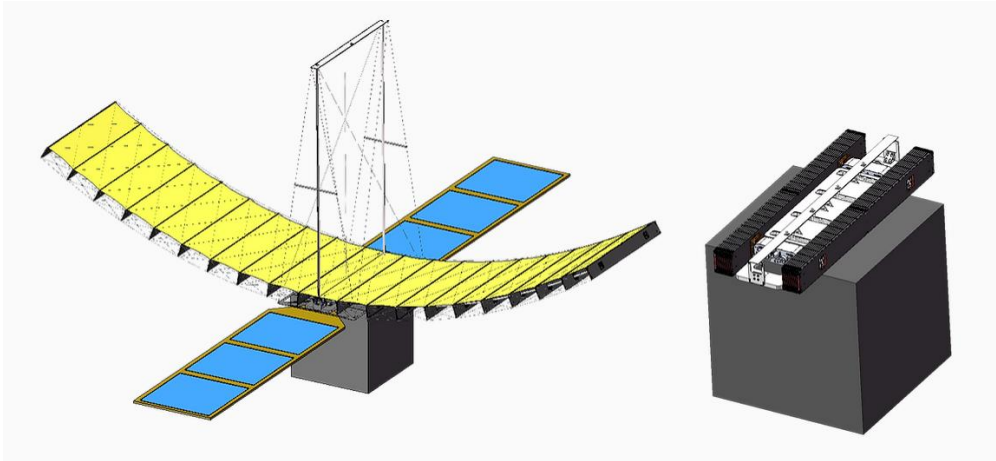


Εικόνα 59: Απεικόνιση κεραία ανακλαστήρα πλέγματος 1 μέτρου για 12U CubeSats

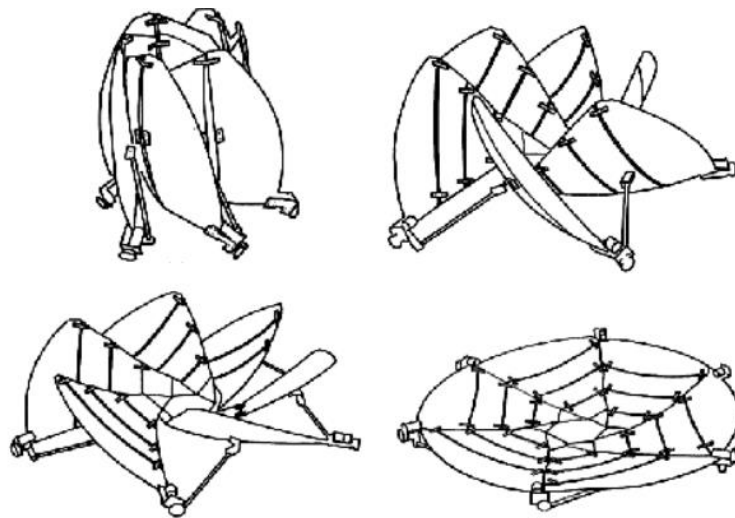


Εικόνα 60: Κεραία ανακλαστήρα πλέγματος του 6U CubeSat RainCube

Αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιούνται και άλλοι μηχανισμοί αναδίπλωσης σε διαστημικές αποστολές, όπως γραμμική επέκταση ή αναδίπλωση στερεών επιφανειών (Εικόνα 30 και 31), αλλά δεν έχει χρησιμοποιηθεί κάτι παρόμοιο σε μικρό δορυφόρο, λόγω του μεγαλύτερου απαιτούμενου όγκου.



Εικόνα 61: TENSAR High Aspect Ratio SAR κεραία με στερεά πάνελ



Εικόνα 62: Διαδικασία αναδίπλωσης παραβολικού κατόπτρου με στερεές επιφάνειες

4.7.2. Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας

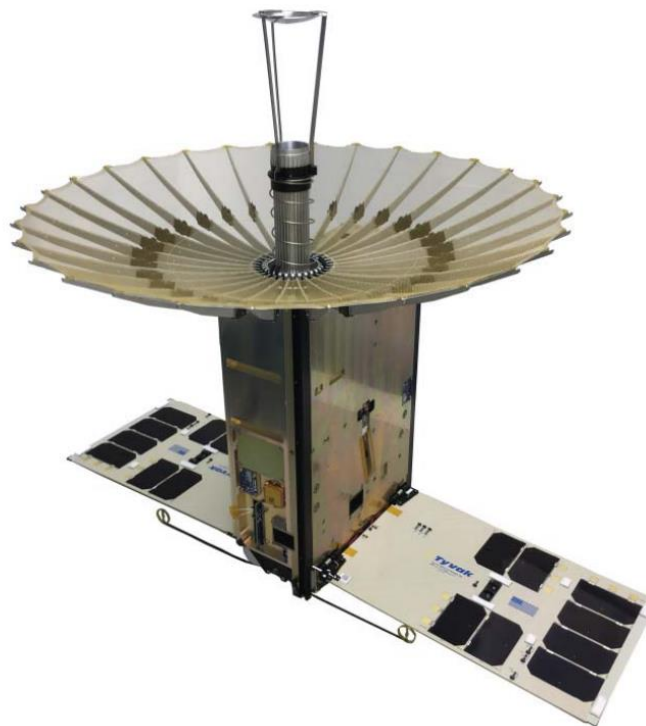
Τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας μιας κεραίας ανακλαστήρα εξαρτώνται κυρίως από το μέγεθος και την ακρίβεια κατασκευής του παραβολικού κάτοπτρου. Σε αυτές τις κεραίες υπάρχουν απώλειες όπως taper, spillover, φάσης, τροφοδοσίας και πόλωσης, που αφορούν κυρίως την επιλογή του ενεργού στοιχείου. Επίσης υπάρχουν απώλειες από την παρεμπόδιση ακτινοβολίας από τον υποανακλαστήρα ή άλλα μέρη κατασκευής (πχ. στηρίγματα), την ακρίβεια της επιφάνειας του ανακλαστήρα και τις ιδιότητες του πλέγματος. Για την κατασκευή ενός ανακλαστήρα θα πρέπει να γίνουν συμβιβασμοί μεταξύ βάρους, την ακρίβεια της επιφάνειας και την περιπλοκότητα του συστήματος. Οι μηχανισμοί αναδίπλωσης του ανακλαστήρα προσθέτουν ατέλειες στην επιφάνειά του, προκαλώντας απώλειες λόγω σκέδασης, περίθλασης ή διαφορά φάσης. Αυτές οι ατέλειες γίνονται πιο σημαντικές όσο αυξάνεται η συχνότητα της κεραίας.

Έχουν σχεδιαστεί κεραιές ανακλαστήρα σε συχνότητες S-Band έως Ka Band [49] [50] [51]. Αυτές οι κεραιές προσφέρουν υψηλό κέρδος και κατευθυντικότητα που κυμαίνεται από 18dBi έως 49.2dBi [52] για συχνότητες από S-Band έως Ka-Band αντίστοιχα. Οι μόνες άλλες επιλογές κεραιών με τόσο υψηλό κέρδος είναι οι Reflect Array και Transmit Array, αλλά οι κεραιές με ανακλαστήρα πλέγματος είναι πιο αποδοτικές και είναι λιγότερο ευαίσθητες στη θερμικές διακυμάνσεις.

4.7.3. Παραδείγματα

4.7.3.1. RainCube

Για τον RainCube 6-U CubeSat δορυφόρο αναπτύχθηκε μια κεραία Cassegrain ανακλαστήρα πλέγματος διαμέτρου 0.5m για τις λειτουργίες RADAR στη ζώνη συχνοτήτων Ka (35.75GHz), με κέρδος 42dBi, 52% αποδοτικότητα και κυκλική πόλωση. Η κεραία χρησιμοποιεί τον μηχανισμό «ομπρέλας» και καταλαμβάνει λιγότερο από 1.5U στον δορυφόρο με βάρος 1.5kg.



Εικόνα 63: Δορυφόρος RainCube με κεραία ανακλαστήρα πλέγματος σε αναπτυγμένη θέση

Η κεραία αποτελείται από έναν κεντρικό σταθερό άξονα και γύρω από αυτόν ξεδιπλώνεται το πλέγμα με την χρήση 30 πτυσσόμενων υποαξόνων (folding ribs). Στον κεντρικό άξονα στηρίζεται ο δεύτερος ανακλαστήρας πάνω σε τρεις στιβαρούς μεταλλικούς ράβδους, όπου

κατευθύνει την ακτινοβολία στο ενεργό στοιχείο τύπου multiflare horn. Το μεταλλικό πλέγμα βασίζεται πάνω στους υποάξονες, οι οποίοι με χρήση ελατηρίων ασκούνε συνεχόμενα δύναμη στο πλέγμα «τεντώνοντάς» το για να προσαρμοστεί στο κατάλληλο σχήμα και να παραμένει σταθερό. Όλα αυτά τα μέρη της κεραίας κινούνται γραμμικά πάνω στον βασικό άξονα. Όταν χρειαστεί να αναπτυχθεί η κεραία, ενεργοποιείται μηχανισμός με γρανάζια (sun gear) όπου ανεβάζει προς τα επάνω την κεραία, η οποία αναδιπλώνεται από την δύναμη των ελατηρίων.



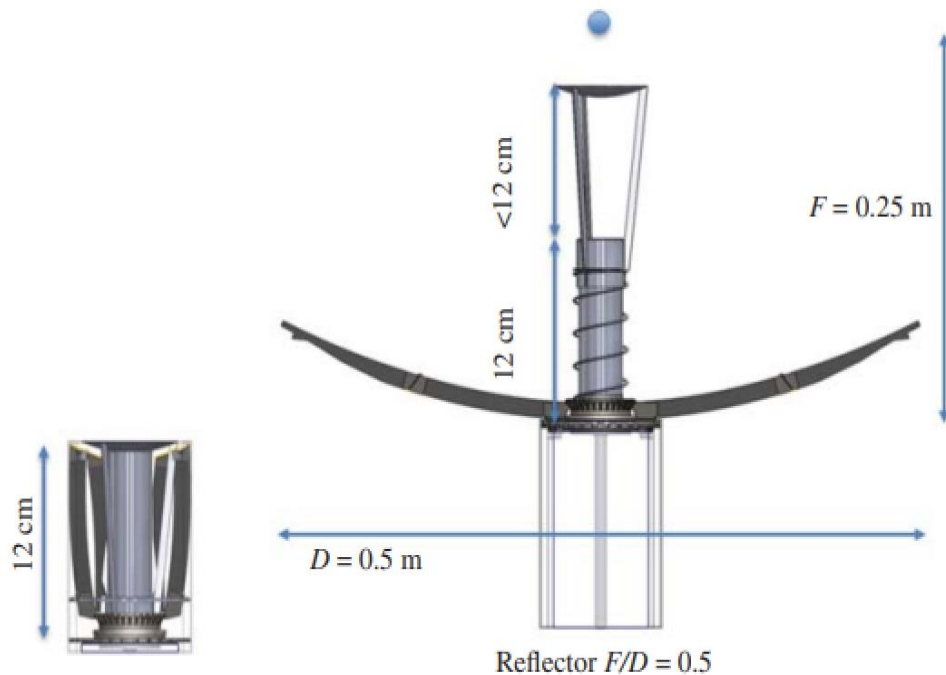
Εικόνα 64: Διαδικασία ανάπτυξης της κεραίας

Ένας τέτοιος μηχανισμός έχει δύο βασικούς περιορισμούς. Ο πρώτος περιορισμός προκύπτει από τον λόγο f/D , καθώς η καμπύλη του ανακλαστήρα θα πρέπει είναι τέτοια ώστε να μπορεί να χωρέσει μέσα στο θάλαμο. Για έναν ανακλαστήρα διαμέτρου 0.5m υπολογίστηκε ελάχιστος λόγος f/D 0.5. Ο δεύτερος περιορισμός είναι ότι για να γίνει η επέκταση του υποανακλαστήρα με έναν μηχανισμό, το ύψος του υποανακλαστήρα θα εξαρτάται από το ύψος του θαλάμου αποθήκευσης και τον χώρο που καταλαμβάνει ο μηχανισμός ανάπτυξης. Ο σχεδιασμός σε Cassegrainian γεωμετρία είναι ο μοναδικός τρόπος κατασκευής με έναν μηχανισμό ανάπτυξης, σύμφωνα με τους συγκεκριμένους μηχανικούς περιορισμούς. Το μειονέκτημα αυτής της γεωμετρίας είναι ότι εμποδίζεται ένα μέρος της ακτινοβολίας από τον δευτερεύοντα ανακλαστήρα. Ο βέλτιστος λόγος d_{sub}/D δίνεται από την παρακάτω εξίσωση του Sudhakar Rao [53]:

$$\left(\frac{d_{sub}}{D}\right)_{opt} = \left[\frac{1}{16\pi^2} \frac{\lambda}{D} C^2 \right]^{\frac{1}{5}}$$

όπου C είναι η μέση κωνικότητα (taper) του πλάτους στην άκρη του υποανακλαστήρα και d_{sub} η διάμετρος του υποανακλαστήρα.

Ο λόγος d_{sub}/D θα πρέπει να είναι χαμηλός ώστε να εμποδίζεται λιγότερη ακτινοβολία.



Εικόνα 65: Διαστάσεις και γεωμετρία της κεραίας σε αποθηκευμένη και αναπτυγμένη μορφή

Η κεραία τροφοδοσίας αποτελείται από την multiflare χοανοκεραία και έναν τηλεσκοπικό κυματοδηγό. Προσφέρει χαμηλές απώλειες taper και XPD με ελάχιστο taper -10dB στις 15.5°. Η αποδοτικότητα ενός ιδανικού ανακλαστήρα εξαρτάται από τον λόγο f/D και το edge taper της κεραίας τροφοδοσίας και υπολογίζεται ως $\eta = \eta_t * \eta_s$, όπου η_t και η_s οι τιμές αποδοτικότητα taper και spillover αντίστοιχα.

Ένα σημαντικό μέρος του μηχανισμού είναι οι τρεις βραχίονες από ανοξείδωτο ατσάλι που στηρίζουν τον δευτερεύοντα ανακλαστήρα. Οποιαδήποτε απόκλιση των βραχιόνων θα επηρεάσει το συνολικό κέρδος, την σταυροπόλωση και τους πλευρικούς λοβούς ακτινοβολίας.

Ο ανακλαστήρας μηχανισμού ομπρέλας αποτελείται από τους 30 βραχίονες που στερεώνουν το μεταλλικό πλέγμα. Έτσι δημιουργούνται 30 διαφορετικές επιφάνειες οι οποίες όμως δεν έχουν την απαραίτητη καμπυλότητα ενός ιδανικού παραβολικού ανακλαστήρα. Για να βελτιωθεί η ακρίβεια του σχήματος θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περισσότεροι βραχίονες, αλλά κάτι τέτοιο θα αύξανε το βάρος και τον όγκο της κεραίας, ενώ στην περίπτωση που ο ανακλαστήρας κατασκευαζόταν με λιγότερο από 10 βραχίονες, η αποδοτικότητα θα μειωνόταν σημαντικά.

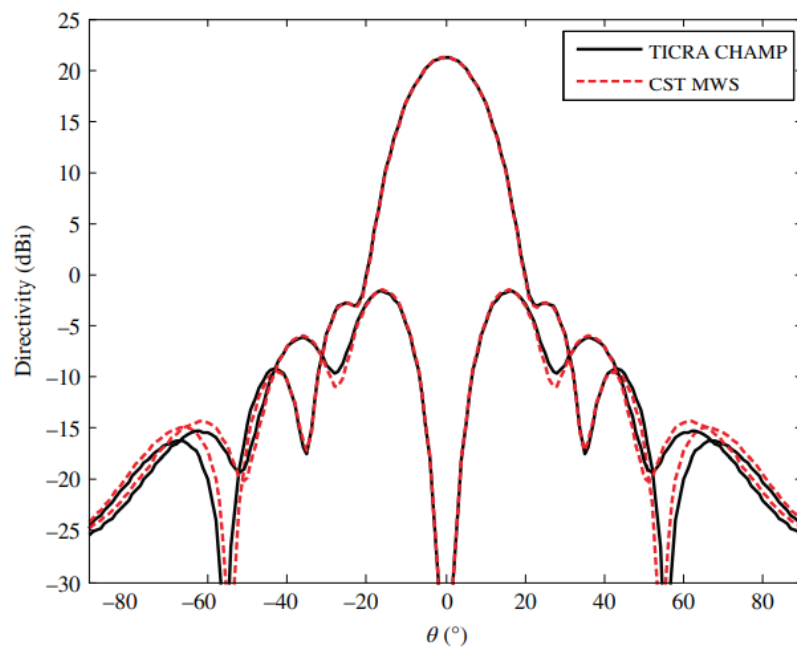
Το πλέγμα του ανακλαστήρα που χρησιμοποιήθηκε είχε 40 ανοίγματα ανά ίντσα (OPI – openings per inch) και ήταν κατασκευασμένο από επιχρυσωμένο σύρμα βολφραμίου διαμέτρου 0.0008”. Η επιλογή του αριθμού OPI σχετίζεται με την συχνότητα λειτουργίας της κεραίας (Ku-Band), όπου ένα πιο πυκνό πλέγμα θα προσφέρει λιγότερες απώλειες, ειδικά για υψηλότερες συχνότητες.

Η ακρίβεια της επιφάνειας είναι κρίσιμο χαρακτηριστικό για αυτές τις συχνότητες. Κεραία με συχνότητα λειτουργίας σε ζώνες X-band ή S-band δεν επηρεάζονται τόσο έντονα από

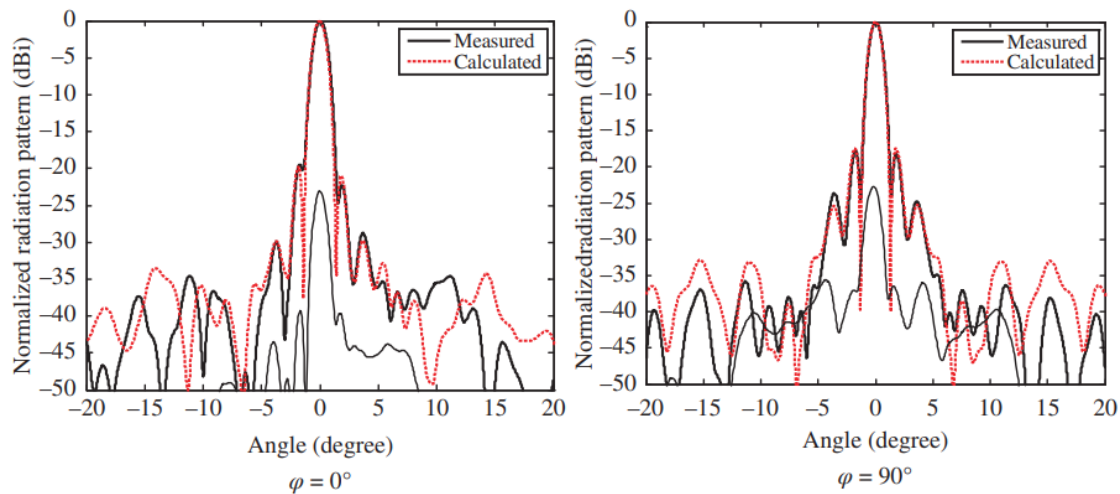
ανακρίβειες ενός ανακλαστήρα. Για μια επιφάνεια με RMS 0.2mm υπολογίζεται απώλεια κέρδους 0.39dB στα 35.75GHz σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση του Ruze.

$$Loss = 10 \cdot \log_{10} e^{-\left(\frac{4\pi\varepsilon}{\lambda_0}\right)^2}$$

όπου ε είναι το σφάλμα RMS του ανακλαστήρα και λ_0 το μήκος κύματος στο κενό. Για να επιτευχθεί η ακρίβεια 0.2mm οι αναδιπλούμενοι βραχίονες παραμένουν σταθεροί στην πλήρως αναπτυγμένη θέση, καθώς δέχονται συνεχόμενη δύναμη από τους μεντεσέδες και τα ελατήρια. Έτσι, διάφορες ανακρίβειες στην κατασκευή και στην συναρμολόγηση δεν θα επηρεάσουν ιδιαίτερα το τελικό σχήμα.



Διάγραμμα 3: Διάγραμμα ακτινοβολίας της χοανοκεραίας (feed) με $\varphi = 45^\circ$



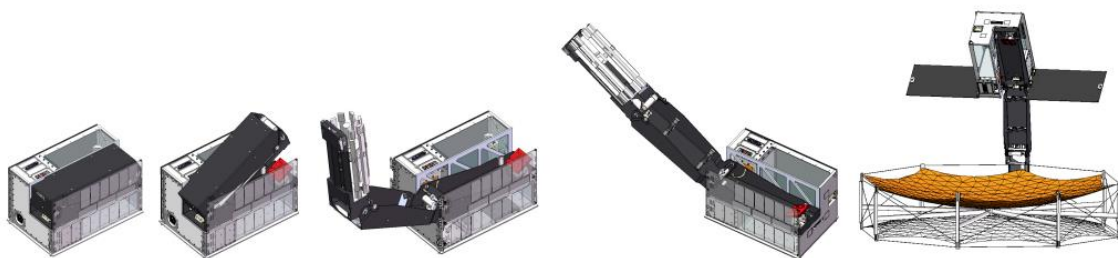
Διάγραμμα 4: Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας RainCube, με κέρδος συνολικό κέρδος 42.62dBi στη συχνότητα 35.75GHz.

	Gain (dBi)	Loss (dB)	Peak SLL (dB)
Ideal directivity	45.45	—	—
Spillover + Taper	44.3	1.15	23.1
Blockage	43.97	0.33	22.1
Surface ribs (30)	43.90	0.07	20.7
Struts	43.60	0.3	17.7
Surface mesh* (40 OPI)	43.35	0.25	17.4
Surface accuracy** (±0.22 mm)	42.88	0.47	16.8
Feed loss / telescoping waveguide / transition	42.76	0.12	—
Feed mismatch (RL = 15 dB)	42.62	0.14	—
Overall performance	42.62	2.83	16.8

Πίνακας 6: Πίνακας κέρδους και απωλειών της κεραίας παραβολικού ανακλαστήρα πλέγματος σε συχνότητα 35.75GHz

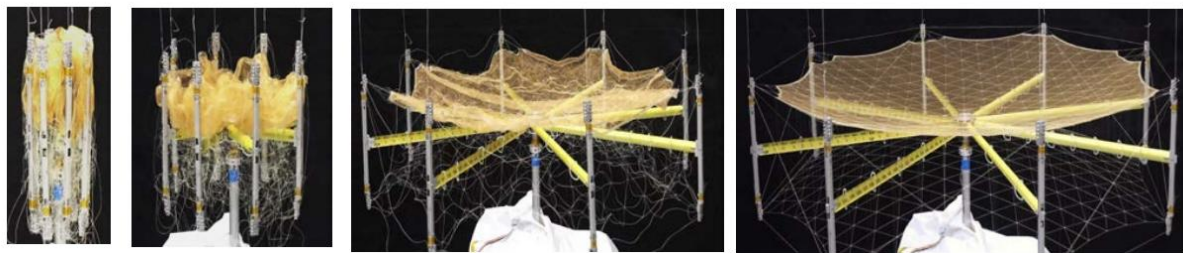
4.7.3.2. One-Meter Deployable Mesh Reflector

Στην ερέυνα [50] προτείνεται η κεραία ανακλαστήρα πλέγματος με μηχανισμό ανάπτυξης, διάμετρο ένα μέτρο, βάρος 2.5kg και συνολικό μέγεθος 3U. Η κεραία σχεδιάστηκε για 12U δορυφόρους και με προδιαγραφές για το Deep-Space-Network (DSN) της NASA στις ζώνες συχνοτήτων X-Band ή Ka-Band με κέρδος μεγαλύτερο από 36.1dBic και 48.4dBic αντίστοιχα. Το σχέδιο της κεραίας μπορεί να προσαρμοστεί και σε διάμετρο μεγαλύτερη του ενός μέτρου και να γίνει χρήση διάφορων κεραιών στην τροφοδοσία (Feed), αναλόγως τις απαιτήσεις και την συχνότητα.

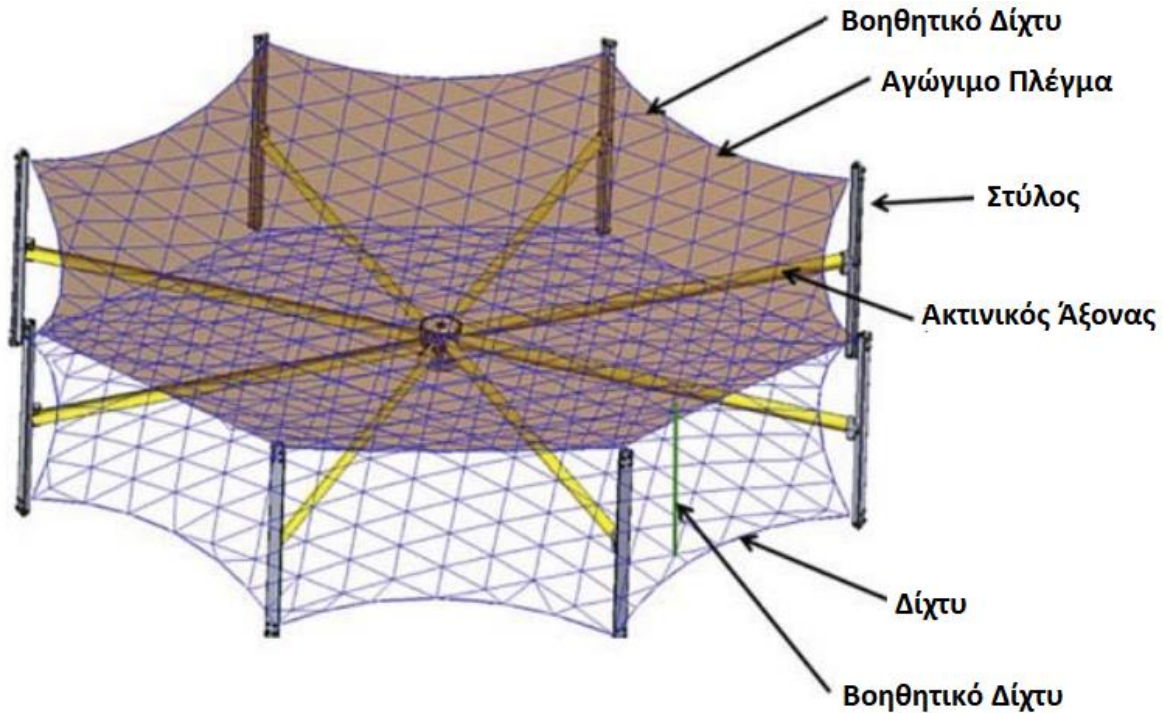


Εικόνα 66: Στάδια επέκτασης της κεραίας ανακλαστήρα 1μ [3]

Το feed της κεραίας παραμένει στο σώμα του δορυφόρου, ενώ επέκταση του ανακλαστήρα γίνεται με έναν κύριο βραχίονα. Στη συνέχεια η ανάπτυξη του παραβολικού πλέγματος γίνεται με οχτώ περιμετρικούς και διαμετρικούς βραχίονες, ο οποίοι επεκτείνονται και ασκούν δύναμη σε ένα βοηθητικό δίκτυο, τεντώνοντας το πλέγμα του ανακλαστήρα και δημιουργώντας το τελικό παραβολικό σχήμα.



Εικόνα 67: Διαδικασία αναδίπλωσης του πλέγματος [54]



Εικόνα 68: Κατασκευή κεραίας ανακλαστήρα πλέγματος - Tendeg Katenna [54]

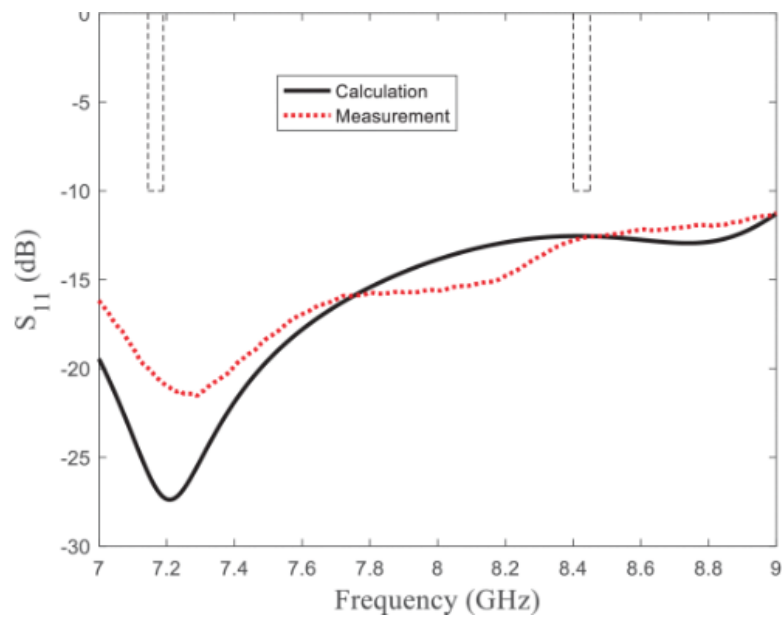
Γενικά οι ανακλαστήρες μπορούν να κατασκευαστούν με σταθερές επιφάνειες με καλή ακρίβεια, αλλά σε αυτό το μέγεθος και με τους περιορισμούς του όγκου στους CubeSat. Ένα τέτοιο σχέδιο θα απαιτούσε περίπλοκους και ογκώδεις μηχανισμούς σύνδεσης και ανάπτυξης, όπου το καθιστά μη πρακτικό. Μια άλλη επιλογή η χρήση ελαστικών υλικών όπου διαστέλλονται, διπλώνουν και γενικά διαμορφώνονται αρκετά εύκολα. Τα υλικά αυτά όμως έχουν μειονεκτήματα όπως περιορισμός στην ελαστικότητα σε σχέση με το πάχος, αλλοιώσεις της επιφάνειας από αυξομειώσεις θερμοκρασίας, και αλλοιώσεις από την αποθήκευσή τους για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Οι ανακλαστήρες πλέγματος προσφέρουν μεγάλη προσαρμοστικότητα για διαφορετικές αποστολές, με σχετικά χαμηλό βάρος, σχεδόν διάφανη επιφάνεια για χρήση με φωτοβολταϊκά, χαμηλή οπισθέλκουσα για LEO δορυφόρους, και την επιλογή διαφορετικής «ύφανσης» του πλέγματος με την κατάλληλο OPI (opening per inch) αναλόγως την συχνότητα λειτουργίας και την σταθερότητα που απαιτείται. Το πλέγμα του ανακλαστήρα μπορεί να έχει OPI από 30 έως 40 OPI για τις ζώνες συχνοτήτων από X-Band έως Ka-Band.

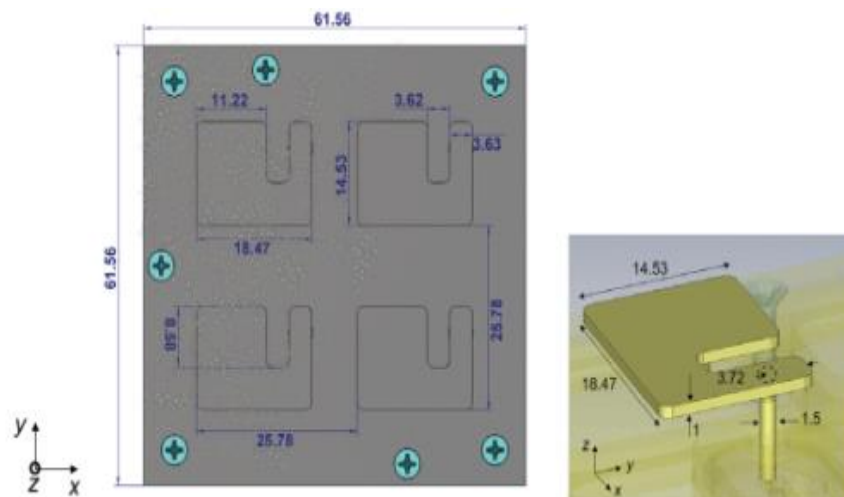
4.7.3.3. X-Band Mesh Reflector

Για την X-Band λειτουργία, σχεδιάστηκε dual band 2x2 patch array feed με LHCP για τη ζώνη X-Band, με uplink 7.145-7.19GHz και downlink 8.4-8.45GHz. Τέτοια κεραία προτάθηκε για την πιθανή αποστολή Europa Lander. Τα στοιχεία της patch κεραίας τροφοδοτούνται από ένα μόνο σημείο (single-fed), απλοποιώντας το δίκτυο τροφοδοσίας, ενώ είναι κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από μέταλλο. Η μέγιστη κατευθυντικότητα της συνολικής κεραίας με διάμετρο ανακλαστήρα ενός μέτρου $D_{\max} = (\pi D/\lambda)^2$ είναι 37.5dBic και 38.9dBic για συχνότητες

7.1675GHz και 8.425GHz αντίστοιχα. Οι απώλειες που προκύπτουν από τα ανοίγματα του πλέγματος (OPI) είναι αμελητέα σε αυτές τις συχνότητες (απώλεια <0.05dB).



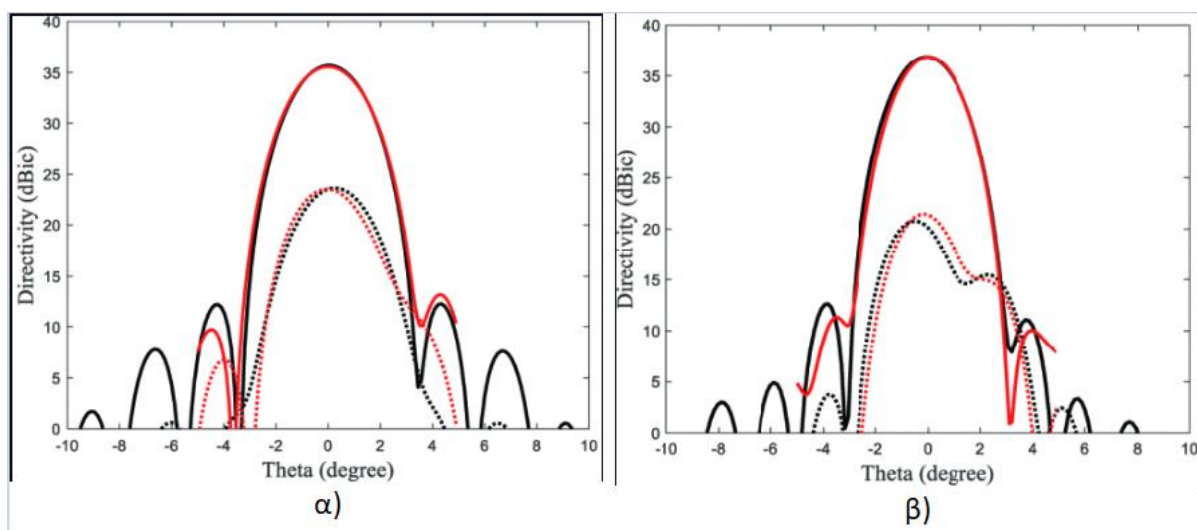
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα S_{11} του X-Band Feed



Εικόνα 69: Γεωμετρία του Dual-Band X-Band feed LHCP (διαστάσεις σε mm)

	Uplink		Downlink	
	Gain (dBic)	Loss (dB)	Gain (dBic)	Loss (dB)
Standard directivity	37.5	—	38.9	—
Taper	37.2	0.3	38.4	0.5
Spillover	36.3	0.9	37.4	1.0
Surface mesh ^a (30 OPI)	36.28	0.02	37.38	0.02
Surface accuracy ^b (± 0.38 mm)	36.22	0.06	37.30	0.08
Feed loss	35.92	0.3	37.00	0.3
Feed mismatch (RL = 15 dB)	35.82	0.1	36.90	0.1
Overall performance	35.82	1.68	36.90	2.00

Πίνακας 7: Κέρδος και απώλειες X-Band mesh reflector



Διάγραμμα 6: Διάγραμμα ακτινοβολίας X-Band κεραία ανακλαστήρα πλέγματος σε συχνότητες α) 7.1675GHz και β) 8.425GHz (προσομοίωση σε μαύρο χρώμα και μετρήσεις σε κόκκινο)

4.7.3.4. Ka-Band

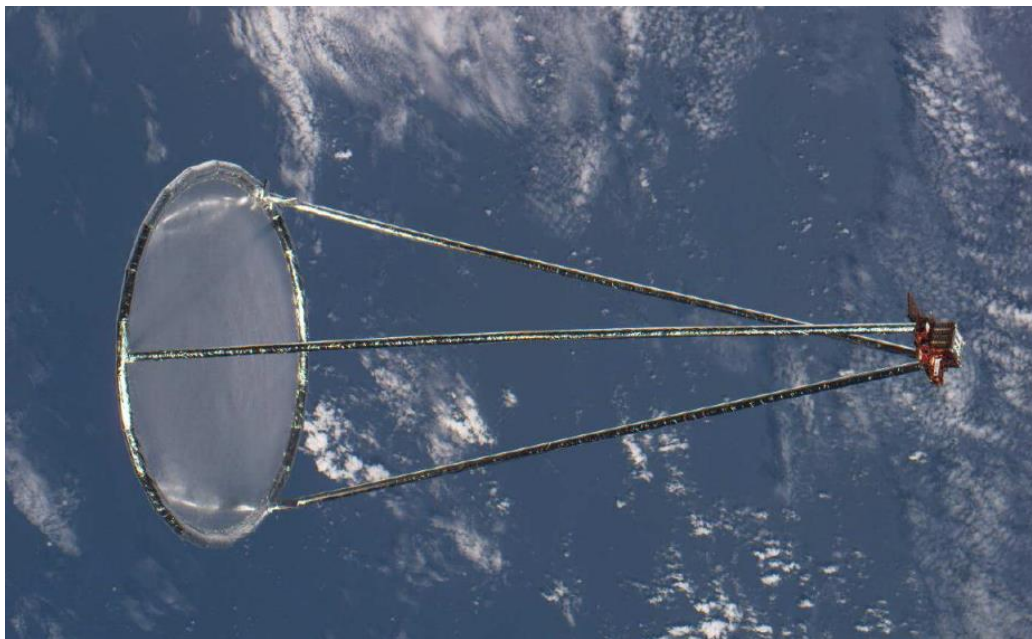
Για τη λειτουργία στη ζώνη Ka-Band σχεδιάστηκε multiflaire χοανοκεραία με χαμηλή σταυροπόλωση και πλευρικούς λοβούς, καλές απώλειες επιστροφής και πολύ καλή κυκλική πόλωση. Οι απώλειες taper και spillover είναι χαμηλότερες σε σχέση με αυτές σε συχνότητες X-Band διότι η χοανοκεραία προσφέρει καλύτερα edge taper χαρακτηριστικά. Οι απώλειες που προκύπτουν από την ομαλότητα της γεωμετρίας και τα ανοίγματα του ανακλαστήρα είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές στην X-Band (απώλειες 1.35dB στα 32GHz). Οι πλευρικοί λοβοί ακτινοβολίας είναι λιγότερο από 20dB και ο αξονικός λόγος μικρότερος από 3dB. Το κέρδος της κεραίας είναι 48.4dBic στην συχνότητα 32GHz με αποδοτικότητα διαφράγματος 62% για διάμετρο ενός μέτρου.

	Gain (dBic)	Loss (dB)
Standard directivity	50.5	-
Taper	49.9	0.6
Spillover	49.5	0.4
Surface mesh* (30OPI)	49.25	0.25
Surface accuracy** ($\pm 0.38\text{mm}$)	48.15	1.1
Feed loss	48.10	0.05
Feed mismatch (RL=15dB)	48.05	0.05
Overall performance	48.05	2.45

Πίνακας 8: Κέρδος και απώλειες mesh reflector Ka-Band με 30 OPI ανακλαστήρα.

4.8. Φουσκωτές Κεραίες

Η ιδέα των φουσκωτών κεραιών υπάρχει εδώ και πολλές δεκαετίες, με μελέτες που ξεκινήσανε από το 1950, αλλά χρησιμοποιήθηκαν σε ελάχιστες αποστολές [55][56]. Οι κεραίες αυτές έχουν την δυνατότητα να αποθηκευτούν σε πολύ μικρό χώρο ($<1U$), με χαμηλό βάρος και χαμηλό κόστος.



Εικόνα 70: Πειραματική φουσκωτή κεραία 14μ του δορυφόρου STS-77 -1996 [45]

4.8.1. Μηχανικά Χαρακτηριστικά

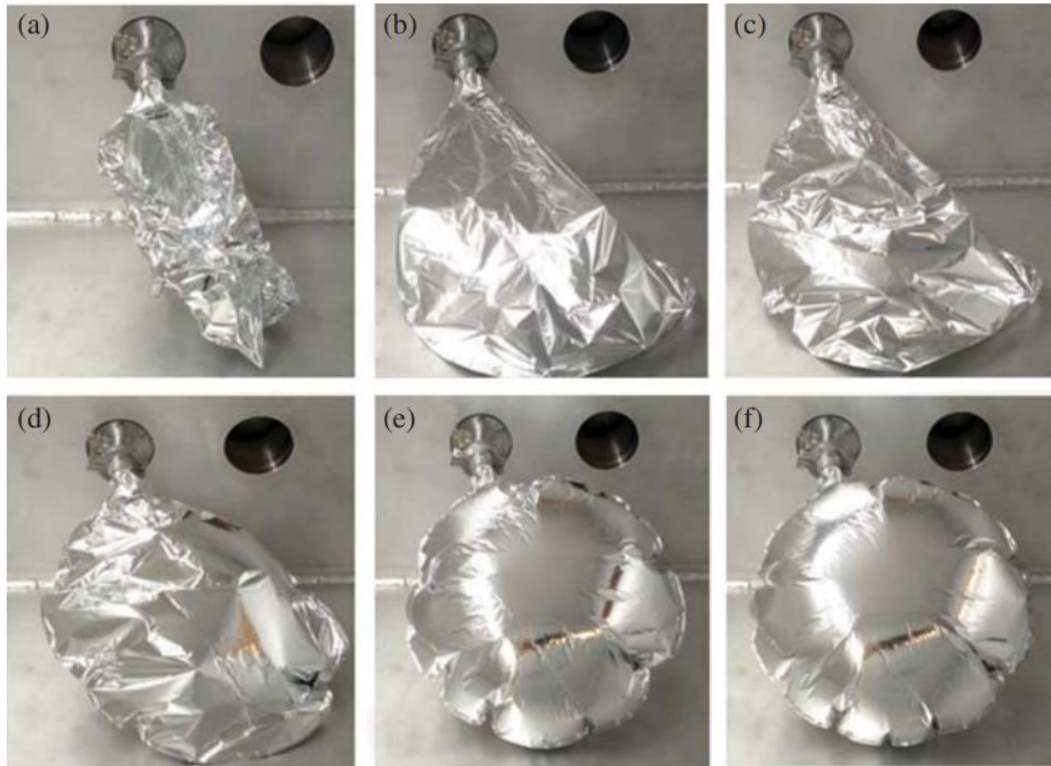
Ο φουσκωτός ανακλαστήρας μπορεί να κατασκευαστεί συνδυάζοντας διάφανο και αγώγιμο ανακλαστικό Mylar. Το ανακλαστικό μέρος του Mylar έχει επίστρωση αλουμινίου και δρα ως ο ανακλαστήρας της κεραίας, ενώ το υπόλοιπο μέρος του «μπαλονιού» παραμένει διάφανο χωρίς να εμποδίζει την ακτινοβολία στη συχνότητα λειτουργίας της κεραίας. Δεν έχουν κατασκευαστεί πολλές φουσκωτές κεραίες στο παρελθόν και τα δεδομένα για την σχεδιάσή τους είναι περιορισμένα. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά αναφέρονται πιο αναλυτικά στα παραδείγματα του κεφαλαίου λόγω της διαφορετικής προσέγγισης σχεδιάσής τους.

4.8.2. Χαρακτηριστικά Ακτινοβολίας

Οι φουσκωτές κεραίες προσπαθούν να πετύχουν παρόμοια χαρακτηριστικά ακτινοβολίας με τις κεραίες παραβολικών κατόπτρων. Οι ατέλειες στην επιφάνεια του φουσκωτού ανακλαστήρα μειώνει σημαντικά το κέρδος. Η προσομοίωση των επιδόσεων και των διαγραμμάτων ακτινοβολίας είναι αρκετά περίπλοκα και μπορεί να έχουν αρκετά μεγάλες αποκλίσεις από τις πραγματικές επιδόσεις. Μπορούν να προσφέρουν κέρδος μεγαλύτερο από 30dBi για ανακλαστήρα διαμέτρου ενός μέτρου ή μεγαλύτερο, αλλά εξαρτάται από τον τρόπο υλοποίησης.

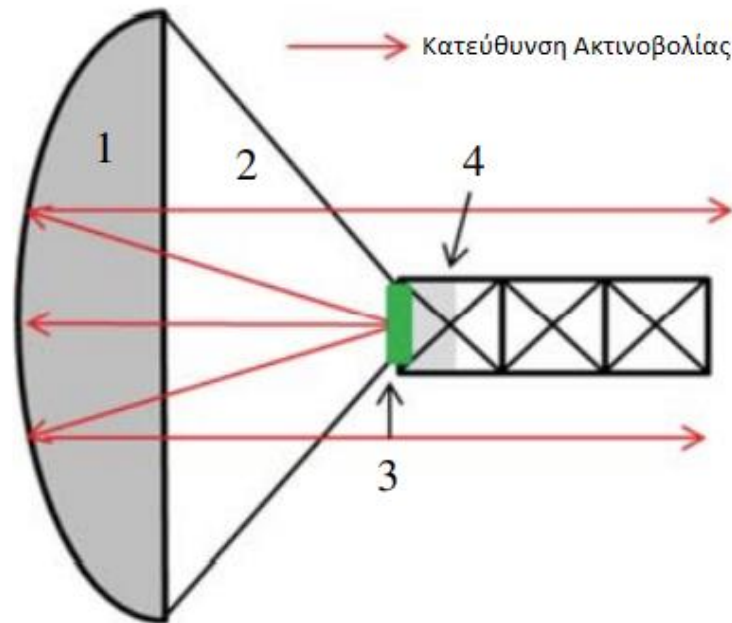
4.8.3. Παραδείγματα

Σε προηγούμενες μελέτες, ο μηχανισμός φουσκώματος γίνεται με την προσθήκη αερίου στο μπαλόνι, όπως άζωτο [56]. Αυτός ο τρόπος φουσκώματος είναι ευάλωτος σε διαρροές, που μπορούν να δημιουργηθούν από διάφορες αιτίες, όπως μικρές τρύπες από ατέλειες της κατασκευής ή σχισίματα που προκαλούνται από μικροσωματίδια τους διαστήματος. Μια εναλλακτική τεχνική θα μπορούσε να χρησιμοποιεί αφρό δύο συστατικών, που μπορεί να επεκταθεί και να γεμίσει το μπαλόνι. Ένα τέτοιο σύστημα θα ήταν ανθεκτικό σε διαρροές αλλά η εγκατάσταση σε έναν μικρό CubeSat με δοχεία υπό πίεση, θα ήταν δύσκολη και ίσως επικίνδυνη [57]. Σε πιο πρόσφατες μελέτες, προτείνουν την χρήση σκόνης εξάχνωσης (βενζοϊκό οξύ), το οποίο είναι παθητικό σύστημα και δεν απαιτεί κάποιο δοχείο αποθήκευσης. Η σκόνη αποθηκεύεται μέσα στην κεραία και εξαχνώνεται όταν απελευθερωθεί η κεραία. Η τεχνική αυτή εκμεταλλεύεται την χαμηλή ενθαλπία σε περιβάλλον με χαμηλές πιέσεις (κενό διαστήματος) και επιτρέπει να διατηρείται αυτόνομα η ισορροπία πίεσης του συστήματος, με μέγιστη πίεση 10^{-3} Torr. Η πίεση του μπαλονιού, ενώ είναι σχετικά χαμηλή, είναι αρκετή να φουσκώσει και να διατηρήσει σωστά το σχήμα του μπαλονιού. Επιπλέον, μπορεί να καλύψει διαφορές πίεσης που μπορεί να προκληθούν από μικροδιαρροές. Υπολογίζεται ότι περίπου 1γρ βενζοϊκού οξέως είναι αρκετό να διατηρήσει την κεραία φουσκωμένη στην μέγιστη πίεση για περισσότερο από έναν χρόνο [58], αλλά χρειαζόμαστε περισσότερες μελέτες για να προβλέψουμε με καλύτερη ακρίβεια την συμπεριφορά της κεραίας στο διάστημα.



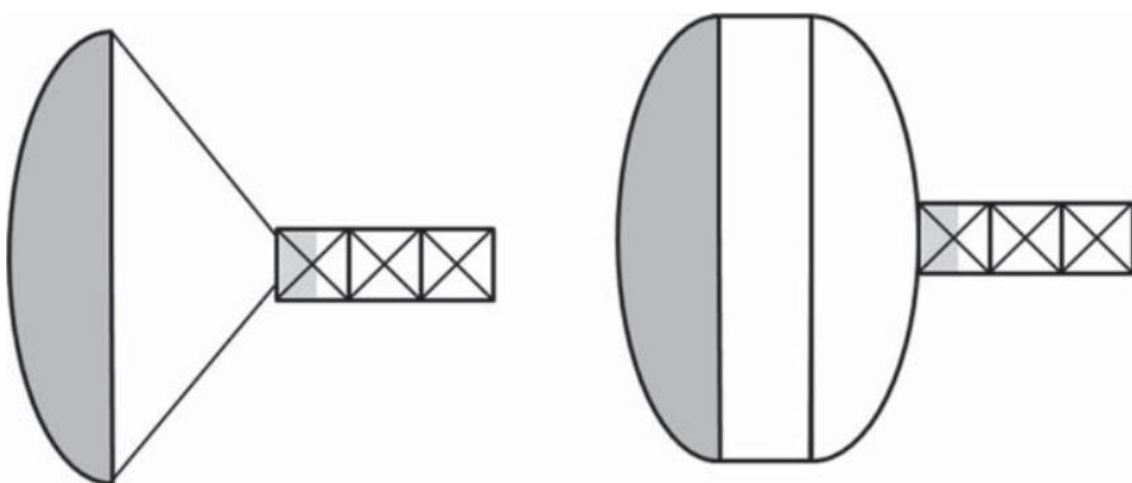
Εικόνα 71: Στάδια φουσκώματος της κεραίας

Η κεραία μπορεί να εγκατασταθεί στον δορυφόρο με το ενεργό στοιχείο (patch antenna) να είναι πάνω στον δορυφόρο και ο παραβολικός ανακλαστήρας να κατευθύνει την ακτινοβολία σε αυτό. Αυτός ο τρόπος εγκατάστασης είναι σχετικά απλός αλλά εμποδίζει ένα σημαντικό μέρος της ακτινοβολίας.



Εικόνα 72: Κεραία μπαλονιού πάνω σε δορυφόρο. Το σύστημα της κεραίας αποτελείται από 1) το Mylar με μεταλλική επίστρωση, 2) το υπόλοιπο διάφανο μέρος Mylar, 3) το ενεργό στοιχείο (patch), 4) και ο χώρος που καταλαμβάνει στον δορυφόρο [59]

Ο τρόπος κατασκευής του μπαλονιού θα πρέπει να επιτρέπει την δημιουργία παραβολικού κατόπτρου χωρίς ατέλειες και χωρίς αποκλίσεις στην γεωμετρία του. Χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη πίεση ή πιο λεπτά υλικά μπορούμε να κάνουμε πιο λεία την επιφάνεια του ανακλαστήρα, αλλά αυτό μπορεί να αλλοιώσει την γεωμετρία του ανακλαστήρα. Το πρόβλημα αυτό παρατηρήθηκε στην έρευνα [60] όπου μετά από πειράματα φωτογραμμετρίας η κεραία σχημάτιζε περισσότερο σφαίρα αντί για παραβολή.

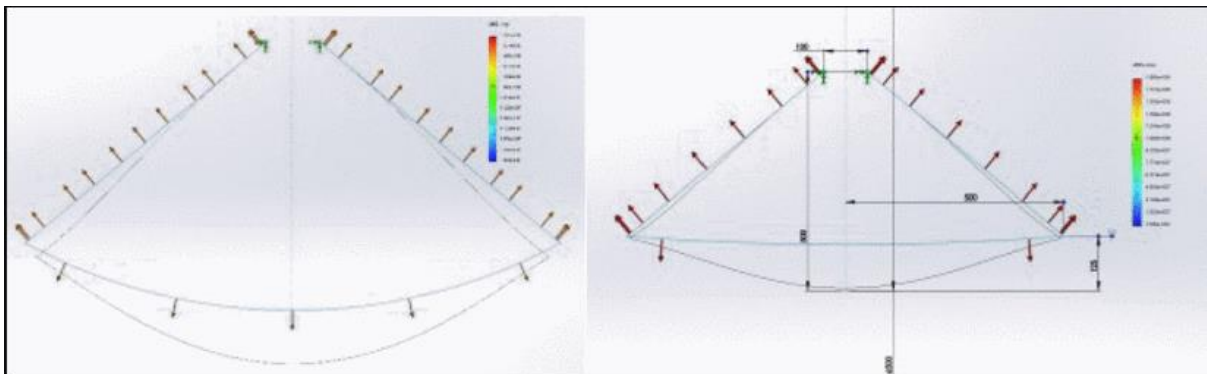


Εικόνα 73: Κωνικό(αριστερά) και κυλινδρικό(δεξιά) σχήμα για την κατασκευή της φουσκαλής κεραίας [60]



Εικόνα 74: Κωνικό (αριστερά) και κυλινδρικό(δεξιά) σχήμα για την κατασκευή της φουσκωτής κεραίας [60]

Λόγω του προβλήματος παραμόρφωσης του παραβολικού ανακλαστήρα, εξετάστηκαν δύο σχέδια κατασκευής. Το πρώτο ήταν να κατασκευαστεί ο παραβολικός ανακλαστήρας σε μικρότερες διαστάσεις και λόγω πίεσης να παραμορφωθεί στο μεγαλύτερο και τελικό σχήμα. Στο δεύτερο σχέδιο ο ανακλαστήρας είναι αρχικά επίπεδος και υπό την πίεση παίρνει τελικά το παραβολικό σχήμα.



Εικόνα 75: Μικρότερο μπαλόνι όπου μεγαλώνει με την πίεση (αριστερά) και επίπεδο μπαλόνι όπου παίρνει παραβολικό σχήμα υπό πίεση (δεξιά)

Μετά την πλήρη ανάπτυξη της κεραίας, μπορεί να σταθεροποιηθεί και να σκληρύνει με την χρήση ρητίνης όπου σκληραίνουν με την υπεριώδη ακτινοβολία (UV curing resins). Με αυτόν τον τρόπο η κεραία θα κρατήσει το σχήμα της στο περιβάλλον το διαστήματος, όπου υπάρχουν αυξομειώσεις θερμοκρασίας και πιθανές διαρροές. Η διαδικασία της σκλήρυνσης διαρκεί μερικές ώρες (0.5 – 2.5 ώρες) υπό την υπεριώδη ακτινοβολία του ήλιου και μπορεί να γίνει αμέσως μετά το φούσκωμα της κεραίας, έτσι ώστε να αποφευχθούν αλλοιώσεις της γεωμετρίας της κεραίας λόγω αυξομειώσεων της θερμοκρασίας. Σε προηγούμενες μελέτες, [46] [60] σχεδιάστηκαν ειδικές εσοχές μέσα στο μπαλόνι για να κυλήσει η ρητίνη. Αυτός ο τρόπος

σκλήρυνσης του μπαλονιού είναι χρήσιμος, αλλά σε περίπτωση χαμηλής πίεσης προκαλούνται σημαντικές αλλοιώσεις στο σχήμα της κεραίας.

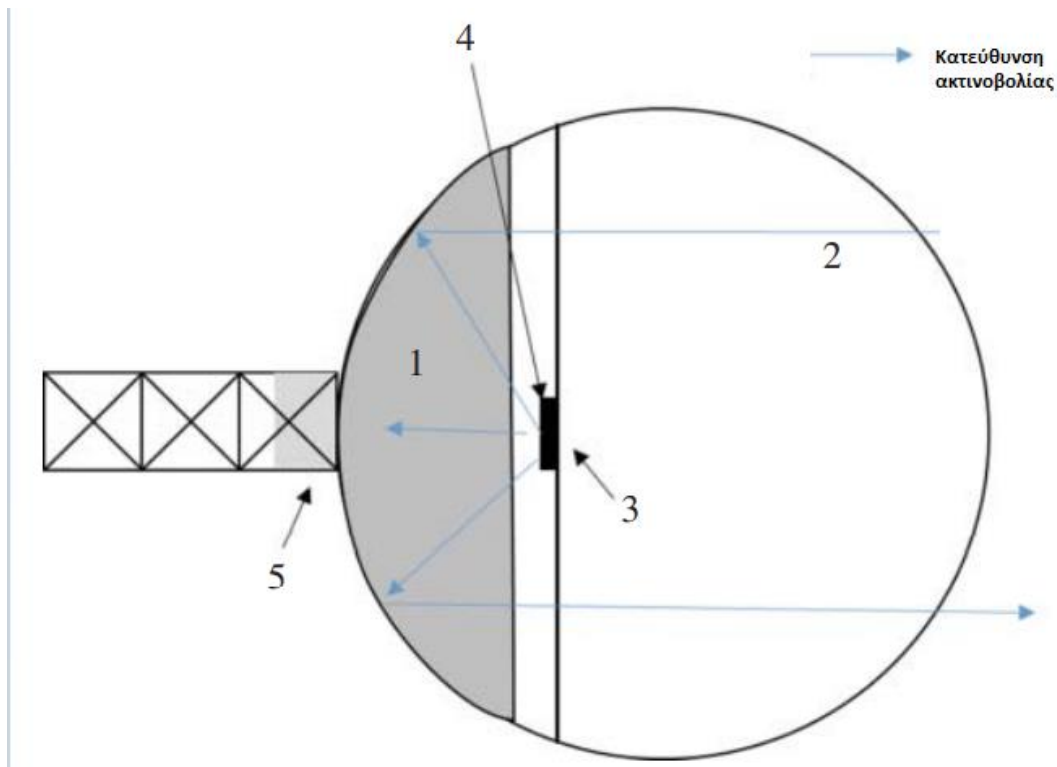


Εικόνα 76: Εσοχές του μπαλονιού όπου κυλάει η UV ρητίνη και δοχείο όπου αποθηκεύεται η σκόνη εξάχνωσης [46]

Η κεραία μπαλονιού είχε 24.2dBi μέγιστη κατευθυντικότητα σε πίεση 0.197 psi, στις συχνότητες από 7.1GHz έως 8.7GHz και κυρίως στα 8.4GHz όπου ήταν η ιδανική συχνότητα χρήσης του patch στοιχείου.

Μετά από τα πρώτα πειράματα της X-Band φουσκωτής κεραίας, δημιουργήθηκε ένα νέο βελτιωμένο σχέδιο με σφαιρικό σχήμα και ενσωμάτωση του ενεργού στοιχείου μέσα στην κεραία.

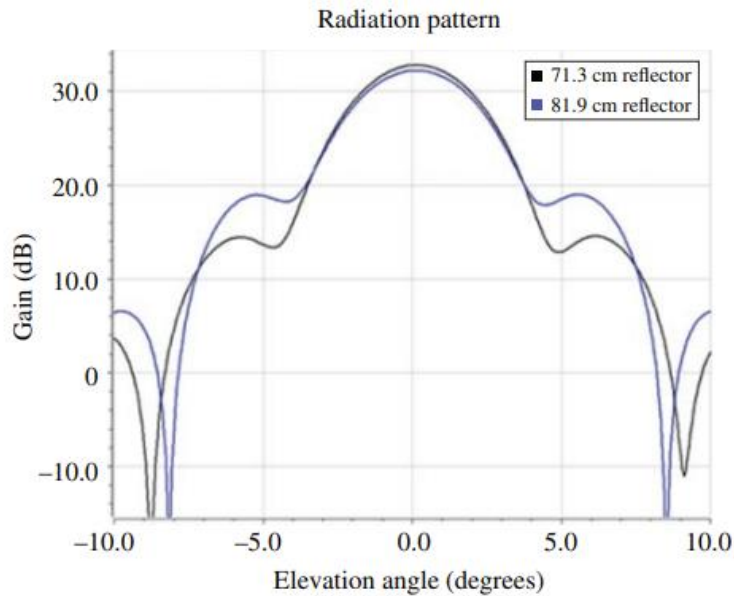
Το νέο σχέδιο προσφέρει τρία πλεονεκτήματα. Το πρώτο είναι ότι η διαδικασία φουσκώματος είναι πιο απλή και προβλέψιμη καθώς το μπαλόνι φουσκώνεται σε σφαιρικό σχήμα. Στο παλιό σχέδιο, το παραβολικό σχήμα αλλοιωνότανε λόγω πίεσης και πλησίαζε να σχηματίζει περισσότερο σφαίρα αντί για παραβολή. Αυτές οι αλλαγές της γεωμετρίας λόγω πίεσης δυσκολεύουν πολύ την πρόβλεψη των επιδόσεων της κεραίας και είναι προτιμότερο να προσαρμόσουμε την κεραία από την αρχή να λειτουργεί με ένα σφαιρικό ανακλαστήρα, ακόμη και αν δεν είναι το ιδανικό σχήμα. Το δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι επιτρέπει μεγαλύτερο κέρδος λόγω της μεγαλύτερης ελεύθερης επιφάνειας. Το τρίτο πλεονέκτημα είναι ότι επειδή το ενεργό patch στοιχείο είναι στο εσωτερικό της κεραίας, η κεραία μπορεί να εγκατασταθεί στον δορυφόρο με τον ανακλαστήρα από την μεριά του δορυφόρου, αντίστροφα σε σχέση με το προηγούμενο πρωτότυπο. Έτσι, δεν υπάρχει το πρόβλημα απωλειών κέρδους από την εμπόδιση της ακτινοβολίας από το σώμα του δορυφόρου.



Εικόνα 77: Βελτιωμένο σχέδιο σφαιρικής κεραία μπαλονιού πάνω σε δορυφόρο. Το σύστημα της κεραίας αποτελείται από 1) το Mylar με μεταλλική επίστρωση, 2) το υπόλοιπο διάφανο μέρος Mylar, 3) Μεμβράνη όπου κρατάει το ενεργό στοιχείο, 4) το ενεργό στοιχείο (patch) 5) και ο χώρος που καταλαμβάνει στον δορυφόρο [46]

Το αρνητικό αυτού του σχεδιασμού είναι η αυξημένη περιπλοκότητα στην ενσωμάτωση της patch κεραίας μέσα στο μπαλόνι, που πρέπει να βρίσκεται στην ιδανική θέση, αλλά και στον τρόπο δημιουργίας ενός μηχανισμού επέκτασης όπου θα περιλαμβάνει την patch κεραία.

Το μέγιστο κέρδος είναι 32.79dB και επιτυγχάνεται με διάμετρο ανακλαστήρα 71.3cm και 22cm απόσταση μεταξύ ανακλαστήρα και patch κεραίας. Επιπλέον, εξετάστηκε και δεύτερο σχέδιο με πιο εύκολο τρόπο κατασκευής, με την τροφοδοσία της κεραίας να είναι στο ίδιο σημείο με τις «ραφές» του ανακλαστήρα και το κέρδος επηρεαζόταν μόνο από τον ανακλαστήρα, που είχε μέγιστη διάμετρο 81.9cm. Για τα πειράματα και τις μετρήσεις κατασκευάστηκε το πρώτο σχέδιο, καθώς προσφέρει μεγαλύτερο μέγιστο κέρδος και χαμηλότερους δευτερεύοντες λοβούς ακτινοβολίας.

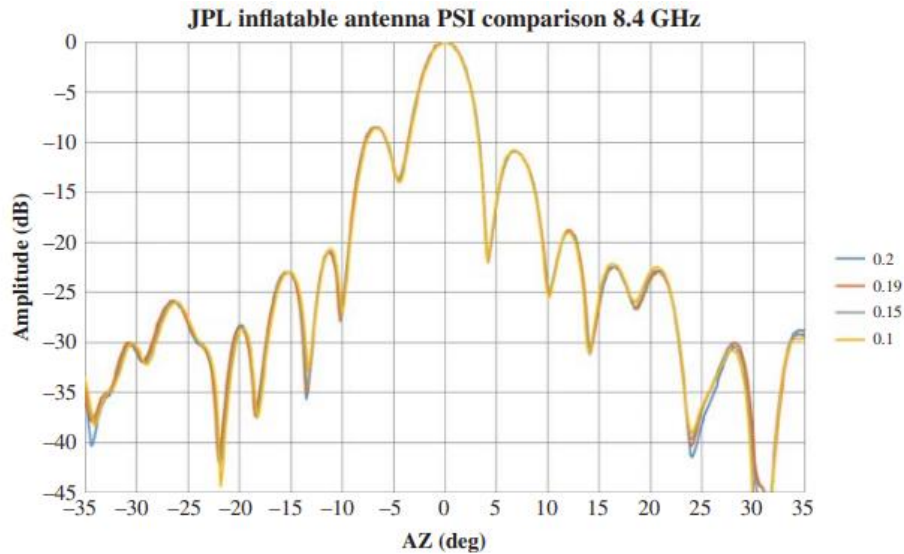


Διάγραμμα 7: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας με μέγιστο κέρδος (71.3cm ανακλαστήρα) και κεραίας με ευκολότερη κατασκευή (81.9cm)

Οι μετρήσεις της κεραίας έγιναν σε ανηχοϊκό δωμάτιο και χρησιμοποιήθηκε σύστημα ελέγχου πίεσης και σύστημα φωτογραμμετρίας για την σωστή καταγραφή των μετρήσεων. Η συχνότητα λειτουργίας της κεραίας ήταν 8.4GHz-8.5GHz για λήψη και 7.19GHz-7.235GHz για εκπομπή. Η κεραία δοκιμάστηκε σε διάφορες πιέσεις (0.10, 0.15, 0.19, 0.20 psi)

Freq. (GHz)	N2 pressure (psi)	Integrated gain (dBi)	3 dB beamwidth (°)	10 dB beamwidth (°)	Estimated 3/10 gain (dBi)
8.4	0.10	29.86	4.055	10.93	31.33
8.4	0.15	29.80	4.124	11.01	31.09
8.4	0.19	29.70	4.166	11.12	31.01
8.4	0.20	29.71	4.124	11.14	31.07

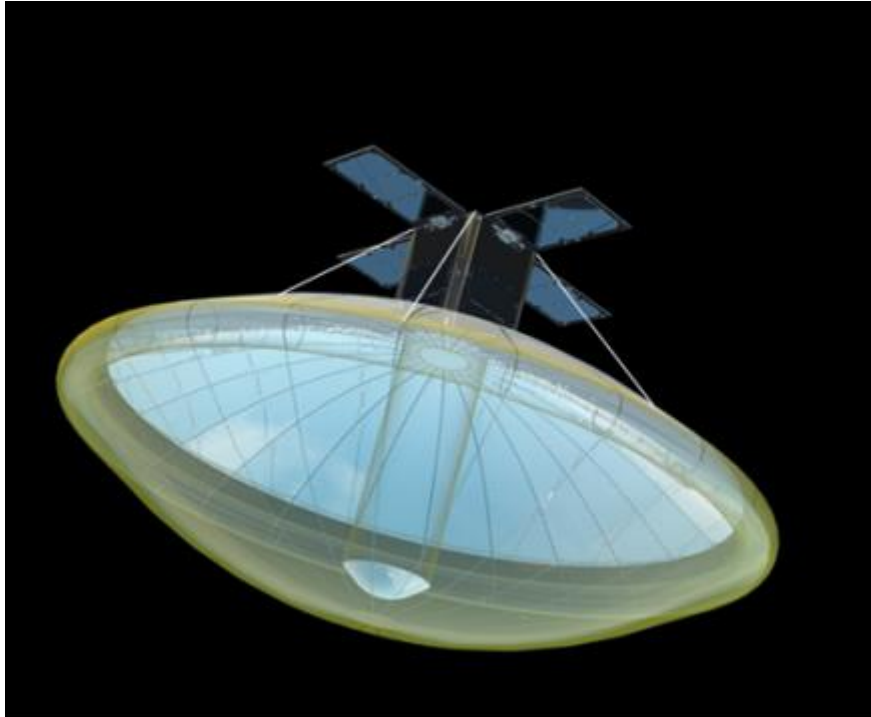
Πίνακας 9: Τιμές κέρδους σε σχέση με την πίεση



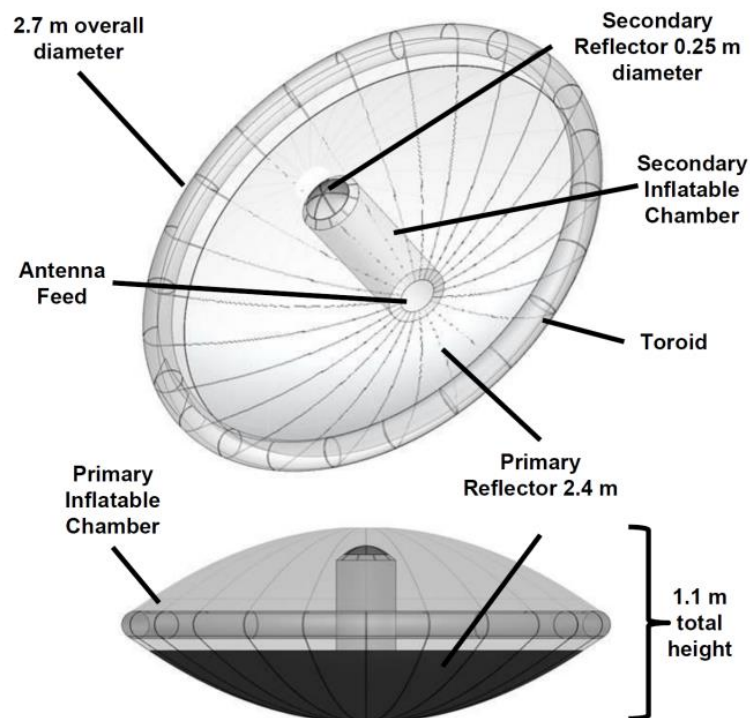
Διάγραμμα 8: Διάγραμμα ακτινοβολίας σε σχέση με τη πίεση

Οι μετρήσεις του κέρδους (integrated gain) συμπεριλαμβάνουν διορθώσεις κέρδους (0.30dB) από απώλειες τροφοδοσίας, VSWR και απώλειες πόλωσης. Επίσης υπολογίστηκε το κέρδος 3dB και 10dB (γωνίες ημίσειας ισχύος και 1/10 ισχύος) και η προσέγγιση του κέρδους 3/10. Οι μετρήσεις κέρδους έδειξαν 1-2dB χαμηλότερο κέρδος σε σχέση με την προσομοίωση, η οποία όμως δεν περιλαμβάνει τις απώλειες καλωδίων ή ατελειών του μπαλονιού. Ακόμη και με τις απώλειες στις μετρήσεις, οι επιδόσεις της πρωτότυπης κεραίας είναι ικανοποιητικές και μπορεί να δημιουργήσει νέες δυνατότητες σε CubeSats.

Σε πρόσφατη μελέτη του πανεπιστημίου MIT [47], κατασκευάστηκε πρωτότυπο φουσκωτής κεραίας διπλού ομοεστιακού ανακλαστήρα σε Gregorian διάταξη και ενεργό patch array. Ο στόχος είναι για μια κεραία ικανή για deep space αποστολές ή άλλες εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλό κέρδος, με τη διάμετρο της κεραίας θα κυμαίνεται από 1 έως 10 μέτρα.



Εικόνα 78: Απεικόνιση φουσκωτής κεραίας πάνω σε δορυφόρο

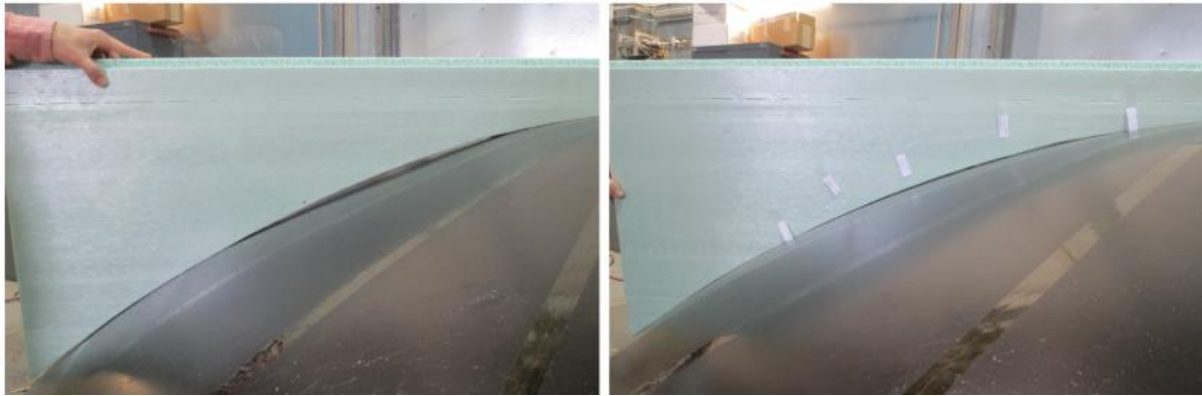


Εικόνα 79: Διαστάσεις πρωτότυπου φουσκωτής κεραίας [47]

Το πρωτότυπο που κατασκευάστηκε είχε διάμετρο 2.7μ. Ο βασικός ανακλαστήρας είχε διάμετρο 2.4μ και ο υποανακλαστήρας 0.25μ με απόσταση εστίασης 0.9μ και 0.08μ αντίστοιχα. Η patch array κεραία στερεώθηκε στο σώμα του δορυφόρου και έτσι το σώμα του δορυφόρου δεν θα εμποδίζει την ακτινοβολία, σε σχέση με προηγούμενα σχέδια που αναφέρθηκαν παραπάνω [Inflatable antenna for CubeSats: Development of the X-band

prototype]. Η κεραία αποτελείται από τρία κύρια μέρη. Το πρώτο είναι ο βασικός θάλαμος όπου φουσκώνει το μπαλόνι και σχηματίζει τον βασικό ανακλαστήρα. Το δεύτερο είναι ένας περιμετρικός βοηθητικός θάλαμος όπου προσαρμόζει τον ανακλαστήρα σε παραβολικό σχήμα. Χωρίς την χρήση αυτού του βοηθητικού θαλάμου, το σχήμα τείνει να γίνει σφαιρικό. Το τρίτο μέρος είναι ο κεντρικός κυλινδρικός θάλαμος του δευτερεύοντος μικρού παραβολικού κατόπτρου. Για την κατασκευή της κεραίας χρησιμοποιήθηκαν βοηθητικά κομμάτια πλαστικού ως καλούπια και πάνω τους κολλήθηκαν τα μέρη του μπαλονιού με ταινία.

Το βασικό μέρος του μπαλονιού κατασκευάστηκε από πολυεστερική μεμβράνη (Melinex 377) πάχους 0.0254mm, με το μισό μέρος να είναι διάφανο και το μέρος του ανακλαστήρα να έχει αλουμινένια επίστρωση 30nm (vapor deposited aluminum – VDA). Για την σωστή υλοποίηση του σχήματος της κεραίας, το μπαλόνι κατασκευάστηκε από 24 διαφορετικά μέρη μεμβράνης, κομμένα με βάση βοηθητικό πρότυπο από κομμάτι αλουμινίου, και στη συνέχεια κολλήθηκαν με ταινία σιλικόνης PSA (pressure sensitive adhesive) πλάτους 2.54cm πάνω σε μεμβράνη Kapton HN πάχους 0.00762 mm. Ο περιμετρικός θάλαμος της κεραίας κατασκευάστηκε εξολοκλήρου από μεμβράνη Kapton πάχους 0.0508mm. Η κατασκευή τέτοιων κεραιών καθιστά δύσκολη την πρόβλεψη των επιδόσεών τους, διότι σε αυτό το στάδιο οι φουσκωτές κεραίες κατασκευάζονται από ανθρώπους και υπάρχουν πάντα αποκλίσεις και ατέλειες στο τελικό σχήμα. Για αυτό τον λόγο προτείνεται να γίνονται αρκετές μελέτες σε φυσικά πρωτότυπα, με επαναλαμβανόμενες μεθόδους κατασκευής και βελτίωση της κεραίας με βάση τα φυσικά πρότυπα. Στο πρωτότυπο της μελέτης, μείωσαν τις μικρές ατέλειες στην επιφάνεια της κεραίας με την χρήση του περιμετρικού φουσκωτού θαλάμου και την κατασκευή του υπόλοιπου μπαλονιού σε 24 διαφορετικά μέρη. Το σχήμα του πρωτότυπου όμως είχε αποκλίσεις και έτσι εξετάστηκε η λύση της θερμικής διαμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας αντίστροφη θερμική διαμόρφωση, κατάφεραν να προσαρμόσουν την μεμβράνη της κεραίας σε παραβολικά καθοδηγητικά καλούπια από διογκωμένη πολυστερίνη (φελιζόλ). Η διαδικασία έγινε χειροκίνητα, θερμαίνοντας την φουσκωμένη μεμβράνη της κεραίας κυκλικά σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (λιγότερο από 50° C), η οποία παίρνει το σχήμα του καλουπιού. Αυτή η επεξεργασία κάνει το πλάτος της επιφάνειας ανομοιόμορφο, αλλά δεν επηρέασε την αντοχή της μεμβράνης ή την αλουμινένια επίστρωση ώστε να υποβιβαστούν οι επιδόσεις της κεραίας. Η τεχνική της θερμικής διαμόρφωσης συνήθως απαιτεί καλούπια κατασκευασμένα με υψηλή ακρίβεια και υψηλό κόστος. Η θερμική διαμόρφωση γίνεται σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες, και τα υλικά της κεραίας θα πρέπει να διατηρήσουν τα φυσικά χαρακτηριστικά τους. Είναι μια χρήσιμη τεχνική κατασκευής τέτοιων αντικειμένων μεμβράνης μεγάλης παραγωγής, αλλά για πρωτότυπα, όπως φουσκωτές κεραίες, η αντίστροφη θερμική διαμόρφωση επιτυγχάνει παρόμοια αποτελέσματα σε πολύ χαμηλότερο κόστος.



Εικόνα 80: Σχήμα κύριου ανακλαστήρα πριν την θερμική διαμόρφωση (αριστερά) και μετά (δεξιά)

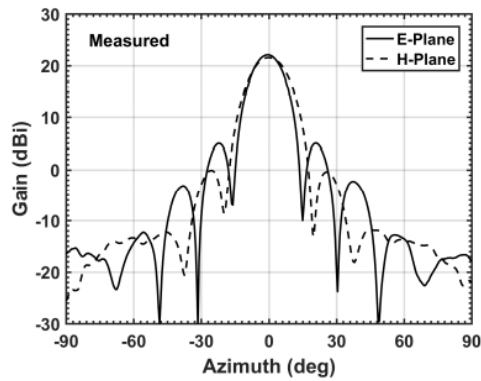
Ο δευτερεύοντας ανακλαστήρας αναπτύσσεται με ελεγχόμενο ύψος και κινείται ανεξάρτητα από το βασικό θάλαμο της κεραίας, χρησιμοποιώντας σύστημα κίνησης δύο αξόνων με μικρούς ιμάντες. Αυτό επιτρέπει την ακριβή προσαρμογή του δευτερεύοντα ανακλαστήρα, για σωστή εστίαση μεταξύ των κατόπτρων. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να γίνουν διορθώσεις μετά την ανάπτυξη της κεραίας στο διάστημα, επιτρέποντας προβλέψιμες και επαναλαμβανόμενες επιδόσεις.

Το φούσκωμα της κεραίας μπορεί να γίνει με την χρήση υγρού μέσα στους θαλάμους, όπως νερό ή υδατικό διάλυμα προπυλενικής γλυκόλης. Το υγρό αυτό θα θερμανθεί σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες με την χρήση θερμαντικού στοιχείου, δημιουργώντας έτσι ατμούς που θα προσφέρουν την απαραίτητη πίεση. Ο χρόνος ζωής της κεραίας εκτιμάται για περισσότερο από 6 μήνες. Για την βελτίωση της ανθεκτικότητας της κεραίας στον χρόνο, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν UV ρητίνες έτσι ώστε να σταθεροποιηθεί η μεμβράνη αλλά στο πρωτότυπο δεν δοκιμάστηκαν τεχνικές σκλήρυνσης.

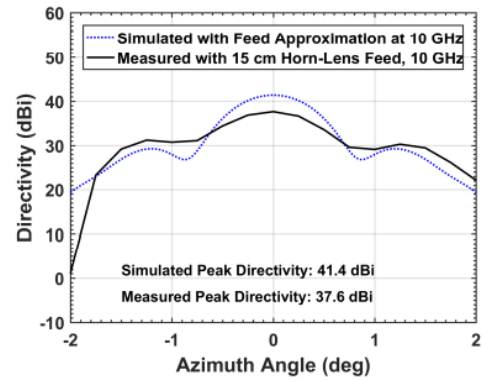
Η κεραία προσαρμόστηκε από προσομοιώσεις (MLFMM) για τις ζώνες συχνοτήτων X-Band (10GHz) και Ku-band (16GHz), ενώ το πρωτότυπο που κατασκευάστηκε είχε συχνότητα λειτουργίας στα 10GHz. Τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας για τη κεραία με διάμετρο κύριου ανακλαστήρα 2.4μ, με ενεργό στοιχείο patch array και συχνότητα λειτουργίας στα 16GHz, αποτελούνται από κατευθυντικότητα 49.4dBi, γωνία ημίσειας ισχύος 0.52°, πρώτος πλευρικός λοβός ακτινοβολίας σε επίπεδο 28.5dB και 55% απόδοση ανοίγματος (aperture efficiency). Το ενεργό στοιχείο (feed array) αποτελείται από 140 γραμμικά πολωμένα στοιχεία με απόσταση 1.5cm μεταξύ τους. Η γωνία από το ενεργό στοιχείο προς την άκρη του κύριου κατόπτρου είναι 5° και η ημίσεια ισχύς του ενεργού στοιχείου είναι 5.5°, ελαχιστοποιώντας έτσι τις απώλειες (spillover losses).

Το πρωτότυπο X-Band (10GHz) χρησιμοποιούσε ως ενεργό στοιχείο χοανοκεραία – φακού (horn – lens) συχνότητας 8.4-11.15GHz και διαμέτρου 15cm. Το κέρδος του ενεργού στοιχείου ξεχωριστά είναι 22.1dBi, ενώ σε συνδυασμό με το Γρηγοριανό παραβολικό κάτοπτρο η

κατευθυντικότητα που μετρήθηκε ήταν 37.6dBi, 3.8dBi λιγότερο από τις προσομοιώσεις ιδανικών συνθηκών με ιδανικές επιφάνειες και ευθυγράμμιση κατόπτρων.



a)



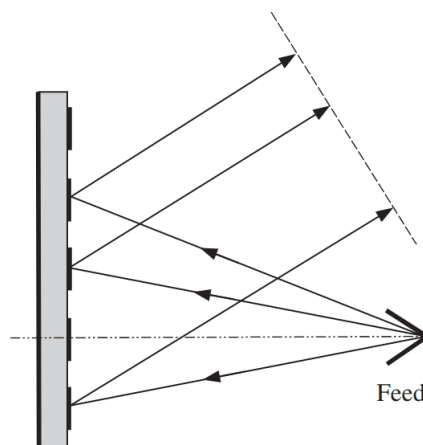
b)

Διάγραμμα 9: α) Διάγραμμα ακτινοβολίας (κέρδος) ενεγού στοιχείου horn-lens (10GHz) β) Διάγραμμα ακτινοβολίας (κατευθυντικότητας) ολοκληρωμένης κεραίας (10GHz)

4.9.Κεραίες Ανακλαστικής Διάταξης (Reflectarrays)

Οι κεραίες ανακλαστικής διάταξης (RA - Reflectarray Antennas) συνδυάζουν χαρακτηριστικά των κεραιών ανακλαστήρα και των στοιχειοκεραιών με έλεγχο φάσης (Phased Arrays). Αποτελούνται από μια επίπεδη ή σύμμορφη διάταξη στοιχείων επάνω σε διηλεκτρική επιφάνεια (συνήθως σε μορφή microstrip patches), κατασκευασμένα με μια ορισμένη φάση η οποία ανακλά την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προς την κεραία τροφοδοσίας(feed) σε επίπεδο μέτωπο κύματος. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας και το κέρδος είναι παρόμοιο με αυτή των παραβολικών κατόπτρων, αλλά με το πλεονέκτημα ότι ο ανακλαστήρας διάταξης μπορεί να κατασκευαστεί σε λεπτή επίπεδη ή ελαφρώς καμπυλωτή επιφάνεια, καταλαμβάνοντας έτσι λιγότερο όγκο και προσφέρουν πιο εύκολη εγκατάσταση στην επιφάνεια ενός δορυφόρου. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτών των κεραιών είναι η μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό τους, όπου επιτρέπει να προσαρμοστούν πιο εύκολα στα ζητούμενα μιας αποστολής σε σχέση με κεραίες παραβολικού ανακλαστήρα. Το κόστος και το βάρος της κατασκευής τους είναι σχετικά χαμηλό επειδή μπορούν να κατασκευαστούν όπως οι κεραίες μικροταινίας με γνωστούς μεθόδους εκτύπωσης κυκλωμάτων, όπως φωτοχημική διεργασία ή χάραξη ενός διηλεκτρικού στρώματος. Λόγω των περιορισμών των CubeSats, έχουν κατασκευαστεί πρωτότυπα κεραίες ανακλαστήρα διάταξης και σε μορφή μεμβράνης, προσφέροντας τον ελάχιστον δυνατό όγκο και βάρος, αλλά η αξιοπιστία κεραιών μεμβράνης δεν έχει αποδειχτεί ακόμη.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η ανθεκτικότητα και η αξιοπιστία αυτών των κεραιών. Τα στοιχεία του ανακλαστήρα είναι απομονωμένα μεταξύ τους και μια πιθανή ζημιά σε μερικά από τα στοιχεία δεν θα επηρεάσει σημαντικά την συνολική απόδοση της κεραίας. Τέλος, η κατεύθυνση της ακτινοβολίας μπορεί να ελεγχθεί ηλεκτρονικά με την χρήση ολισθητών φάσης ή και μηχανικά με χρήση μικρών κινητήρων. Η κατεύθυνση της ακτινοβολίας μπορεί να προσαρμοστεί παραμετροποιώντας το μέγεθος και σχήμα των στοιχείων ή το μήκος των γραμμών φάσης, παρέχοντας έτσι την ζητούμενη κάλυψη προς επίγειους σταθμούς.



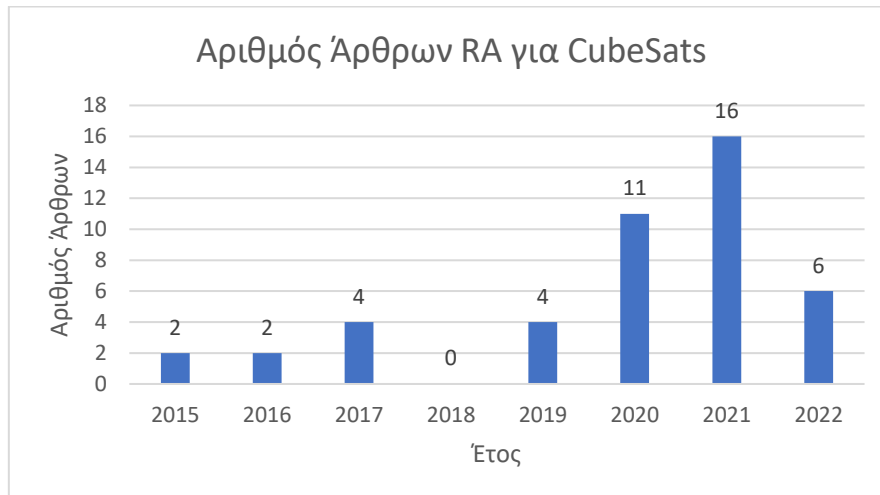
Εικόνα 81: Διάταξη κεραίας ReflectArray

Οι RA έχουν χρησιμοποιηθεί ελάχιστα στο παρελθόν λόγω της περιπλοκότητας του σχεδιασμού τους, αλλά αποτελούν μια καλή επιλογή σε αποστολές όπου απαιτείται υψηλό κέρδος.

Όπως και στους παραβολικούς ανακλαστήρες, έτσι και οι reflectarray κεραίες μπορούν να κατασκευαστούν σε μεμβράνη. Η πρώτη RA μεμβράνης που κατασκευάστηκε χρησιμοποιούσε φουσκωτό μηχανισμό ανάπτυξης και παρουσιάστηκε το 1999 [61]. Ο στόχος της κεραίας ήταν να σχεδιαστεί μια κεραία ελαφριά και μικρού όγκου, αλλά ικανή για αποστολές μεγάλων αποστάσεων, μεγάλες ταχύτητες επικοινωνίας, πιο ακριβή συστήματα RADAR κ.α. Η φουσκωτή μεμβράνη σχεδιάστηκε ώστε να προσφέρει μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σχέση με περίπλοκους μηχανισμούς ανακλαστήρα πλέγματος, οι οποίοι μπορούν να αποτύχουν στην ανάπτυξή τους, όπως για παράδειγμα η κεραία του δορυφόρου Galileo που παρουσίασε πρόβλημα στον μηχανισμό ανάπτυξης λόγω πιθανών φθορών στα ρουλεμάν του. [62]. Ενώ έχουν περάσει πολλά χρόνια από τις μελέτες των RA μεμβράνης, δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ακόμη σε CubeSat παρόλο που θεωρητικά μπορούν να προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα για μικρούς δορυφόρους με σχετικά μικρή διάρκεια λειτουργίας.

Η πρώτη αποστολή CubeSat με RA κεραία έγινε με τον δορυφόρο ISARA (Integrated Solar Array & Reflectarray Antenna) στα τέλη του 2017. Ο ανακλαστήρας της κεραίας αποτελούνταν από τρεις επίπεδες επιφάνειες με μηχανισμό αναδίπλωσης με ελατήρια, ενώ στο πίσω μέρος του ανακλαστήρα χρησιμοποιήθηκαν φωτοβολταϊκά. Η κεραία σχεδιάστηκε και λειτούργησε με επιτυχία για τις συχνότητες 26GHz για LEO επικοινωνία, με κέρδος 33dBic και αποδοτικότητα 26%. Ο σχεδιασμός της κεραίας μπορούσε να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας πιο αποδοτική κεραία τροφοδοσίας και βελτιώνοντας τα μηχανικά χαρακτηριστικά, μειώνοντας τα κενά ανάμεσα στις επιφάνειες που προκαλούσαν οι ογκώδεις μεντεσέδες. Τα κενά ανάμεσα στις επιφάνειες ανάκλασης μείωσαν το κέρδος και προκάλεσαν μεγαλύτερους πλευρικούς λοβούς ακτινοβολίας.

Έξι μήνες μετά την αποστολή του ISARA εκτοξεύθηκαν δύο ίδιοι 6U CubeSats, οι MarCOA και MarCoB, για την αποστολή τους προς τον Άρη, ο οποίος αποτελούσαν βοηθητικό μέρος των τηλεπικοινωνιών για την αποστολή του InSIGHT Mars. Η κύρια κεραία των δορυφόρων MarCo ήταν RA με μηχανισμό επέκτασης στη ζώνη X-Band, με κέρδος 29.2dBic και 42% αποδοτικότητα, ενώ λειτουργούσαν μόνο για εκπομπή του σήματος. Η αποστολή των MarCo ήταν επιτυχημένη και απέδειξε ότι οι αποστολές που απαιτούν κεραίες με υψηλό κέρδος (πχ. διαπλανητικές) είναι πλέον εφικτές με CubeSat δορυφόρους.



Διάγραμμα 10: Αριθμός άρθρων για ReflectArray κεραιές που δημοσιεύτηκαν στο IEEE. (Ημερομηνία διαγράμματος: Σεπτέμβριος 2022)

Οι μελλοντικές αποστολές των Cubesat GOMX-5, MAXWELL και M-ARGO θα χρησιμοποιούν κεραιές RA, ενώ παράλληλα συνεχίζονται οι μελέτες με νέα πρωτότυπα υψηλού κέρδους για τις ζώνες συχνοτήτων X και Ka. [63] [3]

4.9.1. Μηχανικά Χαρακτηριστικά

Οι RA προσφέρουν πολλά μηχανικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα είδη κεραιών, όπως κεραιές ανακλαστήρα. Ο σχεδιασμός των μηχανικών χαρακτηριστικών είναι πολύ πιο απλός και συνήθως καταλαμβάνει μικρότερο όγκο και βάρος. Αποτελείται από μια ή περισσότερες επίπεδες επιφάνειες που δρουν ως ο ανακλαστήρας και από την κεραία τροφοδοσίας. Οι επιφάνειες του ανακλαστήρα μπορούν να διπλώσουν στην επιφάνεια του δορυφόρου καταλαμβάνοντας μόνο 0.1U, ενώ μια κεραία ανακλαστήρα με μηχανισμό επέκτασης θα χρειαζόταν περίπου 1.5U. Η κεραία τροφοδοσίας μπορεί να ενσωματωθεί στην κατασκευή του δορυφόρου, μειώνοντας τον καταλαμβανόμενο χώρο και μειώνοντας στο ελάχιστο τις απώλειες που προκύπτουν από τις αποστάσεις της κεραίας από το σύστημα επικοινωνίας. Λόγω του μικρού τους όγκου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αρκετά μικρούς δορυφόρους μεγέθους 3U, αλλά και σε πολύ μεγαλύτερους λόγω της καλής επεκτασιμότητας των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας σε μεγαλύτερες διαστάσεις.

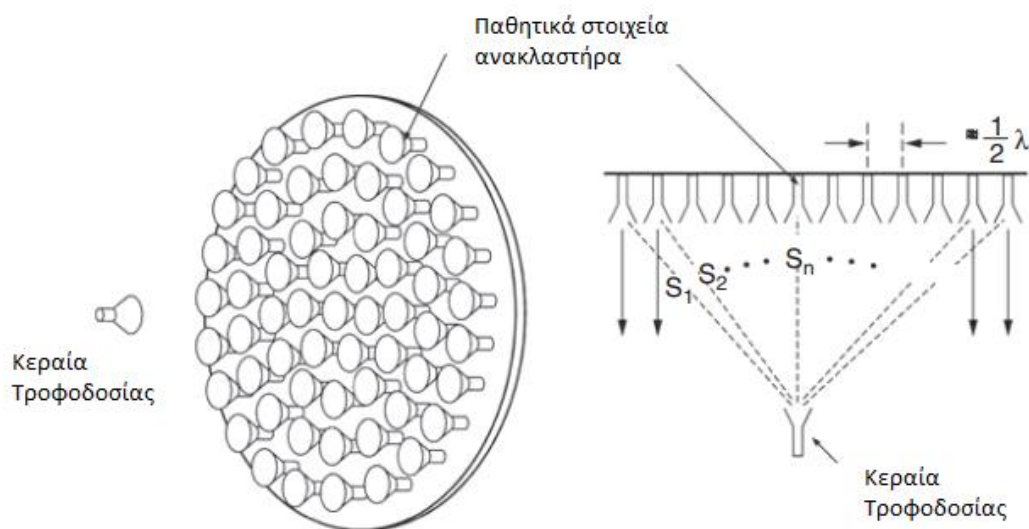
Ο μηχανισμός επέκτασής τους μπορεί να είναι αρκετά απλός, χρησιμοποιώντας μεντεσέδες και ελατήρια. Η επίπεδη επιφάνεια του ανακλαστήρα προσφέρει την δυνατότητα να εγκατασταθούν φωτοβολταϊκά στην πίσω μεριά του ή ακόμη και στην ίδια επιφάνεια των ανακλαστικών στοιχείων, σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν στοιχεία που δεν θα εμποδίζουν την ηλιακή ακτινοβολία, όπως μικρά δίπολα επάνω στην επιφάνεια.



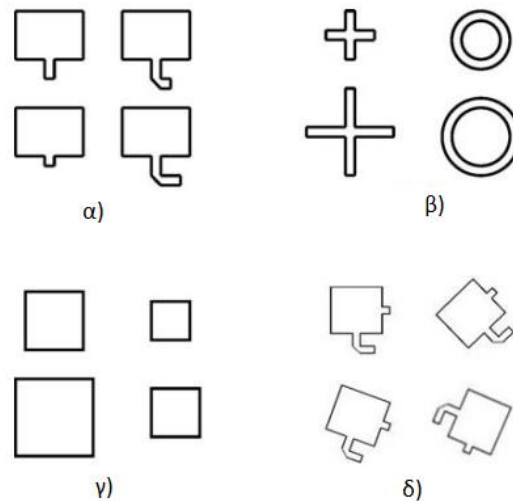
Εικόνα 82: Κεραία ReflectArray με Patch feed και μηχανισμό ανάπτυξης - Αντίγραφο μοντέλου CubeSat M-Argo [64]

Στην πιο απλή μορφή, μια ανακλαστική στοιχειοκεραία αποτελείται από τον ανακλαστήρα με τα παθητικά στοιχεία και την κεραία τροφοδοσίας. Η γεωμετρία είναι παρόμοια με τις κεραίες παραβολικού ανακλαστήρα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο σε διάφορες διατάξεις όπως Gregorian ή Cassegrain.

Η επιλογή της κεραίας τροφοδοσίας είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η απόσταση και η κλίση της (σε περιπτώσεις offset-fed) επηρεάζει άμεσα τις επιδόσεις της ολοκληρωμένης κεραίας. Οι RA προσφέρουν μεγάλη ευελιξία στον τρόπο προσαρμογής τους, αλλά παραμένουν περίπλοκες στον σχεδιασμό τους σε σχέση με άλλου είδους κεραίες.

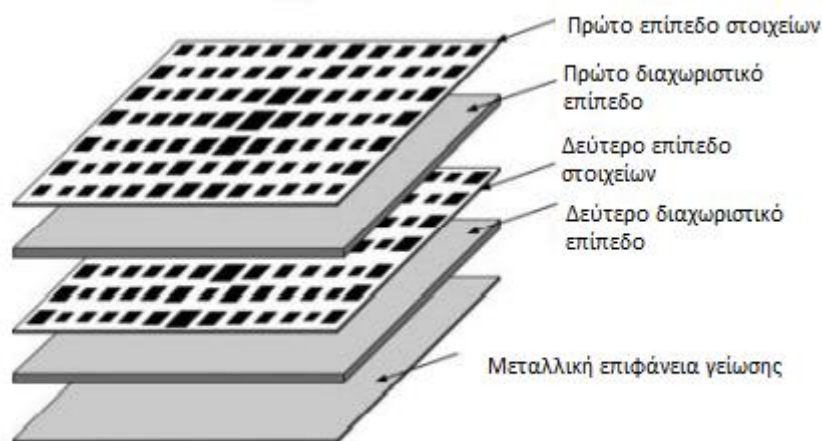


Εικόνα 83: Φυσικά χαρακτηριστικά κεραίας Reflectarray



Εικόνα 84: Διαφορετικά σχήματα των στοιχείων: α) διάφορα μήκη γραμμών φάσης, β) διαφορετική γεωμετρία σε μορφή διπόλου ή βρόγχου, γ) διαφορετικά μεγέθη στοιχείων, δ) διαφορετικές γωνίες κλίσης

Λόγω της χαμηλής ισχύος που μπορεί να παρέχει ένας μικρός δορυφόρος, οι reflectarray συνήθως αποτελούνται από παθητικά στοιχεία ανακλαστήρα. Αυτό κάνει την κατασκευή πιο εύκολη, πιο φθηνή και πιο αξιόπιστη, ενώ παράλληλα διατηρεί τις απαιτήσεις ισχύος του δορυφόρου χαμηλές. Τα στοιχεία μπορούν να τυπωθούν σε διηλεκτρικό υπόστρωμα με καλή ακρίβεια ακόμη και σε συχνότητες μεγαλύτερες των 30GHz. Ο ανακλαστήρας μπορεί να αποτελείται από 2 επίπεδα στοιχείων με ξεχωριστά διηλεκτρικά επίπεδα, καθώς μελέτες [65] έχουν δείξει ότι αυξάνεται το εύρος ζώνης.



Εικόνα 85: Διάταξη πολυεπίπεδης κεραίας reflectarray για αύξηση του εύρους ζώνης

Η χρήση των RA σε δορυφόρους γίνεται κυρίως με μηχανισμούς ανάπτυξης, επειδή ο σχεδιασμός και η κατασκευή του μηχανισμού είναι σχετικά απλοί ενώ παράλληλα προσφέρει

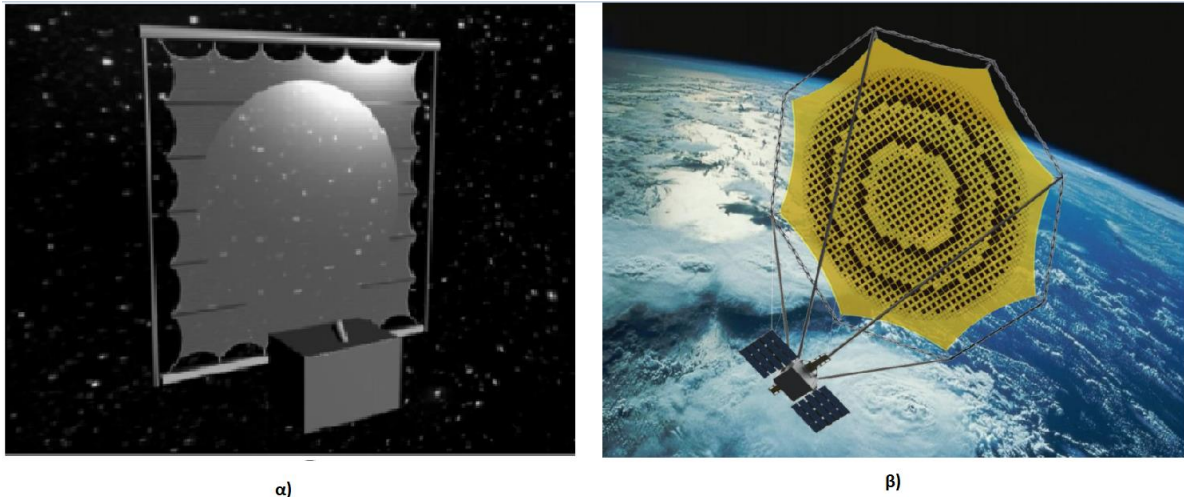
πολύ υψηλότερο κέρδος. Σε όλες τις προηγούμενες αποστολές στο παρελθόν καθώς και σε μελλοντικές αποστολές Cubesat με χρήση RA, ο μηχανισμός ανάπτυξης τους περιλαμβάνει μεντεσέδες ανάμεσα σε τρία ή περισσότερα πάνελ ανακλαστήρα, και ελατήρια τα οποία επιτρέπουν την επέκτασή της.

Η δεύτερη τεχνική κατασκευής των RA, είναι σε μορφή μεμβράνης. Τα αρχικά πρωτότυπα που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιούσαν φουσκωτούς μηχανισμούς ανάπτυξης [61]. Στη Εικόνα 86 φαίνεται η X-Band κεραία μεμβράνης RA με φουσκωτούς θαλάμους. Η κεραία αποτελούταν από τους θαλάμους που σχεδιάζουν τους τρεις βραχίονες, το περιμετρικό δακτύλιο που σταθεροποιεί και τεντώνει την μεμβράνη και τον μικρότερο δακτύλιο στον οποίο υποστηρίζεται η ενεργή χοανοκεραία.



Εικόνα 87: X-Band φουσκωτή RA με διάμετρο 1μ

Οι θάλαμοι κατασκευάστηκαν από 0.25mm Κέβλαρ με στρώμα ουρεθάνης και η μεμβράνη κατασκευάστηκε από Kapton πάχους 0.05mm. Η κεραία χρησιμοποιούσε δύο στρώματα μεμβράνης, τον βασικό ανακλαστήρα με περίπου 1000 παθητικά στοιχεία patch και το επίπεδο γείωσης. Μικροί δίσκοι αφρού διαμέτρου 7mm προστέθηκαν ανάμεσα στις δύο μεμβράνες για να διατηρήσουν σταθερή την απόσταση μεταξύ τους. Τα στοιχεία ήταν ίδιου μεγέθους αλλά με διαφορετικές γραμμές φάσης. Αυτός ο σχεδιασμός παρουσίαζε υψηλές απώλειες λόγω κάλυψης της ακτινοβολίας από την κεραία τροφοδοσίας και των ογκώδη φουσκωμένων θαλάμων.



Εικόνα 88: Εικονικό σχέδιο κεραίας RA μεμβράνης με μηχανισμό ανάπτυξης με κεραία τροφοδοσίας πάνω στον δορυφόρο α) Πρωτότυπο του 1999, β) RA – DaHGR, μοντέλο της MMA Design (2016)

4.9.2. Χαρακτηριστικά Ακτινοβολίας

Τα στοιχεία του ανακλαστήρα δεν χρειάζονται δίκτυο διαιρέτη ισχύος και έτσι δεν υπάρχει διαφορά σε απώλειες αντίστασης μεταξύ ενός ανακλαστήρα λίγων στοιχείων ή χιλιάδων στοιχείων. Έτσι, μια κεραία ανακλαστήρα διάταξης μεγάλου διαφράγματος μπορεί να προσφέρει καλή αποδοτικότητα και υψηλό κέρδος, διατηρώντας χαμηλά τα επίπεδα απαίτησης ισχύος από τον δορυφόρο.

Τα στοιχεία του ανακλαστήρα προκαλούν ολίσθηση φάσης του προσπίπτοντος κύματος και συγκεντρώνουν την ακτινοβολία στην κεραία τροφοδοσίας. Έτσι μπορεί να δημιουργηθεί διάγραμμα ακτινοβολίας σε σχήμα «μολυβιού» (pencil beam), δηλαδή υψηλής κατευθυντικότητας με έναν κύριο «λεπτό» λοβό ακτινοβολίας. Εκτός από την ακτινοβολία σε σχήμα μολυβιού, μπορούν να δημιουργηθούν άλλα διαγράμματα ακτινοβολίας με διαφορετικούς ή και πολλαπλούς λοβούς ακτινοβολίας. Ο τρόπος που αλλάζουν τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας είναι με την αλλαγή της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών των παθητικών στοιχείων. Η μέγιστη ολίσθηση της φάσης που μπορεί να δημιουργηθεί με την αλλαγή του μήκους patch στοιχείων, εξαρτάται και περιορίζεται από το πάχος του διηλεκτρικού υποστρώματος. Εάν το πάχος του υποστρώματος είναι μικρότερο από το ένα δέκατο του μήκους κύματος, μπορεί να επιτευχθεί εύρος φάσης 330° , το οποίο είναι ικανοποιητικό και ευνοεί την χρήση λεπτών επιφανειών διηλεκτρικού.

Επίσης, το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας τροφοδοσίας θα πρέπει να επιλεγεί με προσοχή, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες υπερφωτισμού (spillover) και να μεγιστοποιηθεί η απόδοση κάλυψης ακτινοβολίας (illumination efficiency). Οι κεραίες τροφοδοσίας που επιλέγονται για τις RA είναι συνήθως χοανοκεραίες ή patch στοιχειοκεραίες επειδή αποδίδουν καλά στις παραπάνω απαιτήσεις, αλλά σε κάθε περίπτωση πρέπει να γίνει ξεχωριστή ανάλυση και να σχεδιαστεί η κατάλληλη κεραία τροφοδοσίας για κάθε σύστημα.

Οι RA κεραιές μπορούν να έχουν σταθερό διάγραμμα ακτινοβολίας ή να χρησιμοποιήσουν τεχνικές ανακατεύθυνσης της ακτινοβολίας (beam steering, beamforming). Το σταθερό διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να έχει κύριο λοβό σε σχήμα «μολυβιού» ή να έχει προσαρμοστεί για πιο μεγάλες γωνίες ακτινοβολίας ή και σε δέσμη ακτινοβολίας Isoflux [66] προσφέροντας καλύτερη κάλυψη σε χαμηλές τροχιές, αλλά με χαμηλότερη κατευθυντικότητα. Για παράδειγμα, ένας δορυφόρος χαμηλής τροχιάς πιθανόν να επωφελείται περισσότερο από μια κεραία με σχετικά μεγάλη γωνία ημίσειας ισχύος, ενώ ένας δορυφόρος σε διαπλανητική αποστολή χρειάζεται την μέγιστη δυνατή κατευθυντικότητα για την σωστή επικοινωνία με τον επίγειο σταθμό. Ακόμη, μια RA μπορεί να προσαρμοστεί και σε πολλαπλές δέσμες ακτινοβολίας (multi-beam) με ξεχωριστές κεραιές τροφοδοσίας. Επειδή η δέσμη ακτινοβολίας μπορεί να προσαρμοστεί ξεχωριστά για κάθε κεραία τροφοδοσίας γραμμικής πόλωσης, μπορεί να προσφέρει καλύτερα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας σε σχέση με άλλες multi-beam κεραιές.

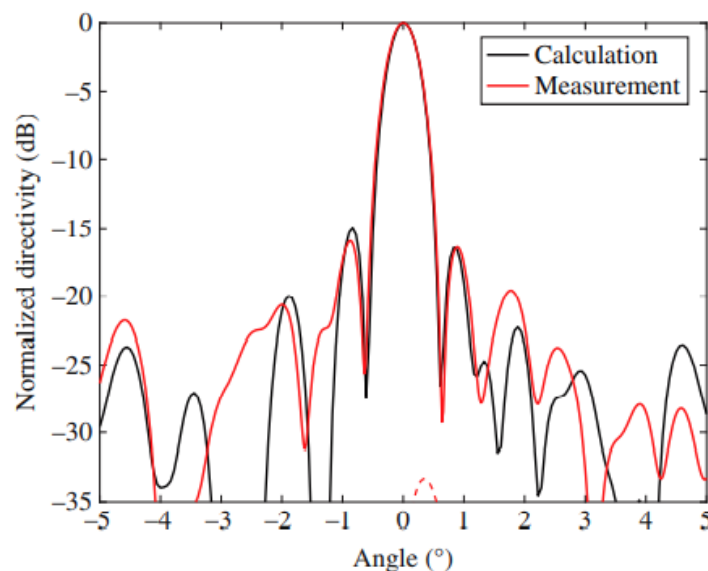
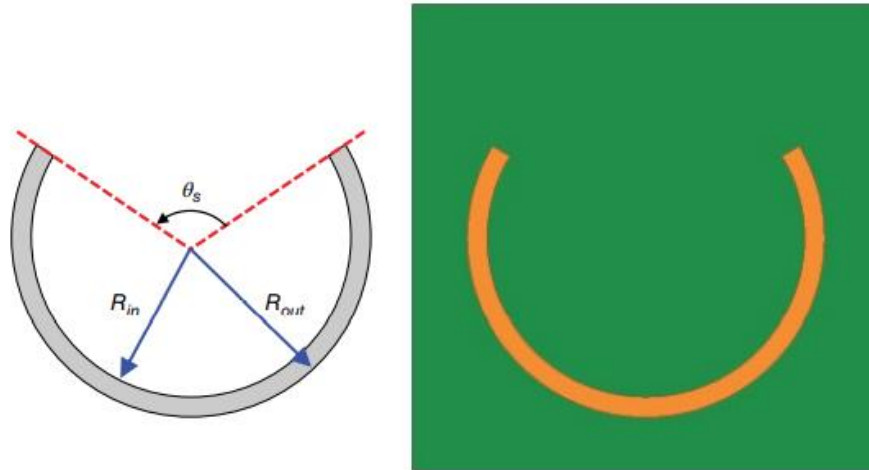


Figure 1: Διάγραμμα ακτινοβολίας Ka-Band RA 1 μέτρου – OMERA [3]

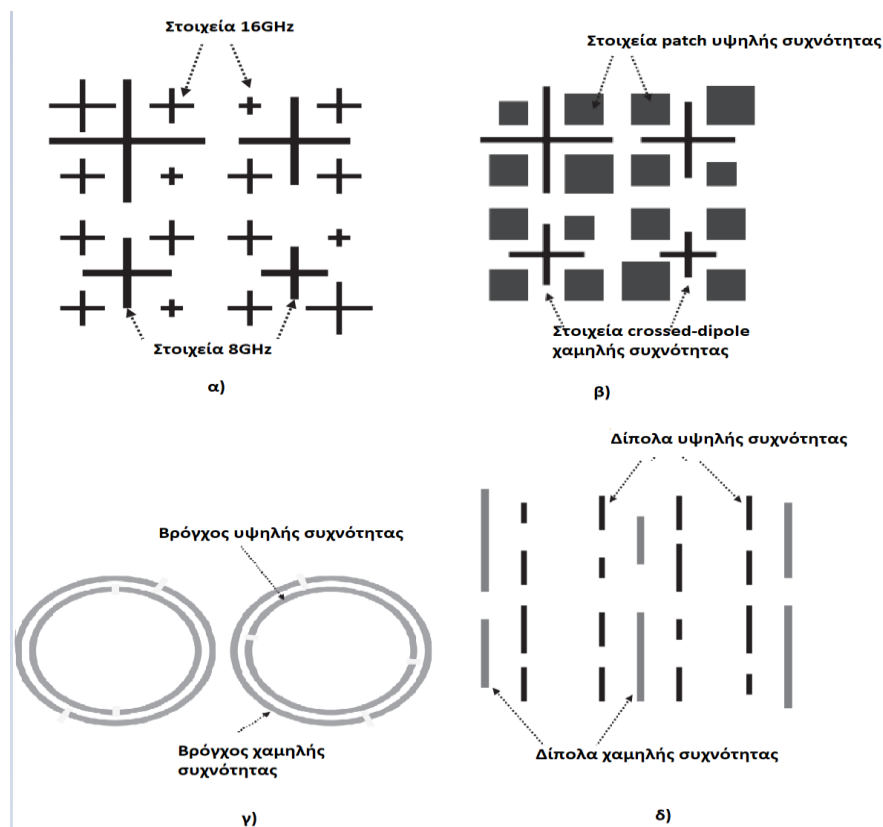
Η ανακατεύθυνση της ακτινοβολίας μπορεί να γίνει με PIN διόδους ή ολίσθηση φάσης με μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) όπως και οι στοιχειοκεραίες φάσης (phased arrays). Αυτός ο σχεδιασμός όμως απαιτεί δίκτυα τροφοδοσίας που θα επιφέρουν επιπλέον απώλειες.

Οι RA μπορούν να προσαρμοστούν για οποιοδήποτε είδος πόλωσης, είτε γραμμική (κάθετη ή/και οριζόντια πόλωση) είτε κυκλική, προσαρμόζοντας κατάλληλα την ολίσθηση φάσης των δύο ορθογώνιων ηλεκτρικών πεδίων που αντανακλώνται. Για κυκλική πόλωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν τετράγωνα patch ή στοιχεία σε μορφή δακτυλίου με εγκοπές.



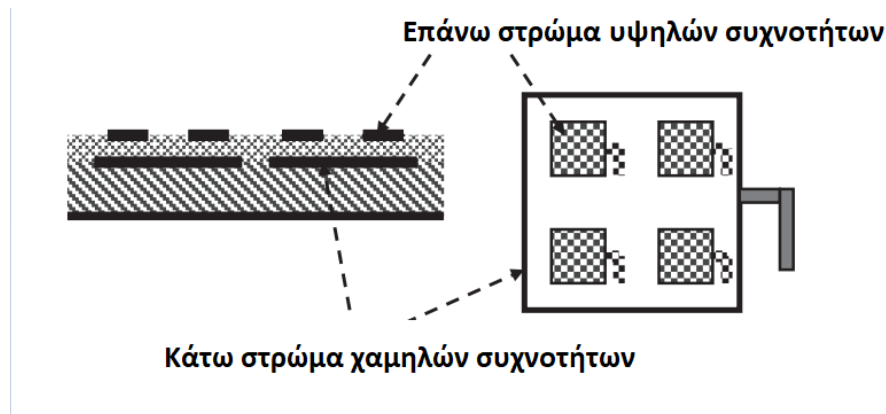
Εικόνα 89: Στοιχείο κεραίας σε γεωμετρία SSR (Single Slot Ring) για κυκλική πόλωση

Μια RA μπορεί να σχεδιαστεί και για λειτουργία σε δύο ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιώντας ένα επίπεδο υποστρώματος. Τα στοιχεία μπορούν να είναι τετράγωνοι ή στρογγυλοί δακτύλιοι για κυκλική ή διπλά γραμμική πόλωση, είτε δίπολα για γραμμική πόλωση.

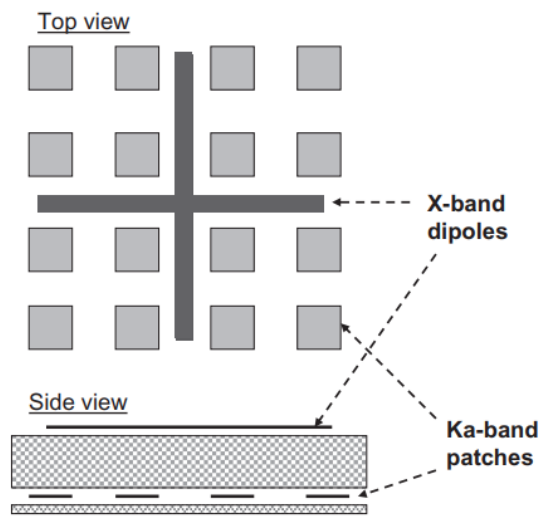


Εικόνα 90: Στοιχεία κεραίας λειτουργίας δύο συχνοτήτων με στοιχεία διαφορετικού μεγέθους για α), β) κυκλική ή διπλά γραμμική πόλωση, γ) κυκλική πόλωση, δ) γραμμική πόλωση.

Η κεραία μπορεί να προσαρμοστεί για λειτουργία σε δύο ή περισσότερες συχνότητες χρησιμοποιώντας περισσότερο από ένα επίπεδο υποστρώματος, τοποθετώντας το στρώμα των υψηλών συχνοτήτων επάνω από το στρώμα των χαμηλών συχνοτήτων. Το υπόστρωμα υψηλής συχνότητας μπορεί να τοποθετηθεί κάτω από το υπόστρωμα χαμηλής συχνότητας, σε περίπτωση που οι δύο συχνότητες έχουν αρκετά διαφορετικό μήκος κύματος και έτσι οι υψηλές συχνότητες θα μπορούν να διαπεράσουν το πρώτο στρώμα χωρίς μεγάλες απώλειες.



Εικόνα 91: Στοιχεία κεραίας λειτουργίας δύο συχνοτήτων με δύο επίπεδα υποστρώματος

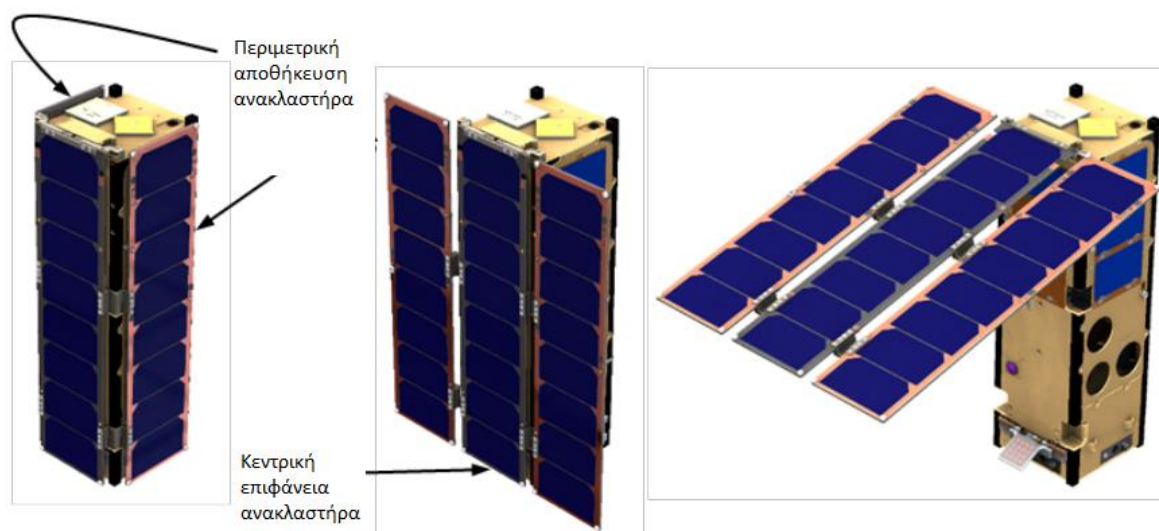


Εικόνα 92: Στοιχεία διπλού υποστρώματος με X-band crossed-dipole επάνω από Ka-Band patches

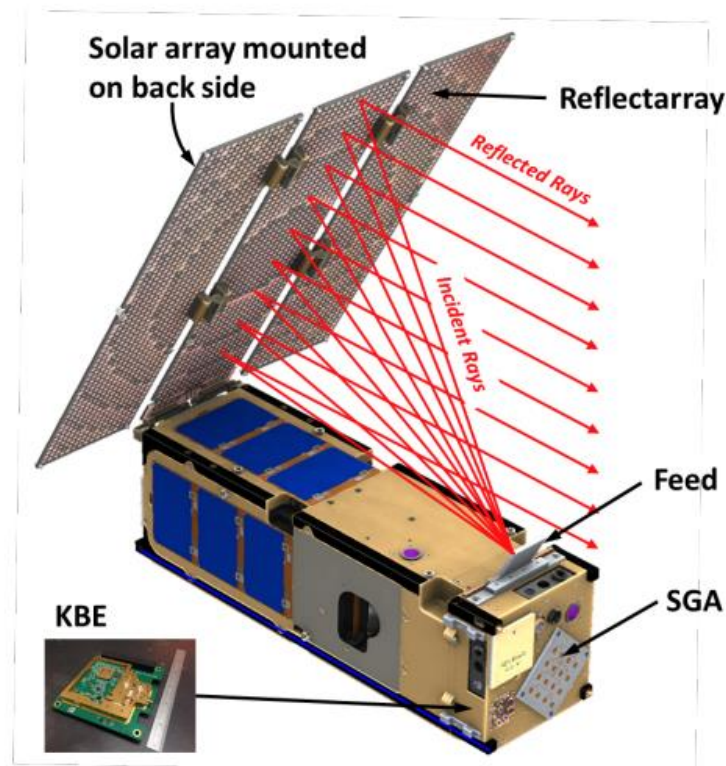
4.9.3. Παραδείγματα

4.9.3.1. ISARA

Ο δορυφόρος ISARA (Integrated Solar Array and Reflectarray Antenna) ήταν ο πρώτος CubeSat με Ka-Band (26GHz) ReflectArray κεραία, πετυχαίνοντας κέρδος 33.5dB και ταχύτητες επικοινωνίας 100Mbps. Η κεραία ήταν χαμηλού κόστους, βάρους, όγκου και κατανάλωσης ισχύος. Ο ανακλαστήρας αποτελούνταν από τρεις επιφάνειες διαστάσεων $33.9\text{ cm} \times 8.26$, με ηλεκτρομηχανικό μηχανισμό επέκτασης ελατηρίων και μεντεσέδων. Στην θέση αποθήκευσης δίπλωνε περιμετρικά στην κατασκευή του δορυφόρου, καταλαμβάνοντας τον ελεύθερο χώρο μέσα στην κάψουλα του πυραύλου εκτόξευσης (P-POD) που δεν θα χρησιμοποιούνταν από τον δορυφόρο. Η κεραία τροφοδοσίας ήταν μια λεπτή microstrip patch κεραία διαστάσεων $97\text{mm} \times 97\text{mm} \times 20\text{mm}$, η οποία αποθηκευόταν και αυτή στην επιφάνεια του δορυφόρου κοντά στην τροφοδοσία για χαμηλότερες απώλειες.



Εικόνα 93: Στάδια επέκτασης της κεραίας [67]



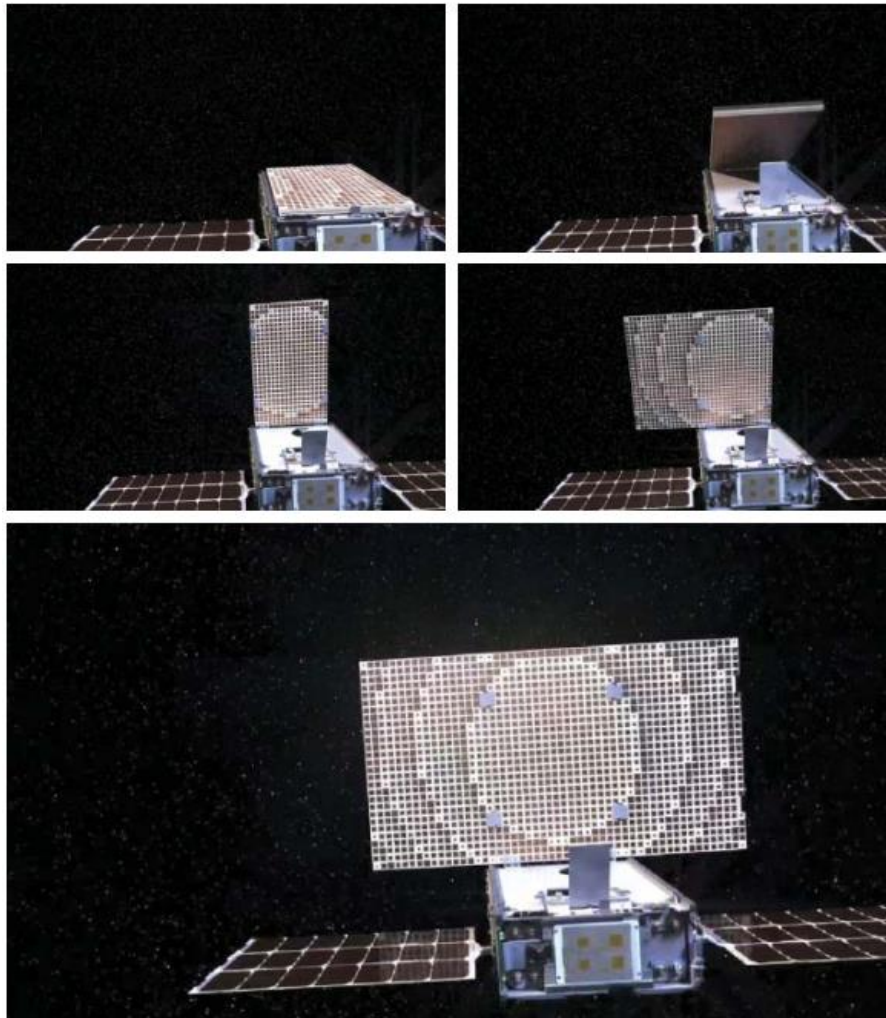
Εικόνα 94: Μοντέλο δορυφόρου ISARA με κεραίες Reflectarray με patch array feed και SGA (Standard Gain Antenna) 4x4 patch array ως κεραία αναφοράς

4.9.3.2. Mars Cube One

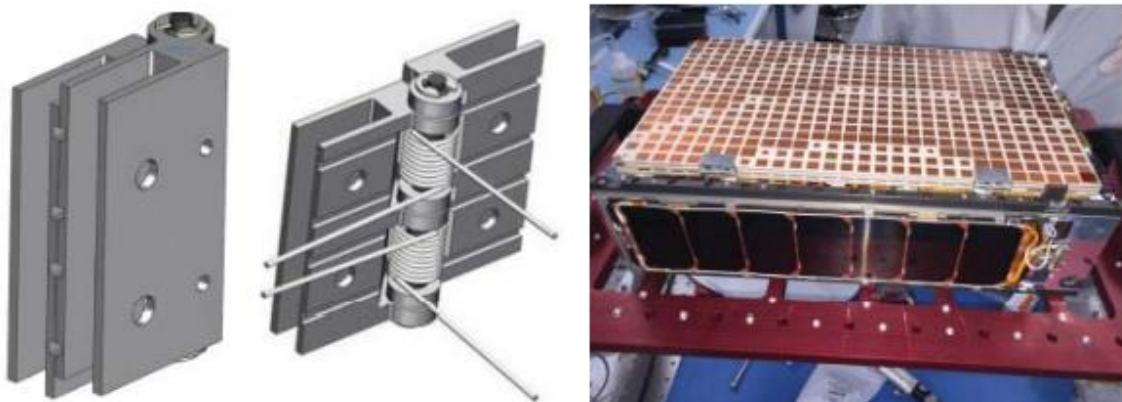
Η στόχος των CubeSat δορυφόρων 6U MarCo ήταν η παροχή βοηθητικών λειτουργιών επικοινωνίας για το διαστημικό όχημα InSight Lander στον Άρη. Για την επικοινωνία του δορυφόρου με τον επίγειο σταθμό χρησιμοποιήθηκε RA κεραία σε λειτουργία μετάδοσης (transmit-only) στη ζώνη X-Band του δικτύου μακρινού διαστήματος (Deep Space Network), στις συχνότητες 8.4-8.45GHz. Αυτή η κεραία έχει πολλές ομοιότητες με αυτή του δορυφόρου ISARA, αλλά με βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Το κέρδος της ήταν μεγαλύτερο από 28.0dBi, με χαμηλά επίπεδα πλευρικών λοβών ακτινοβολίας (κάτω από -15dB) και χαμηλή σταυροπόλωση (XPD μεγαλύτερη από 10dB).

Η κεραία αποτελείται από τρεις επίπεδες επιφάνειες ανακλαστήρα οι οποίες τροφοδοτούνται από μια patch στοιχειοκεραία. Το βάρος της κεραίας μαζί με τον μηχανισμό ανάπτυξης ήταν λιγότερο από 2 κιλά. Ο ανακλαστήρας όπως και η κεραία τροφοδοσίας χρησιμοποιούν μεντεσέδες με ελατήρια, με αποτέλεσμα η κεραία να μπορεί να διπλώσει επίπεδα στο σώμα του δορυφόρου καταλαμβάνοντας έτσι τον λιγότερο δυνατό όγκο (πρακτικά μηδενικό χώρο). Οι διαστάσεις του ανακλαστήρα σε πλήρη ανάπτυξη είναι 2.286 mm x 33.5cm x 59.7cm, ενώ στην θέση αποθήκευσης τα τρία μέρη του ανακλαστήρα διπλώνουν μεταξύ τους σε διαστάσεις 12.5 mm x 210 mm x 345 mm. Η ενεργοποίηση του μηχανισμού ανάπτυξης έγινε σύντομα μετά την εκτόξευση με χρήση νήματος (Vectran) που καίγεται (Nichrome burn-wire),

απελευθερώνοντας αρχικά τον ανακλαστήρα και στην συνέχεια την κεραία (feed). Η επέκταση της κεραίας γίνεται μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα και μόνο με έναν μηχανισμό απελευθέρωσης, αυξάνοντας την αξιοπιστία του.



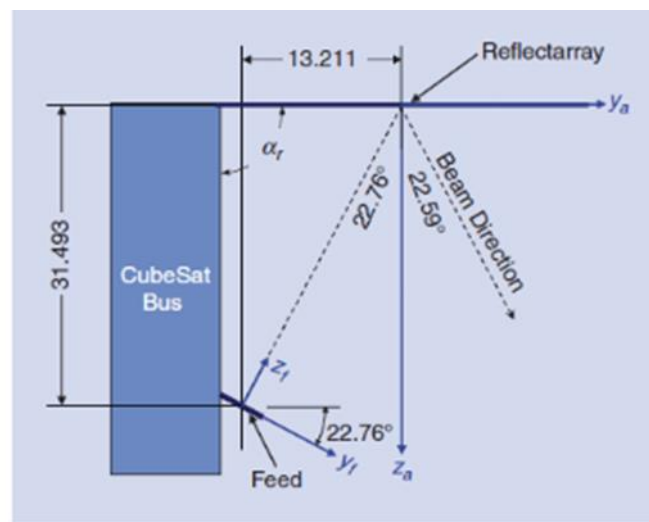
Εικόνα 95: Διαδικασία επέκτασης της κεραίας ReflectArray των δορυφόρων MarCO



Εικόνα 96: Μεντεσέδες με ενωσματομένα ελατήρια (αριστερά) και η κεραία σε θέση αποθήκευσης στην επιφάνεια του δορυφόρου (δεξιά)

Ο ανακλαστήρας κατασκευάστηκε από δύο μέρη κεραμικού υδρογονάνθρακα ενισχυμένο με υαλοβάμβακα (Rogers 4003) πάχους 0.813mm και ένα μέρος συνθετικού γραφίτη (STABLCOR) πάχους 0.589mm ανάμεσα στα δύο υποστρώματα, το οποίο προσφέρει καλύτερη σταθερότητα και διατηρεί επίπεδη την επιφάνεια σε αλλαγές θερμοκρασίας. Αυτός ο τρόπος κατασκευής προσφέρει έναν λεπτό, ανθεκτικό και σταθερό ανακλαστήρα ο οποίος θα παραμένει επίπεδος κατά την εκτόξευση και στις συνθήκες του διαστήματος.

Η γεωμετρία της κεραίας ήταν τύπου offset-fed. Η κεραία τροφοδοσίας τοποθετήθηκε στην πλευρά του δορυφόρου με κλίση 22.6° για να παρέχει την ταυτόχρονη επικοινωνία μεταξύ του InSight Lander και του επίγειου σταθμού. Η τοποθεσία της κεραίας που επιλέχτηκε έγινε με γνώμονα την μεγιστοποίηση της εστιακής απόστασης, την απλοποίηση του σχεδιασμού τροφοδοσίας και την ελαχιστοποίηση του μήκους του καλωδίου.



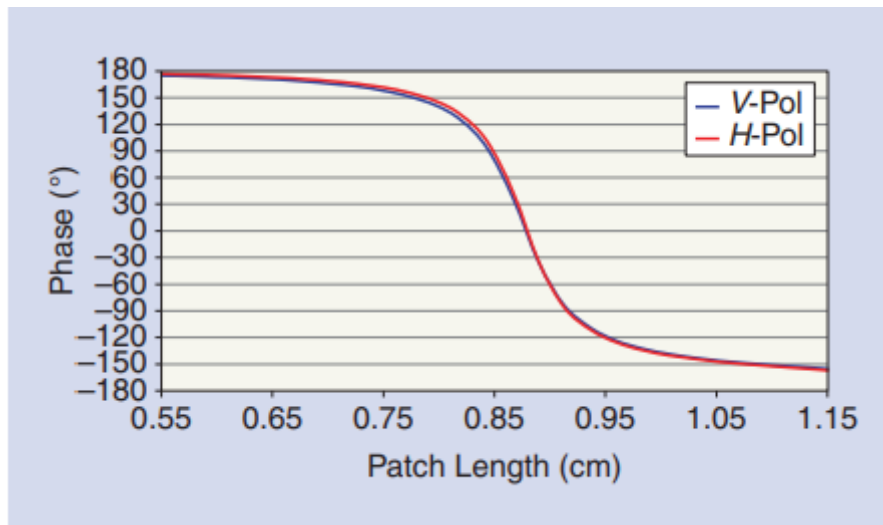
Εικόνα 97: Γεωμετρία της κεραίας RA επάνω στον δορυφόρο

Ο ανακλαστήρας της κεραίας αποτελείται από στοιχεία patch διαφορετικού μεγέθους. Η φάση του κάθε στοιχείου εξαρτάται από την εξίσωση

$$\varphi_i + \varphi_0 - k_0(R_i + \bar{r}_i \cdot \hat{r}_0) = 2\pi N$$

με R_i την απόσταση της κεραίας τροφοδοσίας από το στοιχείο i , φ_i την φάση του ανακλώντος πεδίου από το στοιχείο i , το φ_0 είναι μια αυθαίρετη σταθερά φάσης, το $\bar{r}_i$ είναι ένα διάνυσμα από το κέντρο της διάταξης προς το στοιχείο i και το $\hat{r}_0$ είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση της κύριας δέσμης. Για τον υπολογισμό της δέσμης ακτινοβολίας και τον σχεδιασμό των στοιχείων χρησιμοποιήθηκε η τεχνική ανάλυσης Floquet. Επειδή το μήκος κύματος είναι μεγαλύτερο από τις διαστάσεις της κεραίας ($9.4\lambda \times 16.8\lambda$), τα στοιχεία προσαρμόστηκαν με μικρές αποστάσεις μεταξύ τους για να χωρέσει όσο το δυνατόν περισσότερα καθώς αυτό αυξάνει το εύρος ζώνης της κεραίας και προσφέρει καλύτερη

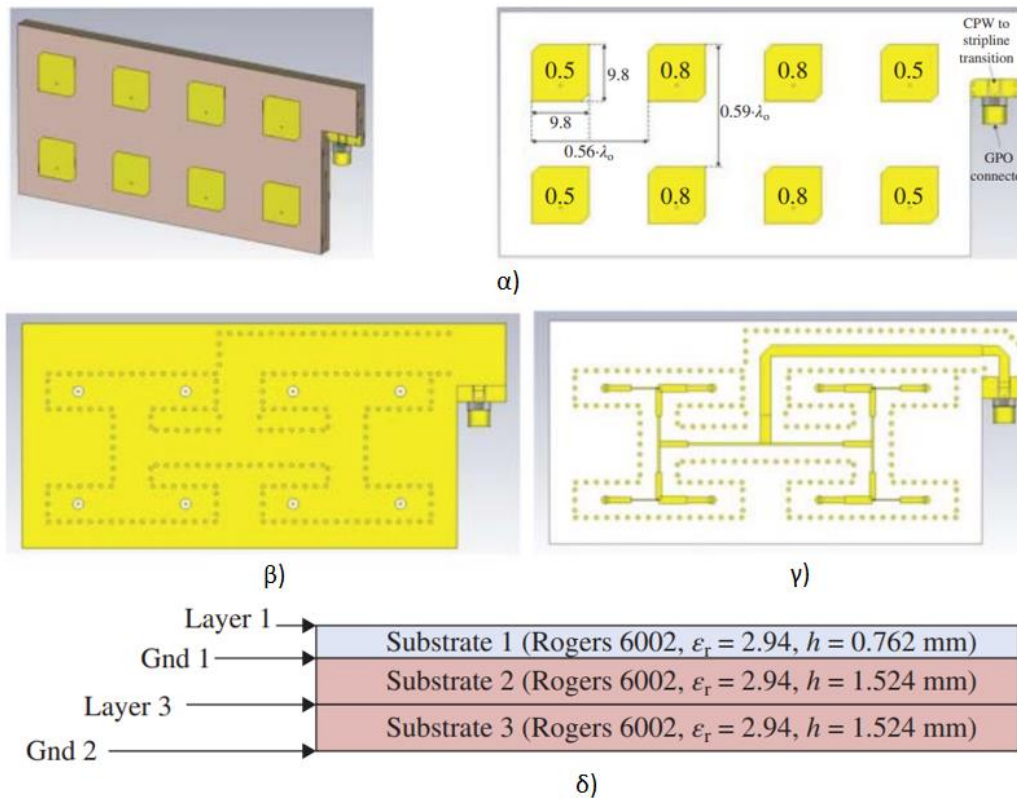
ομοιομορφία μεταξύ των στοιχείων. Το πάχος του υποστρώματος έπρεπε να είναι λεπτό και ελαφρύ, αυτό όμως προκαλεί μείωση του εύρους ζώνης και μειώνονται οι ανοχές κατά την κατασκευή των στοιχείων.



Εικόνα 98: MarCo reflectarray S-curve της ανάκλασης φάσης ανά μήκος στοιχείου για γωνία πρόσπτωσης 23°

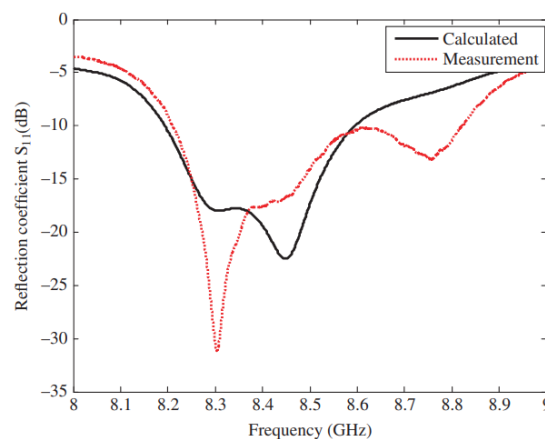
Η επιλογή της κεραίας τροφοδοσίας είναι ιδιαίτερα σημαντική για την συνολική επίδοση της κεραίας. Το συνολικό κέρδος της RA μπορεί να αυξηθεί με μια κεραία τροφοδοσίας με χαμηλές απώλειες υπερφωτισμού (spillover), και μεγάλη κάλυψη ακτινοβολίας (illumination efficiency). Επίσης η αύξηση της εστιακής απόστασης f/D μειώνει τις διακυμάνσεις της γωνίας πρόσπτωσης και αυξάνει την κατευθυντικότητα της κεραίας τροφοδοσίας, αλλά το μέγεθός της θα πρέπει και αυτό να αυξηθεί.

Η κεραία τροφοδοσίας που επιλέχτηκε ήταν patch 2x4 στοιχείων, με συχνότητα λειτουργίας 8.3–8.5 GHz με αριστερόστροφη κυκλική πόλωση (LHCP), δεδομένου ότι η ζητούμενη πόλωση της ολοκληρωμένης κεραίας ήταν RHCP. Η κυκλική πόλωση επιτυγχάνεται με εγκοπές στις δύο αντίθετες άκρες των στοιχείων, ενώ η τροφοδοσία τους γινόταν με ακροδέκτες που συνδέεται με το δίκτυο τροφοδοσίας.

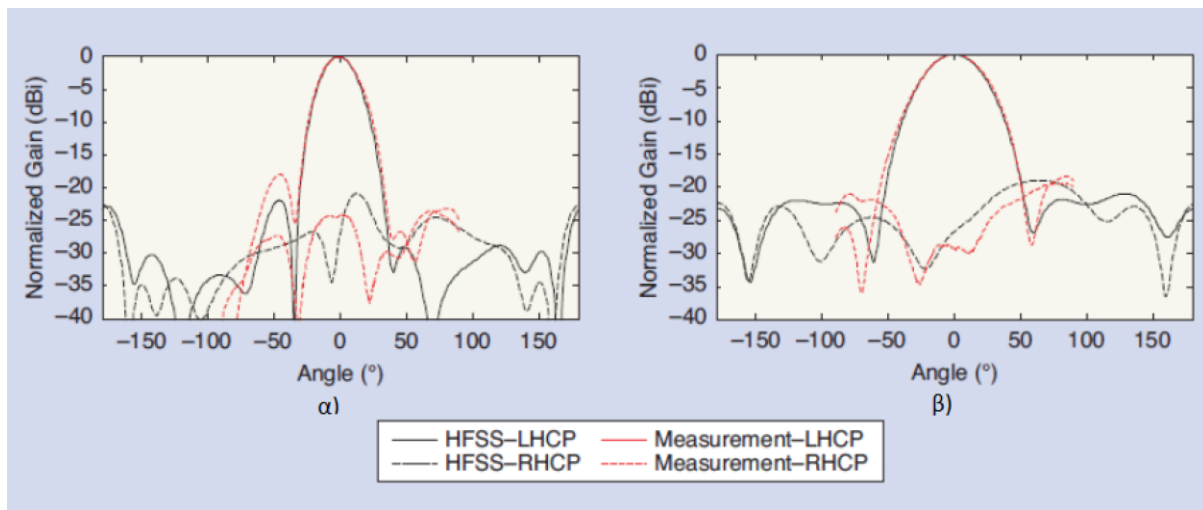


Εικόνα 99: Κεραία τροφοδοσίας patch array, α) Γεωμετρία του πρώτου επιπέδου και διαστάσεις στοιχείων, β) Επίπεδο γείωσης του πρώτου υποστρώματος, γ) ταινιογραμμή (stripline) τροφοδοσίας με κατανομή Taylor δ) διάταξη υποστρωμάτων

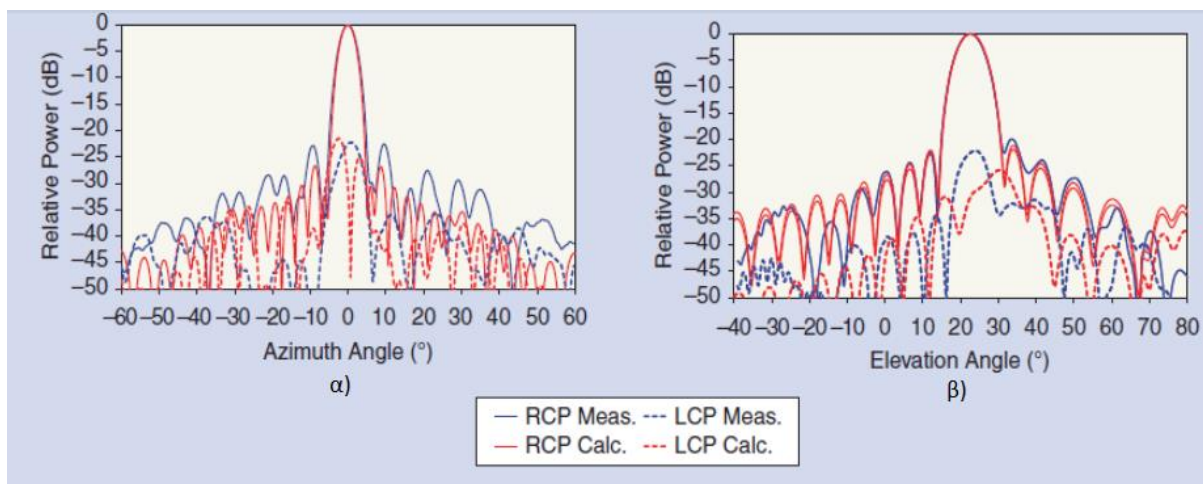
Το μετρημένο κέρδος της κεραίας τροφοδοσίας ήταν μεγαλύτερο από 13.8dBi, ο συντελεστής ανάκλασης S_{11} ήταν χαμηλότερος από -10dB και το axial ratio μικρότερο από 3dB για τις συχνότητες λειτουργίας 8.20-8.82GHz. Η ολοκληρωμένη κεραία RA είχε κέρδος 29.2dBic και αποδοτικότητα 42% (8.425 GHz).



Διάγραμμα 11: Διάγραμμα S_{11} της κεραίας τροφοδοσίας



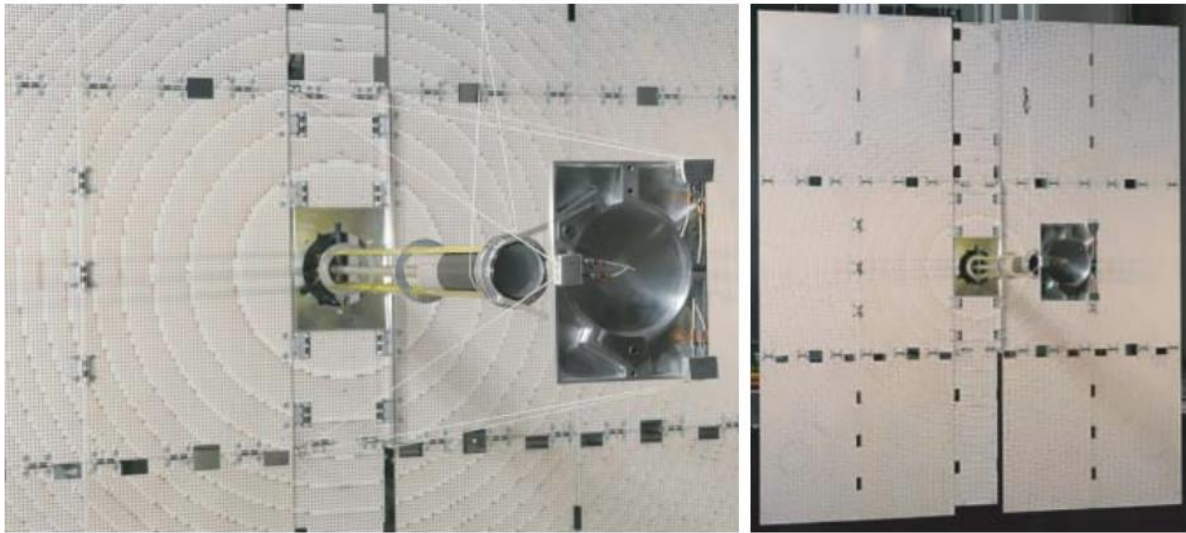
Διάγραμμα 12: Διάγραμμα ακτινοβολίας της ισχύος προς γωνία α) αζιμουθίου και β) ανύψωσης, της κεραίας τροφοδοσίας (feed)



Διάγραμμα 13: Διάγραμμα ακτινοβολίας της ισχύος προς γωνία α) αζιμουθίου και β) ανύψωσης της κεραίας RA

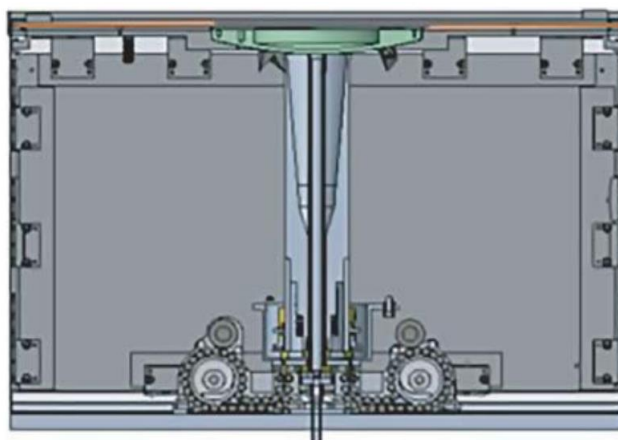
4.9.3.3. Omera - One Meter Reflectarray Antenna

Η κεραία του Omera είναι κεραία υψηλού κέρδους και είναι η μεγαλύτερη RA για Cubesat κλάσης 6U. Η κεραία λειτουργεί στις συχνότητες 35.75GHz και παρέχει κέρδος 47.4dBi με 32% αποδοτικότητα. Για να έχει μια RA υψηλό εύρος ζώνης και αποδοτικότητα συνήθως απαιτείται μεγάλος λόγος f/D , δηλαδή η απόσταση του feed να είναι σχετικά μεγάλη από τον ανακλαστήρα. Επειδή μια τέτοια κατασκευή θα ήταν δύσκολο να προσαρμοστεί σε έναν CubeSat, η κεραία του Omera προσαρμόστηκε σε γεωμετρία Cassegrain, μειώνοντας τις αποστάσεις μεταξύ του feed και του ανακλαστήρα, ενώ παράλληλα διατηρεί ή αυξάνει τον λόγο f/D . Επιπλέον, λόγω της μικρότερης απόστασης μεταξύ του feed και του πομποδέκτη, μειώνονται οι απώλειες μετάδοσης μεταξύ τους.

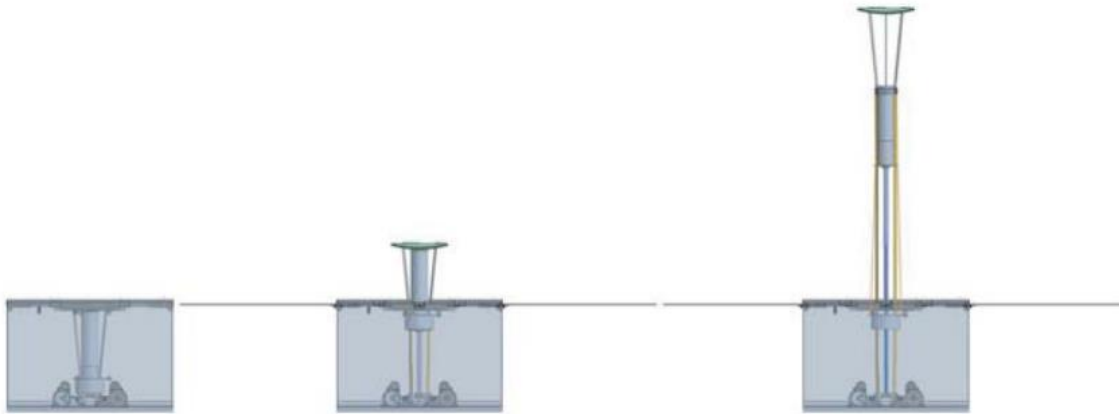


Εικόνα 100: Προτότυπο Ka ReflectArray - OMERA

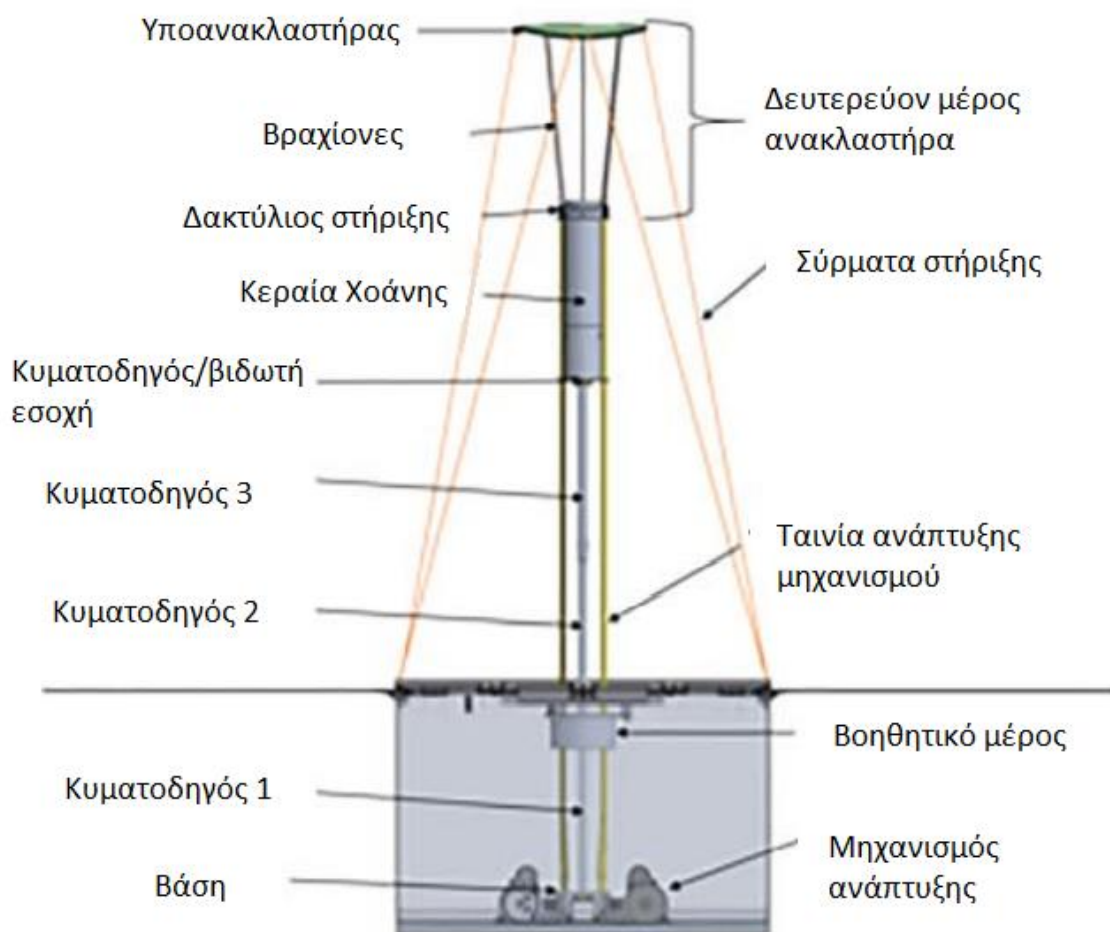
Το feed αποτελείται από την χοανοκεραία και χρησιμοποιεί τηλεσκοπικό μηχανισμό ανάπτυξης ο οποίος λαμβάνει τον ρόλο του κυματοδηγού. Αυτός ο σχεδιασμός είναι παρόμοιος με αυτό του CubeSat RainCube, ο οποίος προσφέρει το πλεονέκτημα χαμηλότερων απωλειών καθώς δεν χρειάζονται ομοαξονικά καλώδια. Επάνω στην χοάνη στερεώνεται ο δευτερεύοντας παραβολικός ανακλαστήρας με τρεις επεκτάσιμους βραχίονες. Ο δευτερεύοντας ανακλαστήρας θα μπορούσε να σχεδιαστεί και σε RA επίπεδη μορφή ώστε να καταλαμβάνει λιγότερο όγκο. Στην θέση αποθήκευσης οι κυματοδηγοί είναι στο εσωτερικό της χοάνης. Το feed, οι δύο από τους τρεις κυματοδηγούς και ο υποανακλαστήρας επεκτείνονται προς τα επάνω χρησιμοποιώντας δύο ελεγχόμενες κυρτές ταινίες. Για καλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιήθηκαν έξι σύρματα όπου κρατάνε σταθερό τον υποανακλαστήρα όταν η κατασκευή είναι πλήρως εκτεταμένη.



Εικόνα 101: Κατασκευή τηλεσκοπικού μηχανισμού της χοανοκεραίας σε θέση αποθήκευσης



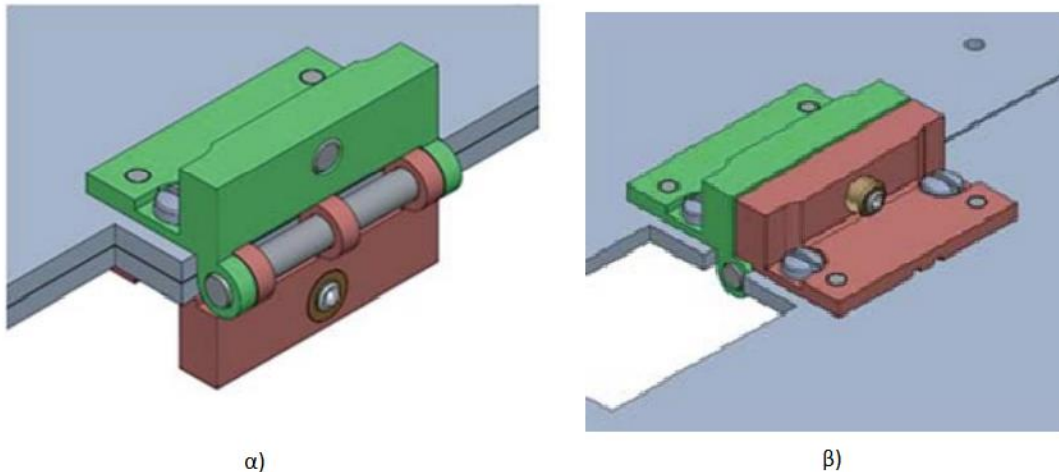
Εικόνα 102: Στάδια επέκτασης κεραίας



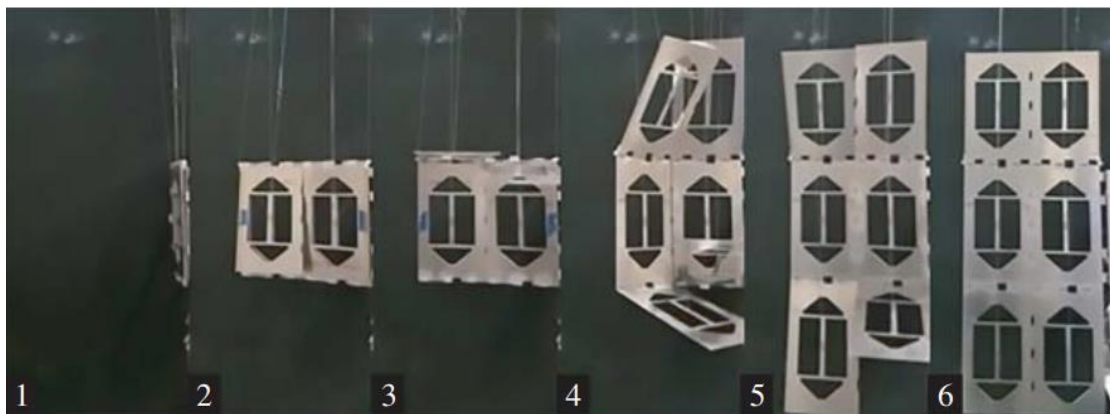
Εικόνα 103: Μέρη του μηχανισμού επέκτασης της χοανοκεραίας, των κυματοδηγών και του ανακλαστήρα, σε πλήρη αναπτυγμένη θέση.

Ο βασικός ανακλαστήρας αποτελείται από 16 επίπεδες επιφάνειες με 345x287 patch στοιχεία διαφορετικού μεγέθους και συνολικές διαστάσεις 986x821mm². Οι δώδεκα επιφάνειες είναι επεκτάσιμες και αποθηκεύονται σε δύο εξάδες περιμετρικά στις πλευρές του δορυφόρου 6U,

καταλαμβάνοντας $360 \times 220\text{mm}^2$. Λόγω της μεγάλης διάστασης του ανακλαστήρα, η ακρίβεια της συνολικής ομαλότητας της επιφάνειας είναι πολύ σημαντική. Ο μεγαλύτερος παράγοντας που επηρεάζει αυτή την κεραία είναι η σωστή υλοποίηση των μεντεσέδων και για αυτό τον λόγο κατασκευάστηκαν ειδικοί μεντεσέδες που μπορούν να προσαρμοστούν σε ακρίβεια μερικών εκατοστών της μοίρας χρησιμοποιώντας μια βίδα στο κέντρο του μεντεσέ, προσαρμόζοντας έτσι την γωνία μεταξύ των επιφανειών. Εκτός από την ζητούμενη ακρίβεια, αυτοί οι μεντεσέδες προσφέρουν μικρότερα κενά ανάμεσα στις επιφάνειες του ανακλαστήρα, σε σχέση με την κεραία του ISARA.



Εικόνα 104: Μεντεσέδες σύνδεσης των επιφανειών ανακλαστήρα, με βίδες αυξομείωσης απόστασης για έλεγχο της γωνίας μεταξύ των επιφανειών, α) όταν οι επιφάνειες είναι κλειστές και β) όταν είναι αναπτυγμένες



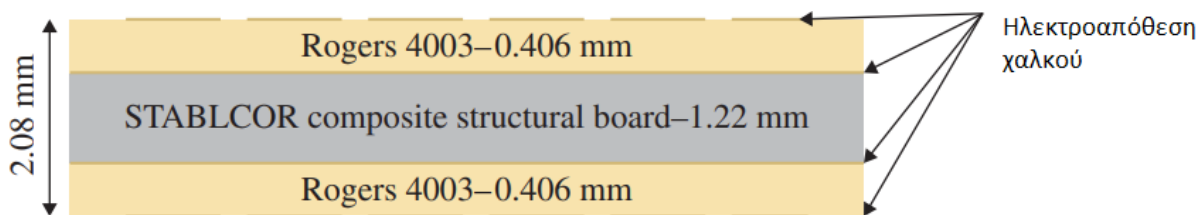
Εικόνα 105: Διαδικασία επέκταση των έξι επιφανειών ανακλαστήρα.

Η φάση του κάθε στοιχείου εξαρτάται από την εξίσωση

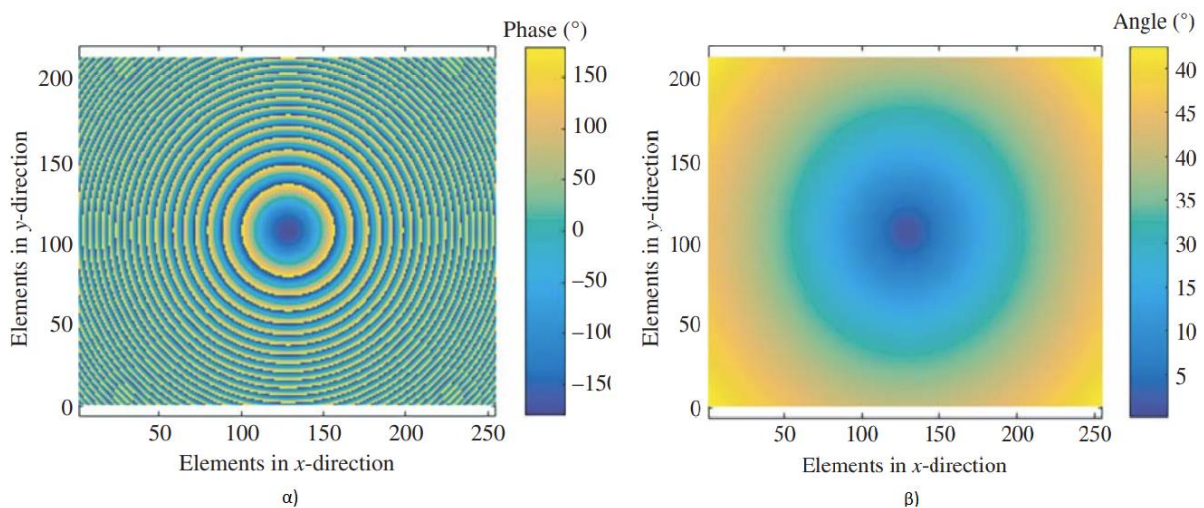
$$\varphi_i + \varphi_0 - k_0(R_i + \bar{r}_i \cdot \hat{r}_0) = 2\pi N$$

με R_i την εστιακή απόσταση της κεραίας τροφοδοσίας από το στοιχείο i , φ_i την απαραίτητη καθυστέρηση φάσης της γραμμής τροφοδοσίας του στοιχείου i , το φ_0 είναι μια αυθαίρετη σταθερά φάσης, το $\bar{r}_i$ είναι ένα διάνυσμα από το κέντρο της διάταξης προς το στοιχείο i , το $\hat{r}_0$ είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση της κύριας δέσμης και το k_0 είναι το μήκος κύματος στο κενό.

Οι γωνίες του προσπίπτοντος κύματος κυμαίνονται από 0° , για το κεντρικό στοιχείο του ανακλαστήρα, έως 45° για τα ακριανά στοιχεία. Λόγω του χαμηλού λόγου f/D οι γωνίες αυτές είναι σημαντικές για την καλή αποδοτικότητα της κεραίας. Η κατασκευή των υποστρωμάτων του ανακλαστήρα, είναι παρόμοια με αυτή της κεραίας των δορυφόρων MarCO. Οι επιφάνειες αποτελούνται από τρία στρώματα, όπου η επάνω και κάτω επιφάνεια του υλικού Rogers RO4003C περιλαμβάνουν τα στοιχεία και μια κεντρική επιφάνεια STABLCOR, που προσφέρει σταθερότητα.

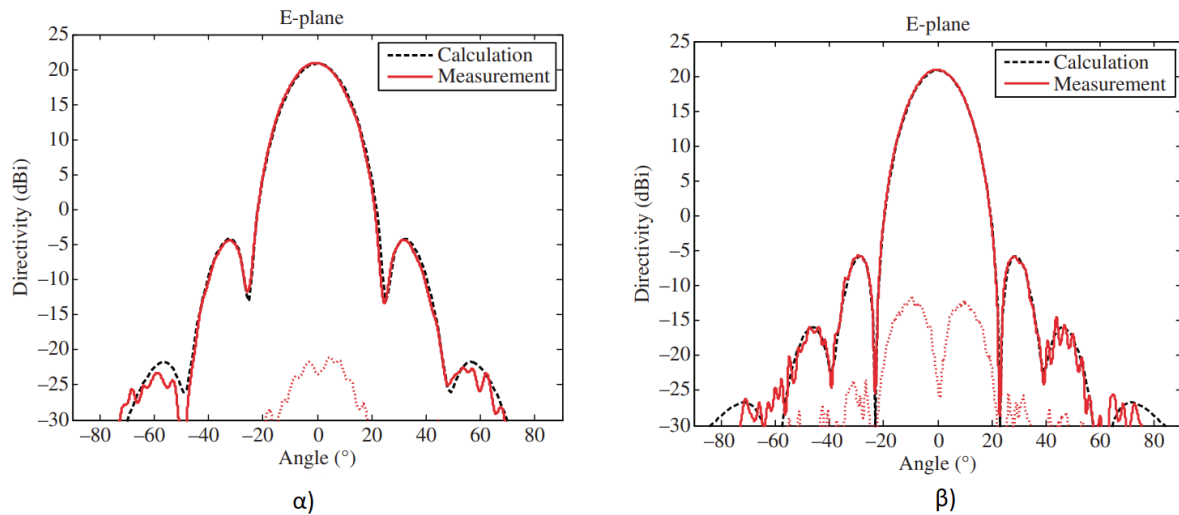


Εικόνα 106: Μέρη υποστρωμάτων των επιφανειών ανακλαστήρα

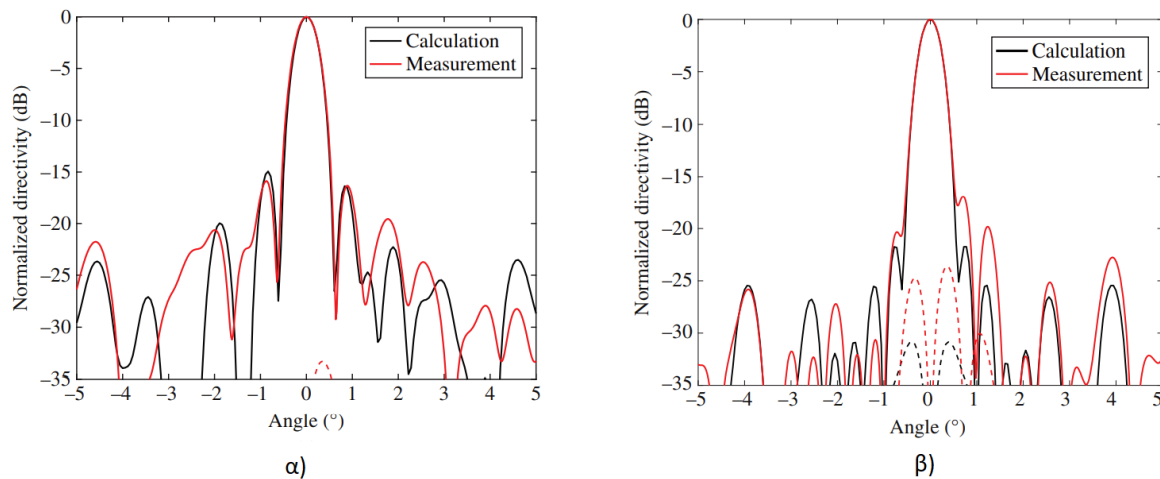


Εικόνα 107: α) Απαιτούμενη καθυστέρηση φάσης των στοιχείων ανακλαστήρα, β) Γωνία προσπίπτοντος κύματος στα στοιχεία του ανακλαστήρα

Η κεραία τροφοδοσίας έχει κέρδος 20.40dBi και κατευθυντικότητα 20.95dBi. Το συνολικό κέρδος της RA είναι 47.38dBi και αποδοτικότητα 32% στη συνόττητα λειτουργίας 35.75GHz. Οι συνολικές απώλειες ήταν 4.99dB, με τις πιο σημαντικές να είναι οι απώλειες spillover (0.91dB), taper(1.51dB) και η ακρίβεια της ομαλότητας της επιφάνειας ανακλαστήρα (1.2dB).



Διάγραμμα 14: Διάγραμμα ακτινοβολίας τηλεσκοπικής χοανοκεραίας σε συχνότητα 35.75GHz για α) $\varphi = 0$ και β) $\varphi = 90$.

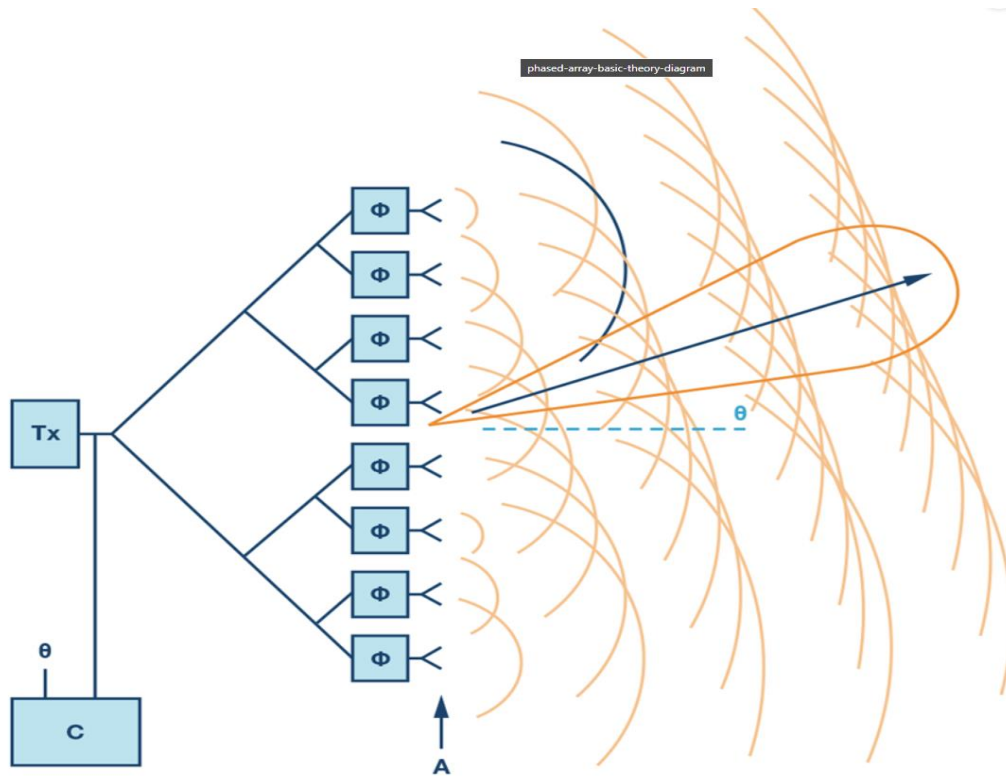


Διάγραμμα 15: Διάγραμμα ακτινοβολίας προσομοίωσης και μετρήσεων πρωτότυπου RA ενός μέτρου, σε συχνότητα 35.75GHz για α) $\varphi = 0$ και β) $\varphi = 90$

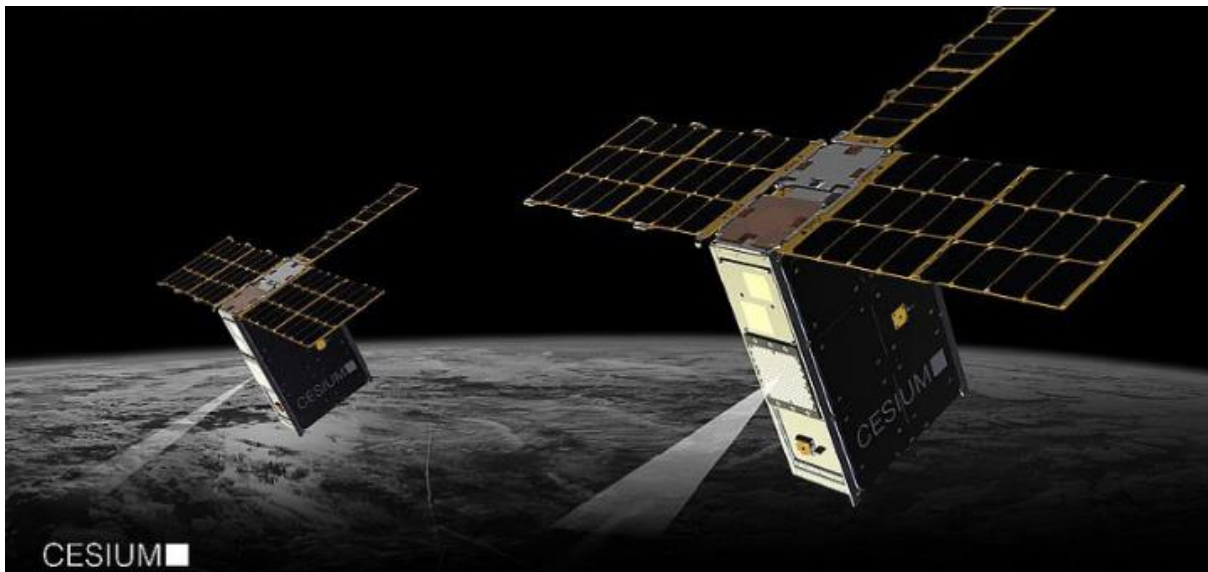
4.10. Φασικές Στοιχειοκεραίες (Retrodirective & Self-Steering)

Οι φασικές στοιχειοκεραίες ή αλλιώς phased arrays ανήκουν στην κατηγορία των επίπεδων κεραιών με πολλά ενεργά στοιχεία. Σε αντίθεση με άλλες στοιχειοκεραίες (πχ patch array) τα στοιχεία των phased arrays ελέγχονται ηλεκτρονικά αλλάζοντας την φάση τους, διαμορφώνοντας έτσι τη κατεύθυνση της δέσμης ακτινοβολίας (beamsteering - beamforming). Η φάση των στοιχείων ελέγχεται με ολισθητές φάσης (phase shifter) με τέτοιο τρόπο ώστε να συνδυάζονται οι δέσμες ακτινοβολίας των στοιχείων εποικοδομητικά προς την ζητούμενη κατεύθυνση και κατασταλτικά προς όλες τις άλλες κατευθύνσεις. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να έχουμε μια μηχανικά σταθερή κεραία που να στρέφει την δέσμη ακτινοβολίας της ηλεκτρονικά. Το πλεονέκτημα είναι πιο δυνατό σήμα προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας πετυχαίνοντας καλύτερο σηματοθορυβικό λόγο και μεγαλύτερες ταχύτητες επικοινωνίας. Επιπλέον μια κεραία με μεγαλύτερο κέρδος μπορεί να επιτρέψει την επικοινωνία μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού με παρόμοιο Link Budget χρησιμοποιώντας όμως λιγότερη ισχύ. Μια phased array κεραία όμως καταναλώνει περισσότερη ενέργεια σε σχέση με μια κεραία σταθερής δέσμης ακτινοβολίας και ίδιου κέρδους. Η πλειοψηφία των CubeSat δορυφόρων είναι χαμηλής τροχιάς και η χρήση μιας κεραίας σταθερής δέσμης με υψηλό κέρδος απαιτεί συνεχή περιστροφή του δορυφόρου προς τον επίγειο σταθμό. Οι phased array μπορούν να προσφέρουν γρήγορη αλλαγή της κατεύθυνσης ακτινοβολίας χωρίς να βασίζονται στους γυροσκοπικούς μηχανισμούς των δορυφόρων (attitude control). Ένα ακόμη πλεονέκτημα των phased arrays είναι η ασφάλεια που προσφέρουν ενάντια σε επιθέσεις από επίγειους σταθμούς, εμποδίζοντας την ακτινοβολία από πομπές από τυχαίες κατευθύνσεις. Όπως και στην κατασκευή των ReflectArray κεραιών, μπορούμε να κατασκευάσουμε την κεραία χωρίς δυναμικό έλεγχο δέσμης. Το διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να καθοριστεί κατά τον σχεδιασμό της κεραίας και να παραμείνει σταθερό. Κάτι τέτοιο ίσως να ήταν ωφέλιμο σε περιπτώσεις που κάποιο μέρος του δορυφόρου εμποδίζει την ακτινοβολία προς την κεραία, αλλά η επιλογή μιας απλής patch κεραίας προσαρμοσμένη στο σώμα του δορυφόρου θα ήταν καλύτερη επιλογή.

Οι phased array δεν έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετά στο παρελθόν σε μικρούς δορυφόρους. Το κόστος κατασκευής και σχεδιασμού των phased array είναι σημαντικά υψηλότερο από άλλες κεραίες όπως μονόπολα, δίπολα και patch. Το μέγεθός τους είναι επίσης μεγαλύτερο διότι χρειάζονται περισσότερα ενεργά στοιχεία (ολισθητές φάσης, υπολογιστική μονάδα), δυσκολεύοντας την προσαρμοστικότητά τους στους δορυφόρους. Η ελεγχόμενη κατεύθυνση της ακτινοβολίας τους όμως προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για μικρούς δορυφόρους. Με την βελτίωση της τεχνολογίας των κυκλωμάτων, μπορεί να μειωθεί αρκετά το κόστος των phased array.



Εικόνα 108: Διάγραμμα κεραίας Phased Array (όπου Φ οι ολισθητές φάσης)

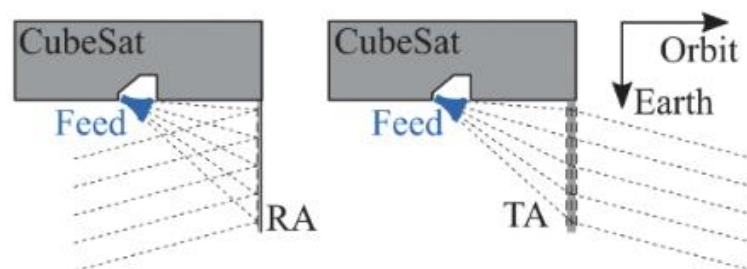


Εικόνα 109: Phased Array με ηλεκτρικά ελεγχόμενη δέσμη ακτινοβολίας, του δορυφόρου CESIUM 6U [68]

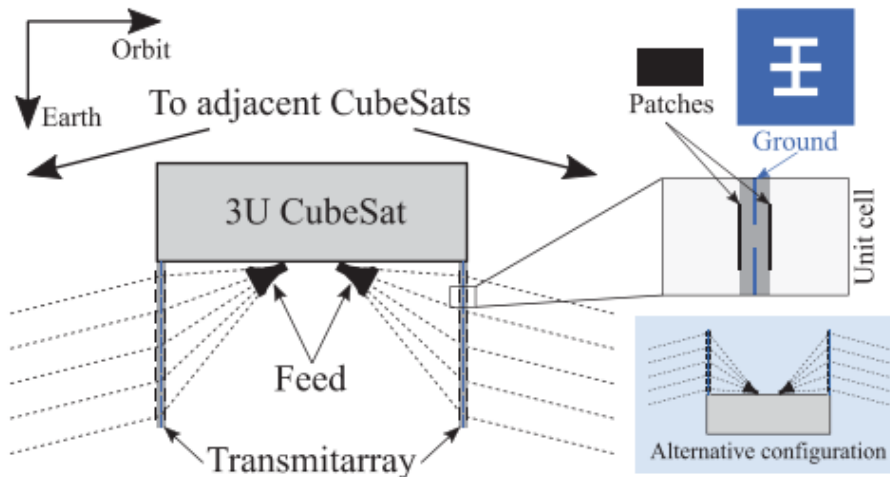
4.11. Transmitarrays

Οι transmitarray (TA) κεραίες είναι επίπεδες κεραίες με παρόμοια χαρακτηριστικά με τις RA. Η βασική διαφορά τους είναι ότι οι RA δρουν ως ανακλαστήρες, ενώ οι TA ως φακοί οι οποίοι εστιάζουν την ακτινοβολία προς το feed. Ομοίως με τις RA, ο τρόπος που θα εστιάζεται η ακτινοβολία προσαρμόζεται με ολίσθηση φάσης, ανάλογα την στοίχιση και γεωμετρία των στοιχείων της επιφάνειάς και μπορούν να προσαρμοστούν σε στατική ή διαμορφώσιμη δέσμη ακτινοβολίας. Σε αντίθεση όμως με τις RA, η επιφάνεια των στοιχείων των TA δεν εμποδίζουν την ακτινοβολία και έτσι παρέχουν μια καλή εναλλακτική για αποστολές όπου η εγκατάσταση RA δεν θα ήταν εφικτή. Τέτοιο παράδειγμα είναι το πρωτότυπο στο άρθρο [69], όπου σχεδιάστηκε κεραία TA κυκλικής πόλωσης για συχνότητες K-Band για επικοινωνία μεταξύ άλλων δορυφόρων (ISL - Intersatellite-Link). Τα στοιχεία αποτελούν μια παραμετροποίηση της μεθόδου [70] όπου χρησιμοποιούνται δύο επιφάνειες στοιχείων στις δύο πλευρές της επιφάνειας γείωσης, με συνολικά πέντε στρώματα. Τα στοιχεία της κεραίας που κατασκευάστηκε είναι aperture-coupled patches με ασύμμετρη εγκοπή και η επιφάνεια αποτελείται συνολικά από τρία επίπεδα, διατηρώντας τον όγκο και το βάρος χαμηλό.

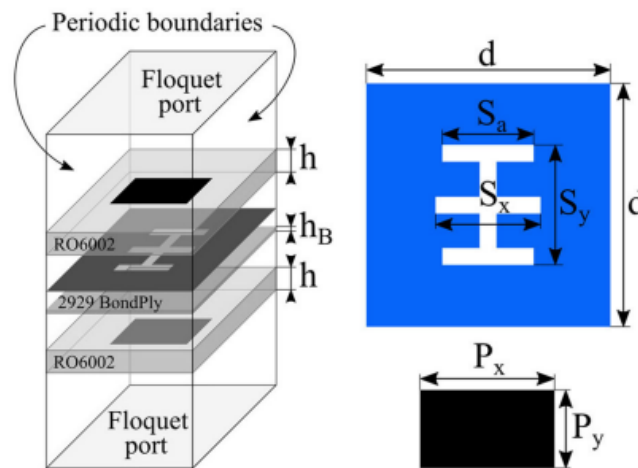
Το feed που επιλέχθηκε ήταν χοανοκεραία κατασκευασμένη από αλουμίνιο. Η επιφάνεια κατασκευάστηκε από δύο στρώματα Rogers 2929 και ο συνολικός αριθμός στοιχείων ήταν 900. Το μέγιστο κέρδος της κεραίας είναι 31.6dBi με αποδοτικότητα διαφράγματος 57%, εύρος ζώνης 5.7% και AR 0.6dB για συχνότητες λειτουργίας 24.6GHz.



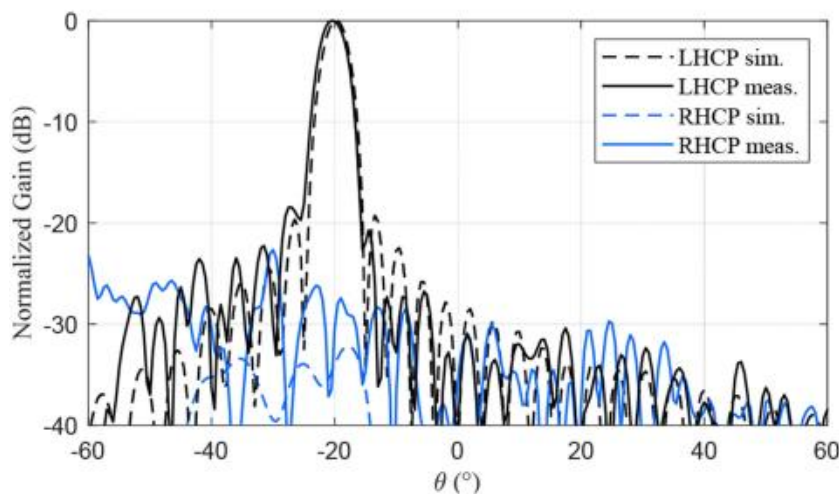
Εικόνα 110: Διαφορά ακτινοβολίας μεταξύ RA και TA.



Εικόνα 111: Διάταξη κεραίας TA και feed για επικοινωνία μεταξύ γειτονικών δορυφόρων και με επίγειους σταθμούς.



Εικόνα 112: Γεωμετρία των στοιχείων patch της κεραίας TA



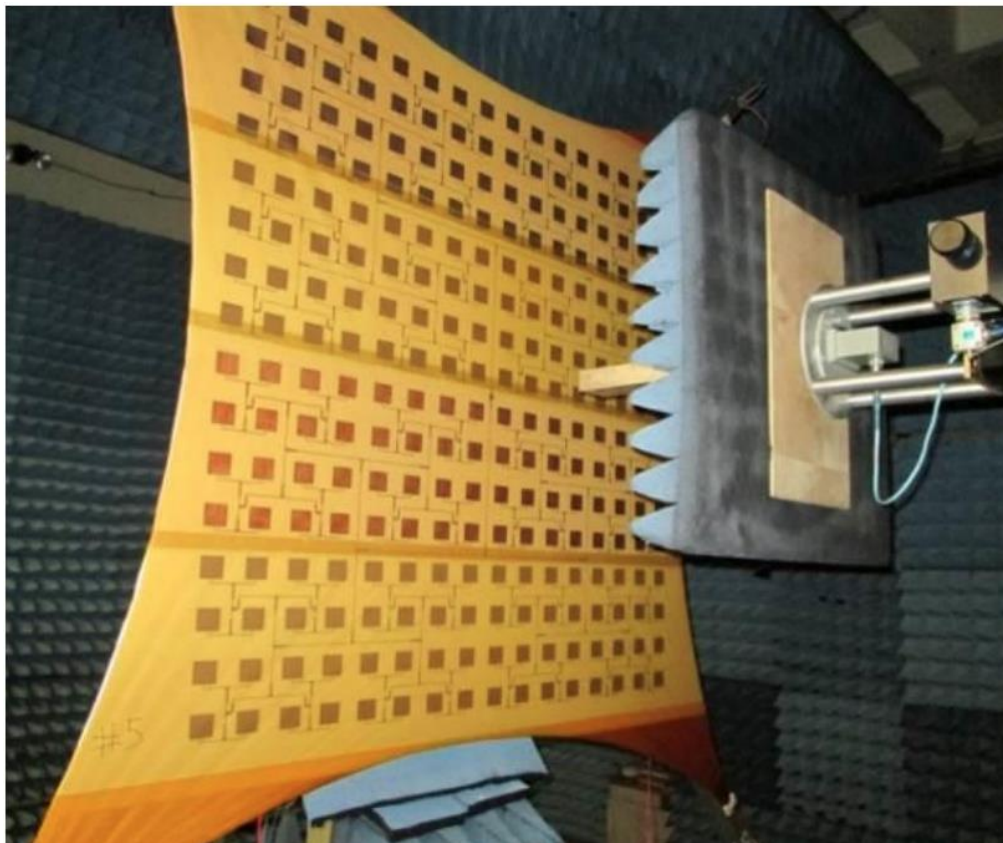
Διάγραμμα 16: Διάγραμμα ακτινοβολίας TA για συχνότητα 24.6GHz ($\varphi=0$)

4.12. Κεραίες Μεμβράνης

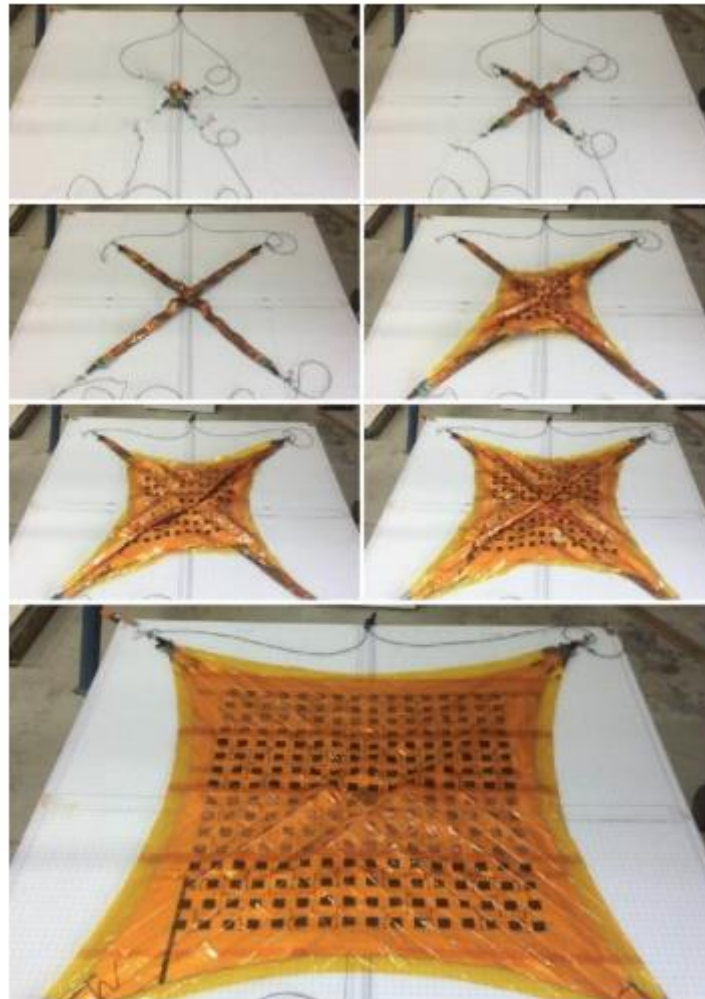
Οι κεραίες μεμβράνης προσφέρουν υψηλό κέρδος και εξαιρετικά χαρακτηριστικά όγκου αποθήκευσης. Αυτό τις καθιστά καλές επιλογές για CubeSat, αλλά το μειονέκτημα είναι η χαμηλή αξιοπιστία τους, καθώς δεν έχουν δοκιμαστεί σε πετυχημένες αποστολές. Το κόστος κατασκευής της κεραίας είναι σχετικά μικρό αλλά απαιτείται συνήθως περίπλοκος μηχανισμός επέκτασης. Μπορούν να βασίζονται σε σχέδιο patch array [71], reflect array, transmit array ή να αποτελούν μέρος παραβολικού ανακλαστήρα. Για να μετατραπεί μια μεμβράνη σε κεραία επιμεταλλώνονται στοιχεία και το δίκτυο τροφοδοσίας επάνω στην επιφάνεια.

Το σχήμα και ο μηχανισμός ανάπτυξης των μεμβρανών μπορεί να είναι διάφορα και εξαρτάται κυρίως από το είδος της κεραίας, το μέγεθός της και τους περιορισμούς χώρου και βάρους του δορυφόρου. Στόχος είναι να κατασκευαστεί μια επιφάνεια χωρίς ατέλειες στην αναπτυγμένη της μορφή.

Στην [72] κατασκευάστηκε patch 16x16 για συχνότητες 3.6GHz. Η κεραία και ο μηχανισμός ανάπτυξης καταλαμβάνουν 2U, ο οποίος αποτελείται από 4 επεκτάσιμους βραχίονες βάρους 109gr. Η κεραία μεμβράνης αποθηκεύεται διπλωμένη και επεκτείνεται με τους βραχίονες.

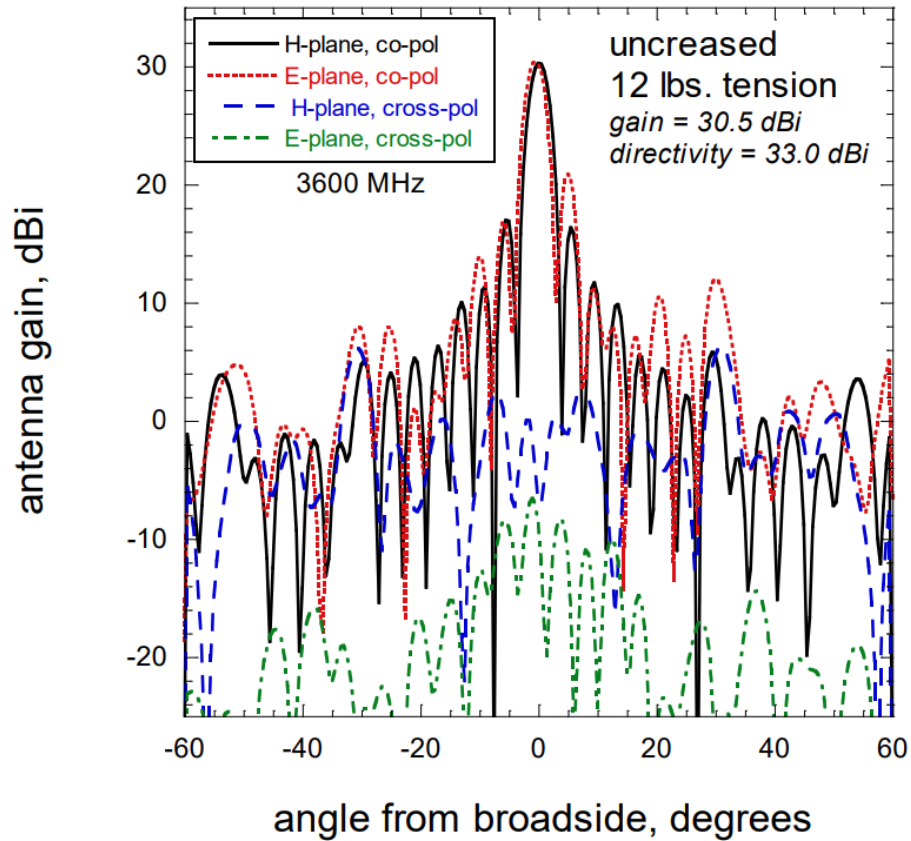


Εικόνα 113: Πρωτότυπο κεραία μεμβράνης 16x16 patch 1.73m²



Εικόνα 114: Βήματα ανάπτυξης κεραίας μεμβράνης 16x16 patch.

Η απόδοση της κεραίας εξαρτάται από την ακρίβεια της επιφάνειας η οποία καθορίζεται από τον τρόπο αποθήκευσης, το υλικό της κεραίας και την δύναμη που της ασκείται από τον μηχανισμό επέκτασης. Για υψηλές συχνότητες μεγαλύτερες από 3.6GHz οι απώλειες αυξάνονται σημαντικά λόγω ατελειών της επιφάνειας. Για συχνότητα λειτουργίας 3.6GHz και άσκησης δύναμης 53N από τους βραχίονες, το κέρδος είναι 30.5dBi και η αποδοτικότητα διαφράγματος 56%. Ο μεγαλύτερος δευτερεύον λοβός ακτινοβολίας είναι 10dB χαμηλότερα από τον κύριο λοβό.



Διάγραμμα 17: Διάγραμμα ακτινοβολίας patch μεμβράνης αναλόγως την ένταση που ασκείται στην μεμβράνη

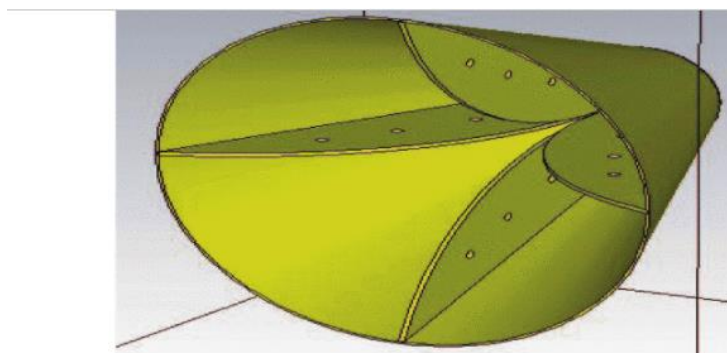
4.13. Horn

Οι χοανοκεραίες είναι χρήσιμες κεραίες ως κεραίες τροφοδοσίας για ανακλαστήρες, reflect arrays ή transmit arrays. Χρησιμοποιούνται ευρέως για τους επίγειους σταθμούς και είναι από τις πιο αποδοτικές κεραίες τροφοδοσίας για παραβολικούς ανακλαστήρες. Προσφέρουν υψηλό κέρδος και μπορούν να προσαρμοστούν με κυκλική πόλωση με χαμηλή σταυροπόλωση και χαμηλά επίπεδα πλευρικών λοβών ακτινοβολίας. Για συχνότητες λειτουργίας μεγαλύτερες από X-Band, οι χοανοκεραίες προσφέρουν καλά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας αλλά λόγω της κατασκευής τους είναι πιο περίπλοκο να εγκατασταθούν στον δορυφόρο σε σχέση με κεραίες όπως patch array.



Εικόνα 115: Ka-Band horn και polarizer -One Meter Mesh Reflector

Στο άρθρο [73] προτείνεται κωνική χοανοκεραία με τροφοδοσία Vivaldi και μηχανισμό επέκτασης, για δορυφόρους 6U. Το κέρδος της κεραίας κυμαίνεται από 10dBi έως 17.5dBi στις συχνότητες 2-13GHz με μεγάλο εύρος ζώνης 11% (-15dB) και ultrawideband για S11 - 10dB. Ο συντελεστή ανάκλασης είναι -37dB στα 6GHz και -23dB στα 10GHz.



Εικόνα 116: Vivaldi-fed conical horn ultrawideband. [A deployable Vivaldi-fed conical horn antenna for CubeSats]

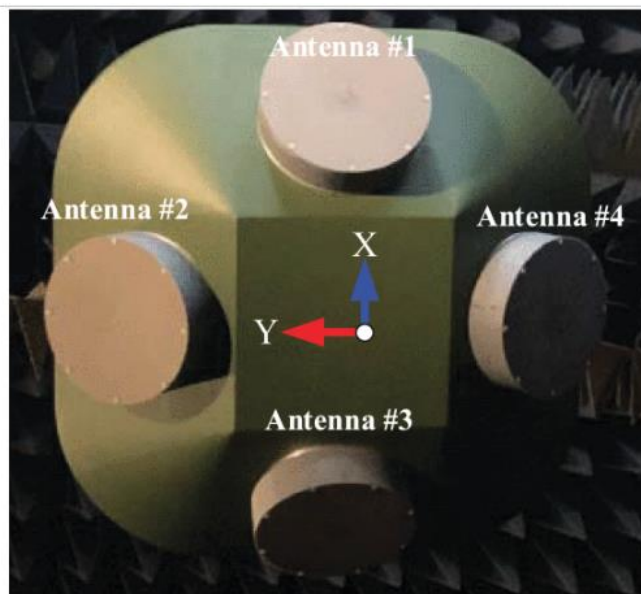
4.14. Σπειροειδείς Κεραίες

Οι σπειροειδείς είναι κεραίες ανεξάρτητες της συχνότητας όπου λειτουργούν σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Οι κεραίες αυτές μπορούν τυπικά να προσφέρουν εύρος ζώνης 9:1 ενώ παράλληλα προσφέρουν κυκλική πόλωση, σε αντίθεση με άλλες UWB κεραίες [16]. Οι πιο συχνοί τύποι σπειροειδών κεραιών είναι η ισογώνια, η αρχιμήδεια και η λογαριθμική κωνική (CLSA). Οι σπειροειδείς κεραίες έχουν δικατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας το οποίο είναι ανεπιθύμητο, διότι η μισή ισχύς της ακτινοβολίας εκπέμπεται προς το μέρος του δορυφόρου. Το πρόβλημα αυτό λύνουν οι σπειροειδείς κεραίες με κοιλότητα και απορροφητικό υλικό (Spiral-abs) και οι λογαριθμικές κωνικές (CLSA).

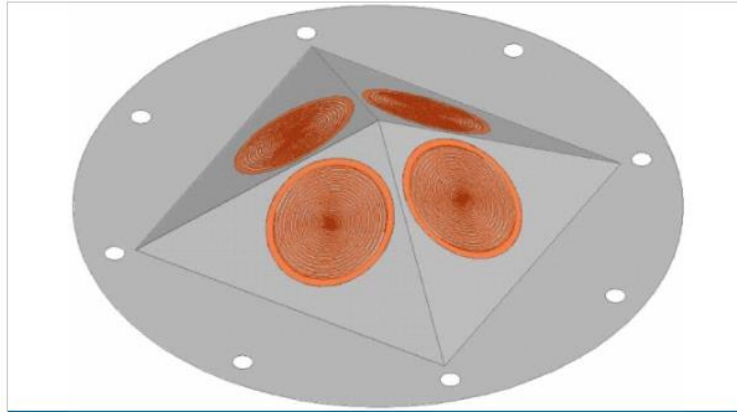
Οι spiral-abs και οι CLSA προσφέρουν κατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας και παρόμοια ή καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με τις ελικοειδείς κεραίες (χαμηλό cross-polarization, κυκλική πόλωση, μεγάλο εύρος ζώνης κλπ.) αλλά σε μικρότερο μέγεθος [74]. Τέτοιες κεραίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία δορυφόρου και επίγειου σταθμού ή λειτουργίες SDR. Συνεπώς είναι μια καλή επιλογή για μικρούς δορυφόρους με βάση τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας τους, αλλά το μέγεθός τους θα μπορούσε να μειωθεί με μηχανισμούς επέκτασης.

4.14.1. Archimedean & Equiangular Spiral Backed by a Shallow Cavity with Absorbing Strips

Οι κεραίες αυτές χρησιμοποιούνται για εποπτεία φάσματος για επίγειους σταθμούς σε τοπολογία στοιχειοκεραίας για λειτουργίες γεωεντοπισμού (AOA), SDR και ραδιοαστρονομία [75] [76] [77].

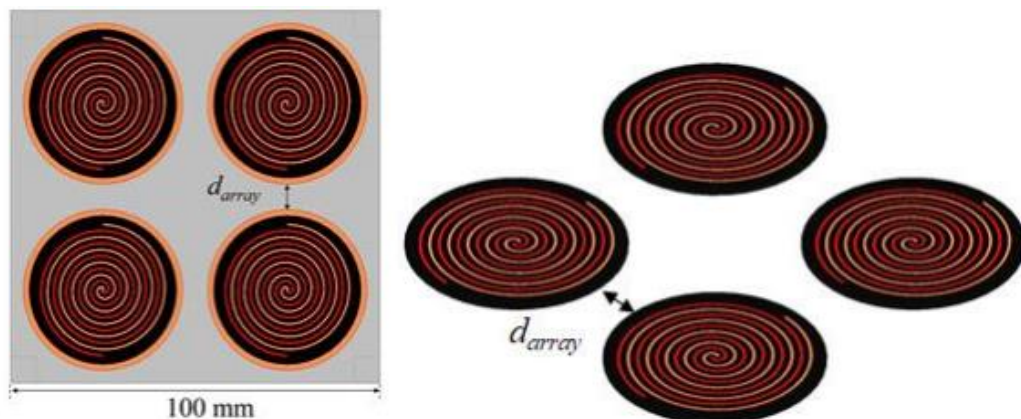


Εικόνα 117: Στοιχειοκεραία σπειροειδούς κεραίας AO-DF [75]



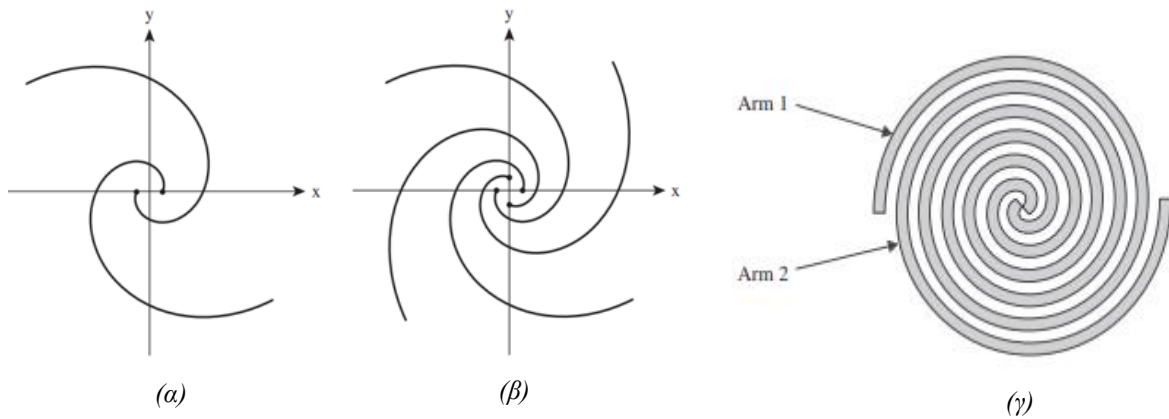
Εικόνα 118: Στοιχειοκεραία σπειροειδούς κεραίας για γεωεντοπισμό [76]

Στις δύο παραπάνω εικόνες φαίνονται στοιχειοκεραίες που χρησιμοποιούνται από επίγειους σταθμούς αλλά για μια τέτοια κατασκευή θα χρειαζόταν κάποιον μηχανισμό επέκτασης και αρκετό χώρο αποθήκευσης. Στην [77] προτείνεται μια σπειροειδής στοιχειοκεραία σε διαστάσεις προσαρμοσμένες για CubeSats για τηλεπικοινωνία σε X-Band.

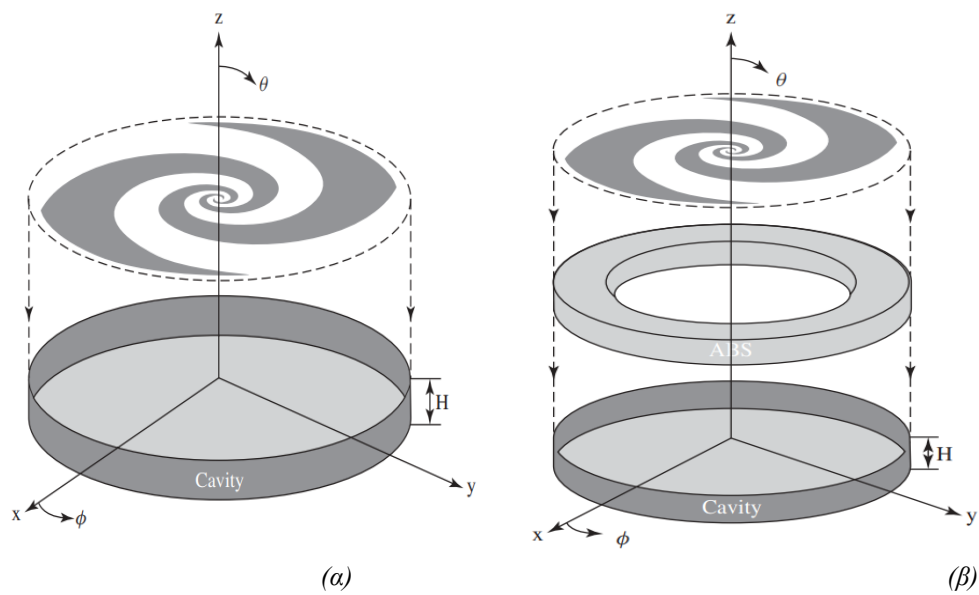


Εικόνα 119: Σπειροειδής στοιχειοκεραία με διαστάσεις 10x10cm για CubeSat

Μια σπειροειδής κεραία μπορεί να κατασκευαστεί σε διηλεκτρικό υπόστρωμα και να τοποθετηθεί πάνω σε μια μεταλλική κοιλότητα. Η κεραία μπορεί να κατασκευαστεί με διάμετρο και ύψος μικρότερο από 10 εκατοστά [78] [79] [80], οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρούς δορυφόρους. Η μεγαλύτερη δυσκολία στην κατασκευή προέρχεται από το ύψος της κεραίας το οποίο δεν μπορεί να βελτιωθεί εύκολα, διότι ο τρόπος τροφοδοσίας και η απόσταση της κεραίας από το πεδίο γείωσης της κοιλότητας επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας [81] [82].



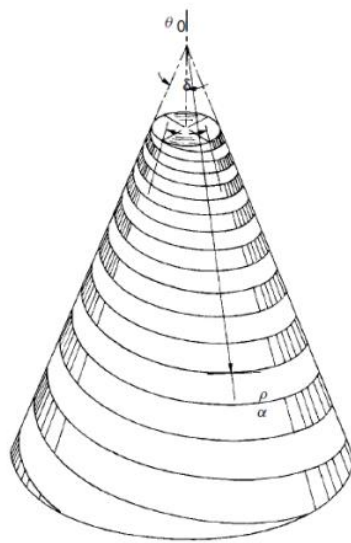
Εικόνα 120: Ισογώνια σπειροειδής κεραία με (α) δύο βραχίονες και με (β) 4 βραχίονες και (γ) αργιμίδα



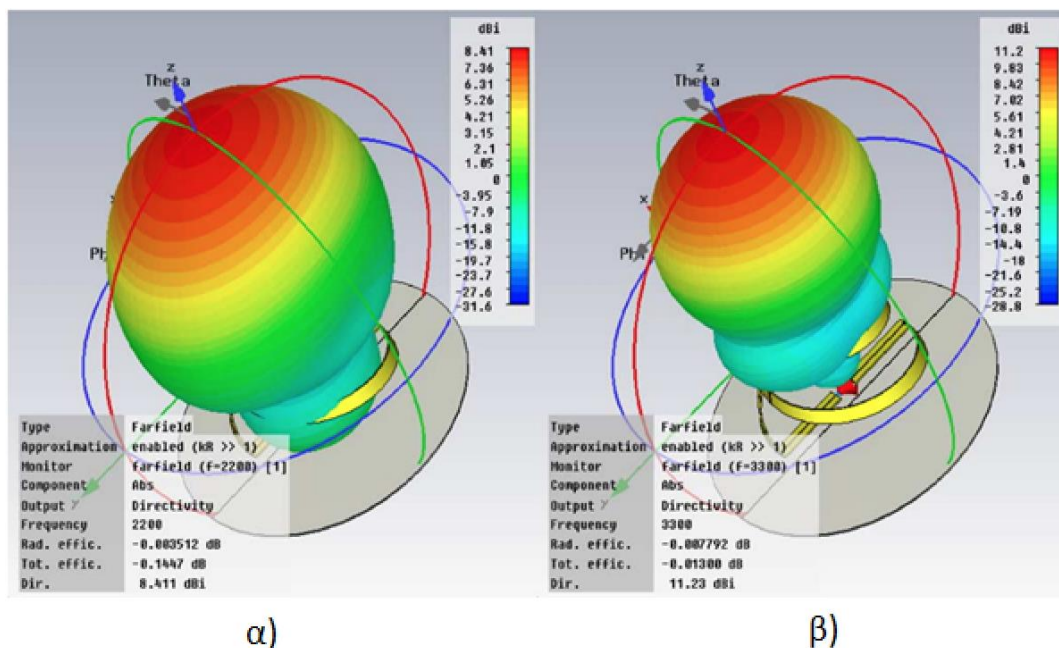
Εικόνα 121: Ισογώνια σπειροειδή κεραία υποστηριζόμενης κοιλότητας (Spiral-CV) (α) και ισογώνια σπειροειδή κεραία υποστηριζόμενης κοιλότητας και απορροφητικό δακτύλιο (Spiral-ABS)

4.14.2. Conical Log-Spiral Antenna

Η CLSA του άρθρου [74] είναι μια σπειροειδής λογαριθμική κωνική κεραία με τροφοδοσία από την βάση. Αυτό το σχέδιο μπορεί να προσαρμοστεί σε έναν μικρό δορυφόρο με παρόμοιο μηχανισμό ανάπτυξης όπως σε μια ελικοειδή κεραία. Εάν η τροφοδοσία της κεραίας γίνει από την βάση, απαιτείται χρήση γείωσης για περιορισμό της ανεπιθύμητης ακτινοβολίας προς τον δορυφόρο. Μια τέτοια κεραία προσφέρει καλό διάγραμμα ακτινοβολίας, κυκλική πόλωση και χαρακτηριστικά ακτινοβολίας ανεξάρτητα της συχνότητας.

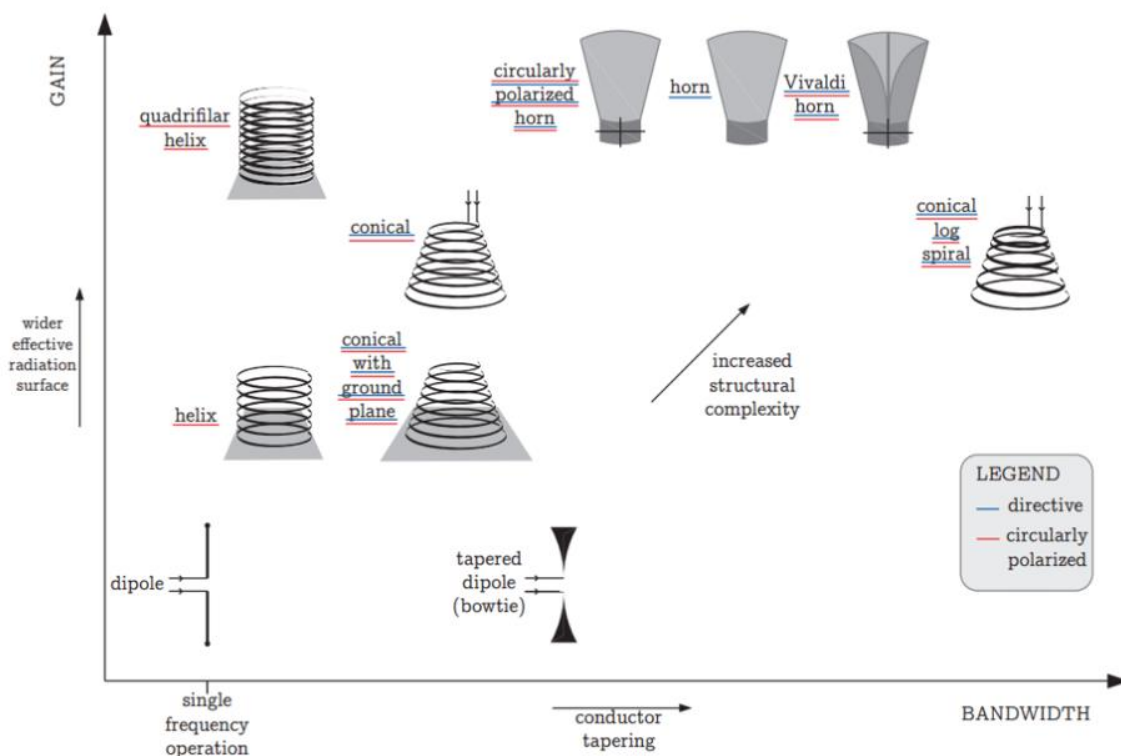


Εικόνα 122: Conical log



Εικόνα 123: Προσομοίωση κατευθυντικότητας CLSA στις συχνότητες α) 2.2GHz και β) 3.3GHz

Το διάγραμμα ακτινοβολίας της σπειροειδούς κεραίας έχει δύο κύριους λοβούς με διαφορά 180° . Για την μείωση της ακτινοβολούμενης ισχύος προς τα πίσω (backfire radiation), χρησιμοποιείται μια κοιλότητα, επηρεάζοντας όμως την σταθερή αντίσταση εισόδου και τα χαρακτηριστικά αξονικού λόγου (Axial Ratio) [83]. Για την διόρθωση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας χρησιμοποιείται οι spiral-abs κεραίες, όπου έχουν απορροφητικό υλικό στο εσωτερικό της κοιλότητας (το απορροφητικό υλικό δεν πρέπει να γεμίζει πλήρως την κοιλότητα γιατί θα προκαλούσε μείωση κέρδους 3dB).



Διάγραμμα 18: Σύγκριση τύπων κεραιών με βάση το κέρδος και το εύρος ζώνης. [84]

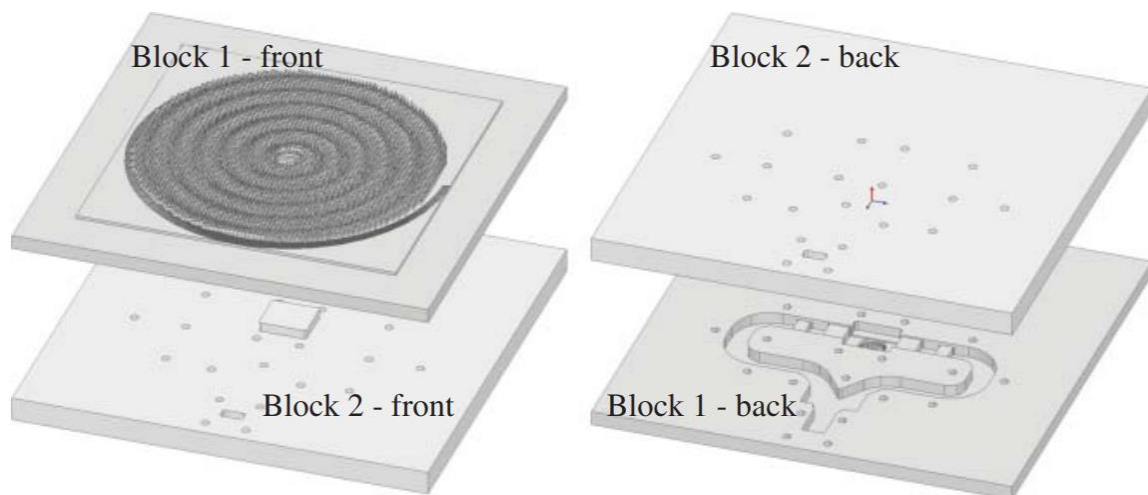
4.15. Metasurface

Οι κεραίες metasurface (MTS) είναι ακόμη στα αρχικά στάδια εξέλιξης αλλά μπορεί να είναι μια καλή επιλογή κεραίας υψηλού κέρδους. Οι τοπολογίες που έχουν προταθεί σε μελέτες μέχρι στιγμής είναι η διαμορφωμένη και η ολογραφική [85] [86]. Οι περισσότερες διαμορφωμένες MTS κεραίες αποτελούνται από επίπεδη στρογγυλή επιφάνεια διαφράγματος με patch ή slot στοιχεία με μέγεθος μικρότερο από το μήκος κύματος. Τα στοιχεία τοποθετούνται σε γειωμένο διηλεκτρικό υπόστρωμα και τροφοδοτούνται από μια μονοπολική πηγή [3].

Οι MTS μπορούν να χρησιμοποιήσουν μεγάλο διάφραγμα χωρίς να απαιτείται η τοποθέτηση του feed στην εστιακή απόσταση από το διάφραγμα και με αυτόν τον τρόπο δεν χρειάζεται η κατασκευή περίπλοκων ή μεγάλων μηχανισμών ανάπτυξης του feed. Οι MTS μπορούν να τροφοδοτηθούν από το κέντρο της κεραίας, πετυχαίνοντας μια επίπεδη επιφάνεια χαμηλού ύψους που μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα σε CubeSats. Επίσης μπορούν να κατασκευαστούν και σε καμπυλωτές επιφάνειες, ενώ μπορεί να προσαρμοστεί και η δέσμη ακτινοβολίας (beamshaping) όπως «μολυβιού» υψηλής κατευθυντικότητας (pencil beam), isoflux, διπλής δέσμης (dual-beam) κ.α.

4.15.1. Metal-Only Modulated Metasurface Antenna

Η κεραία του [87] είναι διαμορφωμένη κεραία μεταλλικών κατασκευασμένη με χρήση CNC και τεχνικές προσθήκης υλικού (additive manufacturing) και είναι πλήρως από μέταλλο. Το διάφραγμα ακτινοβολίας είναι μια τετράγωνη επιφάνεια και αποτελείται από ελλειπτικούς κυλίνδρους με διαφορετικά ύψη και κατευθύνσεις. Η μεταλλική κατασκευή δεν έχει διηλεκτρικές απώλειες και δεν δημιουργεί προβλήματα στατικού ηλεκτρισμού. Στο κέντρο είναι εγκατεστημένος ο κυκλικός feed κυματοδηγός όπου δημιουργεί ένα εγκάρσιο μαγνητικό (transverse magnetic) επιφανειακό κύμα (surface wave) και αλληλοεπιδρά με την επαγωγική αντίσταση της περιοδικά διαμορφωμένης επιφάνειας, δημιουργώντας τα κύματα ακτινοβολίας. Η κεραία λειτουργεί σε συχνότητες 30.8-32.3GHz (Ka-Band) με μέγιστο κέρδος 24.4dB στα 31.5GHz, με RHCP.



Εικόνα 124: Μοντέλο modulated MTS κεραίας.

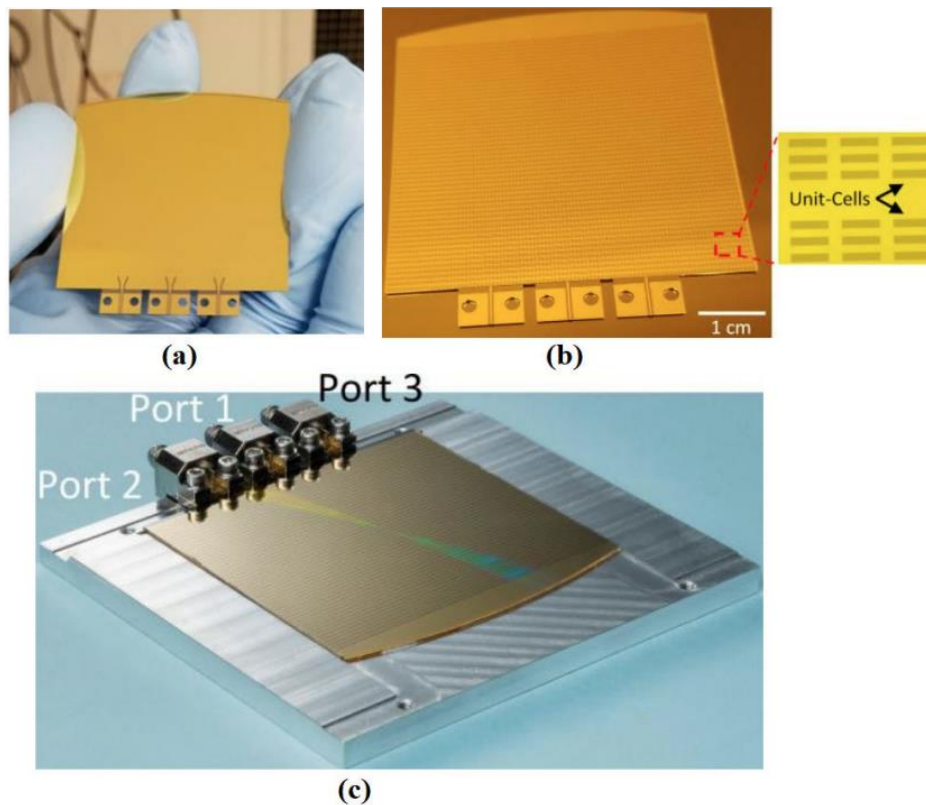


Εικόνα 125: Πλήρως μεταλλική Ka-Band modulated MTS κεραία.

4.15.2. Si/GaAs holographic metasurface antenna

Η ολογραφία έχει μελετηθεί αρκετά και αποτελεί ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για οπτικά συστήματα. Η χρήση της ολογραφίας σε metasurface κεραιών είναι σχετικά νέα έννοια, με ενδιαφέρουσες χρήσεις σε συστήματα RADAR και μετρήσεις κεραιών [88] [89]. Στο [90] παρουσιάζεται ολογραφική MTS κεραία με συχνότητα λειτουργίας 94GHz (W-Band) και η κατασκευή της είναι από πυρίτιο (Si)-αρσενίδιο του γαλλίου (gallium arsenide (GaAs)). Η μέγιστη κατευθυντικότητα είναι 31.9dBi με συντελεστή ανάκλασης χαμηλότερο από -15dB στα 94GHz. Η κεραία χρησιμοποιεί τρεις χοανοκεραίες και σχηματίζονται τρεις δέσμες

ακτινοβολίας, με δυνατότητα beamsteering. Το μέγεθος της κεραίας είναι πολύ μικρό με εξαιρετικά χαμηλό ύψος και έτσι είναι εύκολη η εγκατάστασή της σε έναν CubeSat.



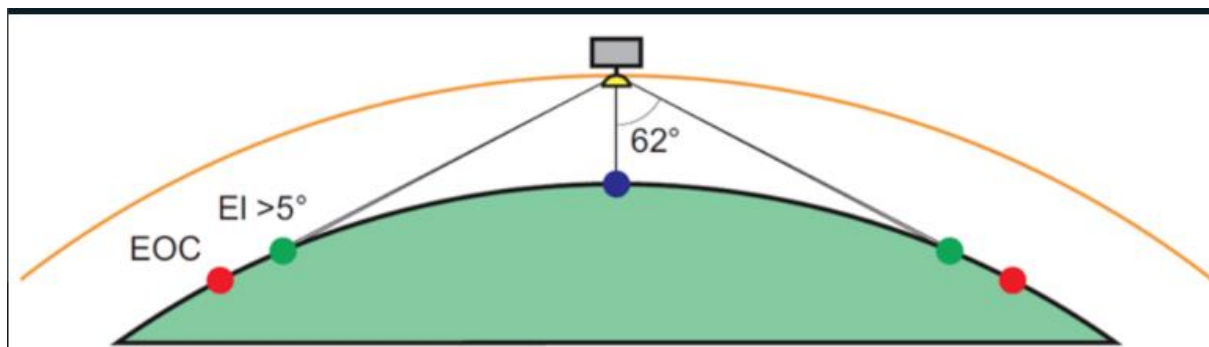
Εικόνα 126: Si/GaAs Holographic metasurface κεραία. α) Silicon Wafer στη μέση στη διαδικασία χαράγματος
β) χαραγμένο metasurface στρώμα επάνω στο GaAs διηλεκτρικό υπόστρωμα γ) ολοκληρωμένη κεραία
τοποθετημένη σε μεταλλική κατασκευή

4.16. Isoflux

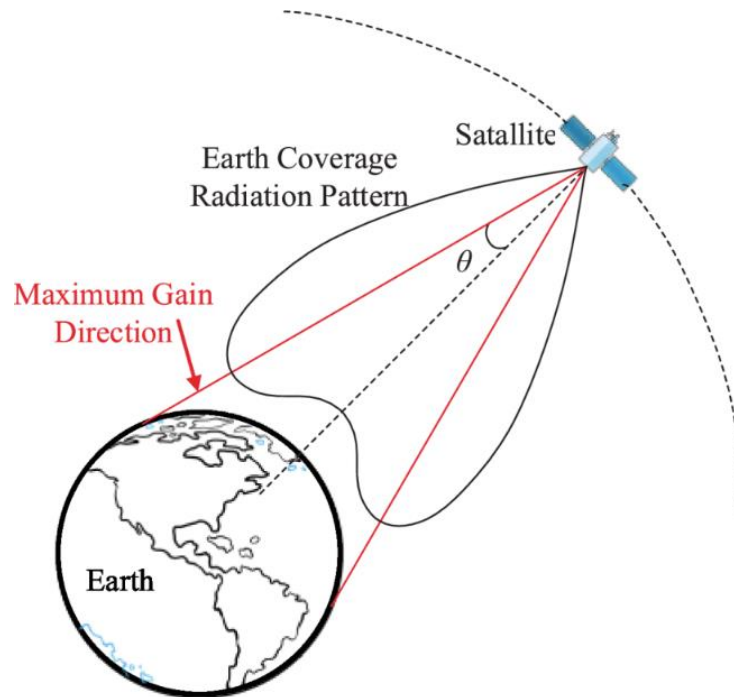
Οι κεραίες isoflux είναι αυτές οι οποίες έχουν χαρακτηριστικά ακτινοβολίας τέτοια ώστε η ισχύς της ακτινοβολίας να είναι σταθερή από οποιαδήποτε γωνία της επιφάνειας της γης. Οι κεραίες isoflux μπορεί να είναι ελικοειδείς [91] [92], phased array [93] [66], στρογγυλού διαφράγματος [94] [95] [96].

Η πλειοψηφία των CubeSat δορυφόρων είναι χαμηλής τροχιάς σε υψόμετρο από 600km έως 2000km. Σε αυτές τις αποστάσεις η ταχύτητα του δορυφόρου είναι αρκετά μεγάλη και εάν ο δορυφόρος χρησιμοποιεί κεραία με υψηλή κατευθυντικότητα ο χρόνος επικοινωνίας μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού είναι περιορισμένος. Για αυτόν τον λόγο, οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς χρησιμοποιούν είτε ομοιοκατευθυντικές κεραίες (μονόπολα, δίπολα), είτε κεραίες με μια κύρια δέσμη ακτινοβολίας μεγάλης γωνίας ημίσειας ισχύος, επιτρέποντας έτσι την επικοινωνία δορυφόρου-επίγειου σταθμού και από μεγάλες γωνίες ανύψωσης πετυχαίνοντας καλύτερη κάλυψη. Και στις δύο περιπτώσεις όμως, η μέγιστη ισχύς σήματος συμβαίνει στο ναδίρ (ελάχιστη απόσταση δορυφόρου-γης).

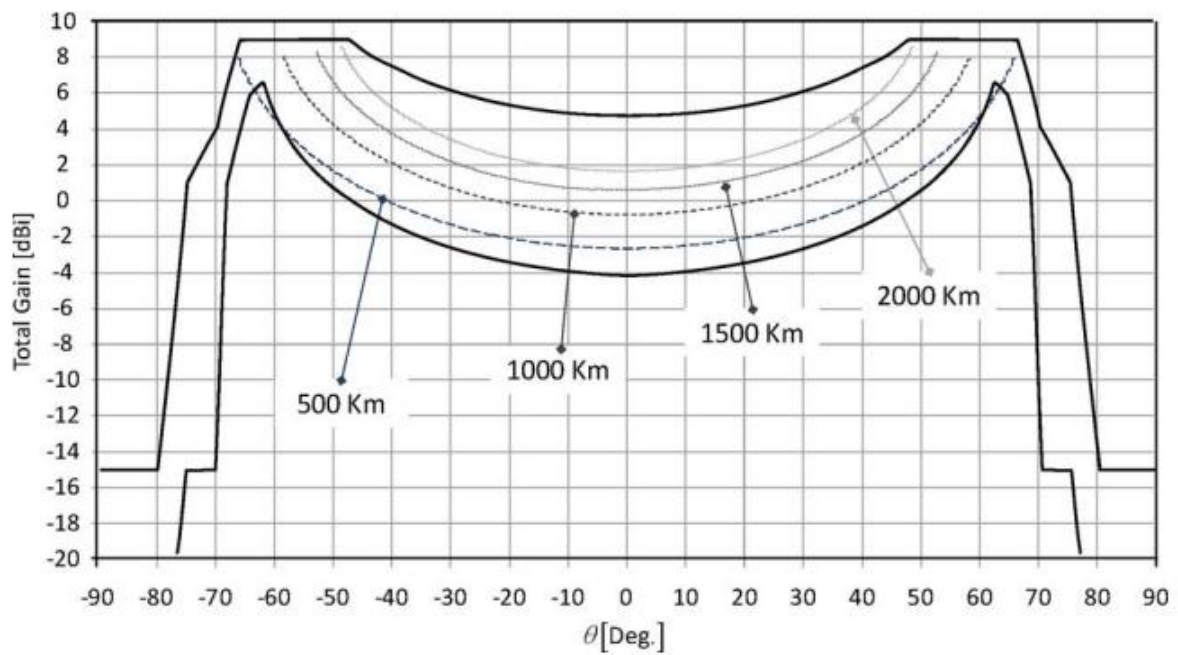
Οι isoflux κεραίες κατανέμουν την ισχύ ακτινοβολίας προς την γη με ίσο τρόπο. Η μέγιστη ισχύς ακτινοβολίας βρίσκεται σε γωνίες ανύψωσης μεταξύ $\pm 50^\circ$ και 70° , ενώ για μικρές γωνίες το κέρδος είναι χαμηλό (περίπου 0dBi).



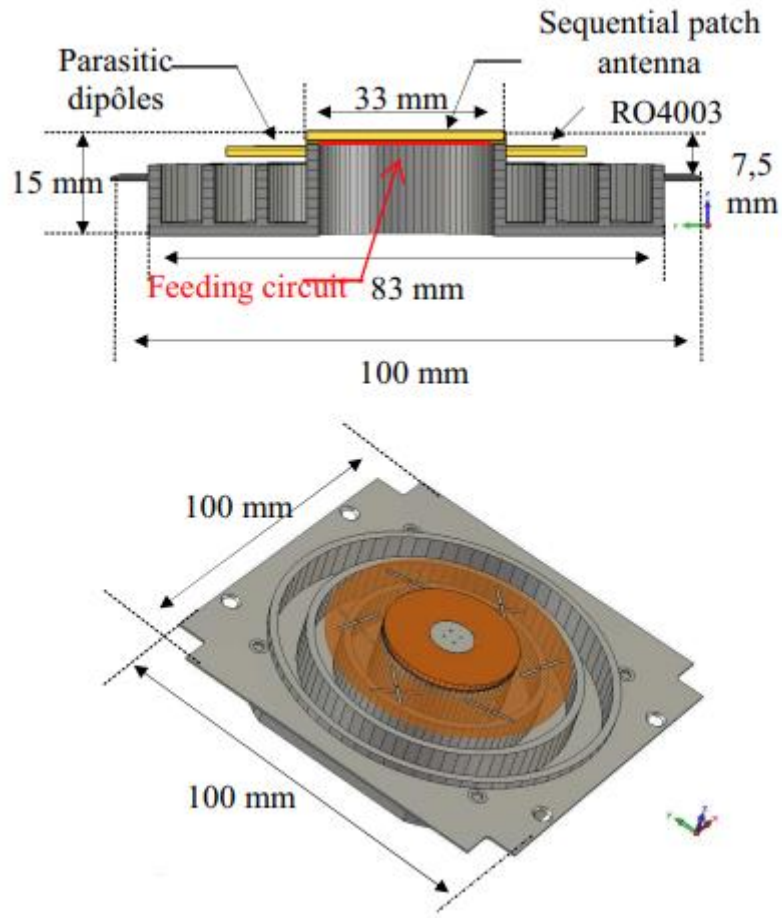
Εικόνα 127: Γεωμετρία μεταξύ LEO δορυφόρου και της επιφάνεια της γης [ESA]



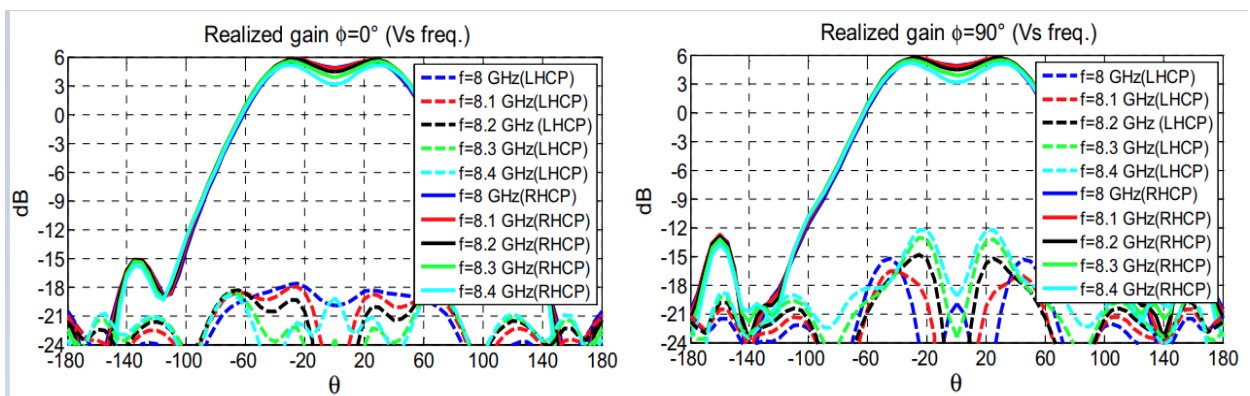
Εικόνα 128: Λοβός ακτινοβολίας Isoflux [97]



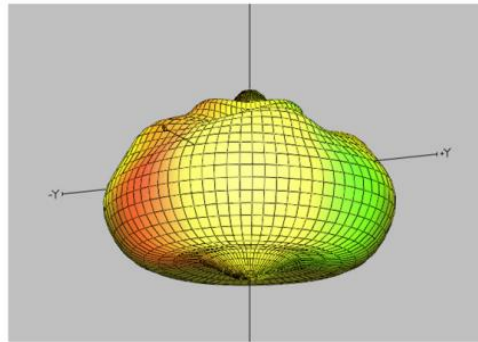
Διάγραμμα 19: Διάγραμμα ακτινοβολίας για διαφορετικά υψόμετρα



Εικόνα 129: Isoflux X-Band κεραία κυκλικής πόλωσης για νανο-δορυφόρους [98]



Διάγραμμα 20: Διάγραμμα ακτινοβολίας Isoflux X-band κυκλικής πόλωσης



Εικόνα 130: QHA Isoflux κεραία με μηχανισμό επέκτασης [92]

5. Συγκριτική μελέτη

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται και συγκρίνονται οι κεραιές των CubeSat δορυφόρων που χρησιμοποιήθηκαν σε αποστολές στο παρελθόν, καθώς και προτεινόμενες κεραιές από μελέτες που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί.

5.1. Αποστολές CubeSat και οι Κεραιές τους

CubeSat	Τύπος Κεραίας	Αποστολή	Μέγεθος	Ζώνη Συχνοτήτων	Κέρδος Κεραίας	Έτος
TUBSAT-N	Monopole x4*	Technology Demonstration	8.5kg	VHF/UHF	LGA	1998
XI-IV (CO-57)	Monopole and Dipole	Educational	1U	VHF/UHF	LGA	2003
AAUSAT 1	Monopoles	Educational	1U	VHF	LGA	2003
CUTE-I	Monopoles x3	Technology Demonstration	1U	VHF/UHF	LGA	2003
QuakeSat	Monopoles x4	Technology Demonstration	3U	UHF	LGA	2003
XI-V (CO-58)	Dipole	Technology Demonstration	1U	UHF	LGA	2005
Cute-1.7 + APD II	Monopole X4	Technology Demonstration	2U	VHF/UHF/L-Band	LGA	2006
GeneSat-1	Monopole and Patch*	Scientific	3U	UHF/S-Band	LGA	2006
CSTB-1	Dipole	Technology Demonstration	1U	UHF	LGA	2007
CP2/CP4	Dipole	Technology Demonstration	1U	UHF	LGA	2007
CAPE-1	Monopole	Educational	1U	UHF	LGA	2007
COMPASS-1	Monopole and Dipole x2	Earth Observation	1U	VHF/UHF	LGA	2007
Delfi-C3	Turnstile x2	Educational	3U	VHF/UHF	LGA	2008
SEED-2	Monopole x4	Technology Demonstration	1U	UHF	LGA	2008
CanX-2	Turnstile and Patch*	Technology Demonstration	3U	UHF/S-Band	LGA	2008
CP3/CP6	Dipole	Technology Demonstration	1U	UHF	LGA	2009
PharmaSat 1	Patch*	Scientific	3U	S-Band	LGA	2009
ITUpSat-I	Monopole x4	Technology Demonstration	1U	UHF	LGA	2009
SwissCube	Monopoles	Scientific	1U	VHF/UHF	LGA	2009

KSat	N/A	Space Technology/Earth Observation	1U	Ku-Band	N/A	2010
TISAT-1	Monopole x4	Technology Demonstration	1U	VHF/UHF	LGA	2010
M-Cubed	Monopole and Dipole	Educational/Technology Demonstration	1U	VHF/UHF	LGA	2011
AENEAS	Parabolic Mesh Reflector and Monopole x2	Surveillance	3U	UHF/S-Band	HGA	2012
Goliat	Monopole x2	Earth Observation	1U	UHF/S-Band	LGA	2012
UNICUBESAT	Monopole	Technology Demonstration	1U	UHF	LGA	2012
AtmoCube	Dipole	Scientific	1U	UHF	LGA	2012
Prometheus	Helical and Monopole	Military	1.5U	N/A	N/A	2013
SENSE	Patch* x2	Military	3U	S-Band	LGA	2013
GOMX-1	Helical	Scientific/Technology Demonstration	2U	UHF	LGA	2013
TSAT	Patch	Technology Demonstration	2U	S-Band	LGA	2014
ALL-STAR	Patch	Educational	3U	UHF/S-Band	LGA	2014
CanX-4&5	Monopole x2, Dipole and Patch x2*	Technology Demonstration	1U	VHF/UHF/S-Band	LGA	2014
MicroMAS	Monopole and Parabolic Reflector	Earth Observation	3U	UHF	LGA	2014
GOMX-3	Monopole x4, Patch and Helical	Technology Demonstration	3U	UHF/L-Band	LGA	2015
AeroCube-OCSD	Patch	Technology Demonstration	1.5U	UHF	LGA	2015
AggieSat	Monopole and Patch* x2	Educational/Technology Demonstration	1U	UHF	LGA	2016
OUFTI-1	Monopole x2	Educational	1U	UHF	LGA	2016
Aalto-I	Crossed-Dipole and Patch	Technology Demonstration	3U	VHF/UHF/S-Band	LGA	2017
ICECube	Dipole and Patch	Technology Demonstration	3U	UHF	LGA	2017
QBITO	Monopole x4	Educational	2U	UHF	LGA	2017
ISARA	ReflectArray with Solar Panels and Patch*	Technology Demonstration	3U	UHF/Ka-Band	MGA/HGA	2017

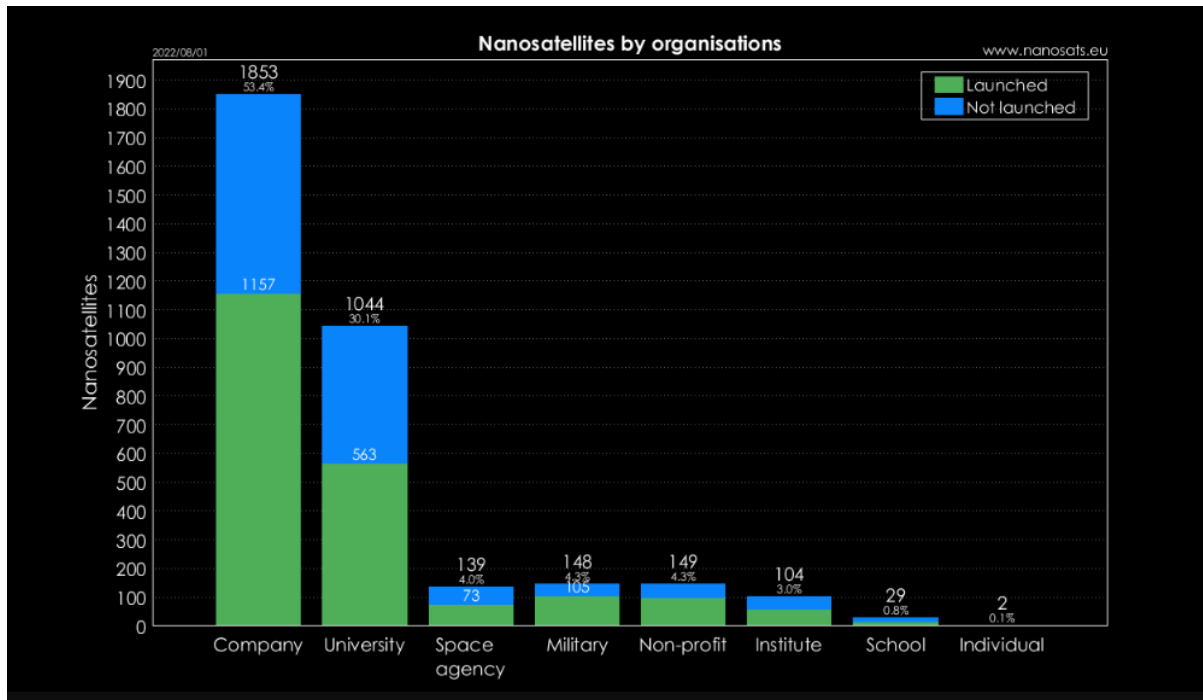
RadSat	Monopole	Technology Demonstration	3U	UHF	LGA	2018
GomX-4A/B	Patches*	Technology/Commercial	6U	UHF/S-Band	LGA	2018
SPATIUM	Monopole x2	Scientific	2U	UHF	LGA	2018
CHOMPTT	Monopole x2	Technology Demonstration	3U	UHF	LGA	2018
MarCO	ReflectArray, Patch Array and Loop	Interplanetary Exploration and Communication Demonstration	6U	UHF/X-Band/Ka-Band	MGA/HGA	2018
RainCube	Parabolic Mesh Reflector	Earth Observation and Technology Demonstration	6U	Ka-Band	HGA	2018
AzTechSat-1	Patch*	Educational	1U	VHF/UHF	LGA	2019
NSLSAT	Parabolic Reflector	Technology Demonstration	6U	Ka-Band	HGA	2019
EyeSat	Patch*	Educational	3U	S-Band/X-Band	LGA	2019
Kepler	Phased Array* and Turnstile	Communications IoT	6U	S-Band/Ku-Band	HGA	2020
OSM1-CICERO	Phased Array* and Patch*	Earth Observation	3U	UHF/X-Band	N/A	2020
TRISAT	Patch* and Turnstile*	Technology Demonstration	3U	VHF/UHF/S-Band	LGA	2020
PICASSO	Patch* and Turnstile	Earth Observation	3U	UHF/S-Band	LGA	2020
AMICal-Sat	Patch* and Dipole	Demonstration/Earth Observation	2U	UHF/S-Band	LGA	2020
Astrocast	Patch*	Communications	3U	L-Band	LGA	2021
Cesium	Active Phased Array*	Technology Demonstration	6U	Ka-Band	N/A	2021
SOMP2b	Monopoles	Communications	2U	UHF	LGA	2021
W-Cube	Bull's Eye* Antenna	Scientific/Technology Demonstration	3U	W-Band	N/A	2021
ELO Alpha	Helical, Patch Array*, Dipoles	Technology Demonstration/Communications	3U	N/A	N/A	2021
SOAR						
KSF1	Monopoles, Patch Array* and Helical	Surveillance	6U	VHF/S-Band	LGA/MGA	2021
SPACE HAUC 1	Dipoles	Technology Demonstration	3U	UHF/X-Band	LGA	2021
CUTE	Monopole, Patch*	Science/Educational	6U	UHF/S-Band	LGA	2021

PAINANI II	Turnstile x2 and Patch*	Educational	3U	VHF/UHF/S -Band	LGA	2021
CUAVA-1	Turnstile and Patch*	Technology Demonstration	3U	VHF/UHF	LGA	2021
D2/AtlaCom-1	Monopoles, Patch Array*	Educational/Earth Observation	6U	UHF/X-Band	LGA	2021
HYPPO	Monopole, Turnstile and Patch*	Technology Demonstration / Earth Observation	6U	UHF/S-Band	LGA	2022
Spark-2	Monopole and Patch*	Communications IoT	12U	S-Band	LGA	2022
SanoSat-1	Dipole	Educational	1U	UHF	LGA	2022
Planetum-1	Monopole	Educational	1U	UHF	LGA	2022

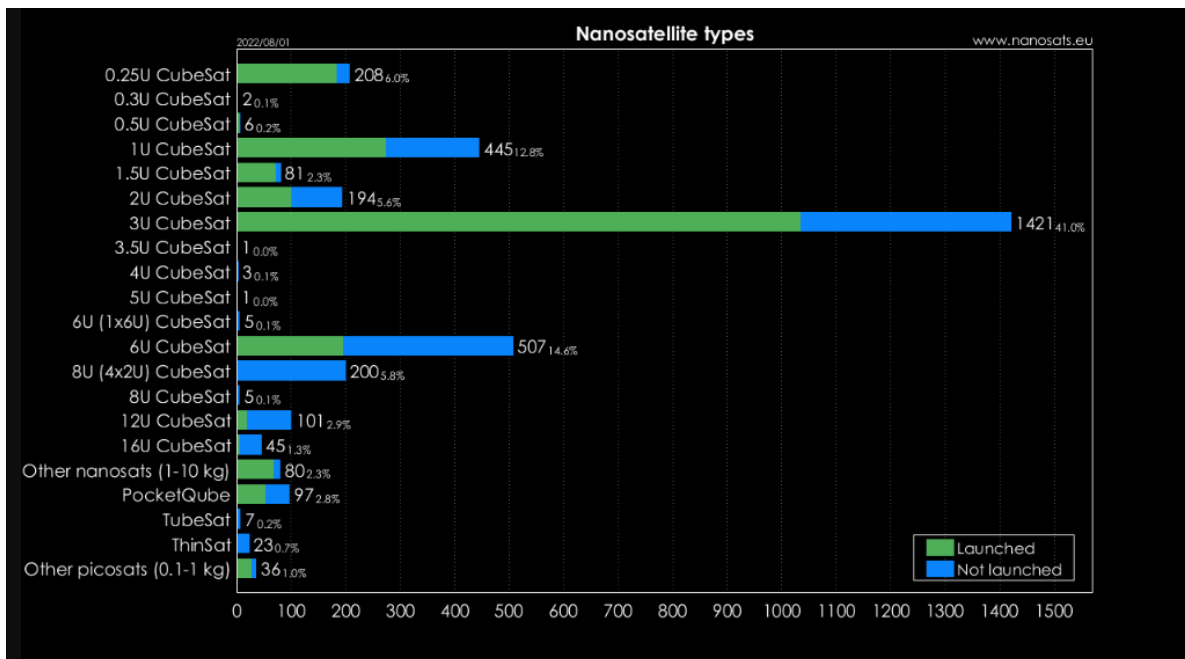
Πίνακας 10: Πίνακας αποστολών CubeSat και οι κεραιές τους (οι κεραιές με * δεν έχουν μηχανισμό επέκτασης)

Ο παραπάνω πίνακας περιλαμβάνει μερικές από τις αποστολές CubeSat δορυφόρων και τις κεραιές που χρησιμοποιήθηκαν. Η πλειοψηφία των αποστολών (περίπου 45%) έχουν στόχο την δοκιμή και επίδειξη τεχνολογίας, δημιουργώντας νέες ευκαιρίες για ανάπτυξη πρωτότυπων και καινοτόμων ιδεών, software και hardware με χαμηλό κόστος. Οι κατηγορίες τεχνολογιών είναι οι τηλεπικοινωνίες, συστήματα τροφοδοσίας, Bus δορυφόρων μικρού μεγέθους, συστήματα προώθησης ή άλλοι μηχανισμοί (πχ. τηλεσκοπικοί μηχανισμοί). Περίπου το 21% των αποστολών είναι για εκπαιδευτικούς σκοπούς, 12% για επιστημονικούς σκοπούς, 12% παρατήρηση της γης (earth observation), 2% επιτήρηση (surveillance), 5% τηλεπικοινωνίες και λίγες διαπλανητικές αποστολές [4]. Οι δύο βασικοί οργανισμοί που χρησιμοποιούν CubeSat είναι εταιρίες (53%) και πανεπιστήμια (30%). Η άμεση επαφή των φοιτητών με την κατασκευή CubeSat είναι ένας από τους λόγους που υπάρχει μεγάλη ανάπτυξη και προβλέπεται η αύξηση του αριθμού αποστολών στο μέλλον. Οι υπόλοιπες αποστολές CubeSat αφορούν στρατιωτικούς σκοπούς, διαστημικές υπηρεσίες, ινστιτούτα, μη κερδοσκοπικούς σκοπούς και σχολεία.

Το 41% των CubeSat είναι μεγέθους 3U (συμπεριλαμβανομένου και των μελλοντικών αποστολών), ενώ ακολουθούν τα μεγέθη 6U και 1U με περίπου 15% και 13% αντίστοιχα. Για εκπαιδευτικούς σκοπούς οι CubeSat μεγέθους 0.25U, 1U και 3U είναι οι πιο συχνές επιλογές, καθώς παρέχουν χαμηλά κόστη κατασκευής και εκτόξευσης. Για πιο περίπλοκες μελλοντικές αποστολές, με περισσότερες απαιτήσεις ισχύος ή ωφέλιμου φορτίου, σχεδιάζονται καινούριοι δορυφόροι μεγέθους 12U και 16U. Τα μεγέθη 3U και 6U είναι η προτίμηση εταιριών για δημιουργία “στόλων” CubeSat (constellations), καθώς είναι μια ισορροπημένη λύση με γνώμονα το κόστος και τις δυνατότητες του δορυφόρων.



Διάγραμμα 21: Στατιστικά πλήθος Cubesat ανά οργανισμό - Erik Kulu, Nanosat Database [63]



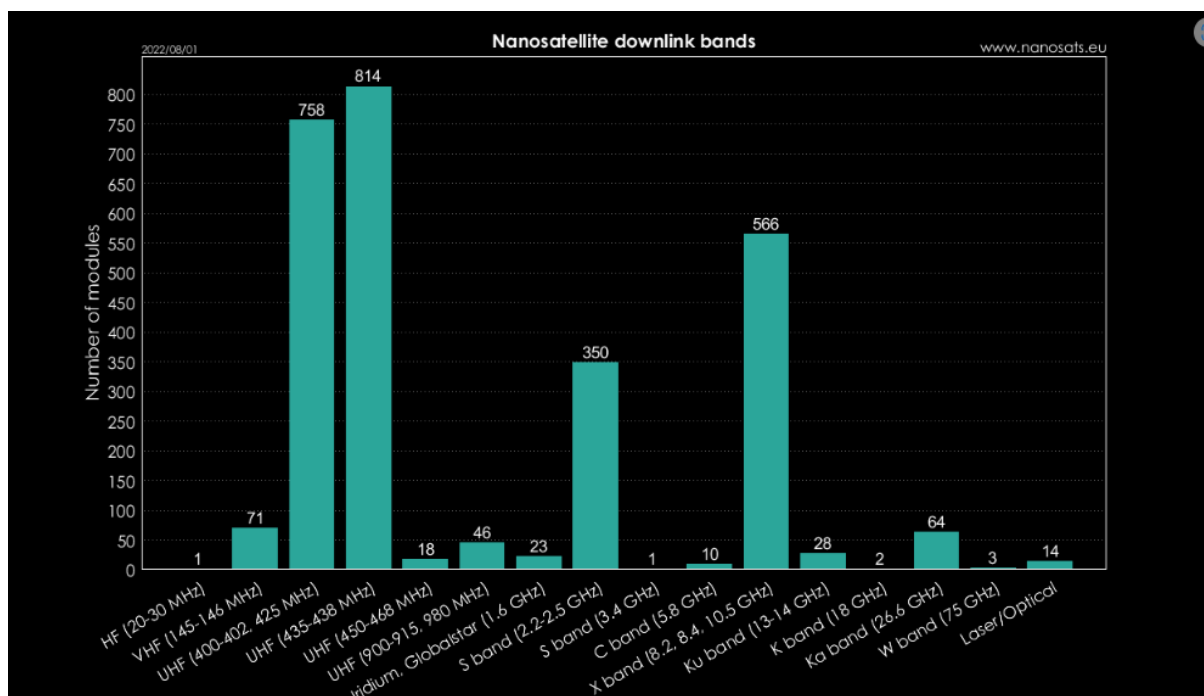
Διάγραμμα 22: Στατιστικά μεγέθους CubeSat [63]

Από την πρώτη αποστολή CubeSat δορυφόρου το 1998 μέχρι και σήμερα, οι πιο σύνηθες κεραίες είναι τα μονόπολα και δίπολα (turnstile). Αυτές οι κεραίες λειτουργούν στις συχνότητες VHF και UHF και είναι χαμηλού κέρδους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για την κύρια λειτουργία downlink/uplink σε μικρούς δορυφόρους (πχ έως 3U) με χαμηλές απαιτήσεις τηλεπικοινωνίας ή ως δευτερεύουσα κεραία για τηλεμετρία. Οι patch κεραίες είναι η δεύτερη πιο συχνή επιλογή και λειτουργούν σε συχνότητες S-Band και L-Band. Χρησιμοποιούνται για downlink/uplink λειτουργίες, GPS ή τηλεμετρία. Οι patch προσφέρουν

υψηλότερο κέρδος και ταχύτητες δεδομένων συγκριτικά με τα μονόπολα και δίπολα και μπορούν να εγκατασταθούν στο σώμα του δορυφόρου χωρίς μηχανισμούς επέκτασης. Ακόμη, λόγω του χαμηλού τους ύψους μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες από μια patch κεραίες στις επιφάνειες του δορυφόρου χωρίς να επηρεαστεί το τελικό μέγεθος του δορυφόρου. Οι ελικοειδείς κεραίες είναι μια επιλογή με παρόμοιο κέρδος με τις patch και μπορούν να προσαρμοστούν πιο εύκολα σε χαμηλότερες συχνότητες (πχ. UHF, VHF/AIS) [34], με το μειονέκτημα ότι χρειάζονται μηχανισμό επέκτασης και έχουν μεγαλύτερο όγκο και βάρος. Για μεγαλύτερες ταχύτητες επικοινωνίας και μεγαλύτερο κέρδος, χρησιμοποιούνται υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας (X-Band, Ku-Band, Ka-Band) και κεραίες όπως Patch Arrays, ReflectArray και κεραίες με παραβολικούς ανακλαστήρες (πχ. ανακλαστήρες πλέγματος, φουσκωτοί ανακλαστήρες).

Οι δορυφόροι AENEAS (2012), ISARA (2017), MarCO (2018), RainCube (2018), NSLSat-1 (2019) και KEPLER 1-19 (2018 με 2022) απέδειξαν ότι υπάρχει δυνατότητα κατασκευής κεραιών υψηλού κέρδους σε μικρούς δορυφόρους, με υψηλές συχνότητες λειτουργίας (Ka-Band, Ku-Band) και υψηλές ταχύτητες μετάδοσης. Οι κεραίες τύπου RA, Patch Array και Phased Array είναι από τις πιο δημοφιλείς επιλογές για μελλοντικούς δορυφόρους, διότι προσφέρουν μεγάλη ευελιξία στην προσαρμογή τους σε CubeSats, με καλά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας, δυνατότητες προσαρμογής της δέσμης ακτινοβολίας (beam-shaping, beam-steering), σχετικά χαμηλό κόστος και μικρό όγκο και βάρος.

Τέλος, υπάρχουν αρκετές νέες προτάσεις κεραιών για CubeSats που δεν έχουν δοκιμαστεί ακόμη σε αποστολή, οι οποίες αναφέρονται στα παρακάτω κεφάλαια.



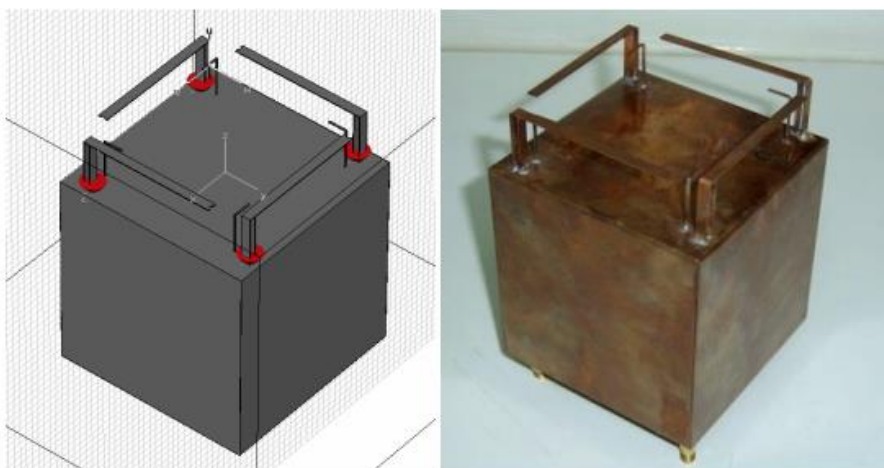
Διάγραμμα 23: Στατιστικά ζωνών συχνοτήτων λειτουργίας CubeSat [63]

5.2.Κεραίες Χαμηλού Κέρδους – LGA

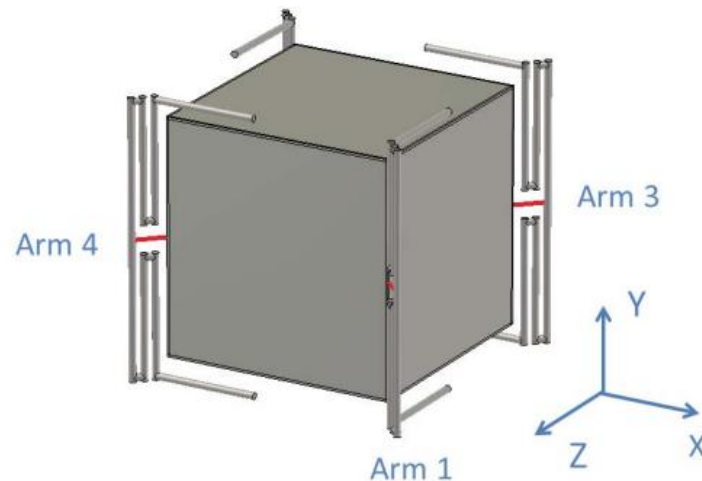
Η κατηγορία των κεραιών χαμηλού κέρδους περιλαμβάνει κεραίες με κέρδος μικρότερο από 8dBi. Αυτές οι κεραίες χρησιμοποιούνται για εκπομπή – λήψη δεδομένων με χαμηλές ταχύτητες ή αποστολή δεδομένων τηλεμετρίας. Η χαμηλή κατευθυντικότητα των κεραιών αυτών προσφέρει το πλεονέκτημα της συνεχούς επικοινωνίας μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού, ανεξαρτήτως από την κλίση του δορυφόρου που προκαλούν πιθανές απώλειες στόχευσης. Οι κεραίες χαμηλού κέρδους λειτουργούν συνήθως στις ζώνες συχνοτήτων VHF, UHF, L-Band και S-Band.

5.2.1. Γραμμικές κεραίες (Μονόπολα - Δίπολα – Loop)

Τα μονόπολα και δίπολα χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε CubeSats και προσφέρουν κέρδος από 0dBi έως 5dBi με ομοιοκατευθυντική δέσμη ακτινοβολίας. Υπάρχουν πολλές επιλογές με έτοιμες προτάσεις από εταιρίες με μηχανισμό ανάπτυξης και υψηλό βαθμό TRL (Technology Readiness Level). Η κατασκευή τους είναι πολύ απλή και μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα στη ζητούμενη συχνότητα λειτουργίας. Σε εκπαιδευτικούς CubeSat χρησιμοποιούνται ακόμη και απλά ελάσματα μετροταινίας. Οι διαφορές ανάμεσα στις υλοποιήσεις αυτών των κεραιών, είναι στα υλικά (ελαστικά ή σταθερά), στον μηχανισμό αποθήκευσης και ανάπτυξης, στο αριθμό των κεραιών και στην παραμετροποίησή τους (πχ. 2 VHF μονόπολα και 1 UHF δίπολο ή 1 turnstile κλπ). Το σύστημα των κεραιών, λόγω του χαμηλού ύψους του, μπορεί να εγκατασταθεί σε μια πλευρά του δορυφόρου, όπως στα περισσότερα συστήματα κεραιών στην αγορά ή σε διαφορετικές τοπολογίες ανάλογα την αποστολή. Για παράδειγμα στη [Design and Analysis of Antennas for Nano-Satellite] οι κεραίες τοποθετούνται στη μεγάλη πλευρά του δορυφόρου με συνδυασμό ενός μονόπολου και ενός δίπολου.



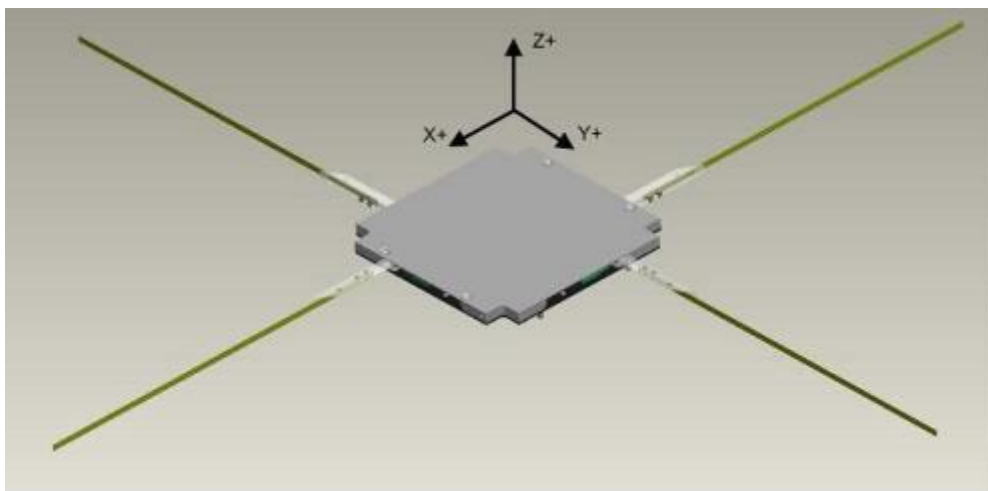
Εικόνα 131: PIFA κεραία επάνω σε μοντέλο δορυφόρου [99]



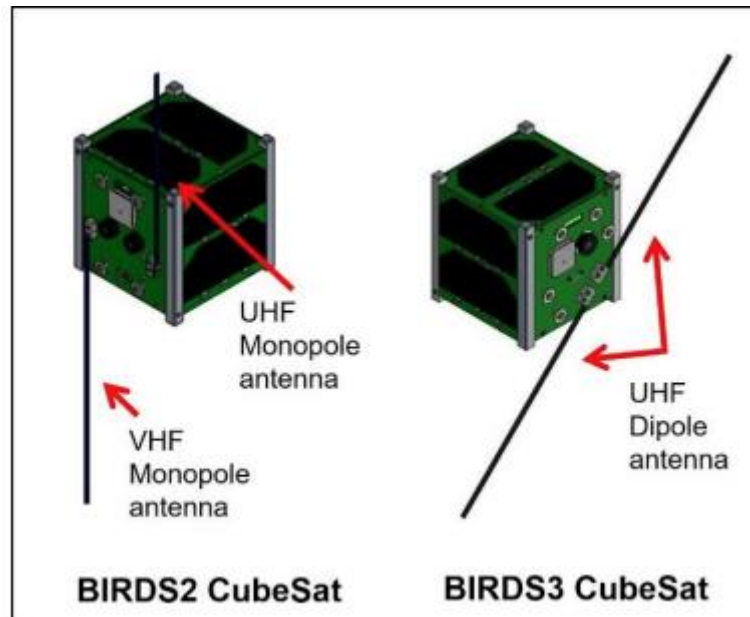
Εικόνα 132: Μοντέλο γραμμικής κεραίας εγκατεστημένη πάνω στον δορυφόρο [100]

Στο [99] μελετάται μια Planar Inverted F Antenna (PIFA) για συχνότητες VHF/UHF, όπου προσφέρει καλύτερο κέρδος, κυκλική πόλωση και δεν χρειάζεται μηχανισμό ανάπτυξης σε σχέση με τα απλά μονόπολα και δίπολα. Στο πρωτότυπο της μελέτης, η κεραία κατασκευάζεται απευθείας στο σώμα του δορυφόρου χωρίς επιπρόσθετα μέρη ή μηχανισμούς. Μια παρόμοια ιδέα παρουσιάζεται στο [100], με δυνατότητα προσαρμογής της κεραίας σε γραμμική ομοιοκατευθυντική ακτινοβολία ή κυκλική δικατευθυντική.

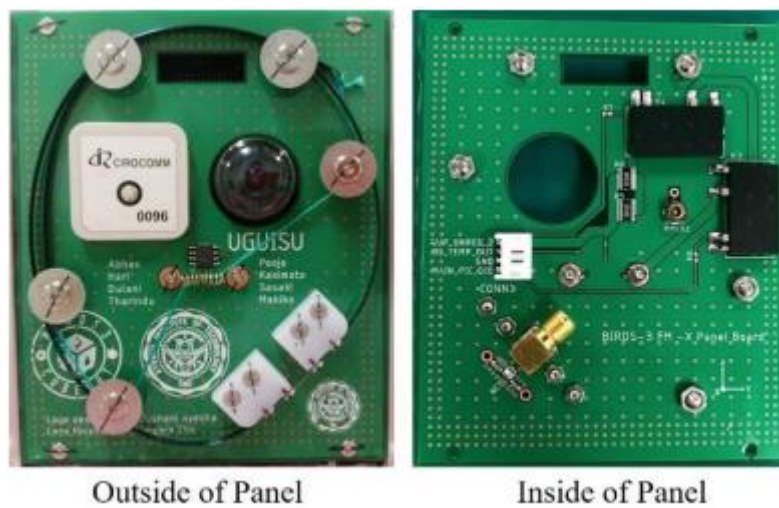
Για τον δορυφόρο MarCO χρησιμοποιήθηκε βροχοκεραία (loop) με συχνότητα λειτουργίας UHF και κέρδος 5dBic με κυκλική πόλωση (η κεραία αυτή αναλύεται στο κεφάλαιο Loop antenna – MarCO).



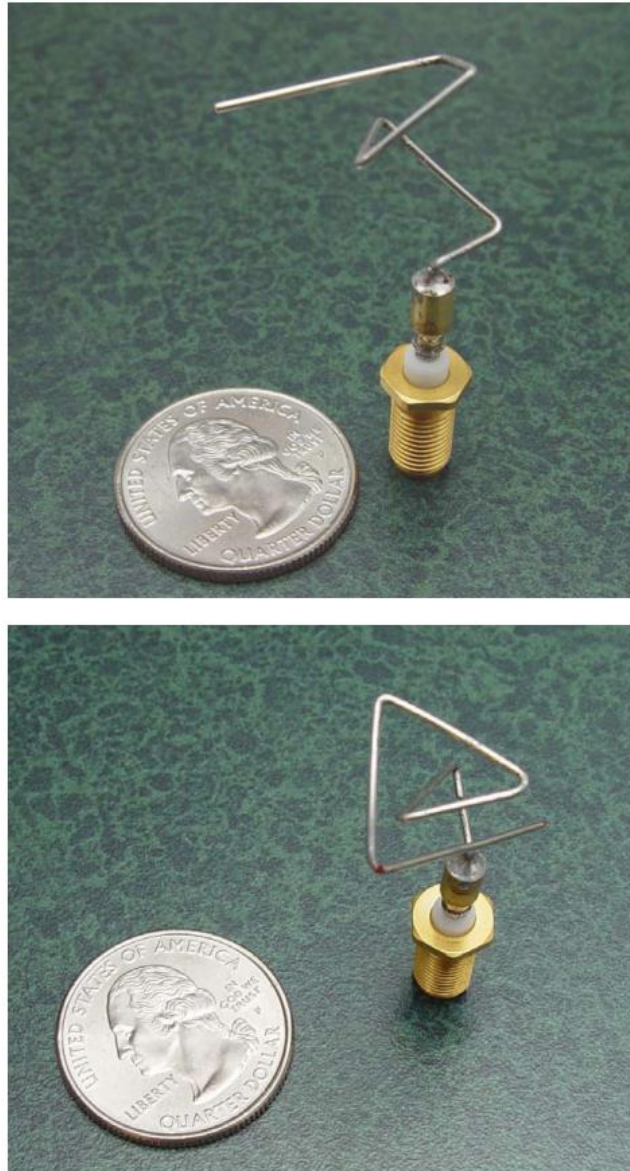
Εικόνα 133: Κεραία του δορυφόρου FUNcube από την ISIS. Αποτελείται από 2 δίπολα σε συχνότητες VHF και UHF.



Εικόνα 134: Μοντέλα CubeSat BIRDS2 και BIRDS3 [101]



Εικόνα 135: Εσωτερικό του συστήματος κεραιών με μηχανισμό ανάπτυξης CubeSat BIRDS3

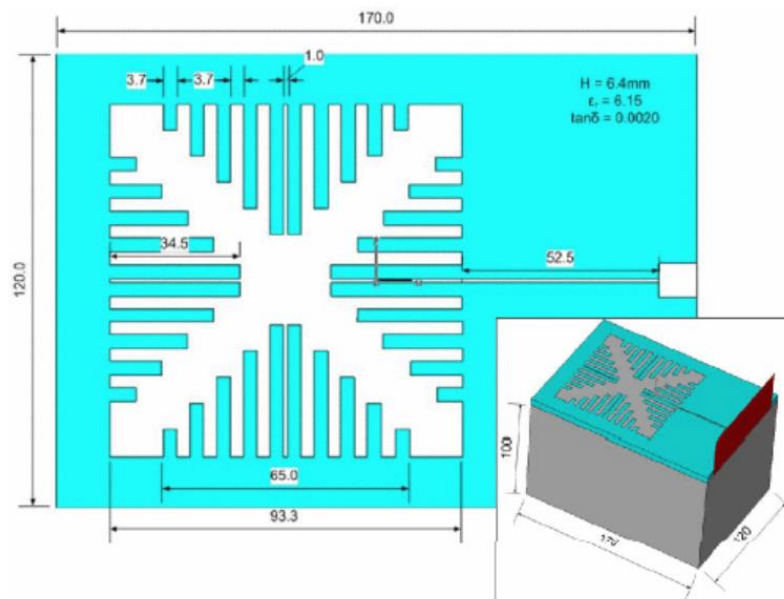


Εικόνα 136: Γραμμικές κεραία X-Band, σχεδιασμένες με αυτόματες αλγοριθμικές τεχνικές [18]

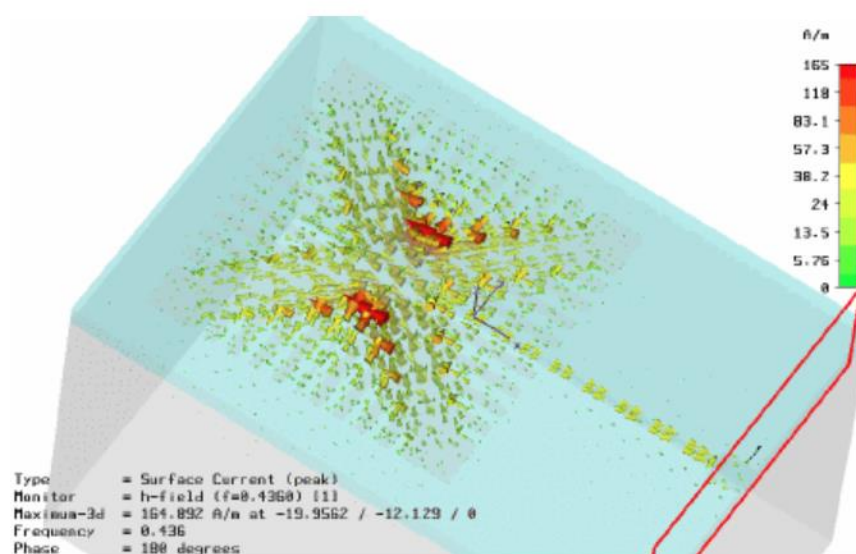
5.2.2. Κεραίες LGA Planar - Patch

Οι κεραίες patch (μονού στοιχείου) είναι χαμηλού/μέτριου κέρδους και ενώ συνήθως χρησιμοποιούνται ως κύρια κεραία επικοινωνίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για έκτακτες περιπτώσεις όπου η κατεύθυνση του δορυφόρου δεν είναι σωστή ή είναι άγνωστη. Για διαπλανητικές αποστολές, όπως η αποστολή MarCo, οι patch κεραίες χρησιμοποιούνται είτε για εκπομπή είτε για λήψη, χωρίς χρήση διπλέκτη για πιο απλή αρχιτεκτονική RF. Οι patch κεραίες έχουν καλά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας για συχνότητες L-Band έως X-Band, αλλά υπάρχουν πολλές μελέτες με στόχο την ελαχιστοποίηση του όγκου των CubeSat κεραιών σε συχνότητες λειτουργίας VHF και UHF, όπου χρησιμοποιούν τεχνικές σμίκρυνσης patch κεραιών. Το πλεονέκτημα που προσφέρουν οι ηλεκτρικά μικρές patch κεραίες με συχνότητα λειτουργίας VHF/UHF, είναι η αυξημένη αξιοπιστία και ανθεκτικότητα, καθώς δεν απαιτείται

η χρήση μηχανισμών ανάπτυξης. Τα μειονεκτήματα του όμως, είναι το χαμηλό εύρος ζώνης, η χαμηλή αποδοτικότητα και το χαμηλό κέρδος. Αυτά τα χαρακτηριστικά παρατηρούνται στο [A compact microstrip antenna with tapered peripheral slits for CubeSat RF Payloads at 436MHz: Miniaturization techniques, design & numerical results], όπου προτείνεται μια ηλεκτρικά μικρή patch κεραία σε συχνότητες λειτουργίας 436MHz. Η κεραία μπορεί να προσαρμοστεί σε μια πλευρά του δορυφόρου και δεν χρειάζεται κάποιο μηχανισμό επέκτασης. Για την σμίκρυνση της κεραίας χρησιμοποιήθηκε διηλεκτρικό υλικό με υψηλή σχετική επιτρεπτότητα ($\epsilon_r = 6.15$), ύψος 6.4mm και σχεδιάστηκαν εγχοπές για καλύτερη κατανομή του ρεύματος.



Εικόνα 137: Ηλεκτρικά μικρή κεραία UHF εγκατεστημένη σε μια πλευρά ενός CubeSat [102]

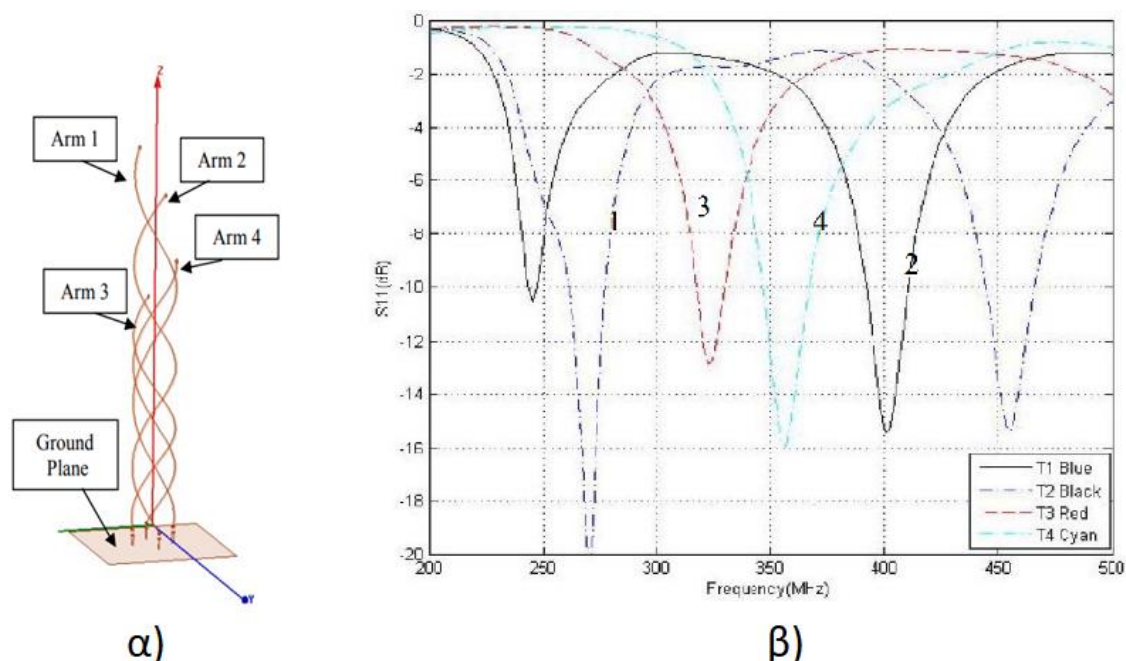


Εικόνα 138: Κατανομή ρεύματος ως διανυσματικό πεδίο.

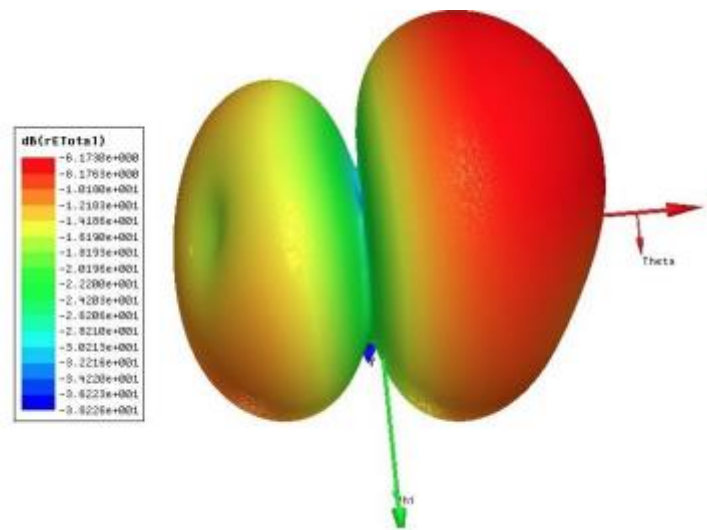
5.2.3. Ελικοειδείς Κεραίες LGA

Το κέρδος των κεραιών σε συχνότητες VHF και UHF, όπως μονόπολα και δίπολα, είναι περιορισμένο (συνήθως 0dBi έως 2dBi). Οι ελικοειδείς κεραίες μπορούν να κατασκευαστούν έτσι ώστε να προσφέρουν το απαιτούμενο κέρδος ανάλογα με την αποστολή και αυτό είναι εφικτό καθώς το κέρδος των ελικοειδών κεραιών εξαρτάται από το μήκος της κεραίας. Επίσης προσφέρουν καλά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας, με κυκλική πόλωση (Axial Ratio <3dB), χαμηλούς δευτερεύοντες λοβούς ακτινοβολίας και υψηλό εύρος ζώνης σε σχέση με άλλες κεραίες. Οι κεραίες αυτές χρησιμοποιούνται συχνά για μικρούς επίγειους σταθμούς για λειτουργίες GPS, σε μορφή ελικοειδούς ή QHA (Quadrifilar Helix Antenna) [103] [104] [105] [106], αλλά δεν έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετά σε μικρούς δορυφόρους λόγω του μεγάλου μήκους τους και των περίπλοκων μηχανισμών ανάπτυξης.

Στην [107] παρουσιάζεται μια QHA με μηχανισμό ανάπτυξης, σε συχνότητα λειτουργίας UHF. Αποτελείται από τέσσερις έλικες, ορθογώνια τοποθετημένες μεταξύ τους, με διάμετρο 7.12mm και διαφορετικά μήκη ανά έλικα (440mm, 392.5mm, 350mm και 390mm). Οι συχνότητες λειτουργίας είναι 270MHz, 350MHz, 400MHz και 450MHz, με κέρδος 3.56dBi, 4.7dBi, 5.64dBi και 5.41dBi αντίστοιχα. Η κεραία έχει χαμηλό εύρος ζώνης (<6.15%) και χρειάζεται μεγάλο πεδίο γείωσης για να πετύχει τα παραπάνω κέρδη, οπότε θα ήταν δύσκολο να εγκατασταθεί σε δορυφόρο μεγέθους μικρότερο από 3U. Οι δύο μηχανισμοί ανάπτυξης που αναφέρονται (συμπίεση και χρήση παντογράφου) δεν έχουν δοκιμαστεί με την συγκεκριμένη τοπολογία.

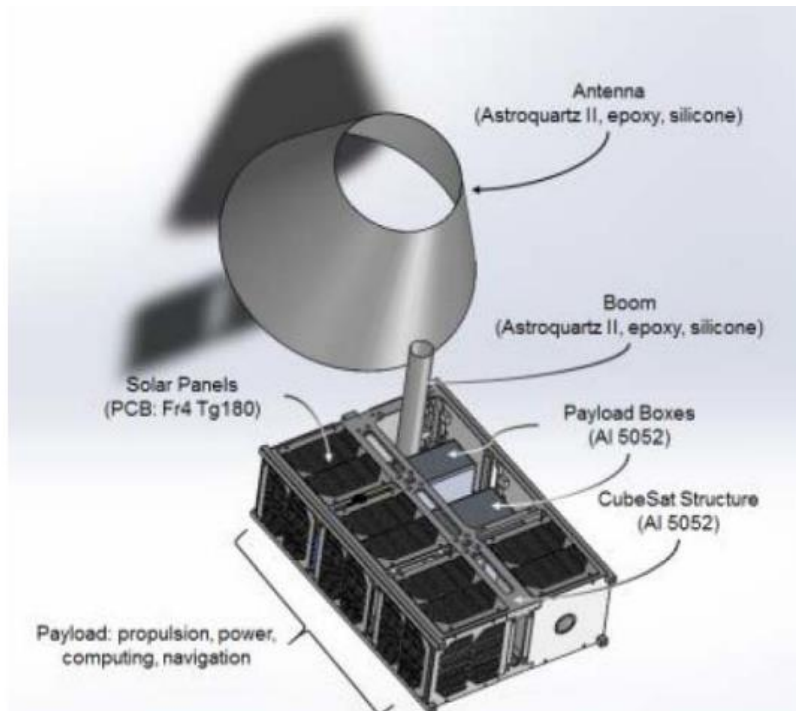


Εικόνα 139: Προτεινόμενη QHA α) Γεωμετρία της κεραίας με 4 έλικες διαφορετικού μήκους β) S11 διάγραμμα [107]

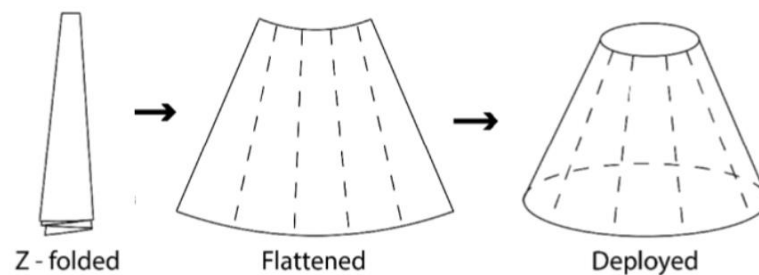


Διάγραμμα 24: Διάγραμμα ακτινοβολίας QHA για συχνότητα 250MHz [107]

Η CLSA κεραία του [108] λειτουργεί σε συχνότητες UHF, 300 με 650MHz (wideband), προσφέρει μέγιστο κέρδος 8dBic με κυκλική πόλωση και μπορεί να προσαρμοστεί σε δορυφόρους 6U ή μεγαλύτερους. Η κεραία μπορεί να διπλώσει σε σχήμα Z και δεν χρειάζεται επιφάνεια γείωσης, το οποίο είναι μεγάλο πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες ελικοειδείς κεραίες που ακτινοβολούν ομοιοκατευθυντικά χωρίς μεγάλες επιφάνειες γείωσης. Η κεραία αποτελείται από δύο έλικες (dual-armed) με διαφορετική σύνθετη αντίσταση εισόδου 200Ω , με διαφορά φάσης 180° ανάμεσα τους. Για την σωστή λειτουργία της κεραίας χρησιμοποιείται balun, όπου χωρίζει την ισχύ στους δύο έλικες με ίσο τρόπο, πετυχαίνοντας την κατάλληλη σύνθεση αντίσταση και την διαφορά φάσης 180° . Τέλος, το κέρδος της κεραίας είναι αρκετά σταθερό για όλο το εύρος ζώνης λειτουργίας.



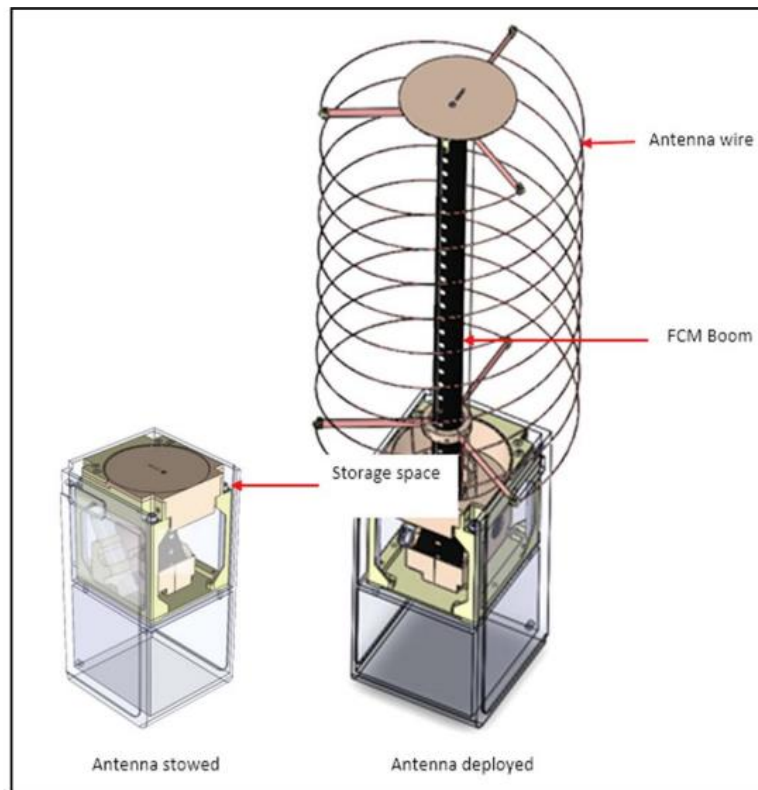
Εικόνα 140: Κεραία CLSA τοποθετημένη πάνω σε δορυφόρο 6U.



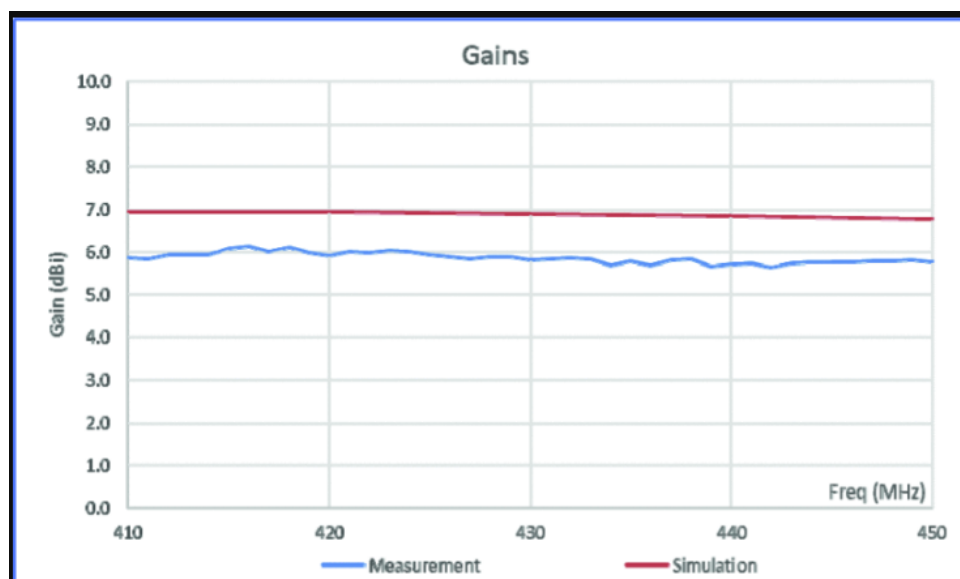
Εικόνα 141: Μηχανισμός ανάπτυξης κεραίας.

Στο [109] προτείνεται tri-filar ελικοειδής κεραία VHF/UHF, κυκλικής πόλωση και μήκους 300mm με μηχανισμό επέκτασης με δυνατότητα αποθήκευσης σε χώρο 1U. Έχει καλά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας και σταθερό κέρδος 6dBic (με θεωρητικό μέγιστο 6.8dBic) στις

συχνότητες λειτουργίας 410MHz έως 450MHz. Η βάση της κεραίας αποτελείται από διηλεκτρική επιφάνεια Rogers RO4003C με το balun και διαιρέτες ισχύος Wilkinson, ενώ ο μηχανισμός επέκτασης αποτελείται από έναν κεντρικό βραχίονα.



Εικόνα 142: Μοντέλο VHF/UHF Tri-Filar κεραία με μηχανισμό ανάπτυξης (stowage <1U) [109]



Διάγραμμα 25: Διάγραμμα κέρδους ανά συχνότητα Tri-Filar κεραίας. [109]

5.2.4. Συγκριτικός πίνακας κεραιών χαμηλού κέρδους

Κεραία	Τύπος κεραίας	Διαστάσεις	Κέρδος	Μηχανισμός επέκτασης	Συχνότητα Λειτουργίας	Πόλωση	Σχόλια
[110]	Dual Band Dipole	1m / 35.3cm	2.4dBi	Ναι	VHF/UHF	Γραμμική	Dual-Band με ξεχωριστά δίπολα για εκπομπή/λήψη. Χρήση του CubeSat ως γείωση
[111]	Dipole Array	1.2m x 10cm x 1.5mm	-9.4dBi / 2.1dBi	Ναι	VHF/UHF (80MHz - 600Mhz)	Γραμμική/ Κυκλική	Ultra-Wideband. Bandwidth 7.5:1 (VSWR<3). Stowage 0.4U. Καλός λόγος μεγέθους/αποθήκευσης
[112]	Compact Monopole	101 x 40 x 8.9mm	1.72dBi (VHF) / 3.11dBi (UHF)	Όχι	VHF/UHF	Γραμμική	Μικρός όγκος. Dual-Band.
[99]	PIFA	69.6 x 26mm	N/A	Όχι	VHF/UHF	Κυκλική	Άμεση εγκατάσταση στον δορυφόρο.
[113]	Dual Band printed inverted F antenna (IFA)	304 x 22.8 x 6mm	2.95dBi (VHF) / 5.06dBi (UHF)	Ναι	VHF/UHF	Κυκλική	Μικρό μέγεθος. Εύκολη κατασκευή. Απλός μηχανισμός επέκτασης. Περιορισμένο Bandwidth
[114]	Monopole	513.6 x 10 x 10mm	2.06dBi / 3.35dBi	Ναι	VHF / UHF	Γραμμική	Dual-Band μονόπολο.
[115]	Planar Cross Dipole	455 x 84mm (max)	<5dBi	Ναι	VHF / UHF	Κυκλική	Κατασκευή από Kapton. Χαμηλό βάρος. Χαμηλός όγκος.
[109]	Helical	180 x 300mm	6dBi	Ναι	VHF / UHF	Κυκλική	Όγκος αποθήκευσης <1U. Υψηλότερο κέρδος και Bandwidth σε σχέση με άλλες κεραίες VHF/UHF.
[108]	CLSA	185mm	5.57dB	Ναι	UHF	Κυκλική	Wideband. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς γείωση. Τροφοδοσία με Balun
[116]	Fractal patch	0.28λ x 0.28λ	3.93dBi (avg)	Όχι	UHF	N/A	Δυνατότητα προσαρμογής σε συχνότητες 700Mhz – 4.71Ghz.

*Διπλωματική εργασία: Μελέτη, Σχεδίαση και Προσομοίωση Κεραιών για Εφαρμογές Εποπτείας
Φάσματος σε Μικρούς Δορυφόρους*

[117]	Ελαστική Meanderline Planar	173 x 850mm	4.1dBi	Ναι	UHF	N/A	Υψηλός λόγος Stowage-to-Deployment 1:10 (stowage volume <100mm)
[107]	QHA	N/A	5.5dBic	Ναι	UHF	Κυκλική	NarrowBand. Μη δοκιμασμένος μηχανισμός ανάπτυξης. Χρειάζεται μεγάλη γείωση μεγέθους 300x300mm.
[118]	Helix	120 x 120 x 470mm	7dB	Ναι	UHF	Κυκλική	WideBand. Χρειάζεται μεγάλη γείωση για να πετύχει αυτό το κέρδος. Μη δοκιμασμένος μηχανισμός ανάπτυξης.
[119]	Meandered Folded Patch Array	90 x 90mm	1.5dBic	Όχι	UHF	Κυκλική	Μικρός όγκος. Περιορισμένο Bandwidth
[100]	Folded Wire	118 x 14.1mm	1.6dBi	Όχι	UHF	Γραμμική / Κυκλική	Άμεση εγκατάσταση στον δορυφόρο.
[92]	QHA	150 x 30mm	3.5dBi	Ναι	L-Band	Κυκλική	Isoflux δέσμη ακτινοβολίας.
[120]	Dual-Band CP	211 x 211 x 43 mm	4dBic (UHF) / 6.7dBic (L- Band)	Όχι	UHF / L-Band	Κυκλική	Dual Band. Μεταλλική κατασκευή. Περιορισμένο Bandwidth.
[121]	Patch - Four Dipole	55 x 55 x 0.85mm	3.49dB / 4.27dB	Όχι	S-Band	Κυκλική	Μικρός μέγεθος. Εύκολη κατασκευή.
[31]	Yagi-Uda	98mm × 150mm	6.19dB	Όχι	S-Band	Γραμμική	Bandwidth 135MHz. Φθηνή και εύκολη κατασκευή.
[122]	Shared Aperture Stacked Patch	0.5λ x 0.5λ x 0.13λ	6dBi	Όχι	S-Band / X-Band	Κυκλική	Dual-Band. WideBand.
[123]	Patch	78mm x 75mm	4dBi	Όχι	S-Band	Κυκλική	Wideband (33%). Μικρό μέγεθος.
[124]	Transparent / Nontransparent Patch	76 x 100 x 2.25mm	7.23dB / 3.99dB	Όχι	S-Band	Κυκλική	Δυνατότητα «διάφανης» κεραίας patch για χρήση με φωτοβολταϊκά
[125]	Slot	100mm x 100mm x 1.6mm	8dBi	Όχι	S-Band	Κυκλική	Bandwidth 37.1% (Wideband) Δύο κύριοι λοβοί ακτινοβολίας.

*Διπλωματική εργασία: Μελέτη, Σχεδίαση και Προσομοίωση Κεραιών για Εφαρμογές Εποπτείας
Φάσματος σε Μικρούς Δορυφόρους*

[126]	Planar Dipole Array	80x80mm	5.03dBi	Όχι	S-Band	Γραμμική	Κατασκευασμένη σε διηλεκτρική επιφάνεια. Υψηλότερο κέρδος σε σχέση με απλό δίπολο. Χαμηλό ύψος. Περιορισμένο Bandwidth.
[127]	Patch	96mm x 96mm	7.3dBi	Όχι	S-Band	Κυκλική	Μεγάλο Bandwidth 44.9%
[18]	Algorithm-based Wired Antenna	N/A	2-4dBi	Όχι	X-Band	Κυκλική	Εξαιρετικά χαμηλό κόστος κατασκευής. Γρήγορος σχεδιασμός.
[128]	Patch	17 mm × 17 mm × 6.5 mm	8dBi	Όχι	X-Band	Κυκλική	Wide Bandwidth 27%.
[129]	Archimedian Spiral Patch	N/A	0-5dBi	Όχι	UWB (6.8-24GHz)	Κυκλική	Ultra-Wideband Χαμηλός όγκος και βάρος.
[130]	Patch	30mm × 33mm	3.67dBi στα 3.9GHz	Όχι	UWB (2.56-19.89GHz)	N/A	Ultra-Wideband
[131]	Patch	9.7 x 7.4mm	7dBi	Όχι	Ka-Band (28.3GHz)	Γραμμική	Wide Bandwidth 21.5%.
[132]	Patch	9.7 x 7.4mm	6.9dBi	Όχι	Ka-Band (25.5-31.2GHz)	N/A	Wide Bandwidth 20.2% Αποδοτικότητα 82%

Πίνακας 11: Συγκριτικός πίνακας κεραιών χαμηλού κέρδους

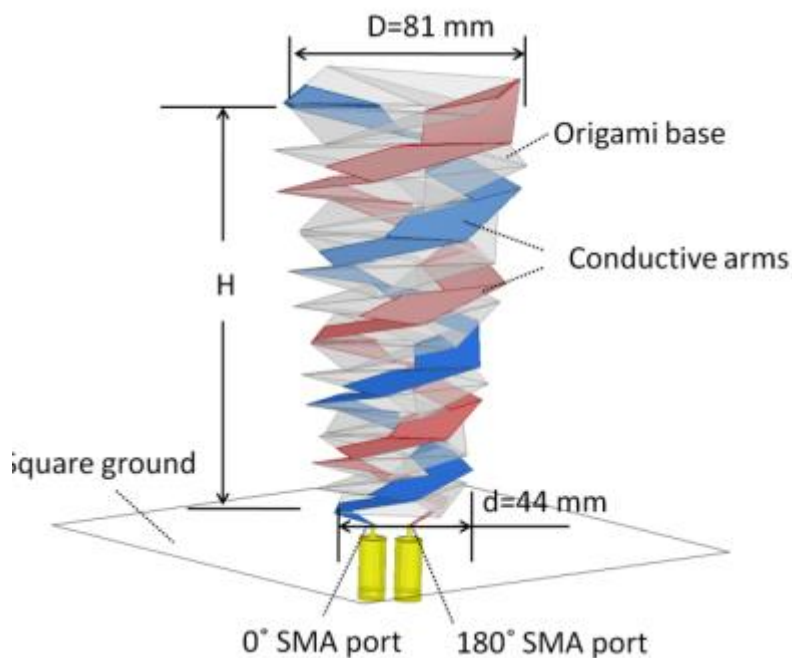
5.3.Κεραίες Μεσαίου Κέρδους – MGA

Οι κεραίες μεσαίου κέρδους που αναφέρονται σε αυτό το κεφάλαιο είναι κεραίες με κέρδος μεγαλύτερο από 8dBi και μικρότερο από 20dBi. Οι κεραίες αυτές χρησιμοποιούνται σε αποστολές μεγάλης απόστασης από τη γη ή όταν απαιτείται υψηλότερος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων.

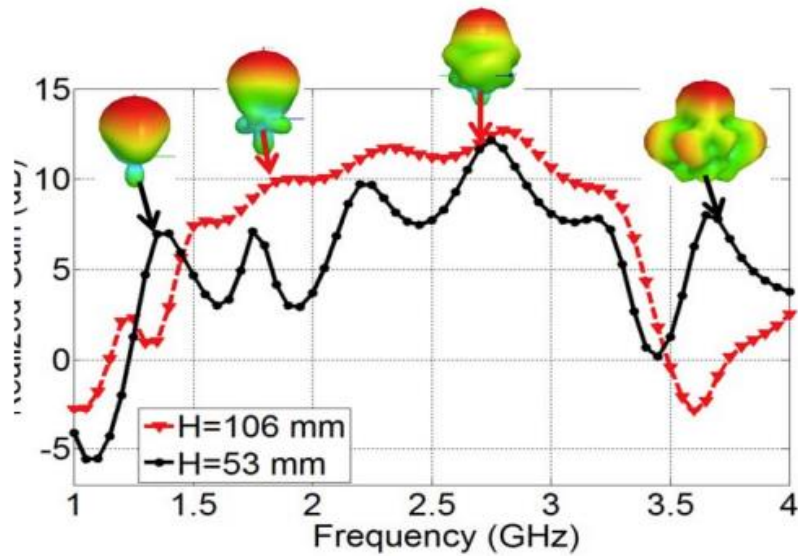
5.3.1. Ελικοειδείς Κεραίες MGA

Ένα πρωτότυπο σχέδιο κωνικής σπειροειδούς κεραίας παρουσιάζεται στο [133] με δυνατότητα προσαρμογής γεωμετρίας λόγω σχεδιασμού origami. Η τεχνική του origami χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη μελέτη για προσαρμογή της κεραίας σε διαφορετικές συχνότητες και την βελτίωση του εύρους ζώνης, αλλά αυτός ο τρόπος σχεδίασης θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για εφαρμογές σε CubeSats προσθέτοντας κάποιον μηχανισμό ανάπτυξης. Τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας είναι ικανοποιητικά για λειτουργίες σε συχνότητες L-Band ή S-Band, με κυκλική πόλωση και κέρδος μεγαλύτερο από 7dBi.

Στο [134] παρουσιάζεται μια ελικοειδής κεραία με εξαιρετικό λόγο μεγέθους προς αποθηκευτικού χώρου 300:1, καταλαμβάνοντας όγκο 0.5U. Λειτουργεί σε συχνότητα UHF, έχει κυκλική πόλωση και κέρδος 13dBi στα 400MHz. Η έλικα και η επιφάνεια γείωσης της κεραίας είναι κατασκευασμένα από ελαστικά υλικά και αποθηκεύονται διπλωμένα, ενώ αναπτύσσονται αυτόματα στο διάστημα λόγω της αποθηκευμένης ενέργειάς τους.



Εικόνα 143: Μοντέλο κεραίας Origami Conical Spiral [133]



Εικόνα 144: Κέρδος κεραίας σε διαφορετικές συχνότητες συντονισμού (Προσομοίωση) [133]



Figure 2: α) Ελικοειδής κεραία σε αποθηκευμένη μορφή β) επιφάνεια γείωσης σε αποθηκευμένη μορφή [134]

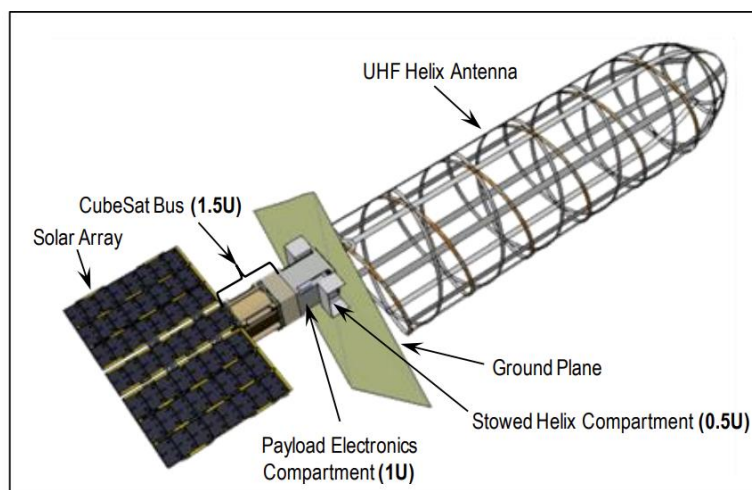
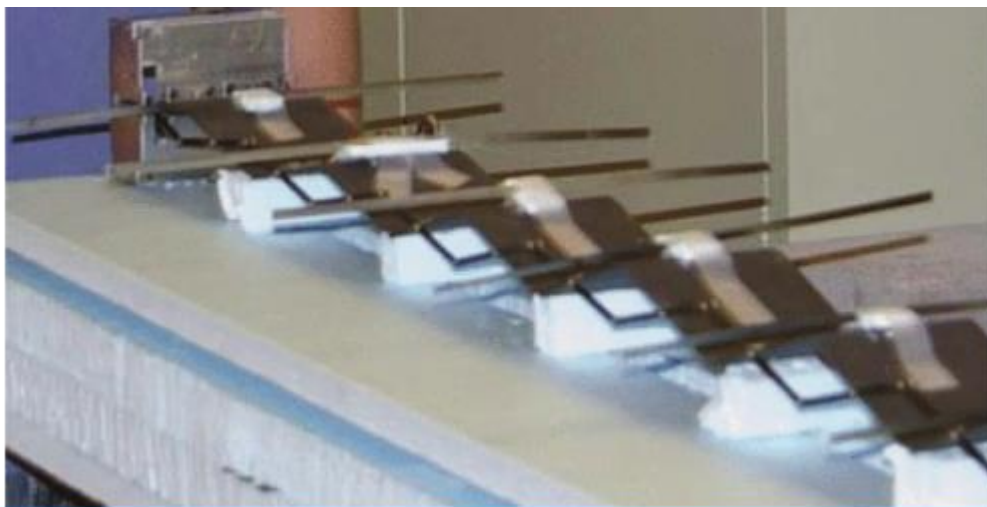


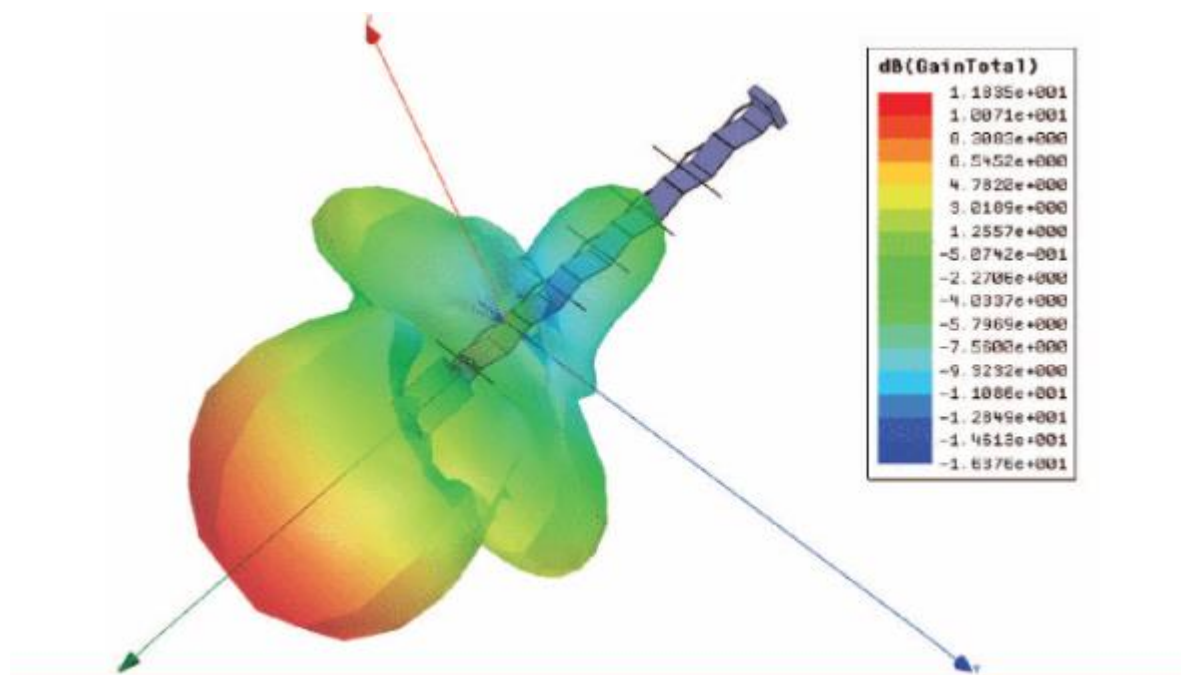
Figure 3: Μοντέλο ελικοειδούς κεραίας εγκατεστημένη σε δορυφόρο [134]

5.3.2. Κεραίες Yagi-Uda MGA

Ομοίως με τις ελικοειδείς κεραίες, οι Yagi-Uda μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερο κέρδος σε σχέση με τις περισσότερες γραμμικές κεραίες όπως μονόπολα και δίπολα. Το κέρδος εξαρτάται από το πλήθος των στοιχείων της κεραίας και συνεπώς από το συνολικό μήκος της. Ο μεγαλύτερος περιορισμός είναι το μέγεθός τους ακόμη και με χρήση μηχανισμών επέκτασης. Στο [135] παρουσιάζεται μια Yagi-Uda κεραία 6 στοιχείων, όπου ενσωματώνεται στην κατασκευή των φωτοβολταϊκών eXtendable Solar Array System (XSAS), το οποίο όμως καταλαμβάνει 1.5U στον δορυφόρο. Το κέρδος της κεραίας είναι αρκετά υψηλό στα 11.8dBi, με γραμμική πόλωση και S11 -19dB στα 435MHz.



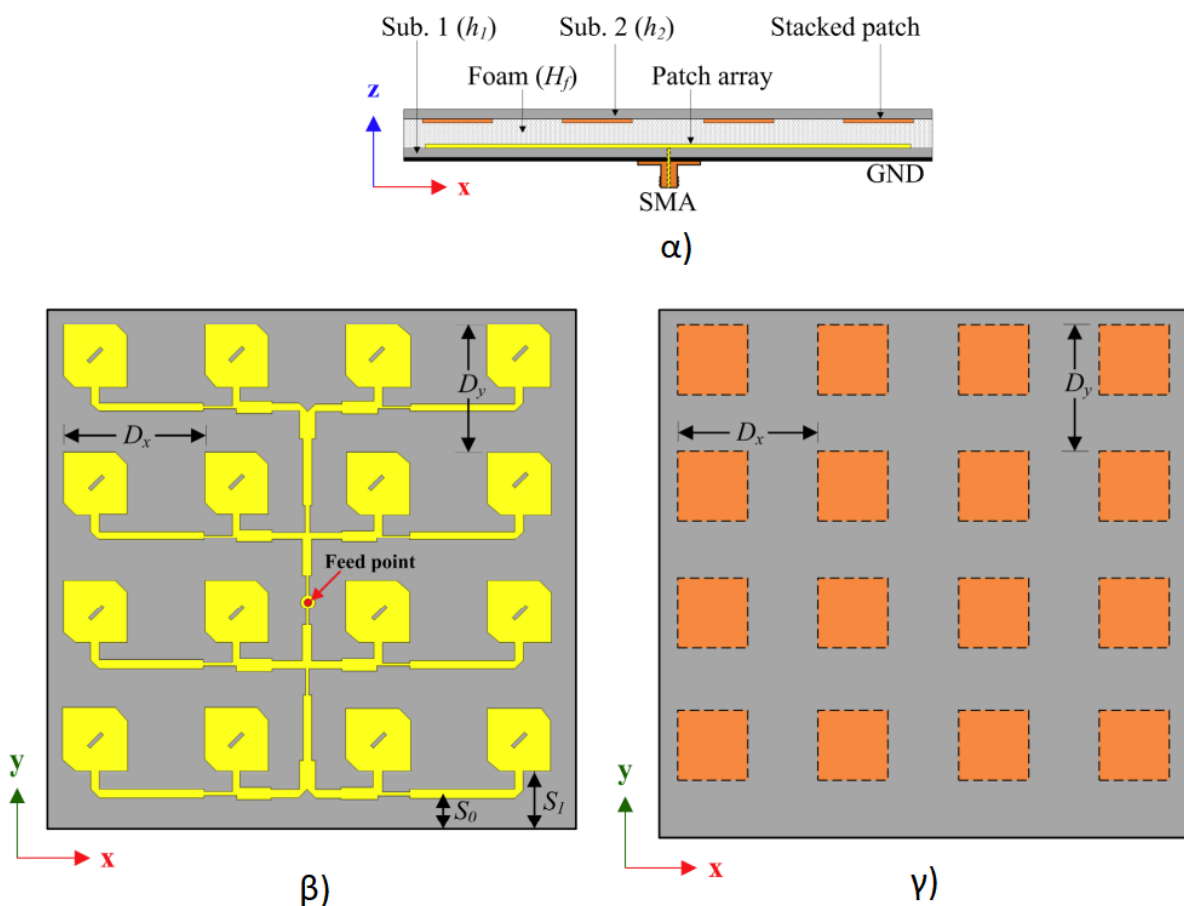
Εικόνα 145: Πρωτότυπο κεραίας Yagi-Uda ενσωματωμένη στα φωτοβολταϊκά. [135]



Εικόνα 146: Προσομοίωση κέρδους Yagi-Uda UHF εγκατεστημένη επάνω σε φωτοβολταϊκά [135]

5.3.3. Στοιχειοκεραίες MGA (Arrays)

Οι στοιχειοκεραίες και πιο συγκεκριμένα οι Patch Array προσφέρουν υψηλότερο κέρδος σε σχέση με τις patch κεραίες ενός στοιχείου, ενώ διατηρούν τα κύρια χαρακτηριστικά τους, όπως το χαμηλό ύψος, την εύκολη εγκατάσταση, την εύκολη κατασκευή και την γρήγορη σχεδίασή τους. Στη [136] παρουσιάζεται μια 4x4 patch array με συχνότητα λειτουργίας 7.52-8.82GHz με κυκλική πόλωση. Η κεραία χρησιμοποιεί παράλληλους διαιρέτες ισχύος και κάθε στοιχείο έχει μια κεντρική εσοχή και κομμένες τις δύο αντίθετες γωνίες, για να επιτευχθεί η κυκλική πόλωση. Οι διαστάσεις της είναι 100x100mm οπότε μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα σε CubeSats. Το κέρδος της είναι 20.03dBic, το οποίο είναι από τα υψηλότερα που έχουν παρουσιαστεί σε τέτοιου είδους κεραίες. Επιπλέον, προσφέρει ικανοποιητικό -10dB εύρος ζώνης με ποσοστό 15.85% και αποδοτικότητα διαφράγματος 86.5%. Παρόμοιο κέρδος παρουσιάζεται στην 6x6 patch array [137], αλλά προσφέρει υψηλότερο εύρος ζώνης -10dB, 21%. Άλλες patch κεραίες προσφέρουν χαρακτηριστικά όπως διάφανη επιφάνεια [138] ή dual-band λειτουργία [139] [140].



Εικόνα 147: Γεωμετρία 4x4 patch array α) η πλευρά της κεραίας β) ενεργά στοιχεία με το δίκτυο τροφοδοσίας γ) επιπρόσθετα patch στοιχεία [136]

5.3.1. Συγκριτικός Πίνακας Κεραιών Μεσαίου Κέρδους

Κεραία	Τύπος κεραίας	Διαστάσεις	Κέρδος	Μηχανισμός επέκτασης	Συχνότητα Λειτουργί ας	Πόλωση	Σχόλια
[21]	Monopole Array	3m / Stowage volume 10x10x5cm	8dBi έως 15dBi	Ναι	VHF/UHF	Γραμμική	Bi-Directional Στοιχειοκεραία μονόπολων μέτρου κέρδους.
[135]	Yagi-Uda	1.2m Deployed / 1.5U Stowage	11.8dBi	Ναι	UHF	Γραμμική	Βασίζεται στον μηχανισμό φωτοβολταϊκών XSAS. Bandwidth 12.18%
[134]	Helix	137cm x 36cm	8dBi έως 13dBi	Ναι	UHF	Κυκλική	Όγκος 0.5U. Πολύ υψηλό stowage ratio 300:1.
[141]	Metal Patch	N/A	10dBic	Όχι	UHF	Κυκλική	Πλήρως μεταλλική. Δυνατότητα Dual-Band λειτουργίας. Κυκλική πόλωση από ένα σημείο τροφοδοσίας. Αποδοτικότητα 90%. Bandwidth 24%.
[108]	QHA	500mm	8.3dBi	Ναι	UHF	Κυκλική	Μικρότερο Bandwidth σε σχέση με την CLSA. Χρειάζεται γείωση για να βελτιωθεί η κατευθυντικότητα.
[142]	Helix	87 mm × 87 mm × 27.5 mm stowed / 87 mm × 87 mm × 515 mm deployed	7.49dB έως 13.5dB (Directivit y)	Ναι	L-Band (GPS)	Κυκλική	0.3U Stowage. Υψηλή κατευθυντικότητα σε σχέση με άλλες κεραίες της ίδιας συχνότητας. Wideband λειτουργία. Λειτουργεί σε συχνότητες GPS L1, L2 και mWRAD (1227.6 - 1575.42 MHz).

[133]	Conical Spiral	N/A	7dbi / 12.4dBi	N/A	S-Band	Γραμμική/ Κυκλική	Κατασκευή Origami. Δυνατότητα προσαρμογής μεγέθους και συχνότητα λειτουργίας.
[143]	F - Patch	100 x 100mm	8.5dBi	Όχι	S-Band	Γραμμική	Wide Bandwidth 44.9%. Υψηλή αποδοτικότητα 85%
[144]	2x2 Patch Array	100 × 100 × 7.2mm	8.8dBi	Όχι	S-Band (1.82GHz – 2.98GHz)	Γραμμική	Wide Bandwidth 41%. Χρήση IoST. Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών.
[42]	Slot	90 × 90 × 10.5 mm	9.71dBi	Όχι	S-Band	Κυκλική	Bandwidth 5.4%. Αύξηση κέρδους λόγω χρήσης του σώματος του δορυφόρου ως ανακλαστήρα.
[145]	2x2 Patch Array	N/A	13dBi	Όχι	X-Band	Κυκλική	Bandwidth 16.97%. Μικρό μέγεθος.
[138]	Transparent Patch Array	N/A	15dB	Όχι	X-Band	Κυκλική	90% Διάφανη. Χαμηλό κόστος. Bandwidth 26%. Αποδοτικότητα 65%
[146]	2x4 Patch Array	91.6mm x 45.8mm	16.4dBi	Όχι	X-Band (8.83GHz – 16.78GHz)	Κυκλική	Wideband 62.1%
[136]	4x4 Patch Array	100 x 100 x 3mm	20.03dBi	Όχι	X-Band	Κυκλική	Υψηλό κέρδος. Εύκολη εγκατάσταση. Αποδοτικότητα διαφράγματος 65% - 97.5%. -10dB Bandwidth 15.9%.
[147]	4x4 Patch Array	96 x 96mm	15.89dBi	Όχι	X-Band	Κυκλική	Dual-fed. Σχετικά μεγάλοι δευτερεύοντες λοβοί ακτινοβολίας. Bandwidth 400MHz.

[139]	4x4 Patch Array	358.9 × 265 × 8mm	11.31dBi	Όχι	X-Band / Ku-Band	N/A	Multiband (X-Band, Ku-Band) Σχετικά μεγάλη.
[137]	6x6 Patch Array	100 x 100 x 6mm	20dBi	Όχι	X-Band (10.4GHz)	Κυκλική	Εύκολη εγκατάσταση. -10dB bandwidth 21%
[140]	4x4 Patch Array	62.76 × 90.45 mm	15.82dBi (X-Band) / 14.84dBi (Ka-Band)	Όχι	X-Band (14GHz) / Ka-Band (35GHz)	Διπλή Γραμμική	Dual-Band. Dual Polarization.
[73]	Vivaldi-fed Conical Horn	N/A	17.5dBi	Ναι	2GHz-13GHz	Κυκλική	UltraWideBand -10dB bandwidth. Wideband 11.11% -15dB. Ελαφριά κατασκευή.
[148]	“Bull’s Eye”	100 x 100 x 3.2mm	16.7dBi	Όχι	V-Band (60GHz)	N/A	Intersatellite Communication. Χαμηλό ύψος. Μεταλλική και ανθεκτική κατασκευή.

5.4.Κεραίες Υψηλού Κέρδους – HGA

Αυτό το κεφαλαίο περιλαμβάνει κεραίες με κέρδος μεγαλύτερο από 20dBi, οι οποίες έχουν αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Αυτές οι κεραίες χρησιμοποιούνται συνήθως για διαπλανητικές αποστολές (Deep Space), Remote Sensing ή άλλες αποστολές όπου απαιτείται υψηλό κέρδος ή/και υψηλές ταχύτητες δεδομένων. Τα είδη κεραιών υψηλού κέρδους είναι οι Patch Array, ReflectArrays, ανακλαστήρες πλέγματος, φουσκωτές, μεμβράνης, Slot Array, TransmitArrays και Metamaterial/Metasurface.

5.4.1. Συγκριτικός Πίνακας Κεραιών Υψηλού Κέρδους

Κεραία	Τύπος κεραίας	Διαστάσεις	Κέρδος	Μηχανισμός επέκτασης	Συχνότητα Λειτουργίας	Πόλωση	Σχόλια
[60]	Inflatable	N/A	25dBi	Ναι	S-Band	N/A	Εξαιρετικά υψηλός λόγος μεγέθους /αποθηκευτικού όγκου. Φθηνή. Κατασκευαστικά περίπλοκη. Δυσκολία προσομοίωσης
[72]	16x16 Patch Array	1.3m x 1.3m	32.7dB	Ναι	S-Band (3.6GHz)	Γραμμική	Αποδοτικότητα διαφράγματος 50%
[50]	Mesh Reflector OMERA	105cm x 91cm	47.4dBi (Ka-Band)	Ναι	X-Band / Ka-Band	N/A	Πολύ υψηλό κέρδος. Βαριά και ακριβή κατασκευή. Εγκατάσταση σε δορυφόρους >6U. TRL 4-5.
[149]	ReflectArray (MarCO)	60cm x 33cm	29.2dBi	Ναι	X-Band (8.4-8.45GHz)	Κυκλική	Περίπλοκος σχεδιασμός. Απλός μηχανισμός ανάπτυξης. Αποδοτικότητα 42%
[150]	Parabolic Reflector & 2x12 Patch Array	1m Diameter	37.4dBi	Ναι	X-Band	N/A	Λειτουργία SAR.
[151]	ReflectArray	1.5m x 1.5m	39.6dBi	Ναι	X-Band	N/A	Εξαιρετικός λόγος μεγέθους/αποθηκευτικού χώρου. Η μεγαλύτερη διάμετρος κεραίας για CubeSat.
[152]	ReflectArray	1 × 0.33m	37.2dBi	Ναι	Ku-Band (17.2 GHz)	Διπλά-Γραμμική	SAR & Remote Sensing εφαρμογές.
[153]	Mesh Reflector	0.5m Diameter Stowage 1.5U	42.6dBi	Ναι	Ka-Band	Γραμμική / Κυκλική	Λειτουργία SAR. Αποδοτικότητα διαφράγματος 52%. Περίπλοκος μηχανικός σχεδιασμός.

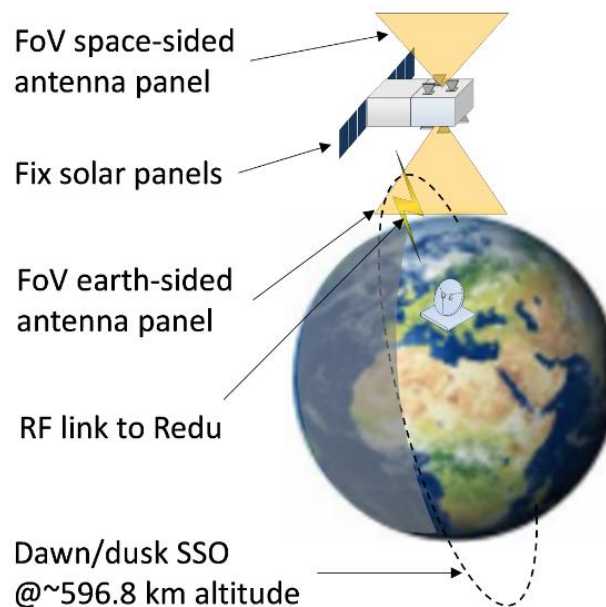
[149]	ReflectArray (ISARA)	33cm x 27cm	33dBi	Ναι	K-Band / Ka-Band	Κυκλική	Συνδυασμός κεραίας RA με φωτοβολταϊκά.
[87]	Metasurface	130 x 130 mm	24.4dB	Όχι	Ka-Band	Κυκλική	Πλήρως μεταλλική. Ανθεκτική. Μικρός όγκος. Περίπλοκος σχεδιασμός.
[52]	Mesh Reflector	1m Diameter	49.2dBi	Ναι	Ka-Band (36GHz)	N/A	Πολύ υψηλό κέρδος. Stowage 3U. Περίπλοκος μηχανισμός. TRL 4-5.
[154]	Reflector and Horn	7.2λ × 3.9λ × 1.4λ	34.36dB ic	Όχι	W-Band (79.5 88GHz)	Κυκλική –	Εγκατάσταση εσωτερικά του δορυφόρου. Inbuilt Polarizer.
[155]	16x32 Phased Array	N/A	30dBic	Όχι	W-Band	Κυκλική	Beamsteering +/- 30° Χαμηλό ύψος. Bandwidth 800MHz.
[90]	Metasurface	56λ × 56λ	31.9dB	Όχι	W-Band (94GHz)	N/A	Πολύ μικρός όγκος. Περίπλοκος σχεδιασμός και κατασκευή.

Πίνακας 12: Συγκριτικός πίνακας κεραιών υψηλού κέρδους

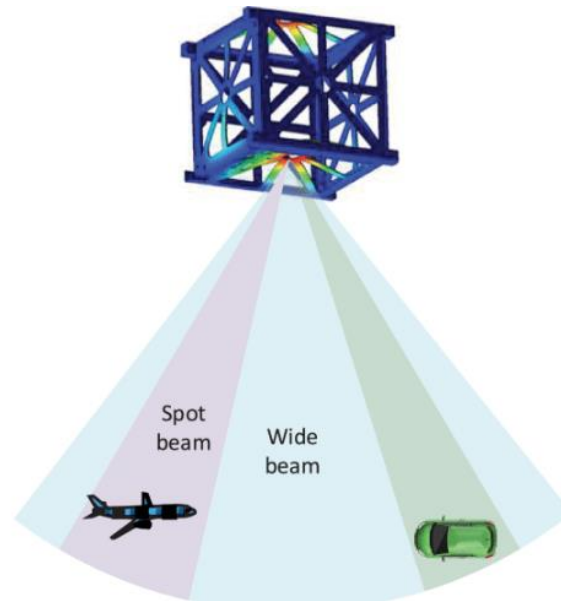
6. Επιλογή Κεραίας CubeSat για Εποπτεία Φάσματος

6.1. Κριτήρια επιλογής κεραιών

Η επιλογή των κεραιών εξαρτάται από το είδος αποστολής και τον στόχο της. Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της κεραίας είναι το κέρδος, διότι από αυτό εξαρτάται το πόσο μεγάλη θα είναι η γωνία κάλυψης (γωνία ημίσειας ισχύος). Σε κάθε απαιτητική αποστολή γίνονται κάποιοι συμβιβασμοί των απαιτήσεων, ειδικά σε μια πολύ περιορισμένη πλατφόρμα όπως οι CubeSats, και πρέπει να υπολογίσουμε αυτούς τους περιορισμούς κατά την ανάλυση των απαιτήσεων μελετώντας παράλληλα όλα τα υπόλοιπα υποσυστήματα του δορυφόρου. Για παράδειγμα, η επιλογή πολλαπλών κεραιών μπορεί να οδηγήσει στην ανεπάρκεια ελεύθερου χώρου για τα απαραίτητα φωτοβολταϊκά. Η ανάλυση του συνολικού σχεδίου και των απαιτήσεων μπορεί να προσφέρει και πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στην κεραία ή την ενσωμάτωση της κεραίας πάνω στα φωτοβολταϊκά για την εκμετάλλευση του μηχανισμού επέκτασής τους. Οι γενικές απαιτήσεις του εύρους συχνοτήτων ενός δορυφορικού συστήματος εποπτείας φάσματος κυμαίνονται από 160MHz (π.χ. AIS VHF) έως 44GHz και συνεπώς η επιλογή μιας κεραίας για την υποστήριξη όλου του φάσματος δεν είναι εφικτό.



Εικόνα 148: Απεικόνιση μοντέλου δορυφόρου με κεραιές προς το διάστημα



Εικόνα 149: Διαφορετικές δέσμες ακτινοβολίας κεραιών δορυφόρου.

Αρχικά για μια αποστολή εποπτείας φάσματος πρέπει να οριστούν οι ζητούμενες συχνότητες και εάν απαιτείται γεωεντοπισμός. Σε περίπτωση όπου το ζητούμενο εύρος είναι πολύ μεγάλο και χρειαζόμαστε πολλαπλές κεραίες θα πρέπει να γίνει ανάλυση της χρήσης τους και την τοποθεσία τους. Αρχικά θα πρέπει να γνωρίζουμε την τροχιά του δορυφόρου και εάν θα είναι σε constellation. Οι CubeSats είναι κυρίως χαμηλής τροχιάς, αλλά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και σε μεγαλύτερα υψόμετρα, με χαμηλότερες τροχιακές ταχύτητες και μεγαλύτερη κάλυψη κάθε δορυφόρου, αλλά λόγω των χαμηλών επιπέδων ισχύος θα απαιτείται υψηλότερο κέρδος κεραιών. Σε περίπτωση constellation θα πρέπει να υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των δορυφόρων, οπότε να πρέπει να εγκατασταθούν κεραίες στις πλευρές του δορυφόρου, ακόμη και από τη μεριά προς το διάστημα για επικοινωνία με δορυφόρους υψηλότερης τροχιάς. Επίσης θα πρέπει να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του συστήματος ADCS σε περίπτωση που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε κεραίες υψηλού κέρδους και να πρέπει να κατευθύνουμε την δέσμη ακτινοβολίας της κεραίας προς έναν επίγειο σταθμό περιστρέφοντας τον δορυφόρο. Σε έναν δορυφόρο με κεραία υψηλού κέρδους θα χρειαστούμε ADCS μεγάλης ακρίβειας για την μείωση των απωλειών στόχευσης.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των κεραιών πρέπει να τηρούν τους περιορισμούς του δορυφόρου, όπως το χαμηλό βάρος και τις συγκεκριμένες διαστάσεις, ενώ σε περίπτωση που ο τύπος της κεραίας έχει μηχανισμό επέκτασης θα πρέπει να διασφαλιστεί η αντοχή του μηχανισμού κατά την εκτόξευση και να υπάρχουν εφεδρικοί μηχανισμοί. Σε όλες τις περιπτώσεις οι κεραίες θα πρέπει να αντέξουν τις δονήσεις κατά την εκτόξευση, το περιβάλλον χωρίς ατμόσφαιρα, τις μεγάλες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και την έντονη ακτινοβολία.

Τα βασικά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας είναι το κέρδος (και κατευθυντικότητα) μιας κεραίας καθώς καθορίζεται το εύρος κάλυψης της κεραίας και η ευαισθησία της. Για συχνότητες λειτουργίας X-Band ή μεγαλύτερες μπορούμε να πετύχουμε πιο εύκολα υψηλά κέρδη (λόγω του μικρού μήκους κύματος) αλλά θα πρέπει να αναλογιστούν οι απώλειες που προκαλούνται

από την ατμόσφαιρα της γης (ατμοσφαιρικές, βροχής). Για συχνότητες S-Band και χαμηλότερες δεν είναι τόσο σημαντικές οι απώλειες ατμόσφαιρας και βροχής, αλλά το δεν μπορούμε να πετύχουμε υψηλό κέρδος λόγω των μεγάλων διαστάσεων που θα καταλάμβαναν. Σε όλες τις περιπτώσεις όμως η κυκλική πόλωση είναι ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό διότι θα μπορούμε να λάβουμε και κυκλικά σήματα και γραμμικά χωρίς να υπάρχουν απώλειες αποπόλωσης μεγαλύτερες από 3dB.

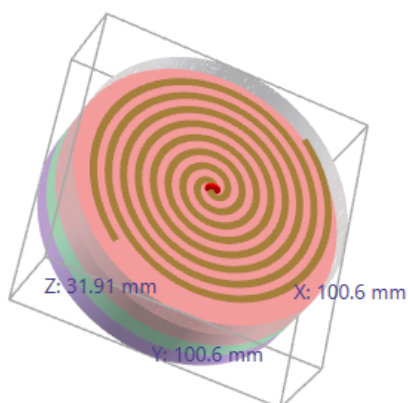
Το εύρος ζώνης της κεραίας είναι σημαντικό όταν θέλουμε να εντοπίσουμε ζώνες συχνοτήτων μεγάλου εύρους (πχ όλες τις ζώνες πλοήγησης GPS, GLONASS, Galileo κλπ), αλλά για περιπτώσεις χρήσεις όπως επικοινωνία μεταξύ δορυφόρων μπορούμε να χρησιμοποιούμε κεραίες με μικρό εύρος ζώνης.

6.2. Σχεδίαση και Προσομοίωση Κεραιών

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το Antenna Magus 2022. Για κάθε κεραία έγινε παραμετρική μελέτη ώστε να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά των κεραιών με βάση τους φυσικούς περιορισμούς των CubeSat (διαστάσεις 10x10cm). Οι προσομοιώσεις πιθανό να έχουν ανακρίβειες όπως διαφορές συχνοτήτων (-3% έως +3%), του συντελεστή ανάκλασης για τιμές κάτω από -15dB και των οπίσθιων λοβών ακτινοβολίας.

6.3. Κεραία Χαμηλού Κέρδους Υπέρ-ευρείας Ζώνης Συχνοτήτων – Archimedean Spiral with Absorber-lined Cavity Backing (UWB)

Η Αρχιμήδεια σπειροειδής κεραία θεωρητικά λειτουργεί σε οποιαδήποτε συχνότητα αλλά πρακτικά μπορεί να λειτουργήσουν σε συχνότητες από 1GHz έως 36GHz. Το συνολικό εύρος ζώνης εξαρτάται από τον τρόπο τροφοδοσίας (π.χ. Balun) και από την ακρίβεια των φυσικών χαρακτηριστικών της. Παρέχουν κυκλική πόλωση (axial ratio <3dB), χαμηλό S11 και μέτριο-χαμηλό κέρδος για όλο το εύρος ζώνης.

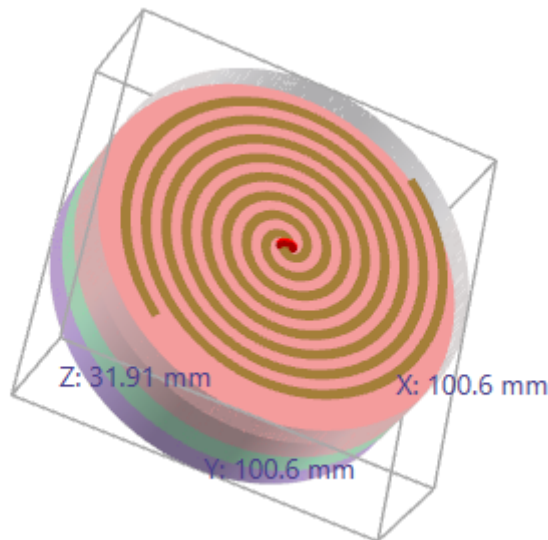


Εικόνα 151: Προσομοίωση Αρχιμήδειας σπειροειδούς κεραίας



Εικόνα 150: Klopfenstein Balun [77]

6.3.1. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Archimedean Spiral with Absorber-lined Cavity Backing

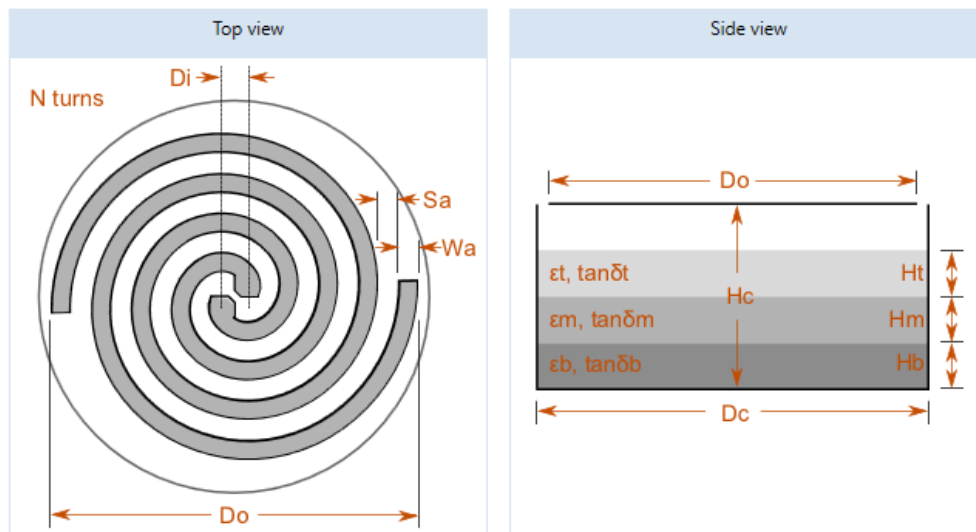


Εικόνα 152: Προσομοίωση Αρχιμήδειας σπειροειδούς κεραίας

Η κεραία έχει διαστάσεις 10x10x3.1cm και μπορεί να εγκατασταθεί σε μια πλευρά ενός CubeSat. Η κεραία θα μπορούσε να κατασκευαστεί σε μικρότερες διαστάσεις, με διάμετρο περίπου 4 εκατοστά. Η επιλογή της διαμέτρου 10cm μας προσφέρει καλύτερα χαρακτηριστικά σε συχνότητες από 1GHz έως 3GHz οι οποίες μπορεί να είναι σημαντικές για μια αποστολή εποπτείας φάσματος.

Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας είναι τα παρακάτω:

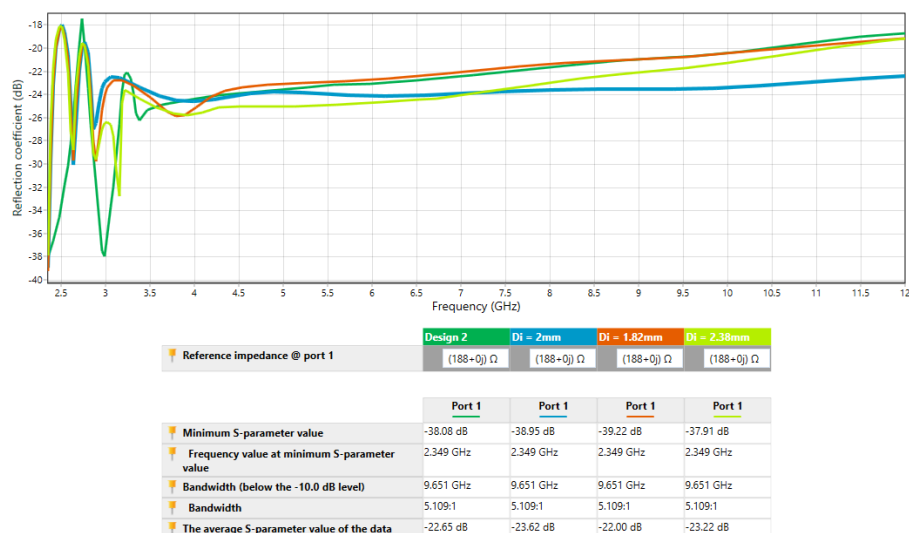
- Για την μείωση της ελάχιστης συχνότητας λειτουργίας πρέπει να αυξηθεί η εξωτερική διάμετρος
- Για την αύξηση της ελάχιστης συχνότητας λειτουργίας πρέπει να μειωθεί η εξωτερική διάμετρος
- Για την μείωση της μέγιστης συχνότητας λειτουργίας πρέπει να αυξηθεί η εσωτερική διάμετρος
- Για την αύξηση της μέγιστης συχνότητας λειτουργίας πρέπει να μειωθεί η εσωτερική διάμετρος
- Λίγες περιστροφές θα επιβαρύνουν τον αξονικό λόγο (axial ratio)



Εικόνα 153: Γεωμετρία και παράμετροι Αρχιμήδειας σπειροειδούς κεραίας

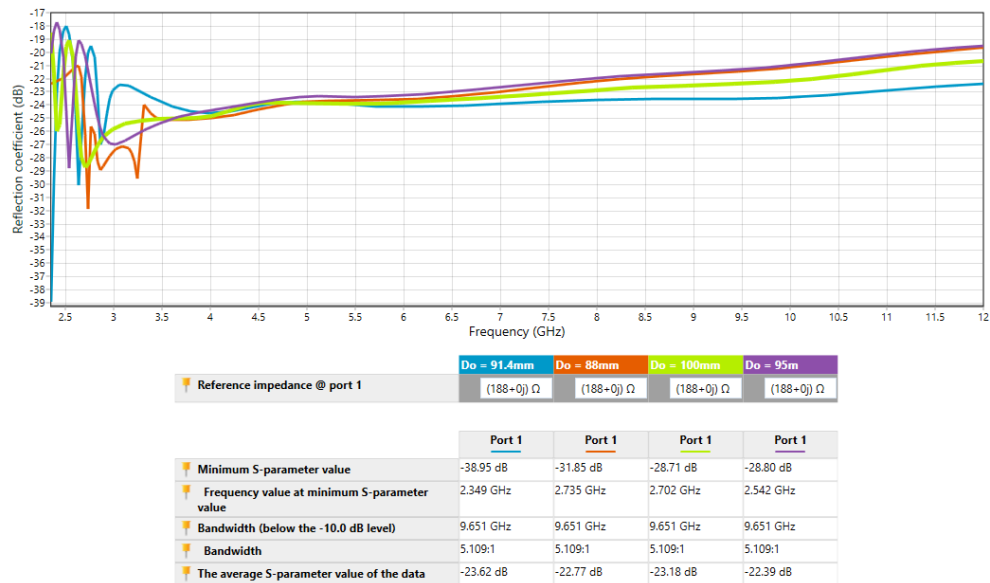
• Επίδραση διαμέτρου D_i

Η αλλαγή της απόστασης των δύο στοιχείων επηρεάζει τον συντελεστή ανάκλασης για συχνότητες μεγαλύτερες των 5GHz, όπου κάποιες τιμές D_i φαίνεται να προκαλούν αύξηση του συντελεστή ανάκλασης όσο μεγαλώνει η συχνότητα. Έτσι, επιλέχθηκε η τιμή 2mm καθώς έχει το πιο σταθερό συντελεστή ανάκλασης σε όλο το εύρος.



Διάγραμμα 26: S_{11} για διάφορες τιμές διαμέτρου D_i

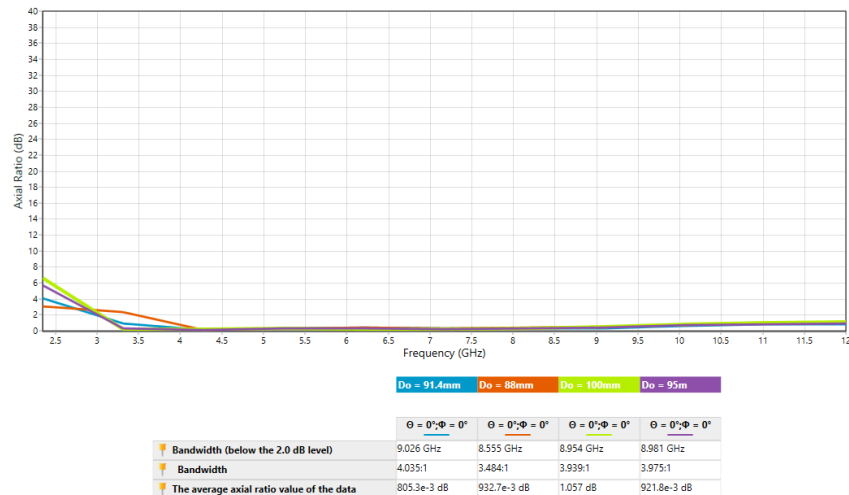
• Επίδραση διαμέτρου D_o



Διάγραμμα 27: S11 για διάφορες τιμές διαμέτρου Do



Διάγραμμα 28: Κέδρος ανα συχνότητα για διάφορες τιμές διαμέτρου



Διάγραμμα 29: Αξονικός λόγος για διαφορετικές τιμές διαμέτρου D_o

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και με την αλλαγή της διαμέτρου των σπείρων και επιλέχθηκε η διάμετρος 91.4mm καθώς προσφέρει το χαμηλότερο και πιο σταθερό συντελεστή ανάκλασης. Το κέρδος και ο αξονικός λόγος παραμένουν σχετικά σταθερά για συχνότητες μεγαλύτερες των 4GHz.

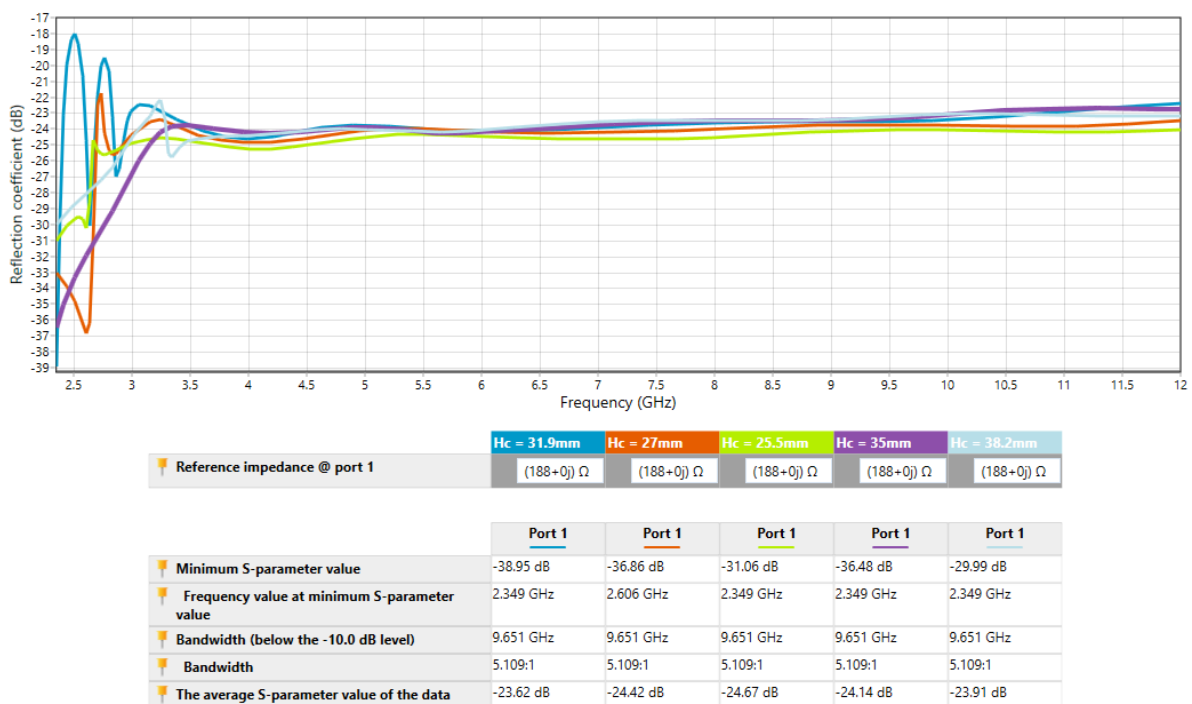
- Επίδραση αριθμών περιστροφών N



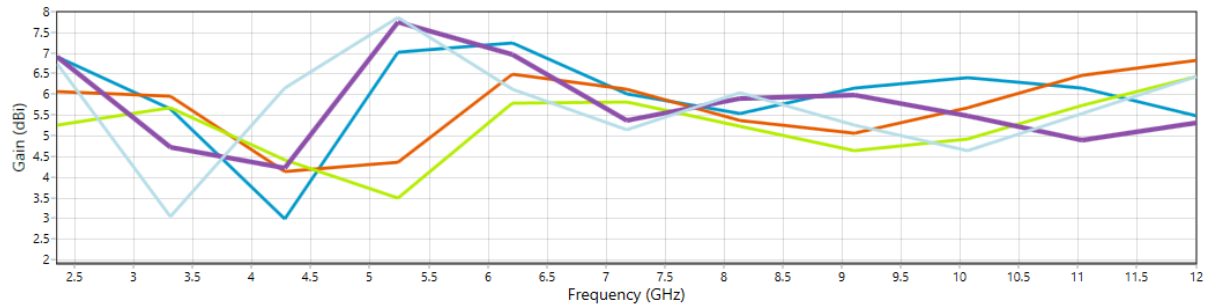
Διάγραμμα 30: Κέρδος ανα συχνότητα για διάφορες τιμές περιστροφών N

Αλλάζοντας τον αριθμό των περιστροφών των στοιχείων επηρεάζεται κυρίως το κέρδος για τις συχνότητες λειτουργίας χαμηλότερες από 4GHz. Για $N=3.9$ έχουμε το μεγαλύτερο κέρδος στα 2GHz σε σχέση με άλλες τιμές, οπότε αυτή είναι η τιμή που επιλέχθηκε. Για $N=2$ παρατηρείται ότι προσφέρει περίπου 0.3dBi υψηλότερο κέρδος στο εύρος από 5.2GHz έως 8GHz, αλλά υπάρχει μείωση του κέρδους κατά περίπου 1dBi για συχνότητες κάτω των 3.5GHz. Ο συντελεστής ανάκλασης και ο λόγος στάσιμων κυμάτων παραμένουν χαμηλότερα από -10dB και 1.5 αντίστοιχα, για όλο το εύρος με παρόμοια χαρακτηριστικά με τα προηγούμενα δεδομένα.

- Επίδραση του ύψους H_c



Διάγραμμα 31: S_{11} για διάφορες τιμές ύψους H_c



	Hc = 31.9mm	Hc = 27mm	Hc = 25.5mm	Hc = 35mm	Hc = 38.2mm
	$\Theta = 0^\circ; \Phi = 0^\circ$	$\Theta = 0^\circ; \Phi = 0^\circ$	$\Theta = 0^\circ; \Phi = 0^\circ$	$\Theta = 0^\circ; \Phi = 0^\circ$	$\Theta = 0^\circ; \Phi = 0^\circ$
Bandwidth (above 3 dB below the peak level)	1.475 GHz	9.651 GHz	9.651 GHz	962.7 MHz	489.3 MHz
Bandwidth	47.79 %	5.109:1	5.109:1	34.02 %	18.87 %
Bandwidth (above 3 dB below the peak level)	7.420 GHz	-	-	7.579 GHz	5.853 GHz
Bandwidth	89.51 %	-	-	92.31 %	86.02 %
Bandwidth (above 10 dB below the peak level)	9.651 GHz	9.651 GHz	9.651 GHz	9.651 GHz	9.651 GHz
Bandwidth	5.109:1	5.109:1	5.109:1	5.109:1	5.109:1
Maximum gain value	7.240 dBi	6.830 dBi	6.416 dBi	7.734 dBi	7.856 dBi
Frequency value at maximum gain value	6.209 GHz	12 GHz	12 GHz	5.244 GHz	5.244 GHz
Bandwidth (above 3 dB below the peak level)	-	-	-	-	1.702 GHz
Bandwidth	-	-	-	-	15.27 %
The average gain value of the data	5.958 dBi	5.680 dBi	5.212 dBi	5.771 dBi	5.720 dBi

Διάγραμμα 32: Κέρδος ανά συχνότητα για διάφορες τιμές ύψους Hc

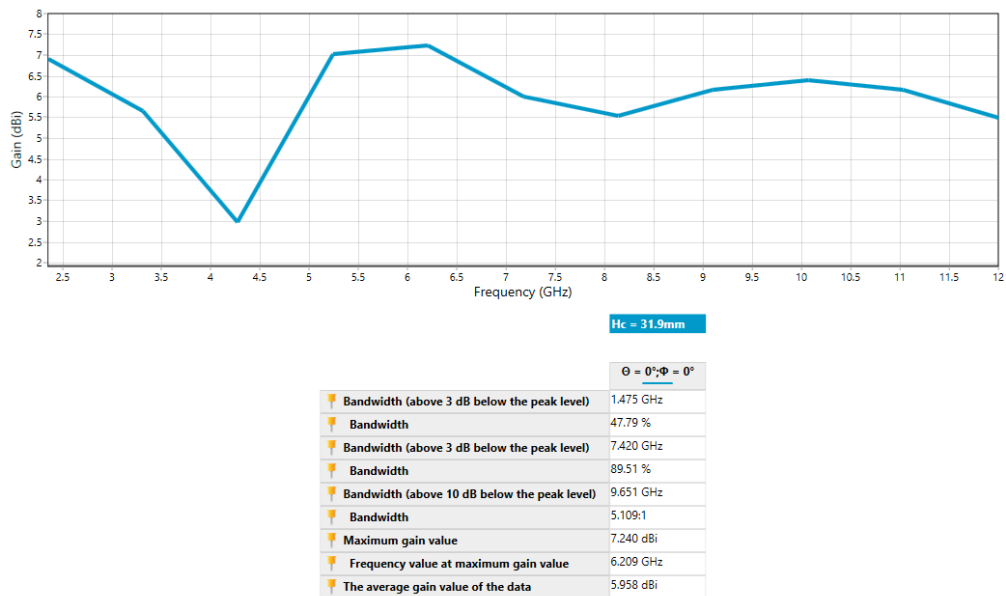
Ομοίως με τα προηγούμενα δεδομένα, δεν υπάρχουν πολλές διαφορές στον συντελεστή ανάκλασης (παραμένει κάτω από -10dB για όλο το ζητούμενο εύρος ζώνης). Το κέρδος αυξομειώνεται με διαφορετικές τιμές αναλόγως την συχνότητα. Σε αυτή την περίπτωση η επιλογή του ύψους θα κριθεί από τους περιορισμούς του χώρου και των απαιτήσεων κέρδους ανά συχνότητα. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέχθηκε η τιμή Hc 31.9mm καθώς προσφέρει το υψηλότερο κέρδος στις X-Band συχνότητες.

- **Βέλτιστο σχέδιο – Αποτελέσματα**

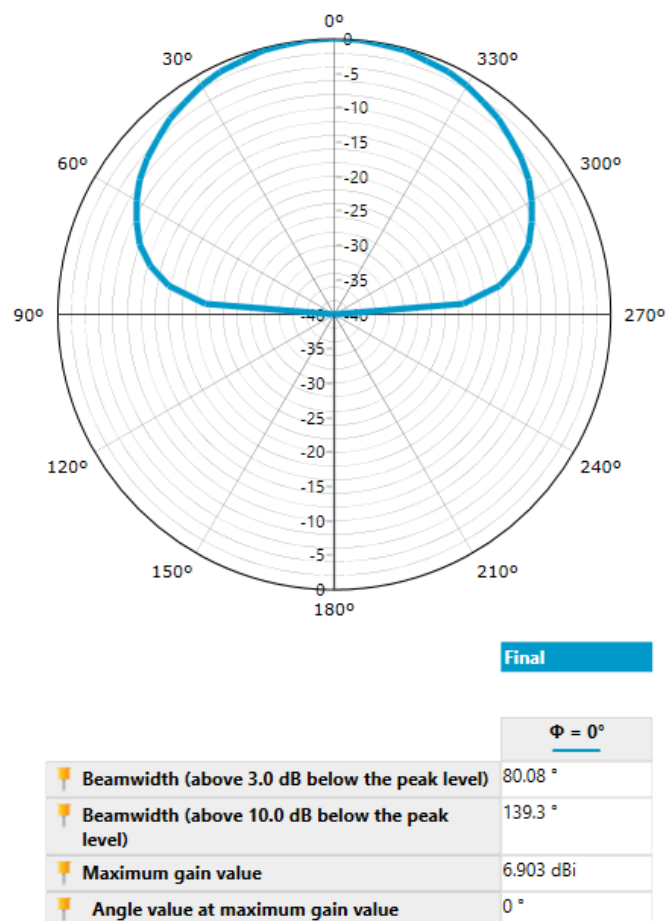
Τα τελικά χαρακτηριστικά της κεραίας είναι τα παρακάτω:

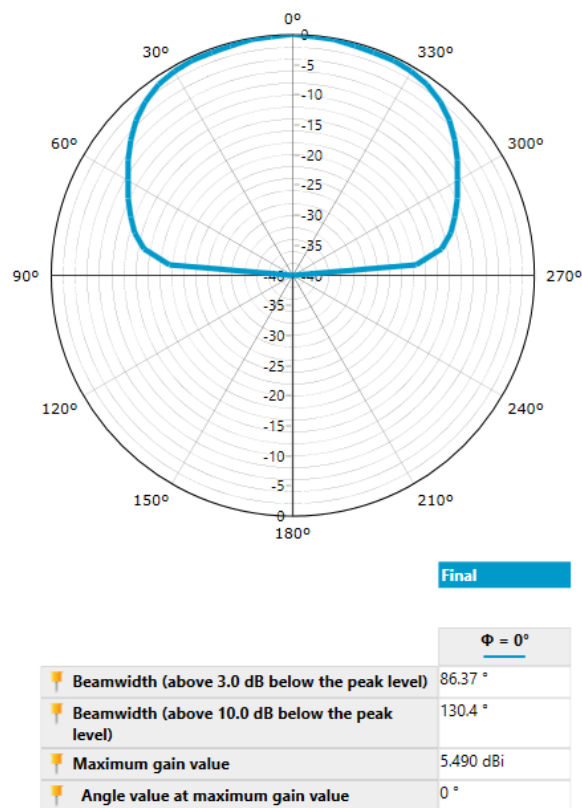
Παράμετροι	Τιμή
Συχνότητες Λειτουργίας ($f_{\min}$ - $f_{\max}$)	2.3GHz – 30GHz
Πόλωση	Κυκλική (RHCP)
Διαστάσεις	X = 10cm Y = 10cm Z = 3.19cm
Di	2mm
Do	91.42mm
N	3.9
H	Αριστερά
Hc	31.91mm
Dc	100.6mm
Ht	7.978mm
Hm	7.978mm
Hb	7.978mm
Tan δ_t	250e-3
Tan δ_m	250e-3
ϵ_t	1.1
ϵ_m	1.1
Eb	2
Wa	2.286
Sa	2.286

Πίνακας 13: Παράμετροι τελικού σχεδίου σπειροειδούς κεραίας

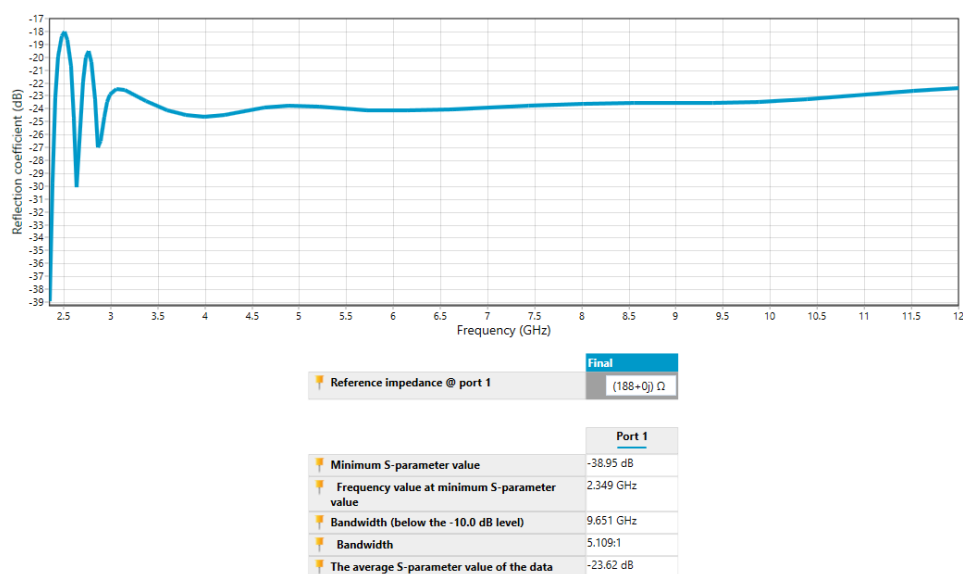


Εικόνα 154: Διάγραμμα κέρδους - συχνότητας

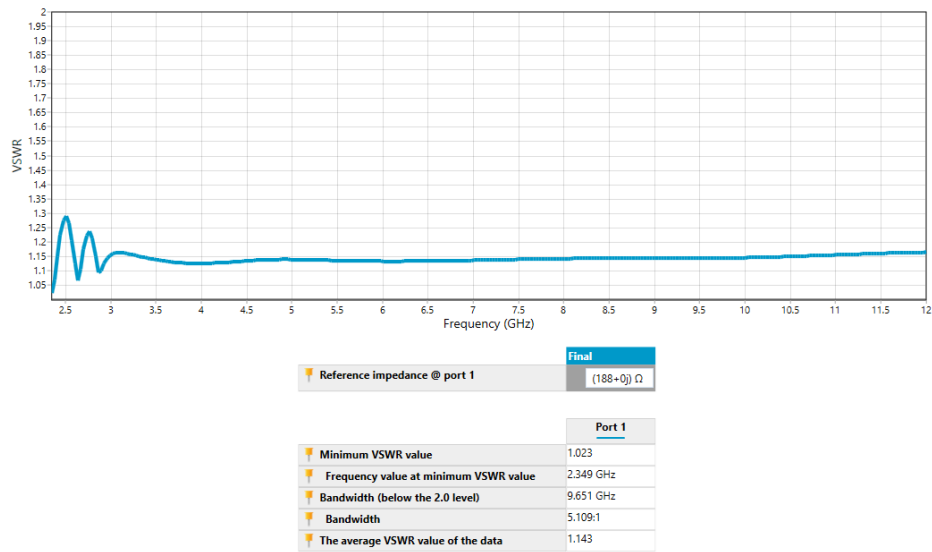




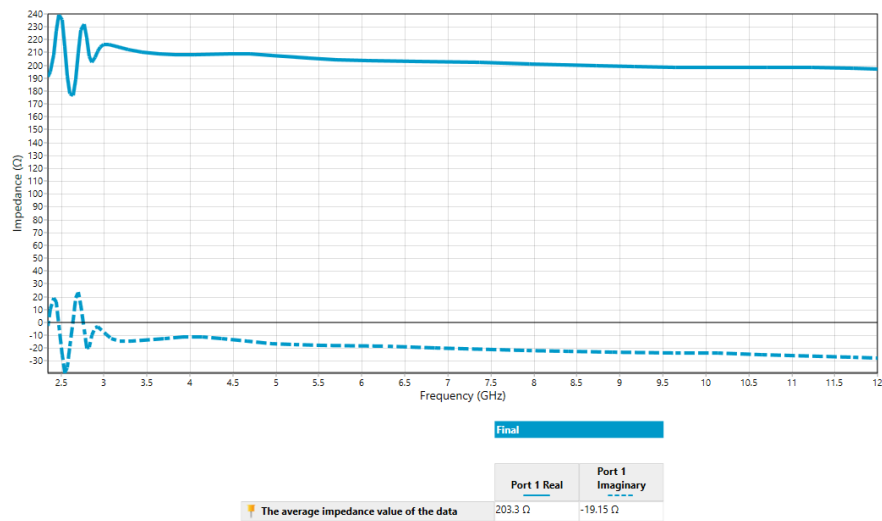
Διάγραμμα 34: Ιδανικό Far field διάγραμμα ακτινοβολίας σε συχνότητα 12GHz



Διάγραμμα 35: Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης σπειροειδούς κεραίας



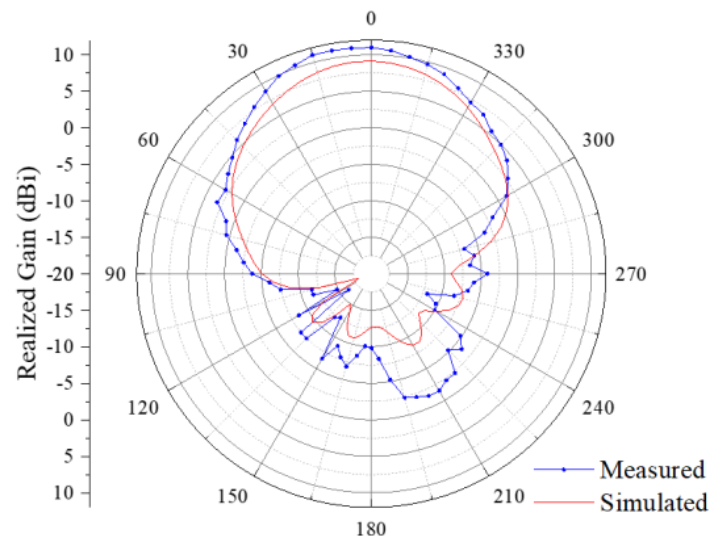
Διάγραμμα 36: Διάγραμμα λόγου στάσιμων κυμάτων σπειροειδούς κεραίας



Διάγραμμα 37: Διάγραμμα εμπέδισης (impedance) σπειροειδούς κεραίας

6.3.2. Συμπεράσματα προσωμοίωσης

Η προσομοίωση που έγινε για την Αρχιμήδεια σπειροειδή κεραία είναι για την επίδοση της κεραίας χωρίς την χρήση Balun, το οποίο όμως είναι απαραίτητο για την σωστή προσαρμογή της κεραίας στη ζητούμενη αντίσταση (50Ω). Το συνολικό εύρος ζώνης θα εξαρτηθεί από το Balun και με δυνατότητες τελικού εύρους ζώνης 3GHz έως 30GHz. Το διάγραμμα ακτινοβολίας των προσομοιώσεων είναι τα ιδανικά γραφήματα, ενώ το προβλεπόμενο πρακτικό διάγραμμα ακτινοβολίας μιας τέτοιας κεραίας φαίνεται στο παρακάτω γράφημα:



Διάγραμμα 38: Πρόβλεψη διαγράμματος ακτινοβολίας ρεαλιστικού μοντέλου σπειροειδούς κεραίας[77]

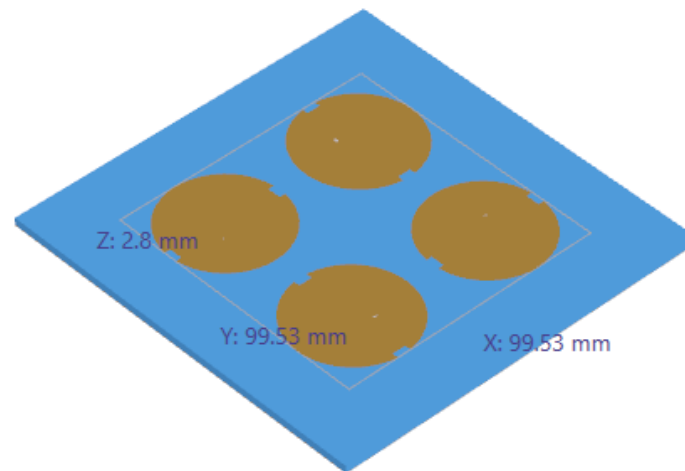
Ο λοβός ακτινοβολίας που προσφέρει αυτή η κεραία είναι ευρύς και με ελάχιστη ισχύ στον δευτερεύοντα πίσω λοβό (προς τον δορυφόρο). Έτσι παρέχεται μεγάλη κάλυψη προς τη γη και αυξάνεται ο χρόνος επικοινωνίας του δορυφόρου και ενός επίγειου σταθμού, χωρίς να απαιτούνται περιστροφές του δορυφόρου με το σύστημα ADCS. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της κεραίας είναι το πολύ μεγάλο εύρος ζώνης (ultrawideband), οπότε μπορούμε να αντικαταστήσουμε δύο ή περισσότερες κεραίες του δορυφόρου με μια Αρχιμήδεια σπειροειδή, εξοικονομώντας χώρο και βάρος, ενώ παράλληλα επιτρέπουμε την χρήση επιπρόσθετων κεραιών στις άλλες πλευρές του δορυφόρου για άλλες λειτουργίες που μπορεί να χρειαστούν σε περίπτωση γεωεντοπισμού ή διαδορυφορικής επικοινωνίας. Τέλος, η κεραία προσφέρει κυκλική πόλωση με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται η ισχύς του σήματος λόγω απωλειών αποπόλωσης.

Τα αρνητικά αυτής της κεραίας είναι το μεγάλο ύψος και βάρος σε σχέση με άλλες κεραίες όπως patch. Επίσης, σε περίπτωση που μια αποστολή απαιτεί υψηλό κέρδος θα μπορούσαμε να επιλέξουμε μια σπειροειδή στοιχειοκεραία (spiral array), αλλά το βάρος θα ήταν σημαντικά μεγαλύτερο από μια patch array.

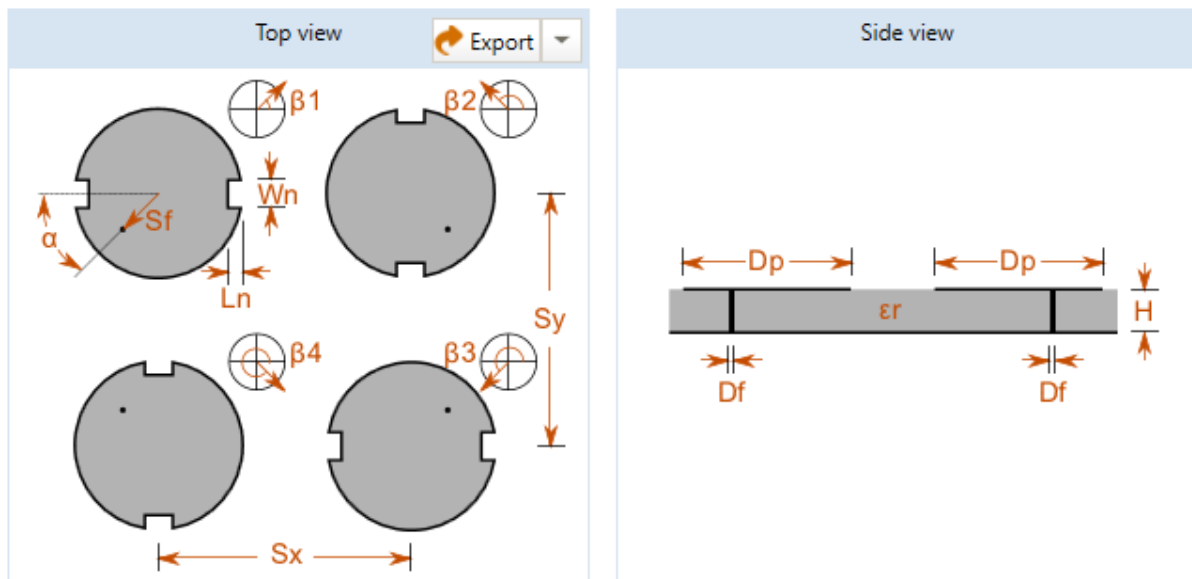
6.4.Κεραία Μεσαίου Κέρδους – 2x2 Patch Array (S-Band)

6.4.1. Γενικά

Για τις συχνότητες S-Band προτείνεται μια κεραία patch array μεσαίου κέρδους και κυκλική πόλωση. Το υψηλότερο κέρδος είναι σημαντικό για τις συχνότητες S-Band διότι σε αυτές τις συχνότητες προκαλούνται απώλειες λόγω έντονων φαινομένων σπινθηρισμού λόγω της ιονόσφαιρας. Η κεραία προσφέρει κέρδος 11.63dBic και εύρος ζώνης $S_{11} < -10\text{dB}$ 88.25MHz. Το διάγραμμα ακτινοβολίας αποτελείται από έναν μεγάλο κύριο λοβό ακτινοβολίας με χαμηλό δευτερεύοντα λοβό. Πρέπει να αναφερθεί ότι για αυτό το μοντέλο κεραίας τροφοδοτείται ξεχωριστά ανά στοιχείο με διαφορά φάσης 0, 90°, 180° και 270° για την δημιουργία κυκλικής πόλωσης δεν περιλαμβάνει κάποιο δίκτυο τροφοδοσίας, το οποίο θα δημιουργούσε επιπλέον απώλειες. Η ξεχωριστή τροφοδοσία μπορεί να προσφέρει προσαρμογή της κατεύθυνσης ακτινοβολίας κατά μερικές μοίρες, αλλάζοντας τη φάση (phased array) ή ακόμη και να προσαρμοστεί σε σταθερές τιμές φάσης για περιστροφή του λοβού ακτινοβολίας προς μια σταθερή κατεύθυνση.



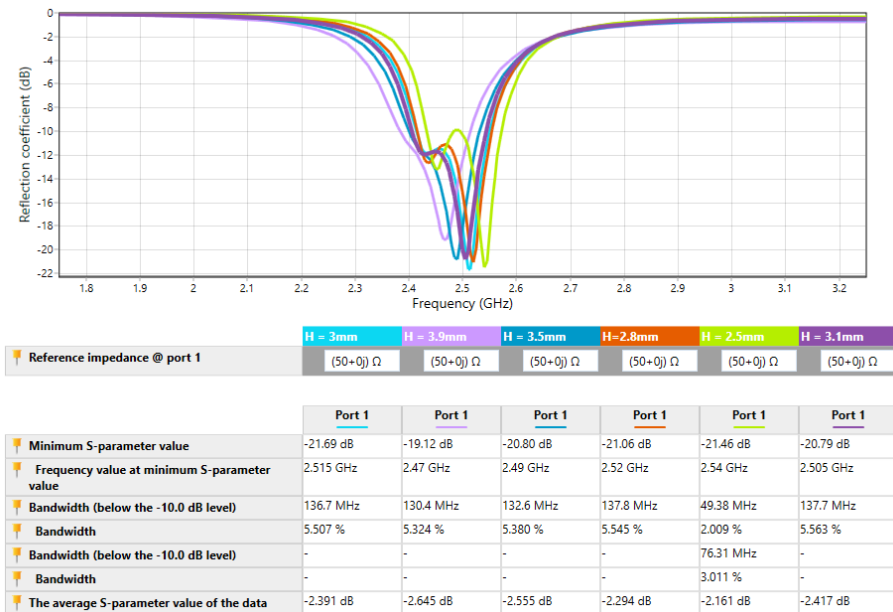
Εικόνα 155: Προσομοίωση 2x2 Patch Array S-Band μεσαίου κέρδους για CubeSats.



Εικόνα 156: Γεωμετρία 2x2 Patch Array

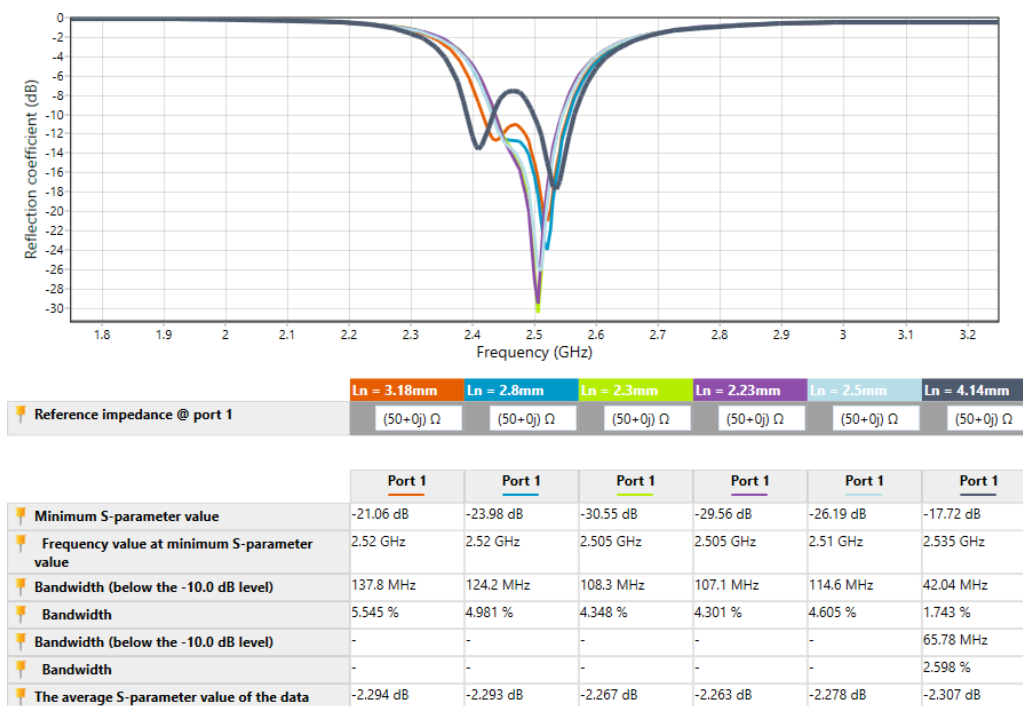
6.4.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης

• Επίδραση του ύψους H



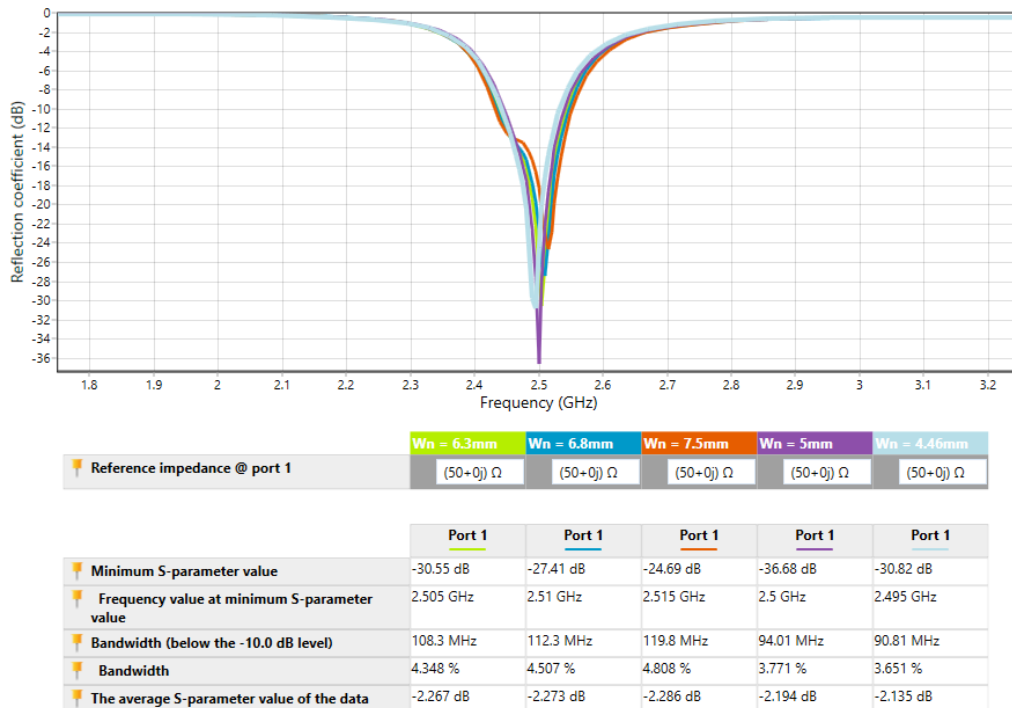
Διάγραμμα 39: Συντελεστή ανάκλασης με διαφορετικές τιμές ύψους

• Επίδραση της τιμής εσοχής Ln



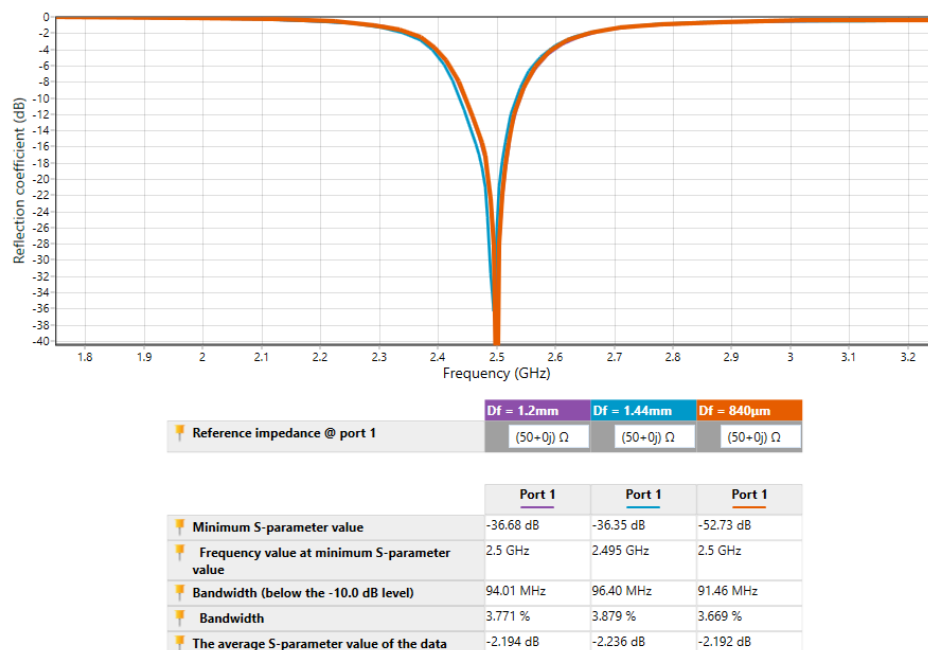
Διάγραμμα 40: Συντελεστής ανάκλασης με διαφορετικές τιμές εσοχής Ln

- Επίδραση της τιμής πλάτους εσοχής W_n



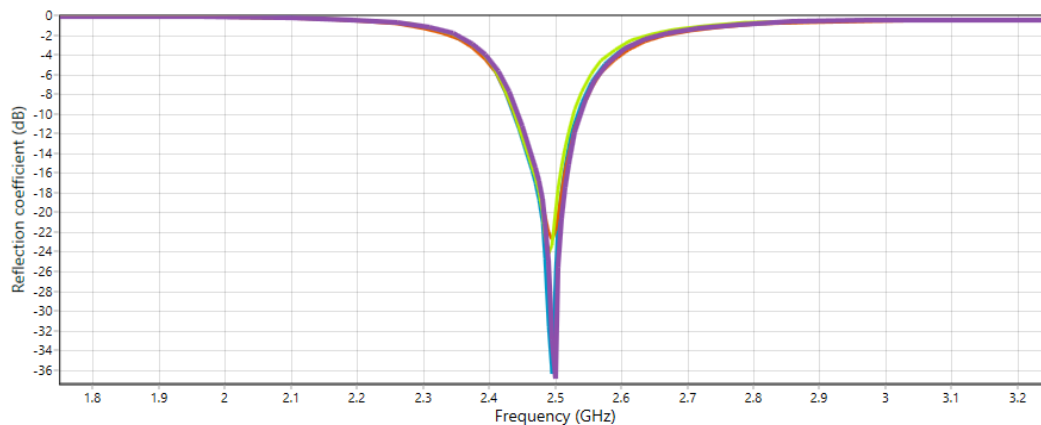
Διάγραμμα 41: S_{11} για διάφορες τιμές πλάτους εσοχής W_n

- Επίδραση της τιμής D_f



Διάγραμμα 42: S_{11} για διάφορες τιμές D_f

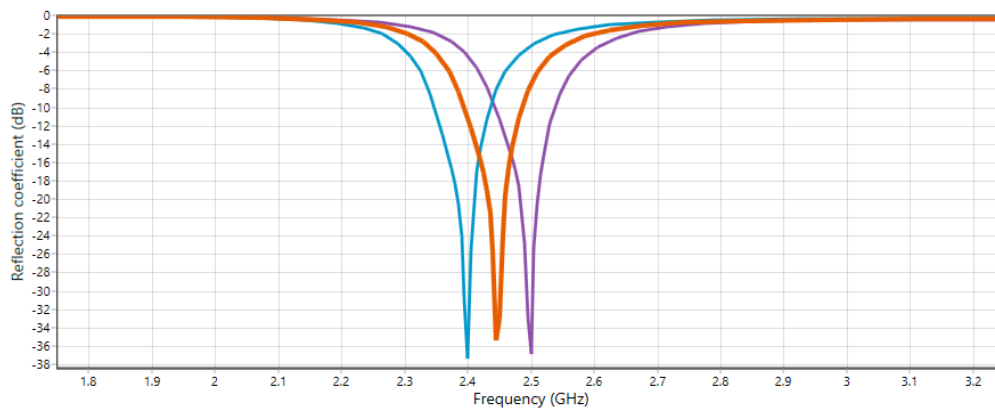
- Επίδραση της τιμής ακτίνας τροφοδοσίας S_f



	$S_f = 7\text{mm}$	$S_f = 7.5\text{mm}$	$S_f = 6.5\text{mm}$	$S_f = 6.9\text{mm}$
Reference impedance @ port 1	(50+0j) Ω	(50+0j) Ω	(50+0j) Ω	(50+0j) Ω
Minimum S-parameter value	-36.35 dB	-22.78 dB	-24.18 dB	-36.82 dB
Frequency value at minimum S-parameter value	2.495 GHz	2.495 GHz	2.49 GHz	2.5 GHz
Bandwidth (below the -10.0 dB level)	96.40 MHz	98.38 MHz	89.46 MHz	94.37 MHz
Bandwidth	3.879 %	3.954 %	3.603 %	3.789 %
The average S-parameter value of the data	-2.236 dB	-2.189 dB	-1.989 dB	-2.206 dB

Διάγραμμα 43: S_{11} για διάφορες τιμές S_f

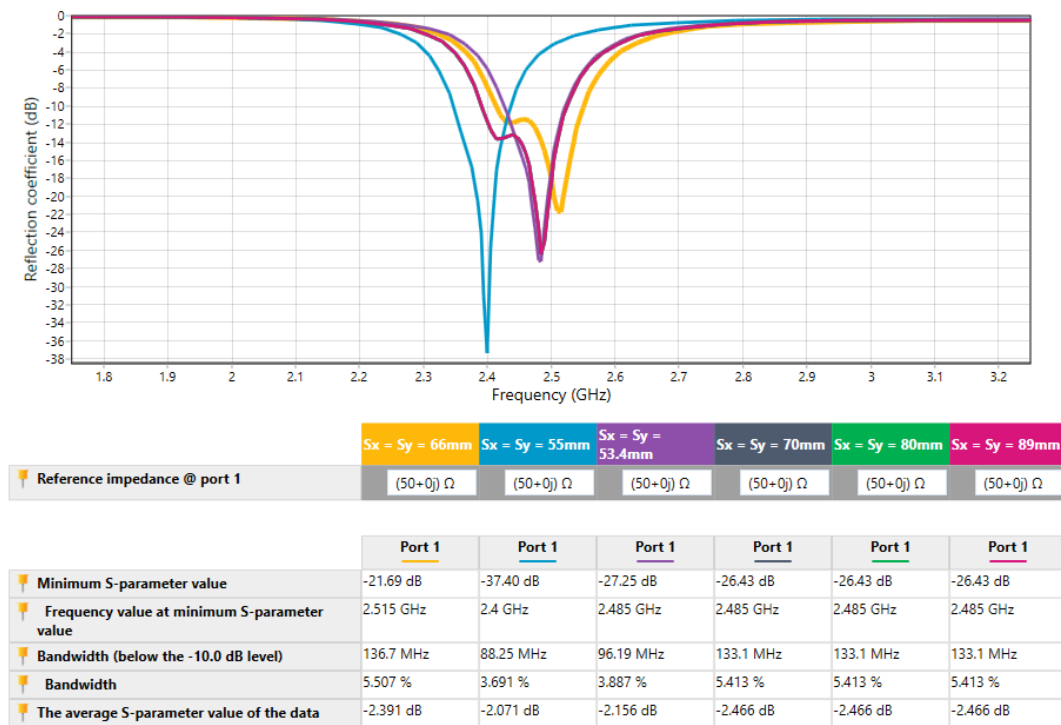
- Επίδραση τιμής του διηλεκτρικού ϵ_r



	$\epsilon_r = 2.2\text{mm}$	$\epsilon_r = 2.4\text{mm}$	$\epsilon_r = 2.3\text{mm}$
Reference impedance @ port 1	(50+0j) Ω	(50+0j) Ω	(50+0j) Ω
Minimum S-parameter value	-36.82 dB	-37.40 dB	-35.40 dB
Frequency value at minimum S-parameter value	2.5 GHz	2.4 GHz	2.445 GHz
Bandwidth (below the -10.0 dB level)	94.37 MHz	88.25 MHz	91.12 MHz
Bandwidth	3.789 %	3.691 %	3.735 %
The average S-parameter value of the data	-2.206 dB	-2.071 dB	-2.160 dB

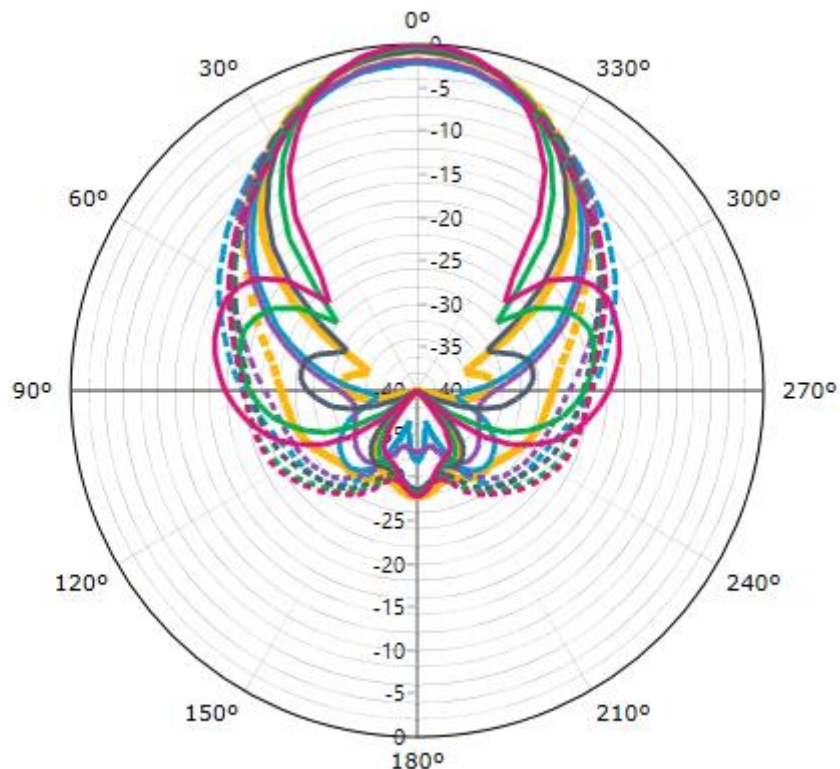
Διάγραμμα 44: S_{11} για διάφορες τιμές διηλεκτρικού

- Επίδραση αλλαγής τιμών S_x και S_y .



Διάγραμμα 45: S_{11} για διάφορες τιμές μήκους και πλάτους S_x , S_y

- Σύγκριση κέρδους για διάφορες τιμές μήκους S_x και S_y

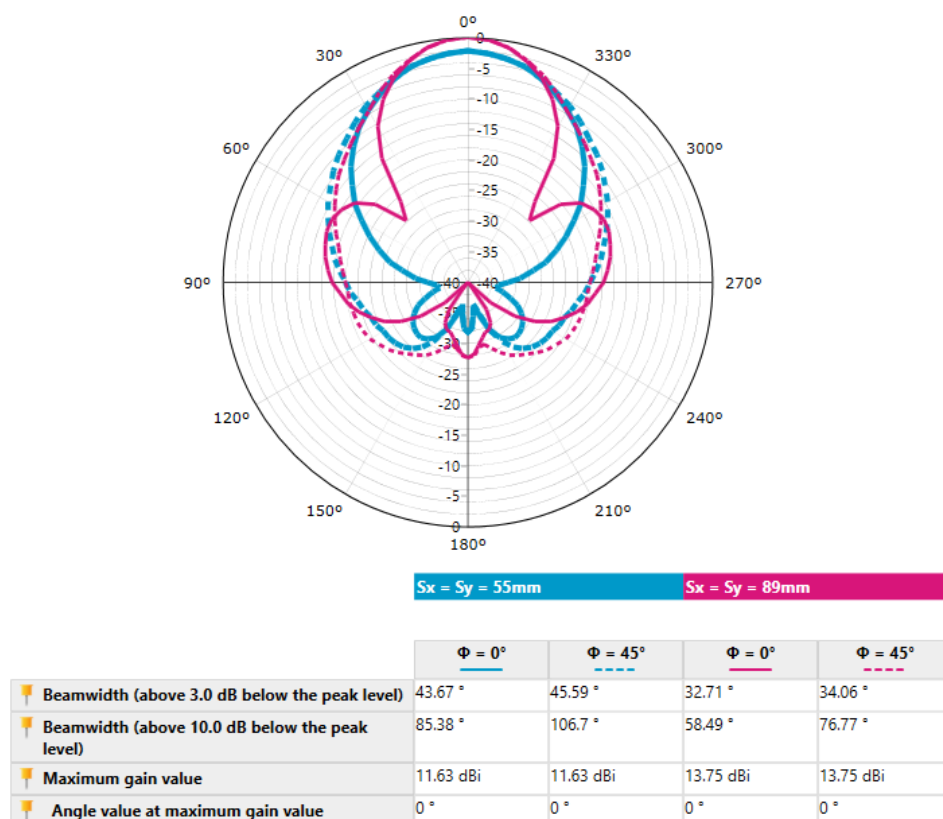


	Sx = Sy = 66mm		Sx = Sy = 55mm		Sx = Sy = 53.4mm	
	$\Phi = 0^\circ$	$\Phi = 45^\circ$	$\Phi = 0^\circ$	$\Phi = 45^\circ$	$\Phi = 0^\circ$	$\Phi = 45^\circ$
Beamwidth (above 3.0 dB below the peak level)	40.28 °	41.04 °	43.67 °	45.59 °	44.72 °	45.57 °
Beamwidth (above 10.0 dB below the peak level)	75.24 °	82.62 °	85.38 °	106.7 °	87.67 °	95.74 °
Maximum gain value	13.04 dBi	13.04 dBi	11.63 dBi	11.63 dBi	11.87 dBi	11.87 dBi
Angle value at maximum gain value	0 °	0 °	0 °	0 °	0 °	0 °

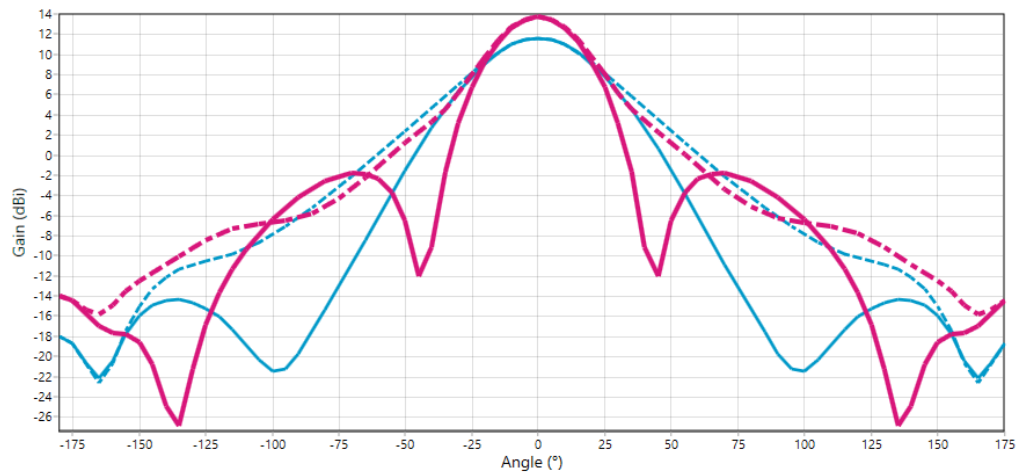
	Sx = Sy = 70mm		Sx = Sy = 80mm		Sx = Sy = 89mm	
	$\Phi = 0^\circ$	$\Phi = 45^\circ$	$\Phi = 0^\circ$	$\Phi = 45^\circ$	$\Phi = 0^\circ$	$\Phi = 45^\circ$
Beamwidth (above 3.0 dB below the peak level)	38.67 °	39.89 °	34.98 °	36.32 °	32.71 °	34.06 °
Beamwidth (above 10.0 dB below the peak level)	71.90 °	84.63 °	63.53 °	79.38 °	58.49 °	76.77 °
Maximum gain value	13.03 dBi	13.03 dBi	13.53 dBi	13.53 dBi	13.75 dBi	13.75 dBi
Angle value at maximum gain value	0 °	0 °	0 °	0 °	0 °	0 °

Διάγραμμα 46: Τιμές κέρδους για διαφορετικά μήκη και πλάτη

- Βέλτιστο αποτέλεσμα για δορυφόρο CubeSat σε σχέση με κεραία χωρίς περιορισμούς

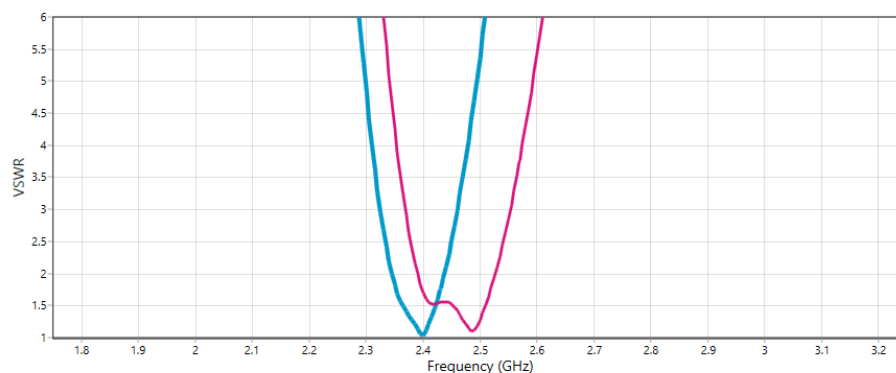


Διάγραμμα 47: Σύγκριση κέρδους κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς



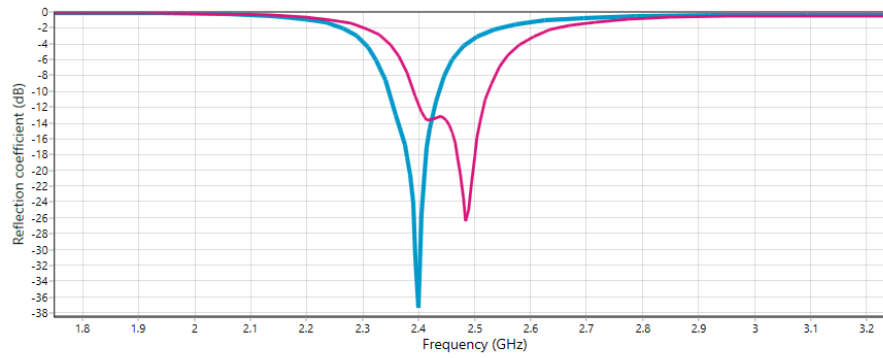
		Optimized for Cubesat		Large Antenna	
		$\Phi = 0^\circ$	$\Phi = 45^\circ$	$\Phi = 0^\circ$	$\Phi = 45^\circ$
	Beamwidth (above 3.0 dB below the peak level)	43.67 °	45.59 °	32.71 °	34.06 °
	Beamwidth (above 10.0 dB below the peak level)	85.38 °	106.7 °	58.49 °	76.77 °
	Maximum gain value	11.63 dBi	11.63 dBi	13.75 dBi	13.75 dBi
	Angle value at maximum gain value	0 °	0 °	0 °	0 °

Διάγραμμα 48: Σύγκριση κέρδους κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς



	Optimized for Cubesat	Large Antenna
Reference impedance @ port 1	(50+0j) Ω	(50+0j) Ω
	Port 1	Port 1
Minimum VSWR value	1.027	1.100
Frequency value at minimum VSWR value	2.4 GHz	2.485 GHz
Bandwidth (below the 2.0 level)	92.34 MHz	137.6 MHz
Bandwidth	3.862 %	5.595 %
The average VSWR value of the data	50.87	46.70

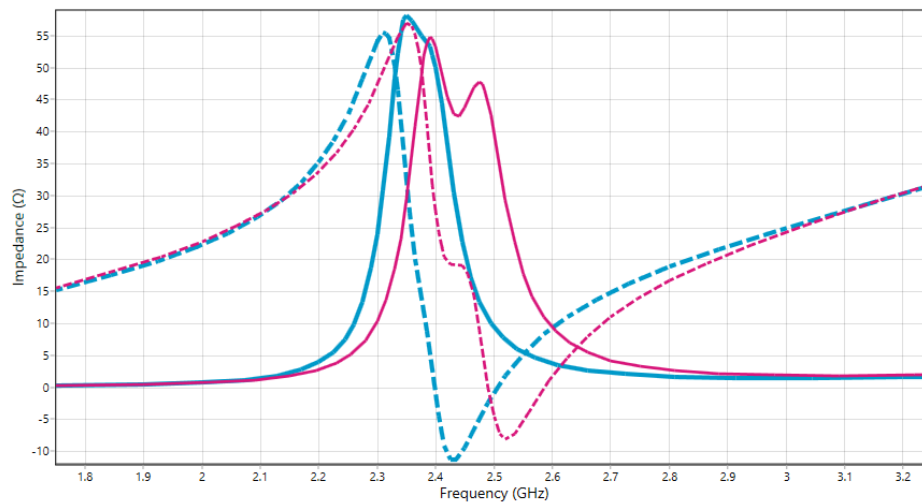
Διάγραμμα 49: VSWR κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς



Reference impedance @ port 1		Optimized for Cubesat	Large Antenna
		(50+0j) Ω	(50+0j) Ω

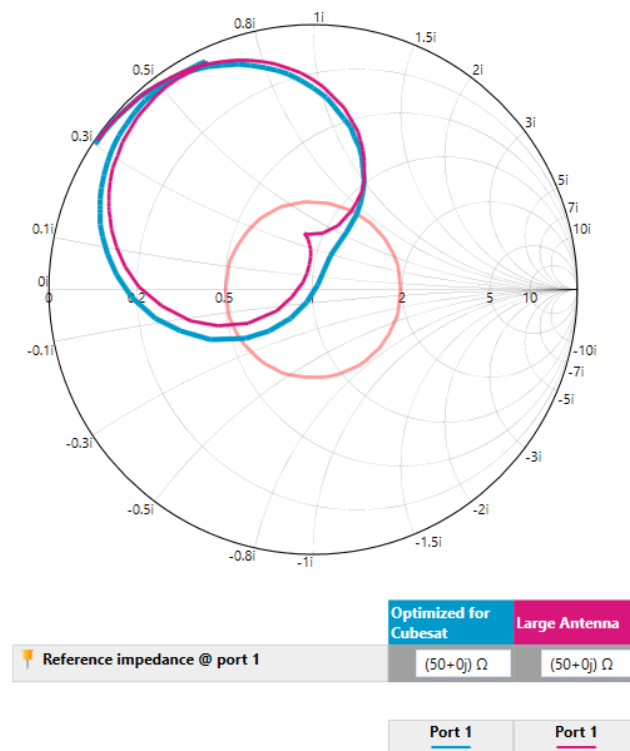
	Port 1	Port 1
Minimum S-parameter value	-37.40 dB	-26.43 dB
Frequency value at minimum S-parameter value	2.4 GHz	2.485 GHz
Bandwidth (below the -10.0 dB level)	88.25 MHz	133.1 MHz
Bandwidth	3.691 %	5.413 %
The average S-parameter value of the data	-2.071 dB	-2.466 dB

Διάγραμμα 50: S11 κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς

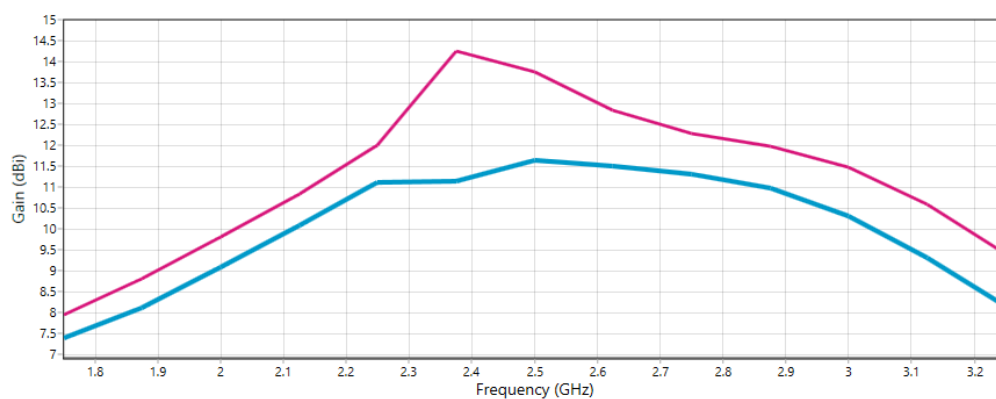


The average impedance value of the data		Port 1 Real	Port 1 Imaginary	Port 1 Real	Port 1 Imaginary
		6.988 Ω	21.18 Ω	8.343 Ω	22.26 Ω

Διάγραμμα 51: Impedance κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς



Διάγραμμα 52: Smith Chart κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς



	Optimized for Cubesat	Large Antenna
	$\theta = 0^\circ; \phi = 0^\circ$	$\theta = 0^\circ; \phi = 0^\circ$
Bandwidth (above 3 dB below the peak level)	1.256 GHz	861.3 MHz
Bandwidth	48.88 %	33.12 %
Bandwidth (above 10 dB below the peak level)	1.5 GHz	1.5 GHz
Bandwidth	60 %	60 %
Maximum gain value	11.63 dBi	14.24 dBi
Frequency value at maximum gain value	2.5 GHz	2.375 GHz
The average gain value of the data	10.00 dBi	11.23 dBi

Διάγραμμα 53: Κέρδος ανά συχνότητα κεραίας με περιορισμούς CubeSat σε σχέση με μια χωρίς περιορισμούς

- **Βέλτιστο σχέδιο – Αποτελέσματα**

Τα τελικά χαρακτηριστικά της κεραίας είναι τα παρακάτω:

Παράμετρος	Τιμή
Διαστάσεις	X = 99.53mm Y = 99.53mm Z = 2.8mm
Διηλεκτρικό	Rogers RT/Duroid 5880 Ύψος = 3mm Διηλεκτρική σταθερά = 2.2
Dp	44.5mm
Ln	2.3mm
Wn	5mm
Df	1.44mm
Sf	6.9mm
α	45°
ϵ_r	2.4
H	2.8mm
Sx	55mm
Sy	55mm
β_1	0°
β_2	-90°
β_3	-180°
β_4	-270°
φ_1	0°
φ_2	90°
φ_3	180°
φ_4	270°

Πίνακας 14: Παράμετροι κεραίας προσομοίωσης

6.4.3. Συμπεράσματα Προσομοίωσης

Η κεραία που σχεδιάστηκε προσφέρει μέτριο κέρδος 11.63dBic με κυκλική πόλωση στις συχνότητες 2.4GHz (S-Band) και εύρος ζώνης -10dB 3.69% (88.25MHz). Οι επιδόσεις της κεραίας προβλέπεται να μειωθούν με την προσθήκη δικτύου τροφοδοσίας, με επιβάρυνση στο κέρδος και στον αξονικό λόγο (axial ratio). Επίσης έχουμε υψηλό λόγο front-to-back, με τον κύριο λοβό ακτινοβολίας να είναι πολύ μεγαλύτερος από τον πίσω λοβό, αλλά σε πραγματικές συνθήκες αυτός ο λόγος θα μειωθεί.

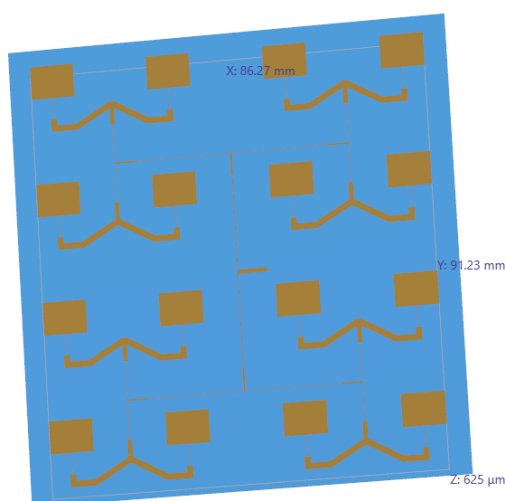
Οι βασικές παράμετροι κατά την προσομοίωση είναι ο μέγεθος των στοιχείων και οι εσοχές τους, διότι από αυτά εξαρτάται η συχνότητα συντονισμού (όσο μικρότερα είναι τα στοιχεία, τόσο συντονίζονται σε υψηλότερες συχνότητες). Οι εσοχές επηρεάζουν τον αξονικό λόγο αλλά διατηρείται χαμηλότερο από 3dB για όλο το εύρος ζώνης. Αύξηση του πάχους του διηλεκτρικού υποστρώματος προσφέρει μεγαλύτερο εύρος ζώνης αλλά επηρεάζει τον συντελεστή ανάκλασης, οπότε θα πρέπει να γίνει μια ανάλυση απαιτήσεων του εύρους ζώνης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η κεραία υλοποιήθηκε ώστε να προσφέρει το μέγιστο εύρος ζώνης χωρίς να επιβαρυνθεί σημαντικά ο συντελεστή ανάκλασης.

Στις προσομοιώσεις προστέθηκε και μια κεραία ίδιου σχεδιασμού αλλά χωρίς τους αυστηρούς περιορισμούς χώρου (10x10cm) ώστε να συγκρίνουμε τις επιδόσεις τους, όπου παρατηρείται ότι μπορούμε να πετύχουμε αρκετά υψηλότερο εύρος ζώνης 5.56% με μέγεθος κεραίας 11x11cm.

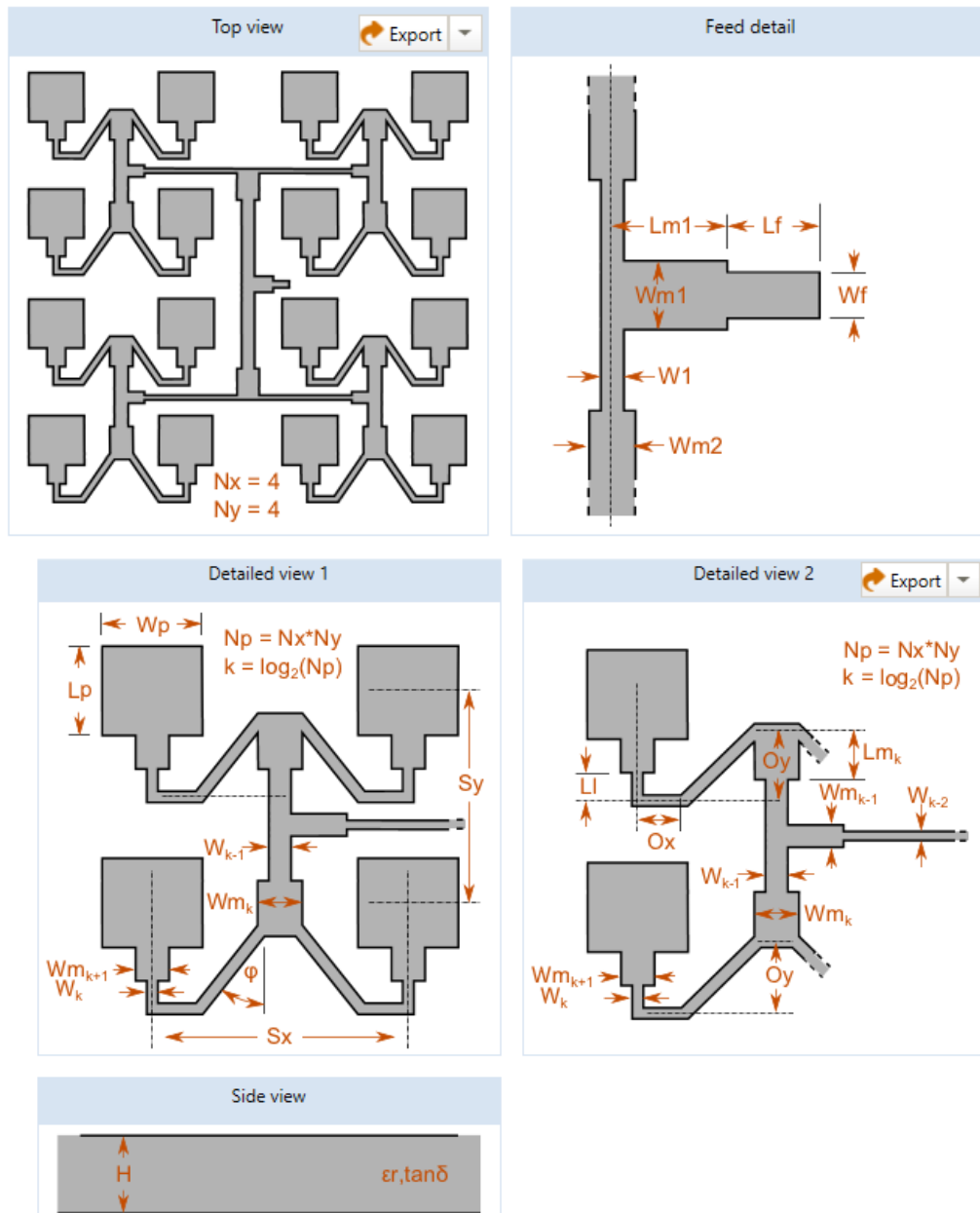
6.5.Κεραία Υψηλού Κέρδους – 4x4 Patch Array (X-Band)

Η πρόταση αυτής της κεραίας είναι κυρίως για την επικοινωνία δορυφόρου και επίγειων σταθμών ή την διαδορυφορική επικοινωνία, για την αποστολή και λήψη δεδομένων της αποστολής. Η κεραία μπορεί να προσαρμοστεί και στο πίσω μέρος του δορυφόρου σε περίπτωση που απαιτείται επικοινωνία με δορυφόρους μεγαλύτερης τροχιάς. Για πιο υψηλές συχνότητες όπως X-Band ή υψηλότερες, μπορούμε να σχεδιάσουμε πιο εύκολα κεραίες υψηλού κέρδους επειδή το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι αρκετά μικρό. Σε αυτές τις συχνότητες χρειαζόμαστε υψηλότερο κέρδος και για να διασφαλίσουμε καλή δορυφορική ζεύξη με τους επίγειους σταθμούς, καθώς οι ατμοσφαιρικές απώλειες είναι αυξημένες. Λόγω μεγαλύτερου κέρδους μπορούμε να πετύχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες αποστολής δεδομένων που πιθανό να είναι ζητούμενο, δεδομένου ότι ο χρόνος επικοινωνίας μεταξύ σταθμού και δορυφόρων είναι περιορισμένος.

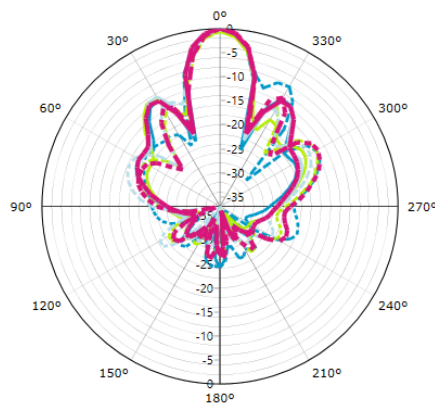
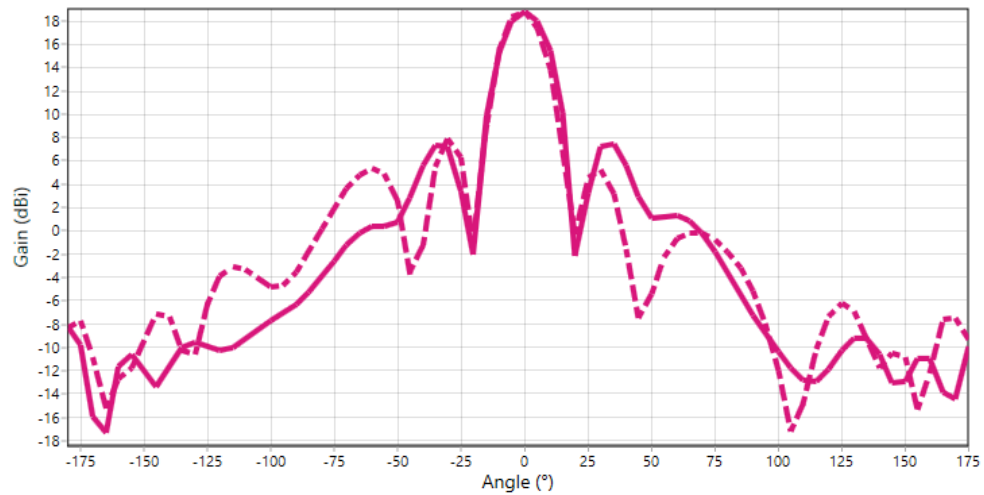
Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η κεραία σχεδιάστηκε με ζητούμενο να μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα σε μια πλευρά του δορυφόρου. Η κεραία μπορεί να σχεδιαστεί και για συχνότητες Ku, αλλά σχεδιάστηκε για συχνότητα λειτουργίας 8GHz (X-Band). Λόγω των πολλών παραμέτρων, παρακάτω περιλαμβάνονται μόνο τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοίωσης για πιο εύκολη ανάλυση. Στόχος της παρούσας προσομοίωσης είναι η γενική ανάλυση των χαρακτηριστικών της κεραίας και εάν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε έναν δορυφόρο για εποπτεία φάσματος ή για τις απαραίτητες συμπληρωματικές λειτουργίες, δηλαδή την αποστολή δεδομένων και την διαδορυφορική επικοινωνία. Σε μεγάλες συχνότητες οι προσομοιώσεις πρέπει να λαμβάνουν ως δεδομένο τα ακριβή χαρακτηριστικά του δορυφόρου (υλικά και μέγεθος), την τοποθεσία και τον τρόπο εγκατάστασης της κεραίας πάνω σε αυτόν.



Εικόνα 157: Προσομοίωση 4x4 X-band Patch Array



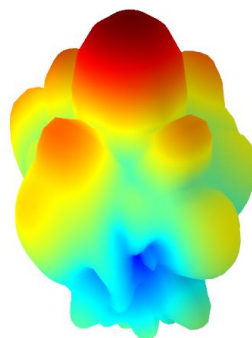
Εικόνα 158: Γεωμετρία 4x4 patch array



Wp = 9.5mm Lp = 7mm Wp = 9mm, Lp = 7mm Wp = 9.16mm Lp = 6.85mm Optimized

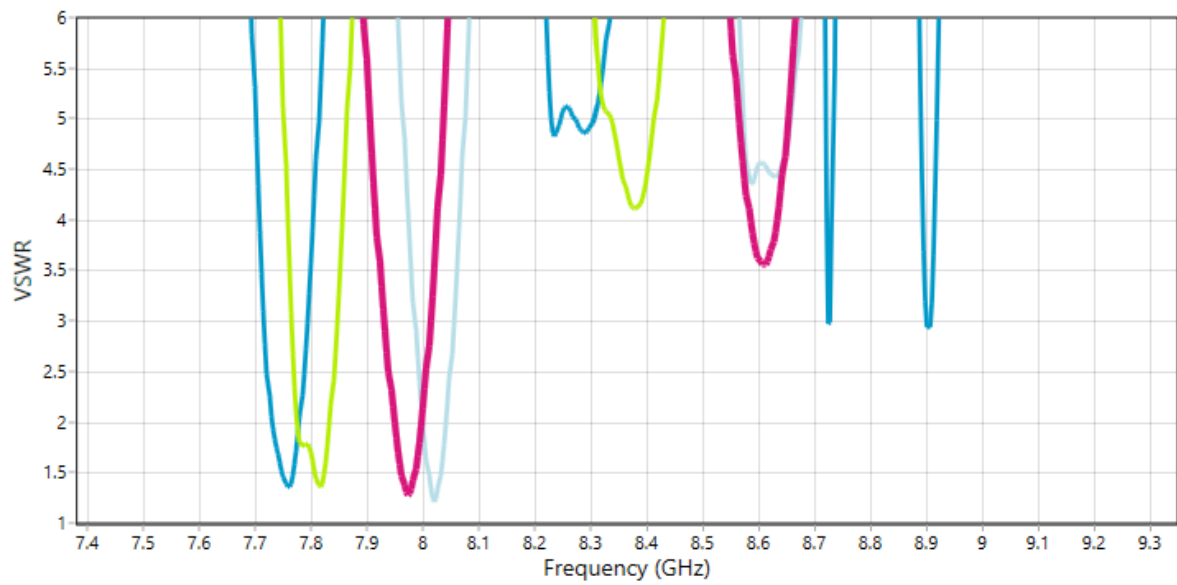
	$\Phi = 0^\circ$	$\Phi = 90^\circ$	$\Phi = 0^\circ$	$\Phi = 90^\circ$	$\Phi = 0^\circ$	$\Phi = 90^\circ$	$\Phi = 0^\circ$	$\Phi = 90^\circ$
Beamwidth (above 3.0 dB below the peak level)	17.77 °	18.03 °	18.78 °	16.93 °	17.84 °	16.96 °	18.25 °	16.61 °
Beamwidth (above 10.0 dB below the peak level)	30.45 °	13.24 °	31.77 °	29.87 °	30.57 °	30.45 °	30.96 °	28.73 °
Beamwidth (above 10.0 dB below the peak level)	-	34.98 °	-	-	-	-	-	-
Maximum gain value	18.53 dBi	18.53 dBi	18.20 dBi	18.20 dBi	18.66 dBi	18.66 dBi	18.80 dBi	18.80 dBi
Angle value at maximum gain value	0 °	0 °	0 °	0 °	0 °	0 °	0 °	0 °

Διάγραμμα 54: Κέρδος και διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας με διαφορετικές παραμέτρους



Total Gain [dBi]
18.80
6.170
-4.461
-19.09
-31.72

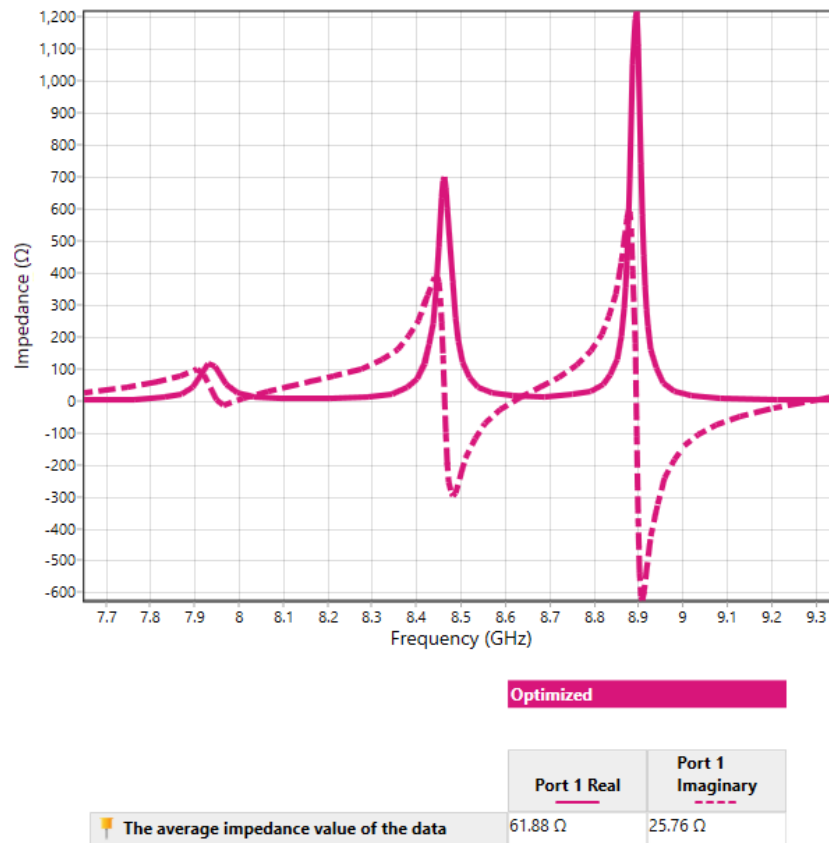
Διάγραμμα 55: Λοβός ακτινοβολίας



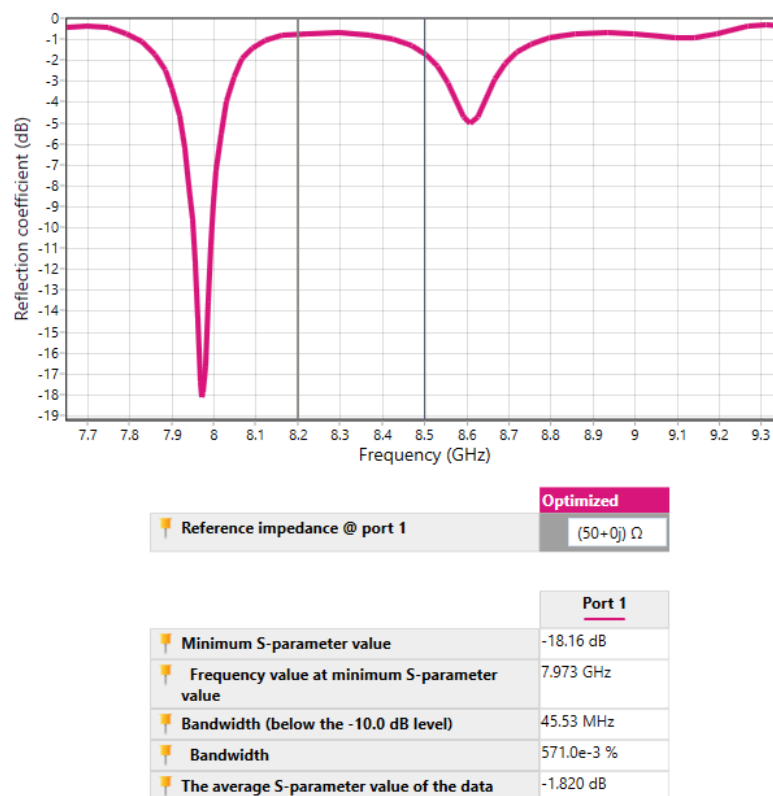
	Wp = 9.5mm, Lp = 7mm	Wp = 9mm, Lp = 7mm	Wp = 9.16mm, Lp = 6.85mm	Optimized
Reference impedance @ port 1	(50+0j) Ω	(50+0j) Ω	(50+0j) Ω	(50+0j) Ω

	Port 1	Port 1	Port 1	Port 1
Minimum VSWR value	1.353	1.357	1.210	1.282
Frequency value at minimum VSWR value	7.760 GHz	7.816 GHz	8.021 GHz	7.973 GHz
Bandwidth (below the 2.0 level)	49.72 MHz	57.99 MHz	41.45 MHz	48.59 MHz
Bandwidth	641.2e-3 %	743.1e-3 %	516.8e-3 %	609.5e-3 %
The average VSWR value of the data	20.27	25.03	23.31	20.41

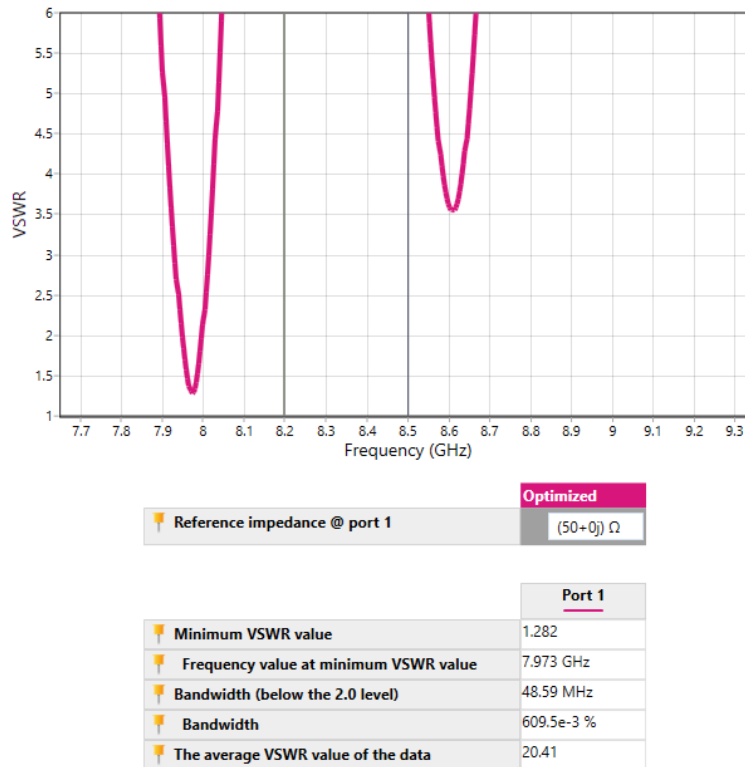
Διάγραμμα 56: VSWR για διαφορετικές γεωμετρίες.



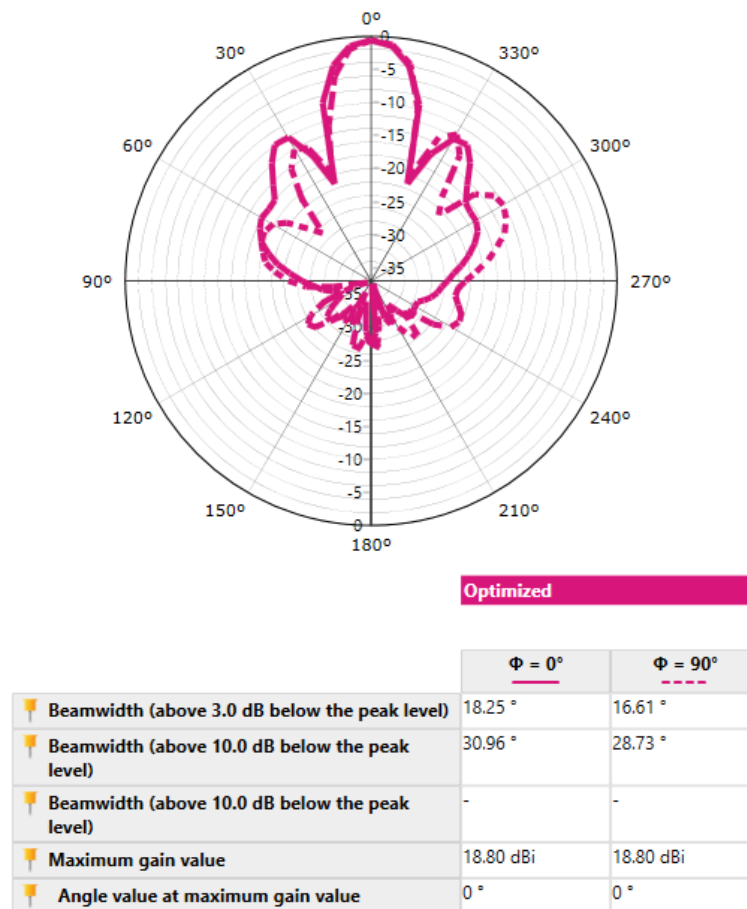
Διάγραμμα 57: Χαρακτηριστική αντίσταση προσαρμοσμένης κεραίας



Διάγραμμα 58: Συντελεστής ανάκλασης προσαρμοσμένης κεραίας



Διάγραμμα 59: Λόγος στάσιμων κυμάτων προσαρμοσμένης κεραίας



Διάγραμμα 60: Διάγραμμα ακτινοβολίας προσαρμοσμένης κεραίας

6.5.1. Συμπεράσματα Προσομοίωσης

Η κεραία προσφέρει υψηλό κέρδος 18.8dBi στις συχνότητες 7.92GHz με εύρος ζώνης 48.59MHz. Το εύρος της κεραίας είναι χαμηλό και η πόλωση είναι γραμμική, συνεπώς προτείνεται να χρησιμοποιηθεί κυρίως ως κεραία επικοινωνίας. Ο λοβός ακτινοβολίας αποτελείται από έναν μεγάλο κύριο λοβό με μικρή γωνία ημίσειας ισχύος, αλλά υπάρχουν και αρκετά έντονοι δευτερεύοντες λοβοί στις γωνίες $+30^\circ$ και -30° από τον κεντρικό λοβό και στα δύο επίπεδα. Το εύρος ζώνης της κεραίας επηρεάζεται από τις διάφορες τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς και το ύψος του υποστρώματος, αλλά παράλληλα επηρεάζεται και η χαρακτηριστική αντίσταση και η συχνότητα συντονισμού. Η χαρακτηριστική αντίσταση μπορεί να προσαρμοστεί αλλάζοντας τις διαστάσεις των μικροταινιακών γραμμών τροφοδοσίας και η συχνότητα συντονισμού εξαρτάται από τις αποστάσεις και τις διαστάσεις των στοιχείων. Στη πράξη, οι διαστάσεις των μικροταινιών χαλκού έχουν φυσικούς περιορισμούς οπότε οι αποστάσεις μεταξύ τους και οι διαστάσεις τους δεν πρέπει να είναι πολύ μικρές, διότι δεν θα μπορούν να χαραχτούν στο υπόστρωμα. Για την σωστή και πιο ακριβή προσημείωση θα πρέπει να γίνει ανάλυση της κεραίας επάνω στην τελική θέση στον δορυφόρο, διότι η κατασκευή του δορυφόρου (συνήθως αλουμίνιο) μπορεί να επηρεάσει πολύ τις επιδόσεις και τα χαρακτηριστικά της κεραίας, με αλλαγές στον λοβό ακτινοβολίας ή αλλαγή της συχνότητας συντονισμού.

7. Συμπεράσματα

Οι δυνατότητες των CubeSat είναι μεγαλύτερες από ποτέ, αλλά οι περιορισμοί στην εγκατάσταση των κεραιών τους παραμένουν ίδιες. Αυτοί οι περιορισμοί μας ωθούν να σχεδιάζουμε νέα είδη κεραιών και να αναζητούμε νέες λύσεις σε προβλήματα που ίσως δεν έχουμε ξανά δει στο παρελθόν. Σε αυτή τη διπλωματική καλύπτονται τα περισσότερα σχέδια κεραιών που μπορούν να προσαρμοστούν σε έναν CubeSat, με στόχο την κατανόηση των βασικών χαρακτηριστικών τους για την σωστή επιλογή σε μια μελλοντική αποστολή εποπτείας φάσματος ή σχεδόν για οποιαδήποτε άλλη αποστολή CubeSat. Η διπλωματική περιλαμβάνει την ανάλυση των χαρακτηριστικών των CubeSats, μια συγκριτική μελέτη των κεραιών που χρησιμοποιούν με βάση το κέρδος, τα είδη των αποστολών και τους βασικούς περιορισμούς τους. Επίσης έγινε μια σύντομη αναφορά για τα πλεονεκτήματα και τις απαιτήσεις ενός δορυφορικού συστήματος εποπτείας φάσματος και γεωεντοπισμού. Η επιλογή των κεραιών ενός CubeSat εξαρτάται από την αποστολή και έτσι πρέπει να γίνει σωστά μια ολοκληρωμένη ανάλυση απαιτήσεων και περιορισμών. Η εποπτεία φάσματος μπορεί να απαιτεί αρκετές κεραίες ώστε να καλύπτεται ένα μεγάλο μέρος του φάσματος ενώ παράλληλα ο γεωεντοπισμός ενός σήματος να απαιτεί δύο ή περισσότερους δορυφόρους σε συγκεκριμένες τροχιές. Συνεπώς είναι μια πολύ απαιτητική αποστολή, όπου σε προηγούμενες αποστολές χρησιμοποιήθηκαν δορυφόροι μεγαλύτεροι από 12U. Κατά την επιλογή και σχεδιασμό του συστήματος κεραιών για τον δορυφόρο, τα πιο σημαντικά κριτήρια είναι το βάρος, ο όγκος, η αξιοπιστία, το κόστος, η ανθεκτικότητα, ο τρόπος εγκατάστασης και οι επιδόσεις τους. Οι πιο χρησιμοποιημένες κεραίες CubeSat είναι τα μονόπολα, τα δίπολα και οι patch κεραίες, καθώς προσφέρουν περιλαμβάνουν όλες τα επιθυμητά χαρακτηριστικά για μια κεραία CubeSat, αλλά παρέχουν μόνο χαμηλό κέρδος. Μια τεχνική για να εγκαταστήσουμε μεγάλες κεραίες με υψηλότερο κέρδος (περισσότερο από 12dBi) σε CubeSats είναι με τη χρήση μηχανισμών ανάπτυξης, όπως μηχανισμοί ομπρέλας, μηχανισμοί origami, επιφάνειες μεμβράνης, ReflectArrays ή φουσκωτές κεραίες, οι οποίοι όμως αυξάνουν το βάρος και την περιπλοκότητα, αυξάνοντας και την πιθανότητα να μην επεκταθεί σωστά η κεραία στο διάστημα. Για μια αποστολή εποπτείας φάσματος, είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας η τοποθεσία εγκατάστασης των κεραιών, η συνεργασία μεταξύ δορυφόρων σε περίπτωση constellation και η ακρίβεια του υποσυστήματος ADCS. Επίσης θα πρέπει να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά των κεραιών και τα δεδομένα της τροχιάς του δορυφόρου για να υπολογίσουμε σωστά τις δυνατότητες του συστήματος και της δορυφορικής ζεύξης. Στο τελευταίο κεφάλαιο έγιναν οι προσομοιώσεις τριών ενδεικτικών προτάσεων κεραιών CubeSat, που περιλαμβάνουν μια UWB Αρχιμήδεια σπειροειδή χαμηλού κέρδους και δύο patch κεραίες, S-Band μέτριου κέρδους και X-Band υψηλού κέρδους, όπου μπορούν να καλύψουν τα πιο βασικά ζητούμενα σε μια αποστολή.

Βιβλιογραφία

- [1] N. CubeSat Launch Initiative, “CubeSat 101: Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers”.
- [2] 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.
- [3] “CubeSat Antenna Design,” *CubeSat Antenna Design*, Dec. 2020, doi: 10.1002/9781119692720.
- [4] S. Lu et al., “A Survey on CubeSat Missions and Their Antenna Designs,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 13, MDPI, Jul. 01, 2022, doi: 10.3390/electronics11132021.
- [5] ITU, “Handbook Spectrum Monitoring.” https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-23-2011-PDF-E.pdf (accessed Oct. 18, 2022).
- [6] A. Mohammed, A. Mehmood, F. N. Pavlidou, and M. Mohorcic, “The role of high-altitude platforms (HAPs) in the global wireless connectivity,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 11, pp. 1939–1953, 2011, doi: 10.1109/JPROC.2011.2159690.
- [7] C. Hao, X. Wan, D. Feng, Z. Feng, and X. G. Xia, “Satellite-Based Radio Spectrum Monitoring: Architecture, Applications, and Challenges,” *IEEE Netw*, vol. 35, no. 4, pp. 20–27, Jul. 2021, doi: 10.1109/MNET.011.2100015.
- [8] N. Saeed, A. Elzanaty, H. Almorad, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, and M. S. Alouini, “CubeSat Communications: Recent Advances and Future Challenges,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 22, no. 3, pp. 1839–1862, Jul. 2020, doi: 10.1109/COMST.2020.2990499.
- [9] Fucheng Guo, Yun Fan, Yiyu Zhou, Caigen Xhou, and Qiang Li, “Space electronic reconnaissance : localization principles and technologies”, Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Space+Electronic+Reconnaissance%3A+Localization+Theories+and+Methods-p-9781118542194>
- [10] M. G. Vidal-Valladares and M. A. Díaz, “A Femto-Satellite Localization Method Based on TDOA and AOA Using Two CubeSats,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 14, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/RS14051101.
- [11] “LUME-1 @ Nanosats Database.” <https://www.nanosats.eu/sat/lume-1> (accessed Oct. 19, 2022).
- [12] “SMOG-P @ Nanosats Database.” <https://www.nanosats.eu/sat/smog-p> (accessed Oct. 19, 2022).
- [13] “HawkEye 360 | The Leader of Spectrum-Based RF Geoanalytics.” <https://www.he360.com/> (accessed Oct. 18, 2022).
- [14] P. Gurfil, J. Herscovitz, and M. Pariente, “The SAMSON Project – Cluster Flight and Geolocation with Three Autonomous Nano-satellites,” *Small Satellite Conference*, Aug. 2012, Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2012/all2012/56>
- [15] A. N. Skauen, “Ship tracking results from state-of-the-art space-based AIS receiver systems for maritime surveillance,” *CEAS Space Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 301–316, Sep. 2019, doi: 10.1007/S12567-019-00245-Z.
- [16] W. A. Imbriale, S. S. Gao, and L. Boccia, “Space Antenna Handbook,” *Space Antenna Handbook*, May 2012, doi: 10.1002/9781119945147.
- [17] D. Vougioukas and Δ. Βουγιούκας, “Δορυφορικές επικοινωνίες,” Feb. 2016, Accessed: Oct. 19, 2022. [Online]. Available: <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2712>

- [18] J. Lohn, D. Linden, and G. Hornby, "Advanced Antenna Design for a NASA Small Satellite Mission," *undefined*, 2008.
- [19] J. Costantine, Y. Tawk, C. G. Christodoulou, J. Banik, and S. Lane, "Cubesat deployable antenna using bistable composite tape-springs," *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 11, pp. 285–288, 2012, doi: 10.1109/LAWP.2012.2189544.
- [20] "RF Solutions - MMA Design LLC." <https://mmadesignllc.com/products/antennas/> (accessed Oct. 18, 2022).
- [21] "(PDF) UHF/VHF MONOPOLE ANTENNA ARRAY FOR CUBESATS." https://www.researchgate.net/publication/337784922_UHFVHF_MONOPOLE_ANTENNA_ARRAY_FOR_CUBESATS (accessed Oct. 19, 2022).
- [22] J. M. EncinasPlaza *et al.*, "xatcobeo: small mechanisms for cubesat satellites - antenna and solar array deployment," *Proceedings of the 40th Aerospace Mechanisms Symposium*, 2010.
- [23] "Monopole antenna - Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Monopole_antenna (accessed Oct. 18, 2022).
- [24] S. G. M. Darwish, K. F. A. Hussein, and H. A. Mansour, "Circularly polarized crossed-dipole turnstile antenna for satellites," *National Radio Science Conference, NRSC, Proceedings*, vol. 21, pp. 217–231, 2004, doi: 10.1109/NRSC.2004.240358.
- [25] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design, 4th Edition | Wiley," p. 1104, 2016, Accessed: Oct. 19, 2022. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Antenna+Theory%3A+Analysis+and+Design%2C+4th+Edition-p-9781118642061>
- [26] "GOMspace | GOMX-1." <https://gomspace.com/gomx-1.aspx> (accessed Oct. 19, 2022).
- [27] "State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology | NASA." <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa> (accessed Oct. 18, 2022).
- [28] "Nickel titanium - Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel_titanium (accessed Oct. 19, 2022).
- [29] S. Liu, R. Raad, P. I. Theoharis, and F. E. Tubbal, "A Printed Yagi Antenna for CubeSat with Multi-Frequency Tilt Operation," *Electronics 2020, Vol. 9, Page 986*, vol. 9, no. 6, p. 986, Jun. 2020, doi: 10.3390/ELECTRONICS9060986.
- [30] H. K. Kan, R. B. Waterhouse, A. M. Abbosh, and M. E. Bialkowski, "Simple broadband planar CPW-fed quasi-Yagi antenna," *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 6, pp. 18–20, 2007, doi: 10.1109/LAWP.2006.890751.
- [31] S. Liu, R. Raad, and F. E. M. Tubbal, "Printed Yagi-Uda antenna array on CubeSat," *2017, 11th International Conference on Signal Processing and Communication Systems, ICSPCS 2017 - Proceedings*, vol. 2018-January, pp. 1–5, Jan. 2018, doi: 10.1109/ICSPCS.2017.8270483.
- [32] S. Molgat Laurin, "Development of Deployable Antennas for Advanced Maritime Communication and Monitoring with Small Satellites," 2018, Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <https://tspace.library.utoronto.ca/handle/1807/91482>
- [33] "NorSat-1 and 2." <https://www.eoportal.org/satellite-missions/norsat-1-2> (accessed Oct. 19, 2022).
- [34] M. Drobczyk, M. Jetzschmann, F. Nohka, and J. Budroweit, "A low-cost Nanosatellite Approach: AlSat-1 after 5 Years in Orbit," *2020 IEEE Space Hardware and Radio Conference, SHaRC 2020*, pp. 5–8, Jan. 2020, doi: 10.1109/SHaRC47220.2020.9034063.
- [35] "Inexpensive helical antenna for global navigation satellite systems | Request PDF." https://www.researchgate.net/publication/238516720_Inexpensive_helical_antenna_for_global_navigation_satellite_systems (accessed Oct. 18, 2022).
- [36] Steven Shichang Gao, Qi Luo, and Fuguo Zhu, *Circularly Polarized Antennas*. Wiley-IEEE Press, 2013. Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Circularly+Polarized+Antennas-p-9781118374412>
- [37] J. Zackrisson, "Wide Coverage Antennas," *undefined*, 2007.
- [38] "Project Life-Cycle and Impleme... - UF Digital Collections." <https://ufdc.ufl.edu/UFE0052696/00001> (accessed Oct. 18, 2022).

- [39] "PROCYON – Spacecraft & Satellites." <https://spaceflight101.com/spacecraft/procyon/> (accessed Oct. 18, 2022).
- [40] A. H. Lokman *et al.*, "A Review of Antennas for Picosatellite Applications," *Int J Antennas Propag*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/4940656.
- [41] A. A. Rakholiya and N. v Langhnoja, "A review on miniaturization techniques for microstrip patch antenna," vol. 3, no. 2, 2017, Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: www.ijariie.com
- [42] F. Tubbal, R. Raad, K. W. Chin, L. Matekovits, B. Butters, and G. Dassano, "A high gain S-band slot antenna with MSS for CubeSat," *Annales des Telecommunications/Annals of Telecommunications*, vol. 74, no. 3–4, pp. 223–237, Apr. 2019, doi: 10.1007/S12243-018-0674-Z/FIGURES/21.
- [43] M. Deshpande, "Novel Load Bearing Antennas for CubeSat Applications," *Small Satellite Conference*, Aug. 2019, Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2019/all2019/121>
- [44] "The Electrical Engineering Handbook | ScienceDirect." <https://www.sciencedirect.com/book/9780121709600/the-electrical-engineering-handbook> (accessed Oct. 18, 2022).
- [45] "NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) - Robotic Space Exploration." <https://www.jpl.nasa.gov/> (accessed Oct. 18, 2022).
- [46] A. Babuscia, J. Sauder, A. Chandra, J. Thangavelautham, L. Feruglio, and N. Bienert, "Inflatable antenna for cubesat: A new spherical design for increased X-band gain," *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, Jun. 2017, doi: 10.1109/AERO.2017.7943897.
- [47] J. Mills *et al.*, "Space-Deployed Inflatable Dual-Reflector Antenna: Design and Prototype Measurements," *Small Satellite Conference*, Aug. 2019, Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2019/all2019/119>
- [48] D. S. Weile, "Handbook of reflector antennas and feed systems. volume 3: applications of reflectors [reviews and abstracts]," *IEEE Antennas Propag Mag*, vol. 56, no. 3, pp. 168–169, Jul. 2014, doi: 10.1109/MAP.2014.6867699.
- [49] C. S. " Scott and " Macgillivray, "Miniature Deployable High Gain Antenna for CubeSats".
- [50] "One-Meter Deployable Mesh Reflector for Deep Space Network Telecommunication at X- and Ka-band | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore." <https://ieeexplore.ieee.org/document/8739629> (accessed Oct. 19, 2022).
- [51] 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.
- [52] "KaTENna 1m - Reflector Antenna | SatCatalog." <https://www.satcatalog.com/component/katenna-1m/> (accessed Oct. 18, 2022).
- [53] K. Sudhakar Rao and P. S. Kildal, "STUDY OF THE DIFFRACTION AND BLOCKAGE EFFECTS ON THE EFFICIENCY OF THE CASSEGRAIN ANTENNA.," *Canadian electrical engineering journal*, vol. 9, no. 1, pp. 10–15, 1984, doi: 10.1109/CEEJ.1984.6591356.
- [54] "Precision Space Deployables | Ka-Band | SAR | Tendeg | CO." <https://www.tendeg.com/> (accessed Oct. 18, 2022).
- [55] N. C. Administrator, "Project Echo," 2016, Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <http://www.nasa.gov/centers/langley/about/project-echo.html>
- [56] "IAE." <https://www.eoportal.org/satellite-missions/iae> (accessed Oct. 18, 2022).
- [57] S. Bolton, D. Doty, and P. Rivera, "Compact Deployable Antenna for CubeSat Units," *Mechanical Engineering*, Jan. 2015, Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <https://digitalcommons.calpoly.edu/mesp/270>

- [58] A. Babuscia *et al.*, “CommCube 1 and 2: A CubeSat series of missions to enhance communication capabilities for CubeSat,” *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2013, doi: 10.1109/AERO.2013.6497128.
- [59] A. Babuscia, J. Sauder, A. Chandra, and J. Thangavelautham, “Inflatable Antenna for CubeSat,” *CubeSat Antenna Design*, pp. 197–231, Dec. 2020, doi: 10.1002/9781119692720.CH6.
- [60] 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,” *Acta Astronaut*, vol. 91, pp. 322–332, Oct. 2013, doi: 10.1016/J.ACTAASTRO.2013.06.005.
- [61] J. Huang and A. Fera, “Inflatable microstrip reflectarray antennas at X and Ka-band frequencies,” *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium: Wireless Technologies and Information Networks, APS 1999 - Held in conjunction with USNC/URSI National Radio Science Meeting*, vol. 3, pp. 1670–1673, 1999, doi: 10.1109/APS.1999.788274.
- [62] “Galileo High Gain Antenna (HGA) Failure (1991).” <https://llis.nasa.gov/lesson/492> (accessed Oct. 18, 2022).
- [63] “Nanosats Database | Constellations, companies, technologies and more.” <https://www.nanosats.eu/> (accessed Oct. 19, 2022).
- [64] “ESA - M-Argo: Journey of a suitcase-sized asteroid explorer.” https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shaping_the_Future/M-Argo_Journey_of_a_suitcase-sized_asteroid_explorer (accessed Oct. 18, 2022).
- [65] John. Huang and J. A. Encinar, “Reflectarray antennas,” 2007, Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Reflectarray+Antennas-p-9780470084915>
- [66] M. Beccaria, A. Massaccesi, A. Freni, A. Mazzinghi, and P. Pirinoli, “Optimization-based Design of Isoflux Reflectarray,” *Mediterranean Microwave Symposium*, vol. 2022-May, 2022, doi: 10.1109/MMS55062.2022.9825537.
- [67] R. E. Hodges *et al.*, “The ISARA Mission – Flight Demonstration of a High Gain Ka-Band Antenna for 100Mbps Telecom,” Aug. 2018, Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <https://trs.jpl.nasa.gov/handle/2014/48475>
- [68] “Kepler Awarded Contributions for Small Satellite Phased Array Technology Development – Kepler Communications.” <https://kepler.space/2020/08/05/kepler-awarded-contributions-for-small-satellite-phased-array-technology-development/> (accessed Oct. 18, 2022).
- [69] M. J. Veljovic and A. K. Skrivervik, “Circularly Polarized Transmitarray Antenna for CubeSat Intersatellite Links in K-Band,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 19, no. 10, pp. 1749–1753, Oct. 2020, doi: 10.1109/LAWP.2020.3016340.
- [70] R. H. Phillion and M. Okoniewski, “Lenses for circular polarization using planar arrays of rotated passive elements,” *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 59, no. 4, pp. 1217–1227, Apr. 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2109694.
- [71] J. Huang *et al.*, “Aperture-coupled thin-membrane microstrip array antenna for beam scanning application,” *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, vol. 1 A, pp. 330–333, 2005, doi: 10.1109/APS.2005.1551317.
- [72] P. Warren, J. Steinbeck, R. Minelli, and C. Mueller, “Large, Deployable S-Band Antenna for a 6U Cubesat,” *Small Satellite Conference*, Aug. 2015, Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2015/all2015/41>
- [73] A. Gupta, J. Costantine, Y. Tawk, C. G. Christodoulou, S. Pellegrino, and M. Sakovsky, “A deployable Vivaldi-fed conical horn antenna for CubeSats,” *2016 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting, USNC-URSI NRSM 2016*, Mar. 2016, doi: 10.1109/USNC-URSI-NRSM.2016.7436244.
- [74] A. J. Ernest, Y. Tawk, J. Costantine, and C. G. Christodoulou, “A bottom fed deployable conical log spiral antenna design for cubesat,” *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 63, no. 1, pp. 41–47, Jan. 2015, doi: 10.1109/TAP.2014.2367539.

- [75] M. A. Elmansouri, E. A. Etellisi, L. Boskovic, and D. S. Filipovic, "Wideband Spectrum Sensing and Direction Finding Antenna Subsystem," *Proceedings of the 2019 9th IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, APWC 2019*, pp. 11–15, Sep. 2019, doi: 10.1109/APWC.2019.8870392.
- [76] N. Jastram and D. S. Filipovic, "Performance of a Spiral Antenna System for Wideband Sensing and Direction Finding," *2018 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, APSURSI 2018 - Proceedings*, pp. 847–848, 2018, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609250.
- [77] K. R. Isbell, Y.-K. Hong, S. J. Yan, S. Gurbuz, and R. D. Branam, "DESIGN OF SPIRAL ANTENNA ARRAY AND COMMUNICATION SYSTEM FOR X-BAND CUBESAT IN LUNAR ORBIT," 2020.
- [78] W. Lee, N. Luhrs, K. Isbell, C. Oliphant-Jerry, P. Morris, and Y. K. Hong, "Cavity-backed archimedean spiral antenna with conical perturbations for 3u cubesat applications," *IEEE Antennas Propag Mag*, vol. 60, no. 6, pp. 102–109, Dec. 2018, doi: 10.1109/MAP.2018.2870586.
- [79] K. Zack, H. Khaleel, A. Isaac, and A. Bihnam, "Compact spiral antenna for space based applications," *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, pp. 1708–1709, Sep. 2014, doi: 10.1109/APS.2014.6905180.
- [80] A. M. Mustafa, S. Mohamad, N. A. Malek, F. N. M. Isa, and I. Rafiqul, "A wideband circularly-polarized spiral antenna for CubeSat application," *undefined*, 2018.
- [81] H. Nakano, K. Kikkawa, Y. Iitsuka, and J. Yamauchi, "Equiangular spiral antenna backed by a shallow cavity with absorbing strips," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 56, no. 8 II, pp. 2742–2747, 2008, doi: 10.1109/TAP.2008.927573.
- [82] A. M. Shire, K. I. Jahun, W. A. Ashwal, M. Z. M. Jenu, and K. N. Ramli, "Effects of cavity ground plane on UWB Archimedean spiral antenna," *I4CT 2015 - 2015 2nd International Conference on Computer, Communications, and Control Technology, Art Proceeding*, pp. 472–475, Aug. 2015, doi: 10.1109/I4CT.2015.7219622.
- [83] C. A. Balanis, "Modern antenna handbook," *Modern Antenna Handbook*, pp. 1–1680, Nov. 2007, doi: 10.1002/9780470294154.
- [84] "Deployable Wideband UHF Antenna for Small Satellites — Sergio Pellegrino - Caltech." <http://www.pellegrino.caltech.edu/deployable-wideband-uhf-antenna-for-small-satellites> (accessed Oct. 18, 2022).
- [85] G. Minatti *et al.*, "Modulated Metasurface Antennas for Space: Synthesis, Analysis and Realizations," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 63, no. 4, pp. 1288–1300, Apr. 2015, doi: 10.1109/TAP.2014.2377718.
- [86] O. Yurduseven and D. R. Smith, "Dual-Polarization Printed Holographic Multibeam Metasurface Antenna," *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 16, pp. 2738–2741, Aug. 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2743710.
- [87] D. Gonzalez-Ovejero, N. Chahat, R. Sauleau, G. Chattopadhyay, S. Macl, and M. Ettorre, "Additive manufactured metal-only modulated metasurface antennas," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 66, no. 11, pp. 6106–6114, Nov. 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2869135.
- [88] D. Smith, O. Yurduseven, B. Livingstone, and V. Schejbal, "Microwave imaging using indirect holographic techniques," *IEEE Antennas Propag Mag*, vol. 56, no. 1, pp. 104–117, 2014, doi: 10.1109/MAP.2014.6821762.
- [89] A. Arboleya, J. Laviada, and F. Las-Heras, "Scalar Calibration for Broadband Phaseless Antenna Measurements Based on Indirect Off-Axis Holography," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 66, no. 6, pp. 3241–3246, Jun. 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2819881.
- [90] O. Yurduseven *et al.*, "Multibeam Si/GaAs Holographic Metasurface Antenna at W-Band," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 69, no. 6, pp. 3523–3528, Jun. 2021, doi: 10.1109/TAP.2020.3030898.

- [91] D. Colantonio and C. Rosito, "A spaceborne telemetry loaded bifilar helical antenna for LEO satellites," *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings*, pp. 741–745, 2009, doi: 10.1109/IMOC.2009.5427481.
- [92] G. O'Neill, "Deployable Small Satellite Antenna: Quadrifilar Helical Antenna," *2016 International Workshop on Antenna Technology, iWAT 2016*, pp. 116–118, Mar. 2016, doi: 10.1109/IWAT.2016.7434818.
- [93] J. E. Diener, R. D. Jones, and A. Z. Elsherbeni, "Isoflux phased array design for cubesats," *2017 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Proceedings*, vol. 2017-January, pp. 1811–1812, Oct. 2017, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072948.
- [94] "X-band isoflux pattern antenna for SAR data transmission | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore." <https://ieeexplore.ieee.org/document/6086974> (accessed Oct. 18, 2022).
- [95] J. Fouany *et al.*, "New Concept of Telemetry X-Band Circularly Polarized Antenna Payload for CubeSat," *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 16, pp. 2987–2991, Sep. 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2756565.
- [96] "Multi-objective optimization of an isoflux antenna for LEO satellite down-handling link | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore." <https://ieeexplore.ieee.org/document/5540489> (accessed Oct. 18, 2022).
- [97] S. Li, S. Liao, Y. Yang, W. Che, and Q. Xue, "Low-Profile Circularly Polarized Isoflux Beam Antenna Array Based on Annular Aperture Elements for CubeSat Earth Coverage Applications," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 69, no. 9, pp. 5489–5502, Sep. 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3060039.
- [98] J. Fouany *et al.*, "Circularly polarized isoflux compact X band antenna for nano-satellites applications," *European Microwave Week 2015: "Freedom Through Microwaves", EuMW 2015 - Conference Proceedings; 2015 45th European Microwave Conference Proceedings, EuMC*, pp. 1403–1406, Dec. 2015, doi: 10.1109/EUMC.2015.7346035.
- [99] "Design of Inverted F antenna for low earth orbit (LEO) satellite application | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore." <https://ieeexplore.ieee.org/document/5067987> (accessed Oct. 18, 2022).
- [100] "Compact UHF Antenna Utilizing CubeSat's Characteristic Modes | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore." <https://ieeexplore.ieee.org/document/8740236> (accessed Oct. 18, 2022).
- [101] M. Kishimoto *et al.*, "Improvement of Communication System for 1U CubeSat," *Small Satellite Conference*, Aug. 2020, Accessed: Oct. 19, 2022. [Online]. Available: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2020/all2020/52>
- [102] C. G. Kakoyiannis and P. Constantinou, "A compact microstrip antenna with tapered peripheral slits for CubeSat RF payloads at 436MHz: Miniaturization techniques, design & numerical results," *2008 International Workshop on Satellite and Space Communications, IWSSC'08, Conference Proceedings*, pp. 255–259, 2008, doi: 10.1109/IWSSC.2008.4656804.
- [103] Y. Pu, H. Wang, Y. Zhao, Y. Yuan, and X. Xi, "Miniaturized wideband quadrifilar helix antenna for satellite navigation application," *Microw Opt Technol Lett*, vol. 63, no. 1, pp. 252–263, Jan. 2021, doi: 10.1002/MOP.32569.
- [104] Y. H. Yang, J. L. Guo, B. H. Sun, and Y. H. Huang, "Dual-Band Slot Helix Antenna for Global Positioning Satellite Applications," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 64, no. 12, pp. 5146–5152, Dec. 2016, doi: 10.1109/TAP.2016.2623647.
- [105] "Design of a high gain quadrifilar helix antenna for satellite mobile communication | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore." <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5773965> (accessed Oct. 18, 2022).
- [106] S. Liu and Q. X. Chu, "A novel dielectrically-loaded antenna for tri-band GPS applications," *Proceedings of the 38th European Microwave Conference, EuMC 2008*, pp. 1759–1762, 2008, doi: 10.1109/EUMC.2008.4751817.

- [107] J. Costantine, D. Tran, M. Shiva, Y. Tawk, C. G. Christodoulou, and S. E. Barbin, "A deployable quadrifilar helix antenna for CubeSat," *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, 2012, doi: 10.1109/APS.2012.6348442.
- [108] J. Costantine *et al.*, "UHF Deployable Helical Antennas for CubeSats," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 64, no. 9, pp. 3752–3759, Sep. 2016, doi: 10.1109/TAP.2016.2583058.
- [109] "An Innovative Deployable VHF/UHF Helical Antenna for Nanosatellites | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore." <https://ieeexplore.ieee.org/document/8739631> (accessed Oct. 18, 2022).
- [110] K. Schraml, A. Narbudowicz, S. Chalermwisutkul, D. Heberling, and M. J. Ammann, "Easy-to-deploy LC-loaded dipole and monopole antennas for cubesat," *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP 2017*, pp. 2303–2306, May 2017, doi: 10.23919/EUCAP.2017.7928135.
- [111] V. Manohar, S. Bhardwaj, S. B. Venkatakrishnan, and J. L. Volakis, "VHF/UHF Ultrawideband Tightly Coupled Dipole Array for CubeSats," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2, pp. 702–708, May 2021, doi: 10.1109/OJAP.2021.3083938.
- [112] X. Zhang, F. Sun, G. Zhang, and L. Hou, "Compact UHF/VHF Monopole Antennas for CubeSats Applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 133360–133366, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3008540.
- [113] M. U. Khan, M. Maqsood, and A. I. Najam, "Dual band printed inverted F antenna (IFA) for low earth orbit (LEO) small satellites," *2017 International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering, RAEE 2017*, vol. 2018-January, pp. 1–5, Jun. 2017, doi: 10.1109/RAEE.2017.8246148.
- [114] 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 Wirel Propag Lett*, vol. 12, pp. 1098–1101, 2013, doi: 10.1109/LAWP.2013.2280454.
- [115] A. Takacs, S. Charlot, P. Calmon, and D. Dragomirescu, "VHF/UHF Kapton supported antenna for cubesat applications," *2017 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Proceedings*, vol. 2017-January, pp. 2485–2486, Oct. 2017, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073285.
- [116] F. Wang, F. Bin, Q. Sun, J. Fan, and H. Ye, "A Compact UHF Antenna Based on Complementary Fractal Technique," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 21118–21125, Sep. 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2756672.
- [117] A. H. Lokman *et al.*, "A flexible deployable CubeSat antenna," *2016 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics, APACE 2016*, pp. 1–4, 2016, doi: 10.1109/APACE.2016.7915860.
- [118] J. Costantine, Y. Tawk, S. Moth, C. G. Christodoulou, and S. E. Barbin, "A modified helical shaped deployable antenna for cubesats," *Proceedings of the 2012 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, APWC'12*, pp. 1114–1116, 2012, doi: 10.1109/APWC.2012.6324991.
- [119] Y. Li, S. K. Podilchak, and D. E. Anagnostou, "A Miniaturized Circularly Polarized Antenna Using a Meandered Folded-Shorted Patch Array for CubeSats," *14th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2020*, Mar. 2020, doi: 10.23919/EUCAP48036.2020.9135713.
- [120] "Collocated Compact UHF and L-Band Antenna for Nanosatellite ARGOS Program | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore." <https://ieeexplore.ieee.org/document/8740138> (accessed Oct. 18, 2022).
- [121] A. H. Lokman *et al.*, "Compact circularly polarized S-band antenna for pico-satellites," *2017 International Symposium on Antennas and Propagation, ISAP 2017*, vol. 2017-January, pp. 1–2, Dec. 2017, doi: 10.1109/ISANP.2017.8228918.

- [122] S. Liberto and G. Goussetis, "A Dual-Wideband Circular Polarized Shared-Aperture Antenna for CubeSat Applications," *15th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2021*, Mar. 2021, doi: 10.23919/EUCAP51087.2021.9411103.
- [123] M. J. Veljovic and A. K. Skrivervik, "Aperture-Coupled Low-Profile Wideband Patch Antennas for CubeSat," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 67, no. 5, pp. 3439–3444, May 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2900428.
- [124] X. Liu *et al.*, "Transparent and Nontransparent Microstrip Antennas on a CubeSat: Novel low-profile antennas for CubeSats improve mission reliability," *IEEE Antennas Propag Mag*, vol. 59, no. 2, pp. 59–68, Apr. 2017, doi: 10.1109/MAP.2017.2655529.
- [125] O. S. Hassan, M. Abou-Khousa, K. Al-Wahedi, and R. Hussain, "S-Band Circularly Polarized Wideband Loaded Slot Antenna for CubeSat Applications," pp. 1002–1003, Sep. 2022, doi: 10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886122.
- [126] S. Liu, R. Raad, K. W. Chin, and F. E. M. Tubbal, "Dipole antenna array cluster for CubeSats," *2016, 10th International Conference on Signal Processing and Communication Systems, ICSPCS 2016 - Proceedings*, 2016, doi: 10.1109/ICSPCS.2016.7843311.
- [127] A. Nascetti, E. Pittella, P. Teofilatto, and S. Pisa, "High-gain S-band patch antenna system for earth-observation CubeSat satellites," *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 14, pp. 434–437, 2015, doi: 10.1109/LAWP.2014.2366791.
- [128] M. M. Hossain, S. I. Latif, M. Qudrat-E-Maula, and E. Spencer, "A wideband circularly polarized stacked antenna with corner perturbations for cubesats," *Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON*, vol. 2021-March, Mar. 2021, doi: 10.1109/SOUTHEASTCON45413.2021.9401889.
- [129] M. Rajab, S. H. Elramly, F. M. El-Hefnawi, and M. H. Bannis, "UWB with Gain Enhancement Archimedean Spiral Microstrip Antennas for On-board Satellite Communications," *2018 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, APSURSI 2018 - Proceedings*, pp. 1937–1938, 2018, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608179.
- [130] F. N. Mohd Isa, N. H. Kamaludin, N. F. Abdul Malek, and S. Y. Mohamad, "Compact UWB slotted pentagonal patch antenna for radar and communication," *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, APSURSI 2019 - Proceedings*, pp. 1393–1394, Jul. 2019, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888353.
- [131] M. el Hammoumi, N. E. A. el Idrissi, R. Raad, P. I. Theoharis, and F. Tubbal, "A Wideband Compact Patch Antenna for Ka-band and CubeSat Applications," *2021 15th International Conference on Signal Processing and Communication Systems, ICSPCS 2021 - Proceedings*, 2021, doi: 10.1109/ICSPCS53099.2021.9660306.
- [132] M. el Hammoumi *et al.*, "A Wideband 5G CubeSat Patch Antenna," *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 47–52, Aug. 2022, doi: 10.1109/JMASS.2022.3195520.
- [133] X. Liu, S. Yao, and S. v. Georgakopoulos, "Reconfigurable origami equiangular conical spiral antenna," *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, vol. 2015-October, pp. 2263–2264, Oct. 2015, doi: 10.1109/APS.2015.7305520.
- [134] D. Ochoa, K. Hummer, and M. Ciffone, "Deployable Helical Antenna for Nano-Satellites," *Small Satellite Conference*, Aug. 2014, Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2014/AdvTechComm/4>
- [135] W. Alomar, J. Degnan, S. Mancewicz, M. Sidley, J. Cutler, and B. Gilchrist, "An extendable solar array integrated Yagi-Uda UHF antenna for CubeSat platforms," *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, pp. 3022–3024, 2011, doi: 10.1109/APS.2011.5997166.
- [136] S. X. Ta, V. du Le, K. K. Nguyen, and C. Dao-Ngoc, "Planar circularly polarized X-band array antenna with low sidelobe and high aperture efficiency for small satellites," *International*

- Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 11, p. e21914, Nov. 2019, doi: 10.1002/MMCE.21914.
- [137] P. I. Theoharis, R. Raad, F. Tubbal, and S. Abulgasem, "High-Gain Circular Polarized Microstrip Patch Array for X-band CubeSat Applications," *2021 15th International Conference on Signal Processing and Communication Systems, ICSPCS 2021 - Proceedings*, 2021, doi: 10.1109/ICSPCS53099.2021.9660346.
- [138] S. Zarbakhsh, M. Akbari, M. Farahani, A. Ghayekhloo, T. A. Denidni, and A. R. Sebak, "Optically Transparent Subarray Antenna Based on Solar Panel for CubeSat Application," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 68, no. 1, pp. 319–328, Jan. 2020, doi: 10.1109/TAP.2019.2938740.
- [139] M. el Bakkali, G. S. Gaba, F. E. Tubbal, and N. el Amrani El Idrissi, "High Gain Patch Antenna Array with Parasitic Elements for CubeSat Applications," *2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation, InCAP 2018*, Dec. 2018, doi: 10.1109/INCAP.2018.8770879.
- [140] R. Shrestha, D. E. Anagnostou, S. J. Horst, and J. P. Hoffman, "Two antenna arrays for remote sensing applications," *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, Jun. 2017, doi: 10.1109/AERO.2017.7943853.
- [141] G. Gupta, E. Decrossas, and N. Chahat, "All-Metal Dual Band Circular Polarized UHF Patch Antenna," *2022 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium, WAMS 2022*, 2022, doi: 10.1109/WAMS54719.2022.9847971.
- [142] L. Fernandez, M. Sobrino, J. A. Ruiz-De-azua, A. Calveras, and A. Camps, "Design of a Deployable Helix Antenna at L-Band for a 1-Unit CubeSat: From Theoretical Analysis to Flight Model Results," *Sensors (Basel)*, vol. 22, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/S22103633.
- [143] S. Abulgasem, F. Tubbal, R. Raad, P. I. Theoharis, S. Liu, and M. U. A. Khan, "A Wideband Metal-Only Patch Antenna for CubeSat," *Electronics 2021, Vol. 10, Page 50*, vol. 10, no. 1, p. 50, Dec. 2020, doi: 10.3390/ELECTRONICS10010050.
- [144] H. Wang, Y. B. Park, and I. Park, "Low-Profile Wideband Solar-Cell-Integrated Circularly Polarized CubeSat Antenna for the Internet of Space Things," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 61451–61462, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3182108.
- [145] R. Lehmensiek, "Design of a wideband circularly polarized 2×2 array with shorted annular patches at X-band on a CubeSat," *2017 International Symposium on Antennas and Propagation, ISAP 2017*, vol. 2017-January, pp. 1–2, Dec. 2017, doi: 10.1109/ISAP.2017.8228945.
- [146] G. Chen, C. Hu, M. Wei, J. Zhang, and F. Lin, "X-Band Low-Profile Wideband Circular Polarized Microstrip Array for CubeSat Communications," *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2022*, 2022, doi: 10.23919/EUCAP53622.2022.9769321.
- [147] K. N. Khac et al., "A Design of Circularly Polarized Array Antenna for X-Band CubeSat Satellite Communication," *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, vol. 2018-October, pp. 53–56, Dec. 2018, doi: 10.1109/ATC.2018.8587574.
- [148] C. J. Vourch and T. D. Drysdale, "V-band 'bull's eye' antenna for cubeSat applications," *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 13, pp. 1092–1095, 2014, doi: 10.1109/LAWP.2014.2327852.
- [149] R. E. Hodges, D. J. Hoppe, M. J. Radway, and N. E. Chahat, "Novel deployable reflectarray antennas for CubeSat communications," *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, IMS 2015*, Jul. 2015, doi: 10.1109/MWSYM.2015.7167153.
- [150] G. di Martino et al., "X-Band SAR Antenna Design for a CubeSat Formation-Flying Remote Sensing Mission," *6th International Forum on Research and Technology for Society and Industry, RTSI 2021 - Proceedings*, pp. 206–210, 2021, doi: 10.1109/RTSI50628.2021.9597211.
- [151] M. Arya, J. Saudert, R. E. Hodges, and S. Pellegrino, "Large-area deployable reflectarray antenna for cubesats," *AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019, doi: 10.2514/6.2019-2257.
- [152] E. Cote Pelletier, C. Mireault-Lecourt, and J. J. Laurin, "Reflectarray Antenna Concept for a Snow Mass Measurement SAR Mission in Ku-Band on a Nanosatellite Platform," *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 20, no. 11, pp. 2085–2089, Nov. 2021, doi: 10.1109/LAWP.2021.3113798.

- [153] 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, Jun. 2016, doi: 10.1109/TAP.2016.2546306.
- [154] G. Mishra, S. K. Sharma, and J. C. S. Chieh, "A Circular Polarized Feed Horn with Inbuilt Polarizer for Offset Reflector Antenna for W-Band CubeSat Applications," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 67, no. 3, pp. 1904–1909, Mar. 2019, doi: 10.1109/TAP.2018.2886704.
- [155] G. Mishra, S. K. Sharma, J. C. S. Chieh, and J. Rowland, "W-band circular polarized series fed single plane beamsteering array antenna with 4-Bit phase shifter for cubesat applications," *2017 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Proceedings*, vol. 2017-January, pp. 2555–2556, Oct. 2017, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073320.