



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Ανάλυση και σχεδίαση ολογραφικών
μεταεπιφανειών και μελέτη εφαρμογών τους σε
ασύρματες κινητές τηλεπικοινωνίες
μικροκυματικών και χιλιοστομετρικών
συχνοτήτων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΙΩΑΝΝΗ ΑΘΑΝΑΣΙΑΔΗ

Επιβλέποντες: Αλέξανδρος Πιτιλάκης

Θεόδωρος Ζυγκιρίδης

ΚΟΖΑΝΗ/ΙΟΥΛΙΟΣ/2024



HELLENIC DEMOCRACY
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
& COMPUTER ENGINEERING

Analysis and design of holographic metasurfaces and study of their applications in wireless mobile telecommunication at microwave and millimeter frequencies

THESIS

IOANNIS ATHANASIADIS

SUPERVISORS: Alexandros Pitilakis

Theodoros Zygiridis

KOZANI/JULY/2024



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο “Ανάλυση και σχεδίαση ολογραφικών μεταεπιφανειών και μελέτη εφαρμογών τους σε ασύρματες κινητές τηλεπικοινωνίες μικροκυματικών και χιλιοστομετρικών συχνοτήτων” καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Αλέξανδρου Πιτιλάκη και Θεόδωρου Ζυγκιρίδη αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Αθανασιάδης Ιωάννης, Αλέξανδρος Πιτιλάκης & Θεόδωρος Ζυγκιρίδης, 2024, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή: Αθανασιάδης Ιωάννης

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν αντικείμενο την ανάλυση και τον σχεδιασμό ολογραφικών μεταεπιφανειών με έμφαση στις εφαρμογές τους στις ασύρματες κινητές τηλεπικοινωνίες σε μικροκυματικές και χιλιοστομετρικές συχνότητες. Ολογραφικές μεταεπιφάνειες είναι αυτές όπου επιτρέπεται αυθαίρετος έλεγχος της φάσης και του πλάτους στην τοπική απόκριση κάθε κελιού, επιτρέποντας υλοποίηση ποικίλων λειτουργιών. Η εργασία παρέχει μια διεξοδική μελέτη της θεωρίας αλλά και των φυσικών υλοποιήσεων των μεταεπιφανειών, από το επίπεδο του μοναδιαίου κελιού έως τον συνδυασμό διαφορετικών κελιών για την σύνθεση ανομοιογενούς μεταεπιφάνειας πεπερασμένου ανοίγματος. Το θεωρητικό υπόβαθρο θέτει τα θεμέλια για την κατανόηση της λειτουργίας των μεταεπιφανειών και των εφαρμογών τους προς βελτίωση στην διάδοση του σήματος σε ένα ασύρματο κανάλι, μειώνοντας την επίδραση εμποδίων σε περίπλοκα τηλεπικοινωνιακά περιβάλλοντα ή όπου δεν υπάρχει άμεση οπτική επαφή πομπού-δέκτη.

Η διπλωματική περιλαμβάνει ανάπτυξη υπολογισμών φυσικής/κυματικής οπτικής σε περιβάλλον MATLAB. Διεξοδικές παραμετρικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για την επικύρωση, επέκταση και προσαρμογή των υφιστάμενων θεωρητικών μοντέλων στις περιοχές εφαρμογής των ασύρματων επικοινωνιών. Οι προσομοιώσεις αυτές αφορούν ανομοιογενείς μεταεπιφάνειες πεπερασμένου ανοίγματος, με προφίλ φάσης ή/και πλάτους στην ισοδύναμη επιφανειακή αντίσταση, αξιολογώντας το αντίκτυπό τους στην επίδοση σε πραγματικά σενάρια με υπολογισμό των διαγραμμάτων σκέδασης σε κοντινό και μακρινό πεδίο. Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των μεταεπιφανειών με σκοπό την ανταπόκριση τους στις απαιτητικές προδιαγραφές των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών μοντέλων επόμενης γενιάς.

Λέξεις Κλειδιά

Μεταεπιφάνειες, χιλιοστομετρικά κύματα, μοναδιαίο κελί, σκέδαση και περίθλαση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, κυματική οπτική, ολογραφία

Abstract

This thesis is concerned with the analysis and design of holographic metasurfaces with emphasis on their applications in wireless mobile telecommunications at microwave and millimeter wave frequencies. Holographic metasurfaces are those where arbitrary control of phase and amplitude is allowed in the local response of each cell, allowing implementation of a variety of functions. The paper provides a thorough study of both the theory and physical implementations of metasurfaces, from the unit cell level to the combination of different cells to synthesize a non-uniform metasurface of finite aperture. The theoretical background lays the foundation for understanding the operation of metasurfaces and their applications to improve signal propagation in a wireless channel, reducing the effect of obstacles in complex telecommunication environments or where there is no direct transmitter-receiver line-of-sight contact.

The thesis includes development of physical/wave optics calculations in MATLAB environment. Extensive parametric simulations were performed to validate, extend and adapt existing theoretical models to the application areas of wireless communications. These simulations involve inhomogeneous finite aperture metasurfaces with phase and/or amplitude profiles in the equivalent surface impedance, evaluating their impact on performance in real scenarios by calculating the scattering patterns in the near and far field. This methodology allows the optimization of the metasurface design to meet the demanding specifications of next-generation wireless telecommunication models.

Keywords

Metasurface, mmWave, Unit cell, scattering and diffraction of electromagnetic waves, wave optics, holography

Ευχαριστίες

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, που στήριξαν εξ' αρχής οικονομικά και συναισθηματικά το προπτυχιακό ταξίδι μου. Ένα ευχαριστώ στους φίλους μου που ήταν δίπλα μου στα ωραία και με την υποστήριξή τους και την θετική τους ενέργεια με βοήθησαν να ξεπεράσω τα δύσκολα κομμάτια αυτής της σταδιοδρομίας. Τέλος ένα ευχαριστώ στον κύριο Αλέξανδρο Πιτιλάκη που μου έδωσε την δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα θέμα που αποτελεί πηγή συζήτησης και πυλώνα εξέλιξης για την επιστημονική κοινότητα, στους τομείς των τηλεπικοινωνιών και οπτικής, ενώ ταυτόχρονα παρέχοντάς μου τα κατάλληλα εργαλεία κατανόησης.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	8
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΣΩΣΣΕΩΝ	14
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	16
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	20
1.1 Μετα-υλικά και μετα-επιφάνειες: Ιστορική αναδρομή	21
1.1.1 Μετα-υλικά	21
1.1.2 Μεταεπιφάνειες	21
1.2 Στατικές μεταεπιφάνειες	22
1.2.1 Επισκόπηση στατικών μεταεπιφανειών	22
1.2.2 Οφέλη στις τηλεπικοινωνίες	22
1.2.3 Οφέλη στην απεικόνιση	23
1.2.4 Περιορισμοί	23
1.3 Ολογραφικές και αναπρογραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες	24
1.3.1 Αναπρογραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες και μηχανισμοί	24
1.3.2 Ολογραφικές μεταεπιφάνειες	24
1.3.3 Αναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΚΕΛΙΟΥ	27
2.1 Επιφάνειες υψηλής αντίστασης	29
2.1.1 συστοιχίες λωρίδων	29
2.1.2 Συστοιχίες από τετράγωνα patches	31
2.1.3 Κατασκευές υψηλής αντίστασης	32
2.2 Απορροφητές ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	36
2.2.1 Δομή απορροφητή	37

2.2.2 Λειτουργία σε πολώσεις TE & TM	37
2.3 Reconfigurable Intelligent Surfaces	39
2.3.1 Δομή επαναδιαμορφώσιμης έξυπνης επιφάνειας	39
2.3.2 Δυνατότητα ελέγχου και τροποποίησης	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΜΕΤΑΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	41
3.1 Αρχή των Huygens-Fresnel (HFP)	41
3.1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο της αρχής HFP	41
3.1.2 Αρχή Huygens Fresnel στο μακρινό πεδίο (Far-Field)	42
3.1.3 Αρχή Huygens Fresnel στο κοντινό πεδίο (Near-Field)	42
3.2 Από το μακρινό πεδίο στο μακρινό (Far-Field to Far-Field)	43
3.2.1 Κατευθυντικότητα δέσμης μέσω grating	43
3.2.2 Ανακατεύθυνση σε πολλαπλές δέσμες (beam splitting)	45
3.2.3 Διάχυτη σκέδαση (diffused scattering)	49
3.3 Από το κοντινό στο μακρινό	50
3.3.1 Παραλληλισμός (Collimating)	50
3.3.2 Κατευθυντικότητα δέσμης μέσω grating για σφαιρικό προσπίπτον (beam steering)	51
3.3.3 Διάσπαση σε πολλαπλές δέσμες για σφαιρικό προσπίπτον (beam splitting)	52
3.3.4 Διάσπαση Δέσμης (Diffused scattering)	54
3.4 Από το μακρινό στο κοντινό	55
3.4.1 Εστίαση σε 1 σημείο (Singular Focusing)	55
3.4.2 Εστίαση σε 1 σημείο εκτός του άξονα z (off-axis focusing)	57
3.4.3 Εστίαση σε 2 σημεία (Dual Focusing)	58
3.5 Από το κοντινό στο κοντινό	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ	62
4.1 Σχεδίαση μεταεπιφάνειας Beam steering	62
4.1.1 Ανακατεύθυνση δέσμης επίπεδου κύματος στο μακρινό πεδίο	62
4.1.2 Ανακατεύθυνση δέσμης σφαιρικού κύματος στο μακρινό πεδίο	65
4.2 Παράδειγμα Beam splitting	68
4.2.1 Διαχωρισμός δέσμης επίπεδου κύματος στο μακρινό πεδίο	68
4.2.2 Διαχωρισμός δέσμης σφαιρικού κύματος στο μακρινό πεδίο	70
4.3 Παράδειγμα Diffused scattering (διάχυτη/τυχαία σκέδαση δέσμης)	71

4.3.1 διάχυτη σκέδαση σε μακρινό πεδίο από επίπεδο προσπίπτον κύμα	72
4.3.2 διάχυτη σκέδαση σε μακρινό πεδίο από σφαιρικό προσπίπτον κύμα	73
4.4 Εστίαση	73
4.5 Αλγόριθμος Gerchberg -Saxton για point cloud	75
4.5.1 Ορισμός του Point Cloud	76
4.5.2 Διαμόρφωση Μεταεπιφάνειας για FT / HFP	76
3.4.3 Λειτουργία αλγόριθμου Gerchberg – Saxton	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΛΟΓΟΣ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ	79
5.1 Σύνοψη	79
5.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	79
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ - ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ - ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	95
ΑΠΟΔΟΣΗ ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΩΝ ΟΡΩΝ	96

Κατάλογος εξισώσεων

Εξίσωση 1.....	27
Εξίσωση 2.....	27
Εξίσωση 3.....	28
Εξίσωση 4.....	28
Εξίσωση 5.....	28
Εξίσωση 6.....	28
Εξίσωση 7.....	28
Εξίσωση 8.....	28
Εξίσωση 9.....	29
Εξίσωση 10.....	29
Εξίσωση 11.....	30
Εξίσωση 12.....	30
Εξίσωση 13.....	30
Εξίσωση 14.....	30
Εξίσωση 15.....	30
Εξίσωση 16.....	30
Εξίσωση 17.....	31
Εξίσωση 18.....	31
Εξίσωση 19.....	31
Εξίσωση 20.....	31
Εξίσωση 21.....	31
Εξίσωση 22.....	32
Εξίσωση 23.....	32
Εξίσωση 24.....	32
Εξίσωση 25.....	32
Εξίσωση 26.....	32
Εξίσωση 27.....	32
Εξίσωση 28.....	32
Εξίσωση 29.....	33
Εξίσωση 30.....	33
Εξίσωση 31.....	33
Εξίσωση 32.....	34
Εξίσωση 33.....	34
Εξίσωση 34.....	34
Εξίσωση 35.....	37
Εξίσωση 36.....	37
Εξίσωση 37.....	37
Εξίσωση 38.....	41
Εξίσωση 39.....	42
Εξίσωση 40.....	42
Εξίσωση 41.....	43
Εξίσωση 42.....	43
Εξίσωση 43.....	43
Εξίσωση 44.....	50
Εξίσωση 45.....	50
Εξίσωση 46.....	55

Εξίσωση 47.....	57
Εξίσωση 48.....	58
Εξίσωση 49.....	63
Εξίσωση 50.....	63
Εξίσωση 51.....	64
Εξίσωση 52.....	66
Εξίσωση 53.....	66
Εξίσωση 54.....	66
Εξίσωση 55.....	68
Εξίσωση 56.....	74
Εξίσωση 57.....	74
Εξίσωση 58.....	76
Εξίσωση 59.....	77
Εξίσωση 60.....	78

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Φάσμα χιλιοστομετρικών & μικροκυματικών συχνοτήτων	20
Εικόνα 2: Split-ring resonators του John Pendry	21
Εικόνα 3 : Αναπαράσταση στατικής μεταεπιφάνειας	22
Εικόνα 4: σχέδιο γενικής RIS.....	25
Εικόνα 5: (α)Ένα πλέγμα από ιδανικά αγώγιμες ταινίες σε ομοιογενές μέσο. (b) Συστοιχία patches σε ομοιογενές μέσο. Τα μεταλλικά μέρη έχουν γκρι χρώμα.	29
Εικόνα 6: (α) Επαγωγικό πλέγμα μεταλλικών λωρίδων σε ομοιογενές μέσο. (β) Ένα χωρητικό πλέγμα μεταλλικών λωρίδων σε ομοιογενή ξενιστή . Τα μεταλλικά μέρη έχουν γκρι χρώμα.....	30
Εικόνα 7(a) Το μοντέλο γραμμής μετάδοσης για ένα χωρητικό πλέγμα λωρίδων ή μια σειρά από patches σε ελεύθερο χώρο. (b) Το μοντέλο γραμμής μεταφοράς για μια επιφάνεια υψηλής αντίστασης που περιλαμβάνει ένα πλέγμα χωρητικών λωρίδων ή μια σειρά από patches πάνω από μια διηλεκτρική πλάκα με μεταλλική βάση.	31
Εικόνα 8: Ο συντελεστής ανάκλασης TE- TM έναντι της γωνίας πρόσπτωσης για μια σειρά από τετράγωνα patches. Οι διαστάσεις του πλέγματος είναι οι εξής: $D = \lambda/15$ και $w = D/15$. Η RH αντιστοιχεί στα αποτελέσματα σύμφωνα με το μοντέλο του C. L. Holloway	33
Εικόνα 9: Μια δομή υψηλής αντίστασης που αποτελείται από μια σειρά από patches πάνω από μια διηλεκτρική πλάκα με μεταλλική βάση.....	34
Εικόνα 10: Διάγραμμα φάσης ανάκλασης για TE-πολωμένα προσπίπτοντα πεδία για επιφάνεια υψηλής αντίστασης που αποτελείται από χωρητικές ταινίες για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Οι παράμετροι της επιφάνειας υψηλής σύνθετης αντίστασης είναι οι εξής: $D = 3\text{mm}$, $w = 0,4\text{mm}$, $d = 15\text{mm}$, και $\epsilon_r = 10.2$	35
Εικόνα 11: Διάγραμμα φάσης ανάκλασης για TM-πολωμένα προσπίπτοντα πεδία για επιφάνεια υψηλής σύνθετης αντίστασης που αποτελείται από χωρητικά ταινίες για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Οι παράμετροι της επιφάνειας υψηλής σύνθετης αντίστασης είναι οι εξής: $D = 3\text{mm}$, $w = 0,4\text{mm}$, $d = 15\text{mm}$, και $\epsilon_r = 10.2$	35
Εικόνα 12: Διάγραμμα φάσης ανάκλασης για TE-πολωμένο προσπίπτον πεδίο για επιφάνεια υψηλής σύνθετης αντίστασης που αποτελείται από τετράγωνα patches. $D=3\text{mm}$ $w=0.4\text{mm}$ $d=0.15\text{mm}$ $\epsilon_r=10.2$	36
Εικόνα 13: Φάση ανάκλασης για πολωμένο προσπίπτον πεδίο TM για επιφάνεια υψηλής σύνθετης αντίστασης που αποτελείται από τετράγωνα patches για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. $D=3\text{mm}$ $w=0.4\text{mm}$ $d=0.15\text{mm}$ $\epsilon_r=10.2$	36
Εικόνα 14: Η απορροφητική δομή. Δεν υπάρχουν ενσωματωμένα μεταλλικά πτερύγια στο υπόστρωμα.....	37
Εικόνα 15: Συντελεστές ανάκλασης ισχύος για τις γωνίες πρόσπτωσης $0^\circ, 15^\circ$ και 40° για TE. Με παραμέτρους Absorber : $D = 4.5\text{mm}$, $w = 0.2\text{mm}$, $h = 2.5\text{mm}$, and $\epsilon_r = 9(1 - j0365)$	38
Εικόνα 16: Συντελεστές ανάκλασης ισχύος για τις γωνίες πρόσπτωσης $0^\circ, 15^\circ$ και 40° για TM. Με παραμέτρους Absorber : $D = 4.5\text{mm}$, $w = 0.2\text{mm}$, $h = 2.5\text{mm}$, and $\epsilon_r = 9(1 - j0365)$	38
Εικόνα 17: Δομή RIS	39
Εικόνα 18: Παράδειγμα Grating	44
Εικόνα 19 : Φάση και πλάτος M/E beam steering	44
Εικόνα 20: Διάγραμμα ακτινοβολίας Beam Steering	45
Εικόνα 21: Πρώτο κομμάτι απόδειξης Beam Splitting FF2FF (Φάση & Πλάτος).....	45
Εικόνα 22 : Πρώτο κομμάτι απόδειξης Beam Splitting FF2FF (Διάγραμμα ακτινοβολίας)	46
Εικόνα 23:Δεύτερο κομμάτι απόδειξης Beam Splitting FF2FF (Φάση & Πλάτος)	46
Εικόνα 24: Δεύτερο κομμάτι απόδειξης Beam Splitting FF2FF (Διάγραμμα ακτινοβολίας).....	47
Εικόνα 25: Φάση και Πλάτος Beam Splitting (FF2FF)	47

Εικόνα 26 : Διάγραμμα Beam Splitting 2 δέσμεων	48
Εικόνα 27: Φάση και Πλάτος Beam Splitting σε 3 λοβούς	48
Εικόνα 28: Διάγραμμα ακτινοβολίας Beam Splitting 3 λοβών.....	49
Εικόνα 29: Διάγραμμα ακτινοβολίας για diffused scattering	50
Εικόνα 30: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για σφαιρικό κύμα (NF2FF).....	51
Εικόνα 31: Διάγραμμα ακτινοβολίας σφαιρικού κύματος για Beam Steering	52
Εικόνα 32: Φάση και πλάτος επιπλέον μονής δέσμης σφαιρικού.....	52
Εικόνα 33: Διάγραμμα ακτινοβολίας επιπλέον μονής δέσμης σφαιρικού.....	53
Εικόνα 34: Προφίλ φάσης και πλάτους M/E για σφαιρικό προσπίπτον για Beam Splitting	53
Εικόνα 35: Διάγραμμα ακτινοβολίας σφαιρικού κύματος για Beam Splitting.....	54
Εικόνα 36: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για diffused scattering σφαιρικού προσπίπτοντος.....	54
Εικόνα 37: Διάγραμμα ακτινοβολίας για diffused scattering σφαιρικού κύματος	55
Εικόνα 38: Αναπαράσταση Μεταεπιφάνειας με on-axis focus.....	56
Εικόνα 39: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για on-axis focusing (FF2NF)	56
Εικόνα 40: Διαγράμματα ακτινοβολίας on-axis μονής εστίασης στο XY και XZ επίπεδο	57
Εικόνα 41: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για off-axis focus.....	57
Εικόνα 42: Διαγράμματα ακτινοβολίας σε πεδίο XY και XZ για off-axis focus.....	58
Εικόνα 43: Φάση και πλάτος Μεταεπιφάνειας για NF2NF εστίασης.....	59
Εικόνα 44: Διάγραμμα ακτινοβολίας για σφαιρικό κύμα στο κοντινό πεδίο	59
Εικόνα 45: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για εστίαση σφαιρικού σε κοντινό πεδίο	59
Εικόνα 46: Διάγραμμα ακτινοβολίας spot-diagram για σφαιρικό κύμα	60
Εικόνα 47: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για εστίαση σφαιρικού κύματος πολύ κοντά στην μεταεπιφάνεια	60
Εικόνα 48: Διάγραμμα ακτινοβολίας για εστίαση σφαιρικού κύματος πολύ κοντά στην μεταεπιφάνεια	60
Εικόνα 49: Διαφορά φάσης σε σημείο της μεταεπιφάνειας σε σχέση με σημείο αναφοράς	63
Εικόνα 50: Υπολογισμένο προφίλ φάσης grating και standard πλάτος μεταεπιφάνειας	64
Εικόνα 51 : Διάγραμμα ακτινοβολίας για beam steering επίπεδου κύματος σε $(\theta,\varphi)=(60,90)$	64
Εικόνα 52: Φάση και πλάτος επίπεδου κύματος ανακατεύθυνσης δέσμης	65
Εικόνα 53: Διάγραμμα ανακατεύθυνσης δέσμης επίπεδου κύματος 175GHz σε $(45,135)$	65
Εικόνα 54: Προφίλ φάσης και πλάτους μεταεπιφάνειας για ανακατεύθυνση δέσμης σφαιρικού κύματος	66
Εικόνα 55: Διάγραμμα ακτινοβολίας για ανακατεύθυνση δέσμης σφαιρικού κύματος σε $(\theta,\varphi)=(30,270)$	67
Εικόνα 56: Προφίλ φάσης και πλάτους μεταεπιφάνειας για ανακατεύθυνση δέσμης σφαιρικού κύματος	67
Εικόνα 57: Διάγραμμα ακτινοβολίας για ανακατεύθυνση δέσμης σφαιρικού κύματος σε $(\theta,\varphi)=(60,150)$	68
Εικόνα 58: Φάση και Πλάτος μεταεπιφάνειας για beam splitting 2 λοβών επίπεδου κύματος σε $(\theta,\varphi)=(45,90)$ και $(\theta,\varphi)=(30,240)$	69
Εικόνα 59: Διάγραμμα ακτινοβολίας beam splitting 2 λοβών επίπεδου κύματος σε $(\theta,\varphi)=(45,90)$ και $(\theta,\varphi)=(30,240)$	69
Εικόνα 60: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για διάσπαση δέσμης σε 3 λοβούς για επίπεδο προσπίπτον	70
Εικόνα 61: Διάγραμμα ακτινοβολίας beam splitting 3 λοβών για επίπεδο κύμα	70
Εικόνα 62: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για beam splitting 3 λοβών σφαιρικού κύματος ..	71
Εικόνα 63: Διάγραμμα ακτινοβολίας για beam splitting 3 λοβών από σφαιρικό κύμα.....	71
Εικόνα 64: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για diffused scattering επίπεδου κύματος.	72
Εικόνα 65: Διάγραμμα ακτινοβολίας για diffused scattering επίπεδου κύματος.....	72
Εικόνα 66: Φάση και πλάτος σφαιρικού κύματος για diffused scattering.....	73

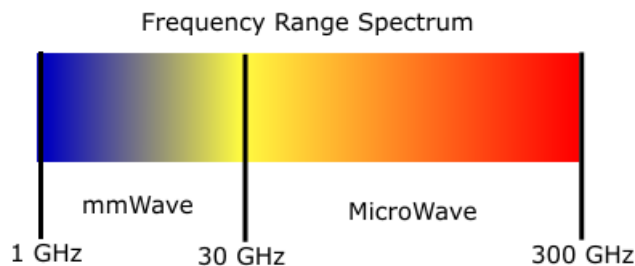
Εικόνα 67: Διάγραμμα ακτινοβολίας για diffused scattering σφαιρικού κύματος	73
Εικόνα 68: Φάση και Πλάτος μεταεπιφάνειας για focusing σε $f = 4.87 * \lambda$	74
Εικόνα 69: Διάγραμμα ακτινοβολίας XY και XZ πεδίου για focusing στα 280 GHz.....	75
Εικόνα 70: Διάγραμμα λειτουργίας του αλγόριθμου Gerchberg – Saxton.....	76
Εικόνα 71: Point Cloud που θέλουμε να αναπαράγουμε στο Image/Focal Plane και μετατροπή σε πλάτος.	76
Εικόνα 72: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας στην έναρξη του αλγόριθμου Gerchberg – Saxton.	77

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε στο χρονικό διάστημα Μαρτίου 2023 έως τον Ιούνιο 2024. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας επικεντρώθηκα στην κατανόηση, ανάλυση και τελικά στην σχεδίαση μεταεπιφανειών με βάσεις που μου δόθηκαν από τα μαθήματα Συστήματα Κεραιών & Ασύρματη Διάδοση, Φωτονική - Οπτικές Διατάξεις και της Οπτικής. Σκοπός της ήταν η εξήγηση και κατανόηση των μεταεπιφανειών αλλά και τον διάφορων λειτουργιών τους στο πλαίσιο των μικροκυματικών και χιλιοστομετρικών συχνοτήτων.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες η ραγδαία εξέλιξη του τεχνολογικού τομέα, και πιο συγκεκριμένα των ασύρματων τηλεπικοινωνιών, σε συνδυασμό με το όλο και αυξανόμενο ενδιαφέρον του κοινού για καινοτόμα προϊόντα έχει οδηγήσει στην αναζήτηση αποδοτικότερων μοντέλων για την χρήση των καναλιών μήκους κύματος για την μετάδοση δεδομένων. Η αποδοτικότητα αυτή μπορεί να επιτευχθεί με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, μείωση της καθυστέρησης (latency) ή/και των απωλειών διαδρομής (path loss) οι οποίοι αποτελούν τομείς που προκαλούν και βελτιώνουν τα ασύρματα δίκτυα. Τα συμβατικά υλικά και διατάξεις, πλησιάζουν όλο και περισσότερο στο όριο της χρησιμότητας τους για την βελτίωση των μοντέλων αυτών καθώς απομακρύνονται όλο και περισσότερο από τις υψηλές απαιτήσεις, ειδικά στο φάσμα των χιλιοστομετρικών και μικροκυματικών (mmWave) συχνοτήτων. Αυτή η ανάγκη εύρεσης καινούργιων υλικών και διατάξεων οδήγησε στην εμφάνιση των μετα-υλικών (metamaterials) [1],[2] και κατ' επέκταση των μεταεπιφανειών (metasurfaces), τα οποία προσφέρουν πρωτοποριακές λύσεις για τον έλεγχο διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο εύρος των χιλιοστομετρικών (30-300 GHz) και μικροκυματικών συχνοτήτων (1-30 GHz), όπως είναι η τέλεια απορρόφηση σε μικρό ή ευρύ φάσμα, η ανακατεύθυνση δέσμης (beam steering) σε ένα ή περισσότερους λοβούς (beam splitting), και γενικότερα οι τεχνικές προσαρμογής του διαγράμματος ακτινοβολίας (beamforming). Εφαρμογές των μεταεπιφανειών υπάρχουν σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες, στην περιοχή των THz και των οπτικών κυμάτων, όπου συχνά συναντάμε την ολογραφία και γενικότερα τα περιθλαστικά οπτικά (diffractive optics). Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να αξιοποιήσει τεχνικές από την περιοχή της οπτικής (π.χ., θεωρία περίθλασης) και να τις προσαρμόσει και αναπτύξει στην περίπτωση των μεταεπιφανειών για χαμηλότερες συχνότητες.



Εικόνα 1: Φάσμα χιλιοστομετρικών & μικροκυματικών συχνοτήτων

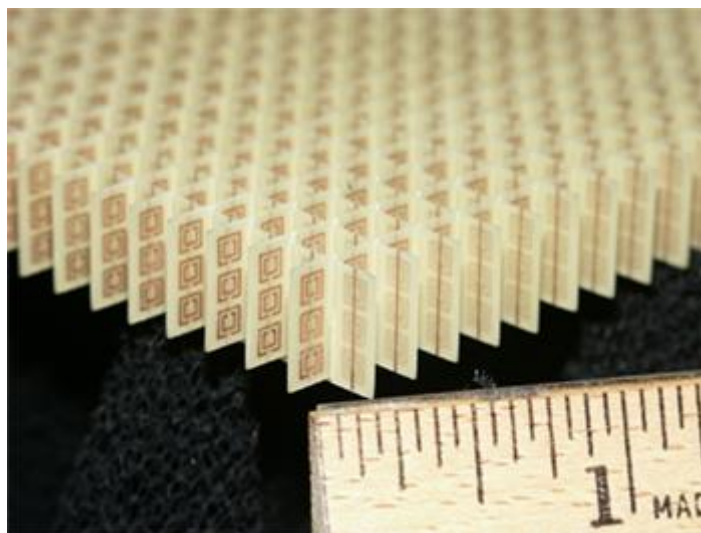
Τα μετα-υλικά είναι τεχνητά υλικά με μικροδομή μικρότερη του μήκους κύματος (subwavelength) που έχουν σχεδιαστεί για να παρουσιάζουν ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες που δεν μπορούν να εντοπιστούν στα φυσικά υλικά [1]. Αυτά τα καινοτόμα υλικά παρουσιάζουν ασυνήθιστες ή 'εξωτικές' μακροσκοπικές ιδιότητες όπως αρνητικό συντελεστή ανάκλασης, ικανότητες απεικόνισης στο κοντινό και μακρινό πεδίο (Near-field & Far-field Imaging) τα οποία αποτελούν το superlensing [3] και την ηλεκτρομαγνητική απόκρυψη (cloaking) μέσω ειδικής διάταξης των κελιών μικρότερου του μήκους κύματος. Οι μεταεπιφάνειες αποτελούν τη δισδιάστατη εκδοχή των μετα-υλικών και αποτελούν μια υπερβολικά λεπτή πλατφόρμα με την ικανότητα να αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με εξαιρετική ευελιξία και ακρίβεια, πράγμα που τις κάνει ιδανικές για πλήθος εφαρμογών. Στον τομέα των ασύρματων τηλεπικοινωνιών τα υλικά αυτά στοχεύουν στην βελτιστοποίηση του σχεδιασμού κεραιών στην ενίσχυση της ποιότητας του σήματος και γενικότερα επιτρέπουν την δυναμική διαμόρφωση δέσμης (beamforming) βελτιώνοντας έτσι την απόδοση όσο και την χωρητικότητα των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Ωστόσο για την πειραματική απόδειξη αυτών των αποτελεσμάτων αναγκαία ήταν η σταδιακή μελέτη από την θεωρία στην σταδιακή

ανάδειξη των αποτελεσμάτων από μαθηματικά μοντέλα τόσο για την θεωρητική αναπαράσταση όσο για την φυσική υλοποίηση των μετα-υλικών και μεταεπιφανειών. Βασικό προϊόν αυτής της χρόνιας έρευνας αποτελούν οι στατικές μεταεπιφάνειες που αναφέρονται σε χαμηλές συχνότητες (ραδιοκύματα) και οι μέτα-φακοί και τα μέτα-κάτοπτρα (meta-lens/mirror) που χρησιμοποιούνται στο οπτικό και στο ορατό φάσμα. Ωστόσο, το κύριο αντικείμενο με τα περισσότερα οφέλη που έχει κεντράρει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας είναι οι ολογραφικές και οι επαναπρογραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες, λόγω της πολυλειτουργικότητας που μπορούν δυνητικά να προσφέρουν, που μειώνει το κόστος ανάπτυξης μια τεχνολογίας σε εμπορικές εφαρμογές.

1.1 Μετα-υλικά και μετα-επιφάνειες: Ιστορική αναδρομή

1.1.1 Μετα-υλικά

Τα μετα-υλικά, τεχνικά κατασκευασμένα υλικά με ηλεκτρομαγνητικές ικανότητες που δεν παρουσιάζονται σε φυσικά υλικά, γνωστά αρχικά ως αριστερόχειρα υλικά (LHM), έχουν εξελιχθεί σημαντικά μετά την πρώτη τους θεωρητική ‘ανακάλυψη’. Στα τέλη της δεκαετίας του 1960, ο φυσικός Victor Vesalago έκανε τον ισχυρισμό ότι υλικά με ταυτόχρονα αρνητική διαπερατότητα (permeability) και επιτρεπτότητα (permittivity) είναι θεωρητικά εφικτά, προβλέποντας φαινόμενα όπως την αρνητική διάθλαση [4]. Αυτή η ιδέα παρέμεινε σε θεωρητικό επίπεδο μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990 όπου ο επιστήμονας John Pendry παρουσίασε σχέδια για μικροκυματικές συχνότητες χρησιμοποιώντας συντονιστές χωρισμένου δακτύλιου (split-ring resonators) και δίπολα, ανοίγοντας τον δρόμο για πρακτικές εφαρμογές. Η επιβεβαίωση της θεωρίας του Pendry καταφτάνει το 2005 από τον David R. Smith με την πειραματική επίδειξη των υλικών με αρνητικό ισοδύναμο δείκτη διάθλασης στις μικροκυματικές συχνότητες. Οι ηλεκτρομαγνητικές τους ιδιότητες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωμετρική δομή τους που είναι μικρότερη του μήκους κύματος (subwavelength structure) σε συνδυασμό με το είδος υλικού που χρησιμοποιείται, παρέχοντας έτσι τις επιθυμητές επιπτώσεις στο προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα [1].



Εικόνα 2: Split-ring resonators του John Pendry

1.1.2 Μεταεπιφάνειες

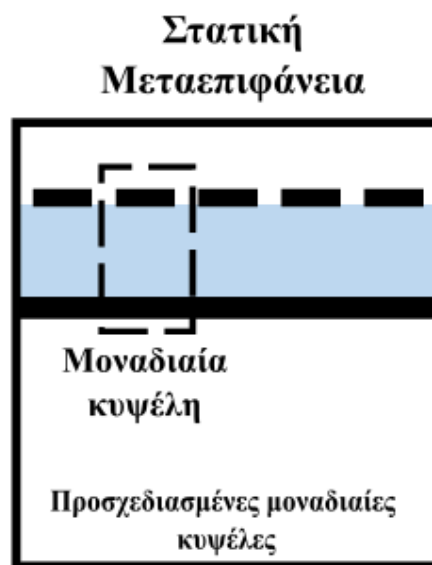
Η πρόοδος της καινούργιας τεχνολογίας βοήθησε με την άνθιση νέων ερευνών που οδήγησαν στην χρήση τους σε εφαρμογές superlensing, cloaking και σε προηγμένες τεχνολογίες κεραιών [5]. Η αυξημένη δυσκολία κατασκευής τρισδιάστατων δομών από micro και nano επίπεδα, την δεκαετία του 2010 οδήγησε στη δημιουργία των μεταεπιφανειών, το δυσδιάστατο ανάλογο των τρισδιάστατων

μετα-υλικών, παρέχοντας την δυνατότητα διαμόρφωσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με μεγάλη ακρίβεια μέσω υπερβολικά λεπτών επιφανειών. Από την πρώτη εμφάνιση των μεταεπιφανειών που διέθεταν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για την διάπλωση ενός κύματος για μία συγκεκριμένη λειτουργία όπως είναι η υπέρθεση ή ο διασκορπισμός ακτινών, το συνεχές ενδιαφέρον για αυτή την τεχνολογία μας οδήγησε στις αναδιαμορφώσιμες και προγραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες (reconfigurable/programmable metasurfaces) οι οποίες είναι πολλά υποσχόμενες για τις προόδους που θα σημειωθούν στην τομέα των τηλεπικοινωνιών αλλά και γενικότερα σε όλους τους τομείς τεχνολογίας. Οι ισοδύναμες ιδιότητες της επιτρεπτότητας, διαπερατότητας και του δείκτη διάθλασης ωστόσο αποτελούν χαρακτηριστικά συμπαγών τρισδιάστατων υλικών. Για αυτό, οι μεταεπιφάνειες συνήθως μοντελοποιούνται με την ισοδύναμη μιγαδική επιφανειακή αντίσταση ή αγωγιμότητά τους.

1.2 Στατικές μεταεπιφάνειες

1.2.1 Επισκόπηση στατικών μεταεπιφανειών

Οι στατικές μεταεπιφάνειες αποτελούν την πιο γνωστή και ευρέως διαδεδομένη μορφή μεταεπιφάνειας. Είναι λεπτές, δισδιάστατες και συνήθως επίπεδες επιφάνειες των οποίων τα δομικά στοιχεία που λέγονται μοναδιαία κελία ή κυψέλες (unit cells) ή μέτα-άτομα (meta-atoms), είναι περιοδικά διατεταγμένα, μικρότερα και λεπτότερα από το μήκος κύματος και έχουν σχεδιαστεί με συγκεκριμένες στατικές ισοδύναμες ιδιότητες για την αλληλεπίδρασή τους με τα ΗΜ κύματα. Η κατασκευή τους αναφέρεται στην διευθέτηση ενός συνόλου σκεδαστών [6] όπως θα παρατηρήσουμε και σε αργότερα κεφάλαια, π.χ., μεταλλικών «μπαλωμάτων» (patches) και «λωρίδων» (stripes) στις μικροκυματικές συχνότητες, με σκοπό να προκαλέσουν απότομες αλλαγές στην φάση του προσπίπτοντος κύματος επιτρέποντας την αλλαγή του πλάτους, της φάσης αλλά και της πόλωσης του από την μεταεπιφάνεια ειδικά στις χιλιοστομετρικές και μικροκυματικές συχνότητες (mmWave).



Εικόνα 3 : Αναπαράσταση στατικής μεταεπιφάνειας

1.2.2 Οφέλη στις τηλεπικοινωνίες

Οι στατικές μεταεπιφάνειες, στις μικροκυματικές και χιλιοστομετρικές συχνότητες, συμβάλουν σημαντικά στον τομέα των ασύρματων τηλεπικοινωνιών. Οι επιφάνειες υψηλής αντίστασης (High Impedance Surfaces) [7], που αποτελούν υποκατηγορία των στατικών μεταεπιφανειών, είναι σημαντικές για την βελτίωση της αποδοτικότητας των κεραιών μέσω της μείωσης παρεμβολών και των απωλειών, οδηγώντας σε μεγαλύτερο κέρδος ή μεγαλύτερη αποδοτικότητα ανοίγματος σε

συστήματα ασύρματης τηλεπικοινωνίας. Η δυνατότητα ελέγχου των σκεδαζόμενων από μια μεταεπιφάνεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με ακρίβεια ανοίγει το πεδίο για την παραγωγή κεραιών και τεχνικών ανακατεύθυνσης κυρίως λοβού (beamforming) προηγμένης τεχνολογίας βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα του σήματος και αυξάνοντας την χωρητικότητα των συστημάτων επικοινωνιών. Επιπλέον οι στατικές μεταεπιφάνειες κάνουν δυνατή την παραγωγή πιο αποδοτικών μοντέλων ηλεκτρομαγνητικών απορροφητών (absorbers) που μετριάζουν τις ανεπιθύμητες ανακλάσεις και παρεμβολές βελτιστοποιώντας την απόδοση αλλά ταυτόχρονα προστατεύοντας ευαίσθητων ηλεκτρικών εξοπλισμών [8]. Είναι εξαιρετικά αποδοτική στις μικροκυματικές συχνότητες (mmWave), όπου τα συμβατικά υλικά έχουν περιορισμένη χρησιμότητα, εξασφαλίζοντας καλύτερη ποιότητα σήματος και μειωμένο θόρυβο σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων όπως τα ραντάρ και τα ασύρματα δίκτυα. Ο συμπαγής (compact) και ελαφρύς σχεδιασμός τους διευκολύνει ακόμα περισσότερο στην ενσωμάτωση σε σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές συσκευές, ενισχύοντας τη συνολική αποδοτικότητα και ευελιξία του δικτύου.

1.2.3 Οφέλη στην απεικόνιση

Στον τομέα της απεικόνισης (imaging) και ανίχνευσης/εντοπισμού με χρήση ΗΜ κυμάτων (radar/lidar), οι στατικές μεταεπιφάνειες είναι σημαντικές καθώς δίνουν την δυνατότητα υψηλότερης ευκρίνειας που ξεπερνά τις ικανότητες των συμβατικών υλικών και διατάξεων, π.χ., για σύνθεση φακών ή κεραιών. Μέσω της δομής τους σε κλίμακα μικρότερη από αυτή του μήκους κύματος (subwavelength) και τον ακριβή έλεγχο του προφίλ φάσης σε κάθε κελί, οι μεταεπιφάνειες επιτρέπουν υπερβολικά λεπτά και ελαφριά συστήματα απεικόνισης με υψηλή ακρίβεια. Αυτού του είδους οι μεταεπιφάνειες κάνουν πιο ευέλικτο τον έλεγχο του beamforming και ιδιαίτερα στις χιλιοστομετρικές (mmWave) και μικροκυματικές συχνότητες (microwave), με τις οποίες ασχολούμαστε σε αυτή τη διπλωματική, επιτρέποντας έλεγχο των λοβών κυρίως λοβού υπό διαφορετικές συχνότητες [2]. Πιο συγκεκριμένα, μελετώντας και τις προαναφερθείσες υποκατηγορίες των στατικών μεταεπιφανειών τους απορροφητές (absorbers) και τις επιφάνειες υψηλής αντίστασης (HIS), μπορούμε να σημειώσουμε και άλλες βελτιώσεις στον τομέα του imaging. Οι absorbers, με την ικανότητά τους να εντοπίζουν και να απορροφούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, μειώνουν τις ανακλάσεις βελτιώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την ανάλυση των εικόνων που καταγράφονται από διάφορα οπτικά συστήματα [8] ενώ οι HIS βελτιώνουν το κέρδος, το εύρος ζώνης ή/και την αποδοτικότητα των κεραιών μειώνοντας τις παρεμβολές [7]. Τα χαρακτηριστικά τους αυτά καθιστούν τις στατικές μεταεπιφάνειες χρήσιμες σε διάφορες εφαρμογές της απεικόνισης όπως π.χ., τα ιατρικά διαγνωστικά τεστ (διατάξεις MRI), κάμερες σε κυκλώματα ασφαλείας χώρων, συστήματα πλοήγησης για μη-επανδρωμένα οχήματα (π.χ. UAV drones), και επιστημονικά όργανα ακριβείας (π.χ. ραδιοτηλεσκόπια). Ο συμπαγής σχεδιασμός τους διευκολύνει και την ενσωμάτωσή τους σε φορητές συσκευές πράγμα που ενισχύει τις δυνατότητες της επίπτωσης τους στην ανάπτυξη τεχνολογιών απεικόνισης υψηλής απόδοσης.

1.2.4 Περιορισμοί

Παρόλα τα οφέλη τους σε πολλές περιοχές της ηλεκτρικής και ηλεκτρονικής τεχνολογίας, οι στατικές μεταεπιφάνειες παρουσιάζουν διάφορους φραγμούς που περιορίζουν το εύρος χρήσης τους. Η πιο σημαντική πρόκληση που αντιμετωπίζουν είναι η «η τελικοποίηση» μετά την κατασκευή τους, πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορούν να προσαρμοστούν στις αλλαγές που μπορούν να συμβούν σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον λειτουργίας (π.χ., χρήστες κινητών που περπατούν) ή στην μετατροπή των απαιτήσεων ενός συστήματος (π.χ., ανάπτυξη νέας ζώνης συχνοτήτων από κάποιον πάροχο). Για να γίνουν τα παραπάνω, θα απαιτούνταν μηχανικός έλεγχος/κίνησή τους, ή απομάκρυνση και αλλαγή τους με στατική μεταεπιφάνεια που διαθέτει τις νέες απαιτούμενες ιδιότητες. Αυτή η στατικότητα τους τα καθιστά περιοριστικά σε δυναμικά περιβάλλοντα που απαιτούν δυνατότητα αναδιαμόρφωσης (reconfiguration) σε σχεδόν ζωντανό χρόνο (real-time, live). Σε συνδυασμό με το

υψηλό κόστος και την περιπλοκότητα κατασκευής όπως η Λιθογραφία με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron-Beam Lithography) και η λιθογραφία νανοαποτύπωσης (Nanoimprint Lithography) καθιστούν την ευρεία παραγωγή και χρήση τους πιο επιβαρυντική από ότι χρήσιμη. Ένα ακόμα μειονέκτημα των στατικών μεταεπιφανειών αποτελεί και το περιορισμένο εύρος συχνότητας λειτουργίας (bandwidth) τους, πράγμα το οποίο καλεί στην παραγωγή πολλαπλών και ειδικά εξατομικευμένων μεταεπιφανειών ανάλογα την ανάγκη χρήσης. Η απαίτηση αυτή περιπλέκει περαιτέρω την διαδικασία ένταξής τους και αυξάνει δραματικά την περιπλοκότητα των τηλεπικοινωνιακών και συστημάτων απεικόνισης [9].

1.3 Ολογραφικές και αναπρογραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες

1.3.1 Αναπρογραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες και μηχανισμοί

Οι αναπρογραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες (reconfigurable intelligent surfaces, RIS) αποτελούν μια σημαντική πρόοδο για τον έλεγχο ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και αποτελούν την λογική εξέλιξη των στατικών μεταεπιφανειών, με βασικό τους χαρακτηριστικό την ικανότητα να αλλάζουν τις ιδιότητές τους ανάλογα με τις αλλαγές που συμβαίνουν στο περιβάλλον τους βάσει της κατασκευής τους που αποτελείται από στατικά και ελεγχόμενα ή ενεργά υλικά [10]. Σε αντίθεση με τον στατικό ομόλογό τους που διατηρεί τις ιδιότητες με τις οποίες κατασκευάστηκε, αυτές οι προηγμένες μεταεπιφάνειες έχουν την ικανότητα ελέγχου των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε πραγματικό χρόνο με την βοήθεια τεχνολογιών διακύμανσης όπως, η ηλεκτρονική διακύμανση μέσω στοιχείων ρύθμισης τάσης, θερμικής διακύμανσης χρησιμοποιώντας θερμικά ευαίσθητα υλικά και οπτικής διακύμανσης με την αξιοποίηση του φωτός για την μεταβολή φωτοευαίσθητων εξαρτημάτων [11]. Αυτή η ικανότητα των αναπρογραμματιζόμενων μεταεπιφανειών παρέχει πλεονεκτήματα στις μικροκυματικές και χιλιοστομετρικές συχνότητες (mmWave), όπου ο ακριβής έλεγχος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι απαραίτητος για εφαρμογές όπως η δυναμική στρέψη δέσμης του κυρίως λοβού (beam steering), ο διαχωρισμός δέσμης (beam splitting), τα αυτό-προσαρμοζόμενα συστήματα φακών (adaptive optics) και η ολογραφία (holography) [2], [11]. Η ανάπτυξη επαναπρογραμματιζόμενων μεταεπιφανειών είναι έτοιμη να βελτιώσει ένα ευρύ φάσμα τομέων, παρέχοντας πρωτοφανή ευελιξία και ακρίβεια σε διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές.

1.3.2 Ολογραφικές μεταεπιφάνειες

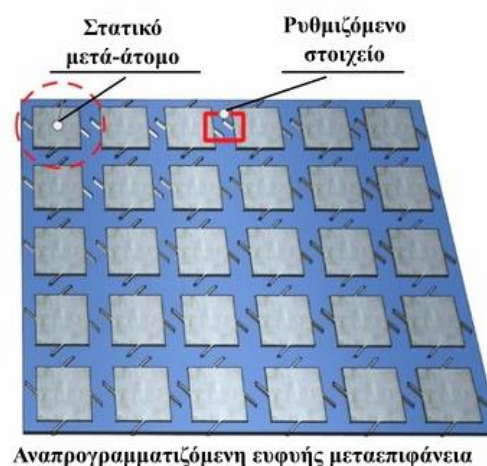
Οι συμβατές ολογραφικές μεταεπιφάνειες αποτελούν προηγμένες οπτικές συσκευές που χειρίζονται το φως για την δημιουργία υψηλής ανάλυσης, τρισδιάστατες ολογραφικές εικόνες. Ο όρος του ολογράμματος αναφέρεται σε μία διάταξη που είναι ικανή να προβάλει στον 3D χώρο εικόνες, μέσω συμβολής των περιθλώμενων από αυτήν κυμάτων, εφόσον «φωτιστεί» με κατάλληλης συχνότητας σύμφωνο ΗΜ κύμα. Το ολόγραμμα γενικεύει την έννοια της φωτογραφίας (που καταγράφει μόνο την ένταση του ΗΜ κύματος) και αποτελείται από φαινομενικά τυχαία μοτίβα/προφίλ φάσης και έντασης στην επιφάνειά του [12]. Τα ολογράμματα που υλοποιούνται με μετά-επιφάνειες έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν με ακρίβεια το πλάτος, την φάση αλλά και την πόλωση του φωτός με σκοπό τη δημιουργία περίπλοκων ολογραμμάτων [10]. Σε γενικές γραμμές, η διαμόρφωση και η παρουσίαση αυτών των ολογραμμάτων από την μεταεπιφάνεια, απαιτεί την χρήση αλγόριθμων ολογραφίας που παράχθηκαν από υπολογιστή (computer generated holography, CGH) για τον υπολογισμό των μαθηματικών δεδομένων από την ανάλυση της ολογραφίας και του αντικειμένου που θέλουμε να αναπαράγουμε που στη συνέχεια κωδικοποιούνται σε φυσικά μέσα, με σκοπό την παραγωγή της μεταεπιφάνειας με το επιθυμητό ολόγραμμα.

Στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες, οι εφαρμογές των ολογραφικών μετά-επιφανειών περιλαμβάνουν προηγμένο σχηματισμό δέσμης (beamforming) σε δισδιάστατο χώρο (2D) μακριά

από τον σκεδαστή (farfield), ή εστίαση δέσμης (focusing) σε σημείο του κοντινού τρισδιάστατου χώρου (3Δ) (nearfield), με υψηλή ανάλυση, βελτιώνοντας την ποιότητα και την κάλυψη της επικοινωνίας. Οι ολογραφικές μεταεπιφάνειες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ασφαλών καναλιών επικοινωνίας με την ενσωμάτωση περίπλοκων, δύσκολα αναπαραγόμενων μοτίβων που προστατεύουν την ακεραιότητα των δεδομένων. Επιπλέον, βελτιώνουν τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και την αποδοτικότητα του εύρους ζώνης βελτιστοποιώντας τη χρήση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η δυνατότητα συντονισμού και αναδιαμόρφωσης αυτών των μεταεπιφανειών τις καθιστά προσαρμόσιμες για δυναμικά περιβάλλοντα δικτύων, βελτιώνοντας την επεξεργασία σήματος και μειώνοντας τις παρεμβολές, αναδεικνύοντας έτσι τις πολλά υποσχόμενες δυνατότητές τους στη σύγχρονη τεχνολογία τηλεπικοινωνιών [10], [11], [12].

1.3.3 Αναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες

Οι RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces) αποτελούν ένα κράμα των παραπάνω τύπων μεταεπιφανειών και αποτελούν κέντρο ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας σε όλες τις περιοχές του ΗΜ φάσματος. Είναι μια τεχνολογία αιχμής που αξιοποιεί μεταεπιφάνειες που χαρακτηρίζονται από τοπικά και συνεχώς ρυθμιζόμενη (local and continuously tunable) τοπική επιφανειακή αντίσταση (surface impedance) για τον ακριβή έλεγχο των σκεδαζόμενων από αυτή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Με τον όρο «έξυπνη/αναδιαμορφώσιμη» χαρακτηρίζουμε κάθε μεταεπιφάνεια που μπορεί να πραγματοποιήσει πολλαπλές ρυθμιζόμενες λειτουργίες με την επιθυμητή απόκριση να ελέγχεται από έναν υπολογιστή που ελέγχει τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες της κάθε μικροδομής της μεταεπιφάνειας [13]. Τροποποιώντας δυναμικά τα χαρακτηριστικά του μετώπου κύματος, όπως η φάση, το πλάτος, η πόλωση αλλά και οι γωνίες πρόσπτωσης, οι RIS επιτρέπουν ένα ευρύ φάσμα αναδιαμορφώσιμων λειτουργιών που είναι απαραίτητες για τις σύγχρονες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας. Η ικανότητα αυτή επιτρέπει την προηγμένη διαμόρφωση δέσμης, την ενίσχυση της ισχύος και της κάλυψης του σήματος, τη μείωση της εξασθένισης πολλαπλών διαδρομών και τον μετριασμό των παρεμβολών, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά την απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας. [13]. Με τον όρο «έξυπνη», εννοούμε πως η RIS περιέχει (ή είναι συνδεδεμένη με) κατάλληλο δίκτυο αισθητήρων ή κεραιών, που της επιτρέπουν να «αισθάνεται» την κατάστασή της και, αν γίνεται, να ανιχνεύει κάποια χαρακτηριστικά από το προσπίπτον σε αυτήν κύμα (π.χ., συχνότητα, κατεύθυνση ή θέση, πόλωση). Η ιδιότητες της αναπροσαρμογής και της «έξυπνάδας» καθιστούν τις RIS ιδανικές για την τρέχουσα τάση της από κοινού ανίχνευσης και επικοινωνίας (integrated sensing and communication, ISAC), που είναι πολλά υποσχόμενη στα δίκτυα νέας γενιάς (6G).



Εικόνα 4: σχέδιο γενικής RIS

Η τεχνολογία RIS ξεχωρίζει για την ικανότητά της να προσαρμόζεται απρόσκοπτα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου και στις απαιτήσεις των χρηστών χωρίς πρόσθετους πομπούς ή αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Αυτή η προσαρμοστικότητα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα και πολύπλοκους εσωτερικούς χώρους, όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι επικοινωνίας αντιμετωπίζουν προκλήσεις. Η ενσωμάτωση των RIS στα δίκτυα επικοινωνιών υπόσχεται σημαντικές βελτιώσεις στη φασματική και ενεργειακή απόδοση, ανοίγοντας το δρόμο για εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης και χαμηλής κατανάλωσης, βασικά στοιχεία των μελλοντικών δικτύων 5G και όχι μόνο. Παρέχοντας μηχανισμούς για λεπτομερή έλεγχο και ευελιξία, οι RIS αντιπροσωπεύουν μια «μετασχηματιστική» (transforamntive) πρόοδο στις τηλεπικοινωνίες, προσφέροντας σημαντικές δυνατότητες για την επανάσταση στην ασύρματη συνδεσιμότητα και τη διαχείριση δικτύων.

Κεφάλαιο 2: Ανάλυση και σχεδίαση σε επίπεδο μοναδιαίου κελιού

Αφού παρουσιάσαμε τις θεμελιώδεις έννοιες και τις ιδιαίτερες ιδιότητες των μεταεπιφανειών στο προηγούμενο κεφάλαιο, στρέφουμε τώρα την προσοχή μας στις θεωρητικές και προσομοιωτικές πτυχές που είναι απαραίτητες για την ανάλυση και τον σχεδιασμό τους σε επίπεδο μοναδιαίου κελιού. Οι μεταεπιφάνειες παρουσιάζουν πρωτοφανή έλεγχο των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων λόγω της ικανότητάς τους να υποστηρίζουν συντονισμούς που προκαλούν πολύπλοκες συμπεριφορές σκέδασης. Μια κρίσιμη πτυχή για την κατανόηση αυτών των αλληλεπιδράσεων είναι οι εξισώσεις Fresnel, οι οποίες περιγράφουν τη συμπεριφορά του φωτός καθώς συναντά τη διεπιφάνεια μεταξύ δύο άπειρων και ομογενών διηλεκτρικών γνωστών δεικτών διάθλασης.

Οι εξισώσεις Fresnel παρέχουν συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης που μεταβάλλονται με τη γωνία πρόσπτωσης και την πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, εισάγοντας ομαλά την έννοια της διασποράς. Για υλικά χωρίς χρωματική διασπορά, οι διηλεκτρικές σταθερές (n_1 και n_2) είναι ανεξάρτητες από το μήκος κύματος (λ). Στις περιπτώσεις αυτές, οι συντελεστές ανάκλασης εξαρτώνται αποκλειστικά από τη γωνία πρόσπτωσης και την πόλωση, άρα δεν υπάρχει διασπορά με τη συχνότητα. Ωστόσο, όταν οι διηλεκτρικές σταθερές παρουσιάζουν χρωματική διασπορά, που σημαίνει ότι μεταβάλλονται με το μήκος κύματος (λ), οι συντελεστές ανάκλασης παρουσιάζουν επίσης διασπορά ως προς το λ . Αυτό προσθέτει πολυπλοκότητα, καθώς το πλάτος και η φάση των συντελεστών ανάκλασης γίνονται συναρτήσεις του μήκους κύματος, της γωνίας πρόσπτωσης (θ) και της πόλωσης [14]. Συνεπώς, καταλαβαίνει κανείς πως όταν το διηλεκτρικό αντικατασταθεί από ένα μετά-υλικό, που λόγω της μικροδομής του παρουσιάζει συντονισμούς (δηλαδή έντονη μεταβολή της απόκρισης σε συγκεκριμένες συχνότητες ή/και γωνίες), η ανάλυση και ο σχεδιασμός της διασποράς αποκτά κομβική σημασία.

Για να εμβαθύνουμε σε αυτή τη θεωρία, πρέπει να εξετάσουμε τις ειδικές εξισώσεις Fourier που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των μεταεπιφανειών, οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι μεταεπιφάνειες αλληλεπιδρούν με ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαφορετικών συχνοτήτων. Στην οπτική, οι εξισώσεις Fresnel περιγράφουν την ανάκλαση και τη μετάδοση (διάθλαση) του φωτός όταν αυτό συναντά μια διεπιφάνεια μεταξύ δύο διαφορετικών μέσων. Η συμπεριφορά του φωτός σε αυτή τη διεπιφάνεια εξαρτάται από την πόλωση του προσπίπτοντος φωτός, με τις δύο συνήθεις πολώσεις να είναι η εγκάρσια ηλεκτρική (TE) και η εγκάρσια μαγνητική (TM) ως προς το επίπεδο πρόσπτωσης.

Η εγκάρσια ηλεκτρική πόλωση (transverse electric, TE) αναφέρεται σε κύματα όπου το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης. Στην περίπτωση αυτή, οι συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης μπορούν να εκφραστούν ως εξής. Ο συντελεστής ανάκλασης για πόλωση TE και ο συντελεστής μετάδοσης δίνονται στις παρακάτω σχέσεις.

$$r_{TE} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

Εξίσωση 1

$$t_{TE} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

Εξίσωση 2

Η εγκάρσια μαγνητική πόλωση (transverse magnetic, TM) αναφέρεται σε κύματα όπου το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης. Οι αντίστοιχοι συντελεστές Fresnel περιγράφονται από τον συντελεστή ανάκλασης και τον συντελεστή μετάδοσης.

$$r_{\text{TM}} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$

Εξίσωση 3

$$t_{\text{TM}} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$

Εξίσωση 4

Όπου:

n_1, n_2 : είναι οι δείκτες διάθλασης του πρώτου και του δεύτερου μέσου, αντίστοιχα.

θ_i : γωνία πρόσπτωσης.

θ_t : είναι η γωνία μετάδοσης, η οποία μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας το νόμο του Snell.

Ο νόμος του Snell δίνεται στην παρακάτω σχέση.

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

Εξίσωση 5

Στις ανακλαστικές επιφάνειες, εάν το κάτω διηλεκτρικό αντικατασταθεί από ένα μέταλλο (τέλειος αγωγός), τα φαινόμενα περίθλασης εξαφανίζονται και ο συντελεστής ανάκλασης γίνεται -1 για όλες τις συχνότητες, γωνίες και πολώσεις. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει καθόλου διασπορά. Ωστόσο, η διαμόρφωση του μετώπου κύματος δεν μπορεί να επιτευχθεί, εκτός εάν αλλάξει το σχήμα του μετάλλου, όπως η χρήση ενός παραβολικού ανακλαστήρα για εστίαση. Αυτή η τροποποίηση είναι τόσο τεχνολογικά όσο και οικονομικά απαιτητική και αυξάνει επίσης τον όγκο του ανακλαστήρα.

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι ένα ισχυρό εργαλείο που μετασχηματίζει μια χωρική ή χρονική συνάρτηση στις συνιστώσες συχνότητάς της. Για τις μεταεπιφάνειες, βοηθά στην ανάλυση του τρόπου με τον οποίο οι δομές της επιφάνειας επηρεάζουν τα εισερχόμενα κύματα.

$$\tilde{E}(k_x) = \int_{-\infty}^{\infty} E(x) e^{-ik_x x} dx$$

Εξίσωση 6

$$E(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}(k_x) e^{ik_x x} dk_x$$

Εξίσωση 7

Για τις μεταεπιφάνειες, έχουμε να κάνουμε με κελία που είναι διακριτά ($\ll \lambda$). Το ηλεκτρικό πεδίο $E(x)$ σε μια περιοδική μεταεπιφάνεια μπορεί να αναπαρασταθεί ως σειρά Fourier:

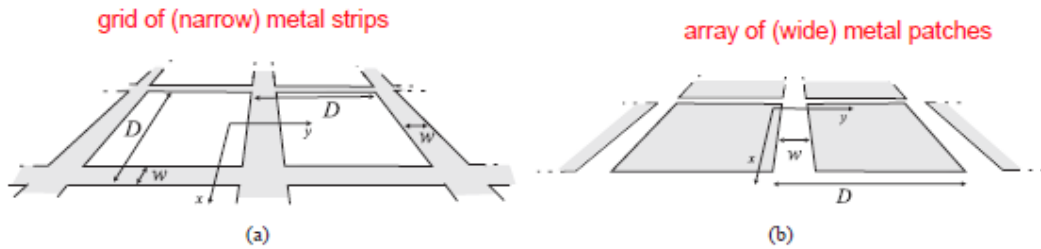
$$E(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_n e^{ik_n x}$$

Εξίσωση 8

Με E_n να είναι συντελεστής Fourier και το $k_n = 2\pi n/d$ (με d να είναι η περίοδος της δομής).

2.1 Επιφάνειες υψηλής αντίστασης

Είδαμε προηγουμένως πως ένας τέλειος μεταλλικός ανακλαστήρας (επιφάνεια μηδενικής αντίστασης) εισάγει έναν συντελεστή ανάκλασης -1 , δηλαδή πλάτος μονάδα και φάση 180° , ανεξαρτήτως συχνότητας. Σε αυτή την υποενότητα θα μελετήσουμε την δυνατότητα των μεταεπιφανειών να ρυθμίζουν την φάση του συντελεστή ανάκλασης έχοντας σταθερό πλάτος, ίσο με τη μονάδα. Οι επιφάνειες υψηλής εμπέδησης (HIS) είναι ένας θεμελιώδης τύπος μεταεπιφάνειας που γενικεύει την έννοια της ανάκλασης. Σε αντίθεση με τους τέλειους ηλεκτρικούς αγωγούς (PEC), οι οποίοι ανακλούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα με πλάτος $|1|$ και μετατόπιση φάσης 180 μοιρών, οι HIS μπορούν να επιτύχουν φάση ανάκλασης οπουδήποτε στο εύρος 0 έως 360 μοιρών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ακριβούς γεωμετρικού σχεδιασμού, επιτρέποντας έλεγχο της φάσης των ανακλώμενων κυμάτων. Αυτή η ιδιότητα καθιστά την HIS ανεκτίμητη για εφαρμογές που απαιτούν ακριβή έλεγχο της φάσης, όπως ο σχεδιασμός κεραιών, η καθοδήγηση δέσμης και η διαμόρφωση του μετώπου κύματος. Θα μελετήσουμε δύο είδη HIS με μεταλλικές λωρίδες και τετράγωνα patches. Η μετατόπιση φάσης σε μια HIS δεν είναι σταθερή σε σχέση με το μήκος κύματος λ αντίθετα, παρουσιάζει διασπορά, δηλαδή μεταβάλλεται ανάλογα με το μήκος κύματος, τη γωνία πρόσπτωσης και την πόλωση.



Εικόνα 5: (α) Ένα πλέγμα από ιδανικά αγώγιμες ταινίες σε ομοιογενές μέσο. (β) Συστοιχία patches σε ομοιογενές μέσο. Τα μεταλλικά μέρη έχουν γκρι χρώμα.

2.1.1 συστοιχίες λωρίδων

Θα θεωρήσουμε ένα πλέγμα το οποίο θα δημιουργήσουμε απλώνοντας παράλληλες μεταλλικές λωρίδες στους άξονες x και y , όπως φαίνεται στην Εικόνα 1(α), με D να αναφέρεται στην περιодικότητα των λωρίδων και w το μήκος τους. Αν το D είναι ηλεκτρικά μικρό αυτή η συστοιχία είναι σχεδόν ιστροπική και η ηλεκτρομαγνητική της αντίδραση αμυδρά και μόνο επηρεάζεται από το επίπεδο πρόσπτωσης ακτίνας (Στα δικά μας πλαίσια θεωρούμε επίπεδο πρόσπτωσης το $x-z$). Όταν το ηλεκτρικό πεδίο έχει μη-μηδενικές x - ή y -συνιστώσες, η αντίδραση του πλέγματος είναι επαγωγική σε χαμηλές συχνότητες και μπορεί να χαρακτηριστεί από την αντίσταση πλέγματος Z_g , που σχετίζεται με τη μέση επαπτομενική συνιστώσα του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου στο πλέγμα ($x-y$) πεδίου \hat{E}_x^{tot} και \hat{E}_y^{tot} με τη μέση πυκνότητα επιφανειακού ρεύματος \hat{J}_y . Για τους ρυθμούς TM και TE έχουμε τις παρακάτω σχέσεις αντίστοιχα.

$$\hat{E}_x^{\text{tot}} = j \frac{\eta_{\text{eff}}}{2} \alpha \left[\hat{J}_x + \frac{1}{k_{\text{eff}}^2 \left(1 + \frac{b}{D}\right)} \frac{b}{D} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \hat{J}_x \right]$$

Εξίσωση 9

$$\hat{E}_y^{\text{tot}} = j \frac{\eta_{\text{eff}}}{2} \alpha \hat{J}_y$$

Εξίσωση 10

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν όταν το μέσο είναι ομοιόμορφο και ιστροπικό, ενώ θεωρούμε επίσης $D=b$. Ωστόσο, επεκτείνουμε τις σχέσεις και στην περίπτωση που το πλέγμα είναι τοποθετημένο σε διεπιφάνεια αέρα και διηλεκτρικού υποστρώματος με σχετική διηλεκτρική σταθερά ή ηλεκτρική επιτρεπτότητα ϵ_r . Έτσι, ορίζεται ένα ισοδύναμο (effective) μέσο με σχετική διηλεκτρική σταθερά που ορίζεται ως ο αριθμητικός μέσος όρος των σταθερών των δύο μέσων. Από αυτή, προκύπτει επίσης η κυματική αντίσταση και ο κυματικός αριθμός

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2}$$

Εξίσωση 11

$$\eta_{\text{eff}} = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0\epsilon_{\text{eff}}}$$

Εξίσωση 12

$$k_{\text{eff}} = k_0\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$$

Εξίσωση 13

Η παράμετρος πλέγματος για μια ηλεκτρικά πυκνή ($k_{\text{eff}}D \ll 2\pi$) διάταξη ιδανικά αγωγίμων ταινιών μπορεί να οριστεί ως :

$$\alpha = \frac{k_{\text{eff}}D}{\pi} \ln\left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi w}{2D}\right)}\right)$$

Εξίσωση 14

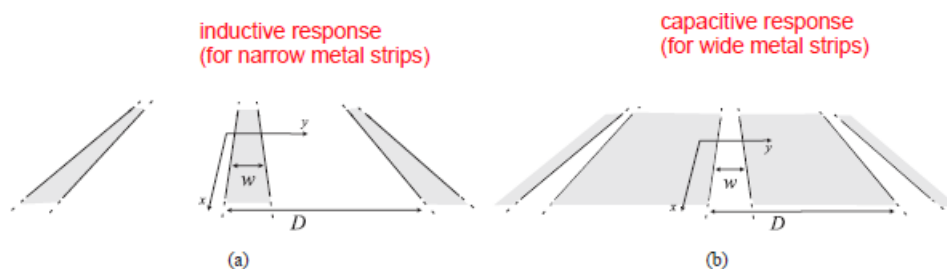
Αντικαθιστώντας την παράγωγο ως προς x με $-jk_x$ στις εξισώσεις Εξίσωση 9 και Εξίσωση 10, όπου $k_x = k_0\sin\theta$ (θ γωνία πρόσπτωσης και $k_y=0$) είναι η x -συνιστώσα του διανύσματος προσπίπτοντος κύματος στον ελεύθερο χώρο, έχουμε τις αντιστάσεις πλέγματος για μεταλλικές λεπτές λωρίδες, με κριτήριο $w \ll D$, στις εξής μορφές για τις ΤΜ και ΤΕ πολώσεις αντίστοιχα:

$$Z_{gTM} = j\frac{\eta_{\text{eff}}}{2}\alpha\left(1 - \frac{k_0^2}{k_{\text{eff}}^2}\frac{\sin^2\theta}{2}\right),$$

Εξίσωση 15

$$Z_g^{TE} = j\frac{\eta_{\text{eff}}}{2}\alpha.$$

Εξίσωση 16



Εικόνα 6: (α) Επαγωγικό πλέγμα μεταλλικών λωρίδων σε ομοιογενές μέσο. (β) Ένα χωρητικό πλέγμα μεταλλικών λωρίδων σε ομοιογενή ξενιστή. Τα μεταλλικά μέρη έχουν γκρι χρώμα.

Οι παραπάνω αντιστάσεις πλέγματος αναφέρονται στην Εικόνα(4.a) στο οποίο το ρεύμα ρέει κατά μήκος των λωρίδων. Στην Εικόνα(4.b) το ηλεκτρικό πεδίο είναι παράλληλο στον άξονα y με την TE πόλωση να ανταποκρίνεται στο πεδίο πρόσπτωσης (x-z) και την TM στο πεδίο πρόσπτωσης (y-z). Για την αντίσταση πλέγματος των χωρητικών διατάξεων από φαρδιές λωρίδες για τις δυο πολώσεις χρησιμοποιούμε την αρχή του Babinet, και έχουμε :

$$Z_g^{TM} = -j \frac{\eta_{eff}}{2\alpha},$$

Εξίσωση 17

$$Z_g^{TE} = -j \frac{\eta_{eff}}{2\alpha} \frac{1}{\left(1 - \frac{k_0^2}{k_{eff}^2} \sin^2 \theta\right)}.$$

Εξίσωση 18

2.1.2 Συστοιχίες από τετράγωνα patches

Σύμφωνα με την αρχή Babinet που δίνεται στην σχέση (13) για τις αντιστάσεις πλέγματος μπορούμε να υπολογίσουμε τις αντίστοιχες για το πλέγμα τετράγωνων μπαλωμάτων (patches).

$$Z_g^{TE} Z_g^{TM} = \frac{\eta_{eff}^2}{4},$$

Εξίσωση 19

Επομένως για την διάταξη πλέγματος με τετράγωνα μεταλλικά patches έχουμε τις παρακάτω αντιστάσεις για τους ρυθμούς TM και TE αντίστοιχα.

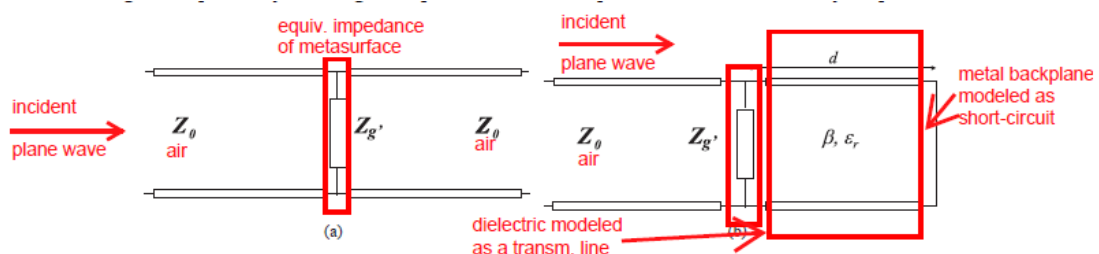
$$Z_{g'}^{TM} = -j \frac{\eta_{eff}}{2\alpha},$$

Εξίσωση 20

$$Z_{g'}^{TE} = -j \frac{\eta_{eff}}{2\alpha \left(1 - \frac{k_0^2 \sin^2 \theta}{k_{eff}^2}\right)}.$$

Εξίσωση 21

Για να υπολογίσουμε τους συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης ενός πλέγματος από τετράγωνα patches μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα με τις αντίστοιχες αντιστάσεις ελεύθερου χώρου Z_0 και πλέγματος Z_g .



Εικόνα 7(a) Το μοντέλο γραμμής μετάδοσης για ένα χωρητικό πλέγμα λωρίδων ή μια σειρά από patches σε ελεύθερο χώρο. (b) Το μοντέλο γραμμής μεταφοράς για μια επιφάνεια υψηλής αντίστασης που περιλαμβάνει ένα πλέγμα χωρητικών λωρίδων ή μια σειρά από patches πάνω από μια διηλεκτρική πλάκα με μεταλλική βάση.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ανάκλασης ενός επίπεδου κύματος (μίας «ακτίνας») που προσπίπτει σε ένα τέτοιο κελί, χρειαζόμαστε την κυματική αντίσταση του κενού χώρου. Οι αντιστάσεις ελεύθερου χώρου εξαρτώνται διαφορετικά από τη γωνία πρόσπτωσης ($\theta=0$ είναι η κάθετος) για τις πολώσεις TE και TM, και συγκεκριμένα είναι ίσες με :

$$Z_0^{TE} = \frac{\eta_0}{\cos \theta},$$

Εξίσωση 22

$$Z_0^{TM} = \eta_0 \cos \theta,$$

Εξίσωση 23

Για διατάξεις που βρίσκονται πλήρως στον ελεύθερο χώρο (δεν υπάρχει διηλεκτρικό ούτε πάνω ούτε κάτω) οι αντιστάσεις πλέγματος για τετράγωνα μπαλώματα από τις εξισώσεις (12) και (13) απλοποιούνται ως εξής:

$$Z_{g'}^{TM} = -j \frac{\eta_0}{2\alpha},$$

Εξίσωση 24

$$Z_{g'}^{TE} = -j \frac{\eta_0}{2\alpha \left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{2}\right)}.$$

Εξίσωση 25

Σύμφωνα με την Εικόνα(5), η συνολική αντίσταση του ισοδύναμου κυκλώματος δίνεται από τον τύπο παράλληλων αντιστάσεων.

$$Z_{\text{inp}}^{-1} = Z_{g'}^{-1} + Z_0^{-1}.$$

Εξίσωση 26

Για λόγους σύγκρισης θα χρησιμοποιήσουμε το ιδανικό μοντέλο Holloway [7] που έχει ως αντιστάσεις πλέγματος αντίστοιχο με τον συντελεστή ανάκλασης και για τις δυο πολώσεις.

$$Z_H^{TE, TM} = -j \frac{\eta}{2\alpha},$$

Εξίσωση 27

Με παράμετρο πλέγματος

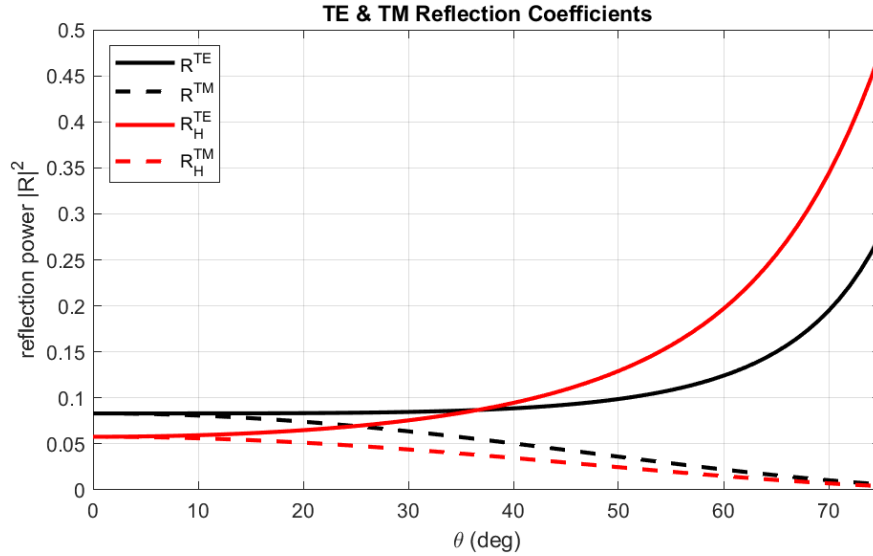
$$a = kD \frac{0.51 \left(\frac{D-w}{D}\right)^3}{1 - 0.367 \left(\frac{D-w}{T}\right)^3}$$

Εξίσωση 28

2.1.3 Κατασκευές υψηλής αντίστασης

Οι επιφάνειες υψηλής αντίστασης (HIS) που μελετήθηκαν εδώ αποτελούνται από τα παραπάνω θεωρούμενα χωρητικά πλέγματα ή συστοιχίες σε διηλεκτρική πλάκα με μεταλλική βάση με πάχος d και σχετική διαπερατότητα ϵ_r .

Στο παρακάτω γράφημα κάνουμε σύγκριση των συντελεστών ανάκλασης στις πολώσεις TE & TM μεταξύ του μοντέλου μας και του μοντέλου Holloway [7]. Η διάταξη που εξετάζεται έχει αέρα εκατέρωθεν της μεταεπιφάνειας (πλέγματα κ.λπ) οπότε εμφανίζεται και ανάκλαση και διάθλαση.



Εικόνα 8: Ο συντελεστής ανάκλασης TE- TM έναντι της γωνίας πρόσπτωσης για μια σειρά από τετράγωνα patches. Οι διαστάσεις του πλέγματος είναι οι εξής: $D = /15$ και $w = D/15$. Η RH αντιστοιχεί στα αποτελέσματα σύμφωνα με το μοντέλο του C. L. Holloway

Από το Fig.3 (b) βγάζουμε την συνολική αντίσταση πλέγματος από τον παρακάτω τύπο. Η σύνθετη αντίσταση εισόδου (επιφάνειας) είναι μια παράλληλη σύνδεση του πλέγματος σύνθετη αντίσταση Z_g , και η επιφανειακή σύνθετη αντίσταση του γειωμένου διηλεκτρικού στρώματος Z_s

$$Z_{inp}^{-1} = Z_g'^{-1} + Z_s^{-1}$$

Εξίσωση 29

Η επιφανειακή αντίσταση για την λοξή πρόσπτωση μπορεί να γραφτεί στη δυαδική μορφή που χωρίζεται σε δύο ασύζευκτες συνιστώσες Z_s για τις πολώσεις TE και TM αντίστοιχα.

$$\tilde{Z}_s = j\omega\mu \frac{\tan(\beta d)}{\beta} \left(\tilde{I}_t - \frac{k_t k_t}{k^2} \right),$$

Εξίσωση 30

Όπου μ είναι η απόλυτη επιτρεπτότητα του υποστρώματος (στην περίπτωση μας $\mu = \mu_0$) $\beta = \sqrt{k^2 - k_t^2}$, $k = k_0 \sqrt{\epsilon_r}$, είναι η σταθερά διάδοσης ορθογώνια προς την επιφάνεια και είναι ο αριθμός κύματος στο υλικό του υποστρώματος και k_t είναι η συνιστώσα του εφαπτομενικού αριθμού κύματος, όπως επιβάλλεται από το προσπίπτον κύμα.

Για μια HIS αποτελούμενη από χωρητικές λωρίδες σε πολώσεις TM και TE οι αντιστάσεις εισόδου σύμφωνα με τις σχέσεις (16) (17) και (25) είναι οι παρακάτω:

$$Z_{c,inp}^{TM} = \frac{j\omega\mu \frac{\tan(\beta d)}{\beta} \cos^2(\theta_2)}{1 - 2k_{eff}\alpha \frac{\tan(\beta d)}{\beta} \cos^2(\theta_2)},$$

Εξίσωση 31

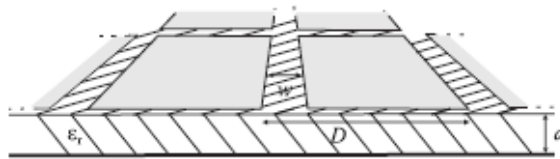
$$Z_{c,inp}^{TE} = \frac{j\omega\mu \frac{\tan(\beta d)}{\beta}}{1 - 2k_{eff} \frac{\tan(\beta d)}{\beta} \left(1 - \frac{2}{\epsilon_r + 1} \sin^2 \theta\right)},$$

Εξίσωση 32

Με θ την γωνία πρόσπτωσης και θ_2 την γωνία διάθλασης σύμφωνα με τον νόμο του Snell ως:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{\sin(\theta)}{\sqrt{\epsilon_r}}\right)$$

Εξίσωση 33



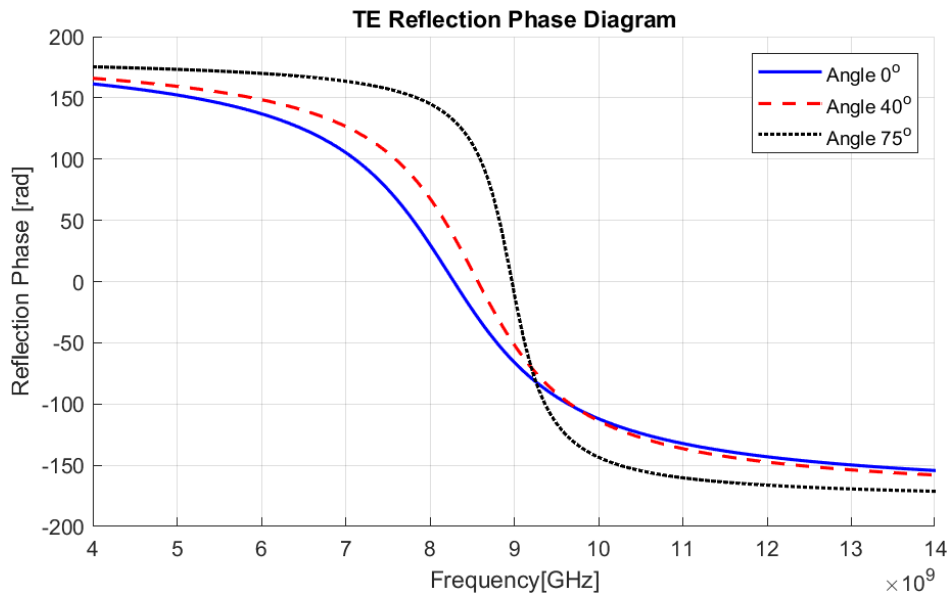
Εικόνα 9: Μια δομή υψηλής αντίστασης που αποτελείται από μια σειρά από patches πάνω από μια διηλεκτρική πλάκα με μεταλλική βάση.

Στην περίπτωση των τετράγωνων μπαλωμάτων η αντίσταση εισόδου από τις εξισώσεις (13), (14) και (25). Για την πόλωση TM η σχέση είναι ίδια με την (26) για την TE :

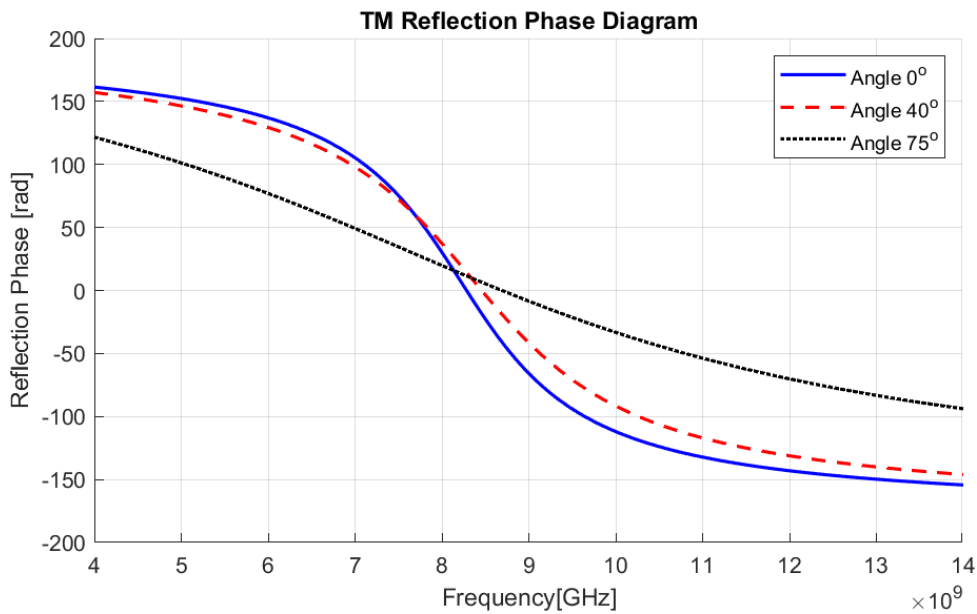
$$Z_{p,inp}^{TE} = \frac{j\omega\mu \frac{\tan(\beta d)}{\beta}}{1 - 2k_{eff}\alpha \frac{\tan(\beta d)}{\beta} \left(1 - \frac{1}{\epsilon_t + 1} \sin^2 \theta\right)}.$$

Εξίσωση 34

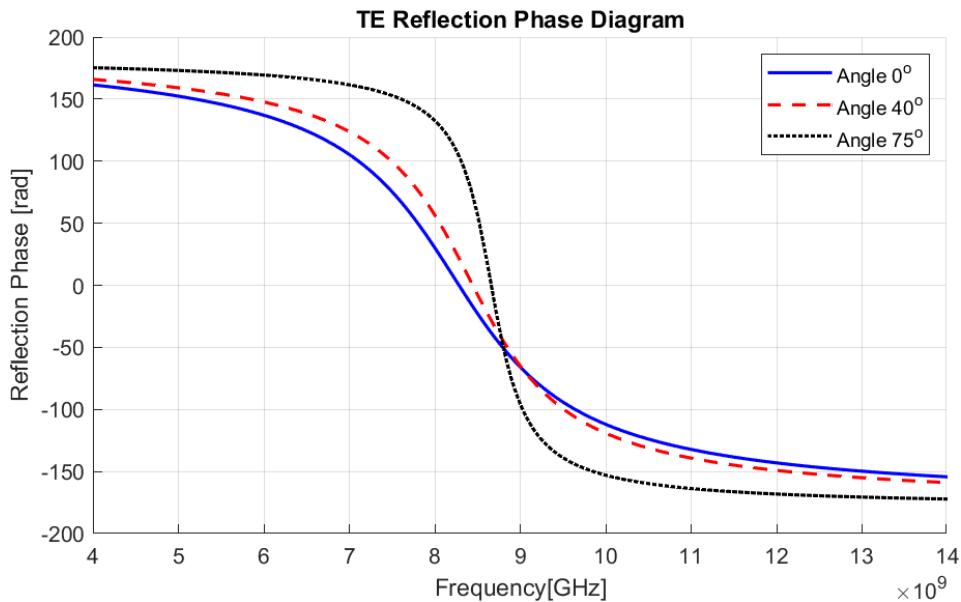
Τα παρακάτω γραφήματα περιγράφουν την φάση του συντελεστή ανάκλασης για πλέγματα από χωρητικές ταινίες και τετράγωνα patches στις πολώσεις TE και TM αντίστοιχα για διάφορες γωνίες, για την διάταξη της Εικόνα(7). Παρατηρούμε τη διασπορά της φάσης σε σχέση με τη συχνότητα. Ομοίως, μπορούμε να υπολογίσουμε και διασπορά σε σχέση με κάποια γεωμετρική παράμετρο (πλάτος patches ή πάχος υποστρώματος), σε μία και μόνο συχνότητα, κάτι που μας δίνει καμπύλες σχεδίασης για τη φάση ανάκλασης του συγκεκριμένου τύπου κελιού.



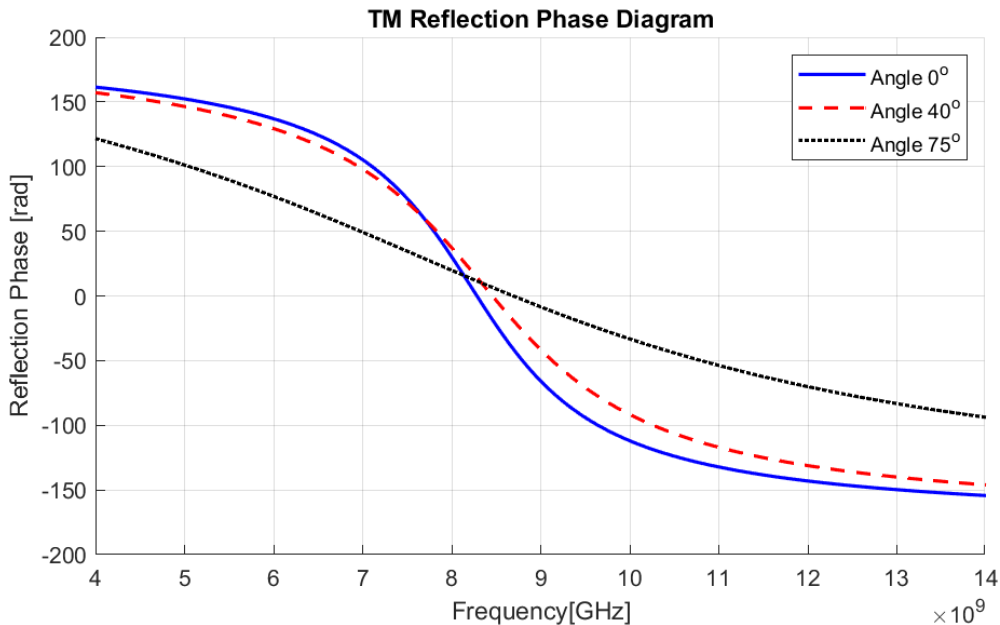
Εικόνα 10: Διάγραμμα φάσης ανάκλασης για TE-πολωμένα προσπίπτοντα πεδία για επιφάνεια υψηλής αντίστασης που αποτελείται από χωρητικές ταινίες για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Οι παράμετροι της επιφάνειας υψηλής σύνθετης αντίστασης είναι οι εξής: $D = 3\text{mm}$, $w = 0,4\text{mm}$, $d = 15\text{mm}$, και $\epsilon_r = 10.2$



Εικόνα 11: Διάγραμμα φάσης ανάκλασης για TM-πολωμένα προσπίπτοντα πεδία για επιφάνεια υψηλής σύνθετης αντίστασης που αποτελείται από χωρητικά ταινίες για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Οι παράμετροι της επιφάνειας υψηλής σύνθετης αντίστασης είναι οι εξής: $D = 3\text{mm}$, $w = 0,4\text{mm}$, $d = 15\text{mm}$, και $\epsilon_r = 10.2$



Εικόνα 12: Διάγραμμα φάσης ανάκλασης για TE-πολωμένο προσπίπτον πεδίο για επιφάνεια υψηλής σύνθετης αντίστασης που αποτελείται από τετράγωνα patches. $D=3\text{mm}$ $w=0.4\text{mm}$ $d=0.15\text{mm}$ $\epsilon_r=10.2$



Εικόνα 13: Φάση ανάκλασης για πολωμένο προσπίπτον πεδίο TM για επιφάνεια υψηλής σύνθετης αντίστασης που αποτελείται από τετράγωνα patches για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. $D=3\text{mm}$ $w=0.4\text{mm}$ $d=0.15\text{mm}$ $\epsilon_r=10.2$

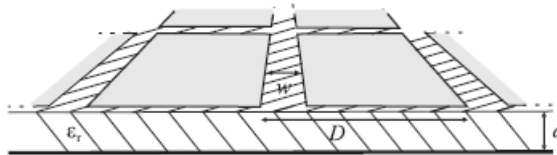
2.2 Απορροφητές ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Εκτός από τον έλεγχο της φάσης των ανακλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, οι μεταεπιφάνειες μπορούν επίσης να σχεδιαστούν για να χειρίζονται το πλάτος του συντελεστή ανάκλασης σε ένα ευρύ φάσμα (0 έως 1) χρησιμοποιώντας απορροφητές. Χρησιμοποιώντας κατάλληλες γεωμετρίες και ενσωματώνοντας υλικά με απώλειες (που χαρακτηρίζονται από την εφαπτομένη απωλειών, $\tan\delta$) ή απορροφητικά στοιχεία, όπως συγκεντρωμένοι ωμικοί αντιστάτες (R), είναι δυνατόν να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες ανάκλασης πλάτους. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο του πόσο από το προσπίπτον κύμα απορροφάτε και πόσο ανακλάται. Συνήθως χρησιμοποιούνται διατάξεις με μεταλλικό επίπεδο ανάκλασης («γείωση») στο πίσω μέρος του υποστρώματος, έτσι ώστε να σχηματίζεται διαμήκης συντονισμός και να εξαλείφεται η μετάδοση (διάθλαση).

Παρόμοια με τον έλεγχο φάσης, το πλάτος της ανάκλασης στους απορροφητές δεν είναι σταθερό σε σχέση με το μήκος κύματος (λ), αντίθετα, παρουσιάζει διασπορά. Αυτό σημαίνει ότι τόσο το πλάτος όσο και η φάση των ανακλώμενων κυμάτων μεταβάλλονται με το μήκος κύματος, προσθέτοντας πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό και την ανάλυση αυτών των μεταεπιφανειών. Η κατανόηση αυτών των χαρακτηριστικών διασποράς είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη αποδοτικών και αποτελεσματικών απορροφητών για εφαρμογές στις τηλεπικοινωνίες, τα ραντάρ και άλλες ηλεκτρομαγνητικές τεχνολογίες.

2.2.1 Δομή απορροφητή

Η διάταξη μπαλωμάτων πάνω από την γειωμένη διηλεκτρική πλάκα έχει χωρητική αντίδραση, που σε συνδυασμό με την επαγωγική αντίδραση της γειωμένης πλάκας, δημιουργούν ένα κύκλωμα συντονισμού. Η συστοιχία μπαλωμάτων αποτελείται από μικρά μεταλλικά τετράγωνα με σκοπό η δομή να είναι σχεδόν ιστροπική [8].



Εικόνα 14: Η απορροφητική δομή. Δεν υπάρχουν ενσωματωμένα μεταλλικά πτερύγια στο υπόστρωμα.

Η αντίσταση της συνολικής δομής επιφάνειας Z_{inp} , μπορεί να θεωρηθεί ως παράλληλη σύνδεση της αντίστασης πλέγματος μπαλωμάτων Z_g και της αντίστασης επιφάνειας της γειωμένης διηλεκτρικής πλάκας Z_s .

$$Z_{inp}^{-1} = Z_g^{-1} + Z_s^{-1}.$$

Εξίσωση 35

2.2.2 Λειτουργία σε πολώσεις TE & TM

Για τη δομή στο Fig. 10 οι αντιστάσεις επιφάνειας για τις πολώσεις TE και TM είναι:

$$Z_{inp}^{TE} = \frac{j\omega\mu_0 \frac{\tan(\beta d)}{\beta}}{1 - 2k_{eff}\alpha \frac{\tan^2(\beta d)}{\beta} \left(1 - \frac{\sin^2(\beta)}{\epsilon_t + 1}\right)},$$

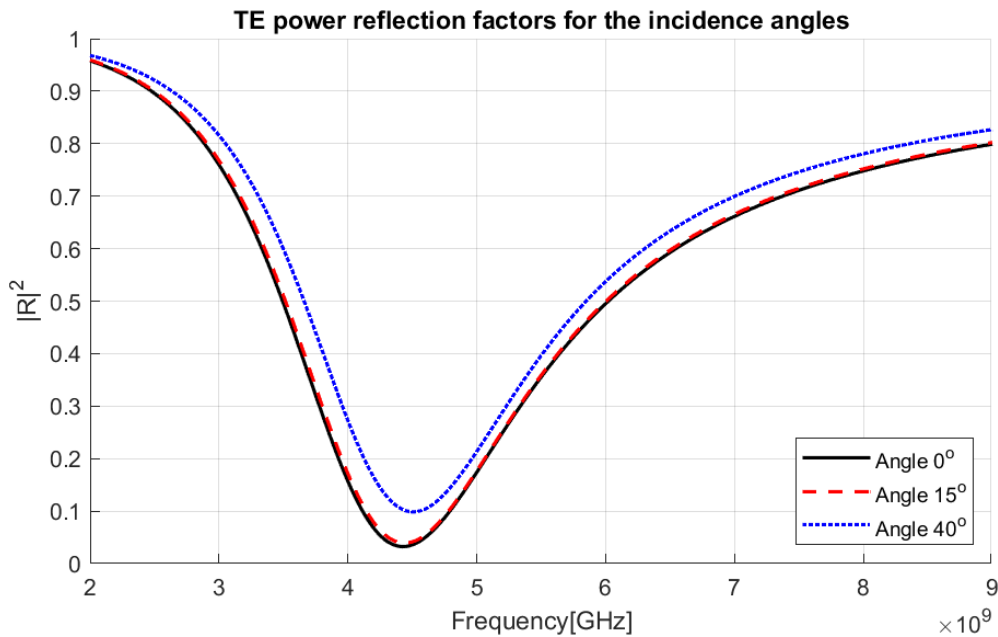
Εξίσωση 36

$$Z_{inp}^{TM} = \frac{j\omega\mu_0 \frac{\tan(\beta d)}{\beta} \left(1 - \frac{\sin^2(\theta)}{\epsilon_r}\right)}{1 - 2k_{eff}\alpha \frac{\tan(\beta d)}{\beta} \left(1 - \frac{\sin^2(\theta)}{\epsilon_r}\right)},$$

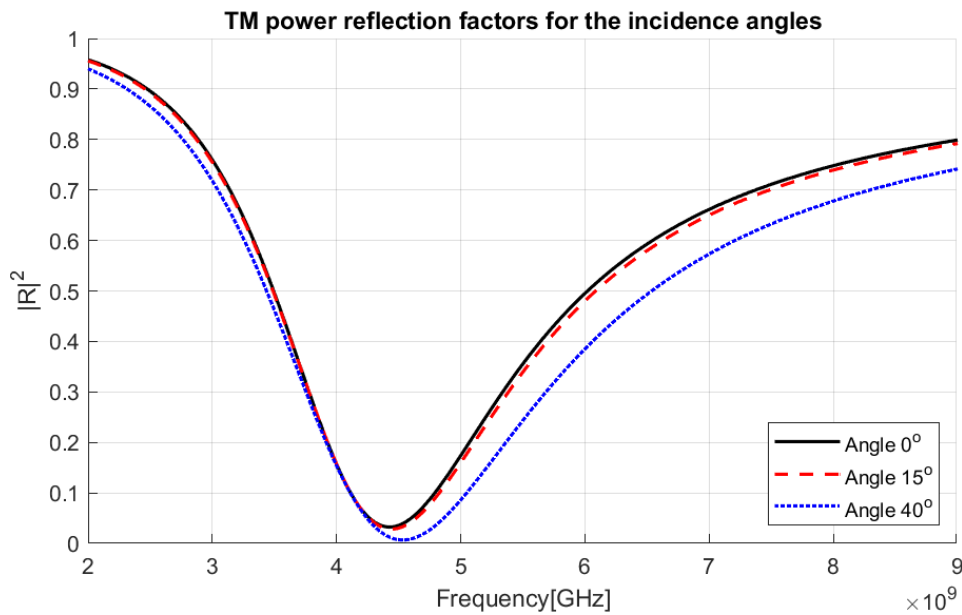
Εξίσωση 37

Με $\beta = \sqrt{k_0^2 \epsilon_r - k_t^2}$, $k_{eff} = k_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}$, διηλεκτρική σταθερά της σχέσης (9) και παράμετρο πλέγματος τη σχέση (10).

Τα γραφήματα που ακολουθούν καταγράφουν το φάσμα του πλάτους συντελεστή ανάκλασης του ηλεκτρικού απορροφητή στις πολώσεις TE και TM υπό συγκεκριμένες γωνίες πρόσπτωσης.



Εικόνα 15: Συντελεστές ανάκλασης ισχύος για τις γωνίες πρόσπτωσης 0°, 15° και 40° για TE. Με παραμέτρους Absorber : D = 4.5mm, w = 0.2mm, h = 2.5mm, and $\epsilon_r = 9(1 - j0365)$.



Εικόνα 16: Συντελεστές ανάκλασης ισχύος για τις γωνίες πρόσπτωσης 0°, 15° και 40° για TM. Με παραμέτρους Absorber : D = 4.5mm, w = 0.2mm, h = 2.5mm, and $\epsilon_r = 9(1 - j0365)$.

Έχοντας παρουσιάσει τα φάσματα φάσης και πλάτους του συντελεστή ανάκλασης στις παραπάνω διατάξεις που αποτελούνται από απλά μεταλλικά patches πάνω σε γειωμένο διηλεκτρικό υπόστρωμα, καθίσταται σαφώς πως με προσεκτική ρύθμιση (tuning, tailoring) των παραπάνω παραμέτρων (π.χ., πλάτος patches, πάχος και σχετική σταθερά του διηλεκτρικού), μπορούμε να πετύχουν σχεδόν όποια μιγαδική τιμή θέλουμε για τον συντελεστή ανάκλασης.

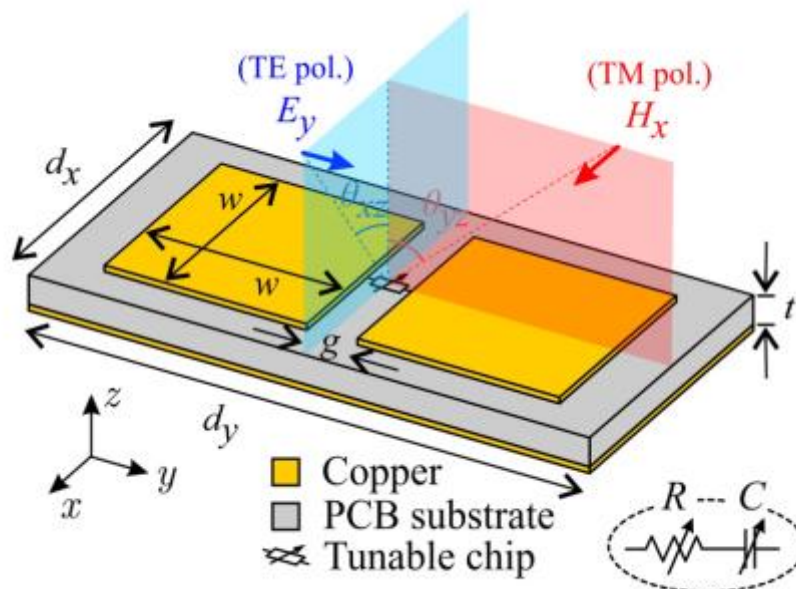
2.3 Reconfigurable Intelligent Surfaces

Οι επαναδιαμορφώσιμες ευφυείς επιφάνειες (RIS) μεταφέρουν τις έννοιες του ελέγχου φάσης και πλάτους στο επόμενο επίπεδο, καθιστώντας τις πλήρως ρυθμιζόμενες και ελεγχόμενες σε πραγματικό χρόνο. Αυτός ο δυναμικός έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης στοιχείων όπως δίοδοι varactor (μεταβλητοί πυκνωτές) και κυκλώματα varistor (μεταβλητές αντιστάσεις) σε συχνότητες μικροκυμάτων. Με την ενσωμάτωση αυτών των ρυθμιζόμενων στοιχείων, η μια RIS μπορεί να διαμορφώνει τόσο τη φάση όσο και το πλάτος ανάκλασης των κελιών της κατά απαίτηση και πλήρως ελεγχόμενα από υπολογιστή. Αυτή η ικανότητα δυναμικής προσαρμογής στις μεταβαλλόμενες συνθήκες καθιστά τις RIS ένα ισχυρό εργαλείο για τη βελτίωση των επιδόσεων των συστημάτων επικοινωνίας, επιτρέποντας προηγμένες λειτουργίες όπως η καθοδήγηση δέσμης, η βελτιστοποίηση σήματος και η διαχείριση παρεμβολών.

2.3.1 Δομή επαναδιαμορφώσιμης έξυπνης επιφάνειας

Η RIS μοιράζεται τον ίδιο τρόπο δομής μικρότερης του μήκους κύματος με τις μεταεπιφάνειες. Η διαφορά είναι πως μεταξύ των μοναδιαίων κυψελών είναι ενσωματωμένα με ολοκληρωμένα κυκλώματα μικτού σήματος (integrated circuits, ICs) που παρέχουν ρυθμιζόμενη τοπική επιφανειακή αντίσταση [13]. Η ενσωμάτωση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων επιτρέπει τη συνεχή ρύθμιση τόσο της αντίστασης όσο και της αντίδρασης, επιτρέποντας στη μεταεπιφάνεια να εκτελεί διάφορες λειτουργίες, όπως η συντονιζόμενη τέλεια απορρόφηση και η συντονιζόμενη ανώμαλη ανάκλαση.

Μια τυπική ευφυής μεταεπιφάνεια αποτελείται από μια περιοδική συστοιχία μεταλλικών επιφανειών τοποθετημένων πάνω από ένα γειωμένο διηλεκτρικό υπόστρωμα. Οι μεταλλικές επιφάνειες χωρίζονται από μικρά κενά όπου είναι ενσωματωμένα ρυθμιζόμενα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Αυτά τα ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι ικανά να μεταβάλλουν ανεξάρτητα τη σύνθετη αντίσταση σε κάθε μοναδιαίο κύτταρο ρυθμίζοντας παραμέτρους όπως η χωρητικότητα και η αντίσταση [13].



Εικόνα 17: Δομή RIS

2.3.2 Δυνατότητα ελέγχου και τροποποίησης

Η δυνατότητα συντονισμού της ευφυούς μεταεπιφάνειας επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που παρέχουν μεταβλητή σύνθετη αντίσταση. Αυτά τα ολοκληρωμένα

κυκλώματα ενσωματώνουν συνήθως στοιχεία όπως varactor και τρανζίστορ, τα οποία μπορούν να ελέγχονται από εξωτερικές τάσεις πόλωσης για τη ρύθμιση της χωρητικότητας και της αντίστασης. Αυτή η ρύθμιση επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο των χαρακτηριστικών ανάκλασης και απορρόφησης της μεταεπιφάνειας. Για παράδειγμα, ρυθμίζοντας την αντίσταση R και της χωρητικότητας C των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, η μεταεπιφάνεια μπορεί να εναλλάσσεται μεταξύ διαφορετικών λειτουργικών καταστάσεων, όπως από τέλεια απορρόφηση σε ανώμαλη ανάκλαση σε συγκεκριμένες συχνότητες και γωνίες πρόσπτωσης.

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση σε επίπεδο Μεταεπιφάνειας

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, διερευνήσαμε την πολυπλοκότητα του χειρισμού των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε επίπεδο κυψελών μεταεπιφάνειας, εξετάζοντας περιοδικά δομημένες μεταεπιφάνειες και τις αλληλεπιδράσεις τους με τα προσπίπτοντα κύματα. Εμβαθήναμε στον τρόπο με τον οποίο αυτές οι περιοδικές δομές μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να ελέγχουν τη φάση και το πλάτος των ανακλώμενων και μεταδιδόμενων κυμάτων μέσω ακριβών γεωμετρικών διαμορφώσεων και επιλογών υλικών.

Σε αυτό το κεφάλαιο, μετατοπίζουμε την εστίασή μας στις ανομοιόμορφες μεταεπιφάνειες πεπερασμένου ανοίγματος. Σε αντίθεση με τις αντίστοιχες περιοδικές επιφάνειες, αυτές οι μεταεπιφάνειες παρουσιάζουν μεταβολές στη δομή και τις ιδιότητές τους σε όλη την επιφάνειά τους, εισάγοντας πρόσθετη πολυπλοκότητα και ευελιξία στην αλληλεπίδρασή τους με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Οι ανομοιόμορφες μεταεπιφάνειες μπορούν να παρέχουν προσαρμοσμένες ηλεκτρομαγνητικές αποκρίσεις, καθιστώντας τις κατάλληλες για ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών.

Στόχος μας σε αυτό το κεφάλαιο είναι να αναλύσουμε αυτές τις ανομοιόμορφες μεταεπιφάνειες εξετάζοντας τις παραμέτρους τους και μελετώντας τις επιδράσεις τους στα προσπίπτοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Με τον τρόπο αυτό, επιδιώκουμε να κατανοήσουμε πώς συγκεκριμένες σχεδιαστικές επιλογές επηρεάζουν τη συνολική συμπεριφορά της μεταεπιφάνειας και την ικανότητά της να χειρίζεται τα μέτωπα κύματος με τους επιθυμητούς τρόπους. Η ανάλυση αυτή θα προσφέρει βαθύτερη κατανόηση της πρακτικής εφαρμογής των μεταεπιφανειών σε προηγμένες τεχνολογικές εφαρμογές, όπως η προσαρμοστική οπτική, η διαμόρφωση δέσμης και η δυναμική ολογραφία. Μέσα από λεπτομερείς θεωρητικές μελέτες και μελέτες προσομοίωσης, θα αποκαλύψουμε τις δυνατότητες των ανομοιόμορφων μεταεπιφανειών να φέρουν επανάσταση στον έλεγχο των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

3.1 Αρχή των Huygens-Fresnel (HFP)

3.1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο της αρχής HFP

Η αρχή Huygens-Fresnel αποτελεί την βάση της κυματικής θεωρίας, απαραίτητη για την κατανόηση της διάδοσης και διάθλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, ιδίως στο πλαίσιο των μεταεπιφανειών. Η αρχή αυτή αποτελεί επέκταση την έννοιας του Christian Huygens ότι κάθε σημείο σε ένα μέτωπο κύματος λειτουργεί ως πηγή δευτερογενών σφαιρικών κυμάτων [14]. Ο Augustin-Jean Fresnel ενσωμάτωσε την έννοια της παρεμβολής, υποστηρίζοντας ότι το νέο μέτωπο κύματος σχηματίζεται από την υπέρθεση αυτών των δευτερογενών κυμάτων. Η αρχή αυτή μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως εξής.

$$U(P_0) = \frac{1}{j\lambda} \int \int_{\Sigma} U(P_1) \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos \theta \, ds,$$

Εξίσωση 38

Όπου θ είναι η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων n και r_{01} . Εκφράζει το παρατηρούμενο πεδίο $U(P_0)$ ως μια υπέρθεση αποκλίνων σφαιρικών κυμάτων $\frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}}$ προέλευσης από τις δευτερεύουσες πηγές που έχουν ως θέση κάθε σημείο P_1 εντός του ανοίγματος Σ . Η δευτερεύουσα πηγή P_1 έχει σύνθετο

πλάτος που είναι ανάλογο του πλάτους της διέγερσης $U(P_1)$ στο αντίστοιχο σημείο. Πλάτος που είναι αντιστρόφως ανάλογο του μήκους κύματος, ή ισοδύναμα ανάλογο της οπτικής συχνότητας ν . Έχει φάση που προηγείται της φάσης του προσπίπτοντος κύματος κατά 90° , όπως υποδεικνύεται από το παράγοντα $1/j$. Κάθε δευτερεύουσα πηγή έχει διάγραμμα κατευθυντικότητας $\cos\theta$.

3.1.2 Αρχή Huygens Fresnel στο μακρινό πεδίο (Far-Field)

Για την μελέτη του πεδίου ακτινοβολίας, από την επίδραση της μεταεπιφάνειας στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, στο μακρινό πεδίο θα χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω εκδοχή της αρχής Huygens-Fresnel, αυτό επιτυγχάνεται από την άθροιση των πεδίων ακτινοβολίας κάθε κελιού ξεχωριστά [15].

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} e^{ja_{mn}} f_{mn}(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) \Gamma_{mn} e^{j\Phi_{mn}} f_{mn}(\theta, \varphi) e^{jk_0 z_{mn}(\theta, \varphi)}$$

Εξίσωση 39

Όπου:

A_{mn} : πλάτος προσπίπτοντος κύματος στο mn κελί της μ/ϵ .

$e^{ja_{mn}}$: φάση προσπίπτοντος κύματος στο mn κελί της μ/ϵ .

Γ_{mn} : πλάτος ανακλώμενου κύματος στο mn κελί της μ/ϵ .

$e^{j\Phi_{mn}}$: συντελεστής φάσης ανάκλασης.

$f_{mn}(\theta, \varphi)/f_{mn}(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$: αριθμός/σχέση που αναφέρεται στο μοτίβο διασποράς του mn κελιού της μ/ϵ , η τιμή ταυτίζεται για το προσπίπτον και το ανακλώμενο.

$z_{mn}(\theta, \varphi)$: σχετική μετατόπιση φάσης των κελιών μ/ϵ σε σχέση με τις συντεταγμένες του προτύπου ακτινοβολίας.

Ο τύπος της μεταβλητής $z_{mn}(\theta, \varphi)$ είναι:

$$z_{m,n}(\theta, \varphi) = D_u \sin\theta \left[\left(m - \frac{1}{2} \right) \cos\varphi + \left(n - \frac{1}{2} \right) \sin\varphi \right],$$

Εξίσωση 40

Κρατώντας την μελέτη του πεδίου ακτινοβολίας που παράγει η μεταεπιφάνεια μας στο μακρινό πεδίο, στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου θα ερευνήσουμε σε βάθος τις δυνατότητες επιρροής της σε προσπίπτοντα κύματα που προέρχονται και αυτά είτε από το μακρινό είτε από το κοντινό πεδίο. Για κύματα από το μακρινό θα δούμε μεθόδους beam steering, beam splitting, η αλλιώς πολυκατευθυντικότητας αλλά και διάχυτης σκέδασης. Για κύματα που προέρχονται από το κοντινό πεδίο θα μελετήσουμε μεθόδους συσχέτισης (collimating) που αποτελούν παρόμοιες με αυτές του μακρινού.

3.1.3 Αρχή Huygens Fresnel στο κοντινό πεδίο (Near-Field)

Στο κοντινό πεδίο, η Αρχή Huygens-Fresnel (HFP) παρέχει ένα κρίσιμο πλαίσιο για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αλληλεπιδρούν με αντικείμενα που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από την μεταεπιφάνεια. Σε αντίθεση με το μακρινό πεδίο, όπου τα μέτωπα κύματος μπορούν να προσεγγιστούν ως παράλληλα, το κοντινό πεδίο περιλαμβάνει πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις λόγω των μικρότερων αποστάσεων μεταξύ του μετώπου κύματος και του σημείου παρατήρησης. Αυτή η εγγύτητα έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές μεταβολές στο πλάτος και τη φάση των δευτερευόντων κυμάτων, οδηγώντας σε περίπλοκα μοτίβα παρεμβολής και τοπικά φαινόμενα [16], [17].

$$\bar{E}_{\text{scat}}(r_P) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{r_s} \Gamma \bar{E}_{\text{inc}} \cdot \Psi \cdot \frac{e^{jk d_{PS}}}{d_{PS}} dx dy,$$

Όπου

$d_{ps} = |r_s - r_p|$, που αποτελεί την απόσταση μεταξύ του διανύσματος r_s που βρίσκεται πάνω στην μεταεπιφάνεια και r_p που είναι το διάνυσμα από την μεταεπιφάνεια ως το σημείο του κοντινού επιπέδου που θα διαμορφωθεί το επίπεδο ακτινοβολίας.

Γ : αποτελεί το πλάτος και την φάση του σκεδαζόμενου κύματος.

\bar{E}_{inc} : αποτελεί το πλάτος και την φάση του προσπίπτοντος κύματος, σφαιρικού και επίπεδου.

Το Ψ λειτουργεί ως συντελεστής λοξότητας (obliquity factor) παίρνοντας τιμές από 0 έως 1 και δίνεται από τον τύπο:

$$\Psi = \frac{1}{2} (\cos \theta_{inc} + \cos \theta_{scat}),$$

Στην εξερεύνηση της αρχής Huygens-Fresnel κοντινού πεδίου, θα εμβαθύνουμε σε συγκεκριμένες τεχνικές που αξιοποιούν τις μοναδικές ιδιότητες των αλληλεπιδράσεων κοντινού πεδίου για προηγμένες εφαρμογές. Πρώτον, θα εξετάσουμε τις μεταβάσεις FF σε NF (Far-Field to Near-Field), οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές όπως η εστίαση και η ολογραφία. Εδώ, εστιάζουμε στον τρόπο με τον οποίο οι μεταεπιφάνειες μπορούν να χειριστούν τα μέτωπα κύματος του μακρινού πεδίου για να επιτύχουν ακριβή εστίαση, είτε ως μεμονωμένα είτε ως πολλαπλά εστιακά σημεία, και πώς αυτές οι δυνατότητες μπορούν να επεκταθούν για τη δημιουργία λεπτομερών ολογραφικών οθονών. Επιπλέον, θα μελετήσουμε τις αλληλεπιδράσεις NF to NF (Near-Field to Near-Field), οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για την απεικόνιση υψηλής ανάλυσης και την ενισχυμένη ολογραφία. Αυτό το τμήμα θα αναδείξει τον τρόπο με τον οποίο οι μεταεπιφάνειες, σχεδιασμένες με βάση τις αρχές του κοντινού πεδίου, επιτρέπουν τη σύλληψη και το χειρισμό των μετωπών κύματος για την παραγωγή εξαιρετικά λεπτομερών εικόνων και εξελιγμένου ολογραφικού περιεχομένου. Οι τεχνικές αυτές υπογραμμίζουν τις σημαντικές δυνατότητες των αλληλεπιδράσεων κοντινού πεδίου για την προώθηση των δυνατοτήτων των μεταεπιφανειών σε οπτικά συστήματα.

3.2 Από το μακρινό πεδίο στο μακρινό (Far-Field to Far-Field)

3.2.1 Κατευθυντικότητα δέσμης μέσω grating

Η καθοδήγηση δέσμης είναι μια κρίσιμη εφαρμογή των μεταεπιφανειών, η οποία επιτρέπει τον δυναμικό έλεγχο της κατεύθυνσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η ικανότητα αυτή είναι απαραίτητη για διάφορες προηγμένες τεχνολογίες, όπως συστήματα ραντάρ, ασύρματες επικοινωνίες και οπτικές συσκευές. Μια αποτελεσματική μέθοδος για την επίτευξη της διεύθυνσης δέσμης είναι η χρήση πλεγμάτων σε μεταεπιφάνειες. Τα πλέγματα είναι περιοδικές δομές που μπορούν να διαθλούν τα εισερχόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Με τον προσεκτικό σχεδιασμό του μοτίβου του πλέγματος σε μια μεταεπιφάνεια, είναι δυνατός ο έλεγχος των γωνιών στις οποίες διαθλώνται τα κύματα. Η θεμελιώδης αρχή της διεύθυνσης δέσμης με χρήση πλεγμάτων βασίζεται στην εξίσωση περίθλασης

$$m\lambda = d(-\sin\alpha + \sin\beta)$$

Όπου:

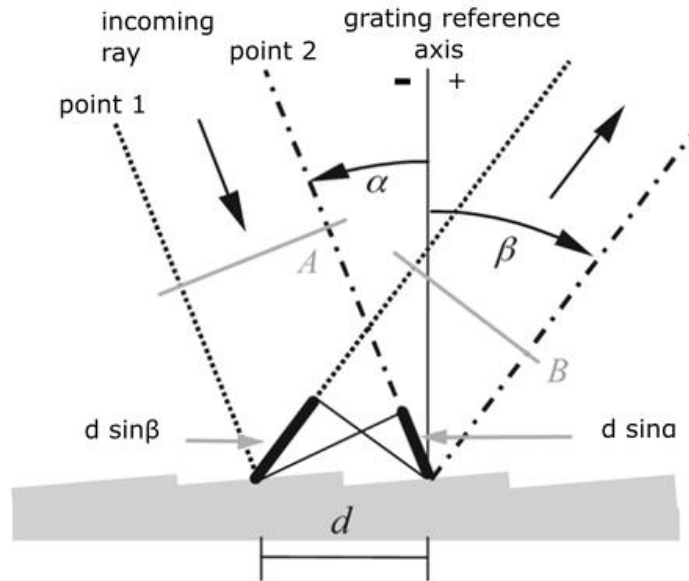
λ : μήκος κύματος

m : σειρά περίθλασης (φασματική σειρά)

d : απόσταση μεταξύ αυλακιών του grating (περίοδος grating)

α : γωνία (θ_{inc}) προσπίπτοντος κύματος

β : γωνία (θ_m) περίθλασης του κύματος

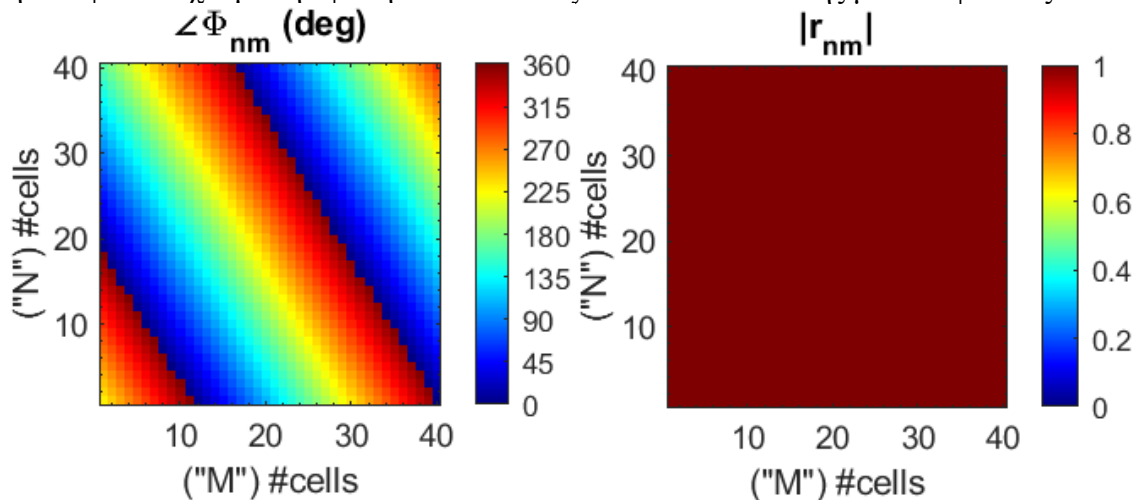


Εικόνα 18: Παράδειγμα Grating

Ρυθμίζοντας την περίοδο της σχάρας d και της γωνίας πρόσπτωσης θ_i , η κατεύθυνση των διαθλωμένων ακτίνων (θ_m) μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια. Αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει στις μεταεπιφάνειες να κατευθύνουν δυναμικά τις δέσμες μεταβάλλοντας το μοτίβο της επιφάνειας ηλεκτρονικά ή μηχανικά. Ο σχεδιασμός ενός μεταεπιφανειακού πλέγματος για την καθοδήγηση δέσμης περιλαμβάνει την επιλογή κατάλληλων υλικών και γεωμετρικών παραμέτρων για την επίτευξη των επιθυμητών γωνιών περίθλασης. Η περιοδικότητα του πλέγματος, μαζί με το μέγεθος και το σχήμα των επιμέρους στοιχείων, καθορίζει την αποτελεσματικότητα και την κατευθυντικότητα των κατευθυνόμενων ακτίνων [15].

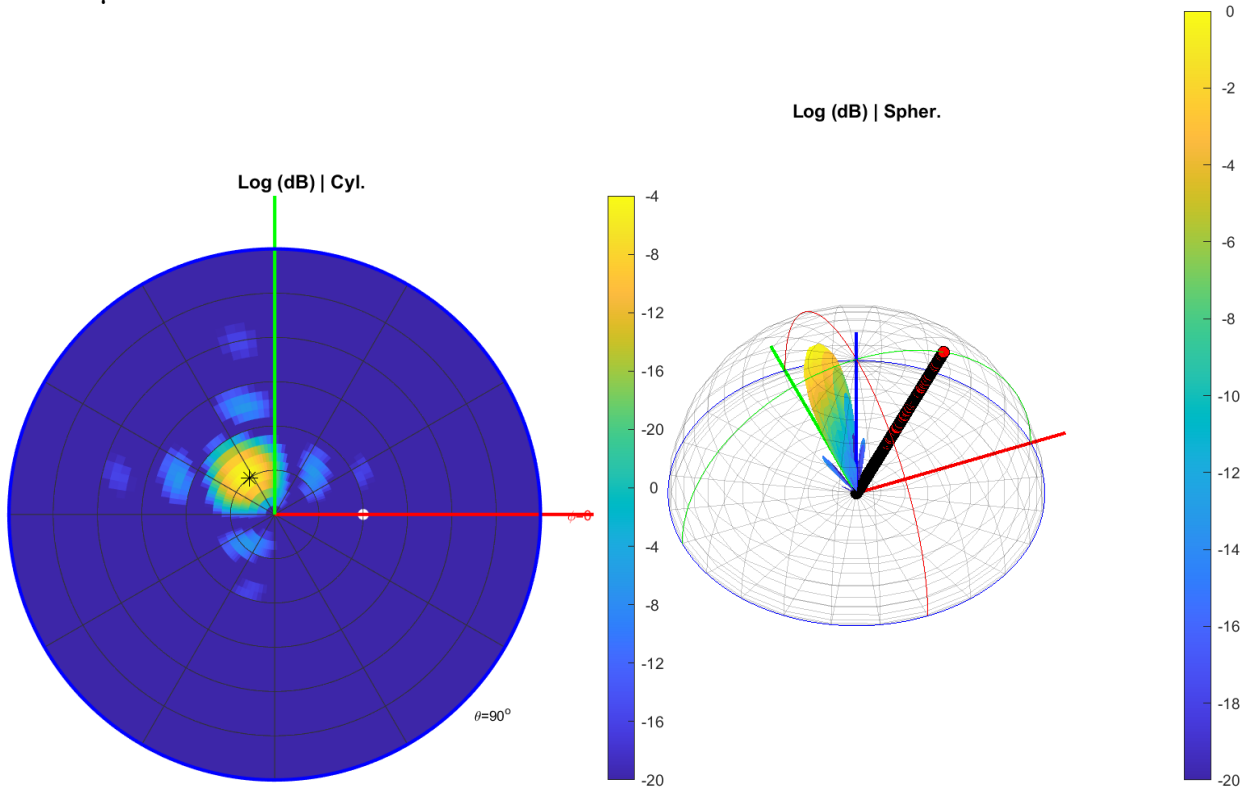
Με την βοήθεια του θεωρητικού υπόβαθρου που πήραμε από την παραπάνω παράγραφο μας δίνεται η δυνατότητα να αναλύσουμε μια μεταεπιφάνεια και να υπολογίσουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας που παράγει μέσω της αρχής Huygens Fresnel στο μακρινό πεδίο που δίνεται από την Εξίσωση 39.

Για παράδειγμα εάν έχουμε μια μεταεπιφάνεια 40×40 στα 850 GHz με μέγεθος κελιού $35 \mu\text{m}$ και το προσπίπτων είναι επίπεδο κύμα που πέφτει υπό γωνία $(\theta, \phi) = (30, 0)$ μοίρες μπορούμε να υπολογίσουμε την ακτινοβολία του σκεδαζόμενου κύματος που παράγει στο μακρινό πεδίο μέσω της Εξίσωσης 39 εφόσον έχουμε την φάση και το πλάτος του κάθε κελιού της μεταεπιφάνειας.



Εικόνα 19 : Φάση και πλάτος M/E beam steering

Βγάζουμε το παρακάτω διάγραμμα ακτινοβολίας για beam steering στο μακρινό πεδίο από επίπεδο κύμα.

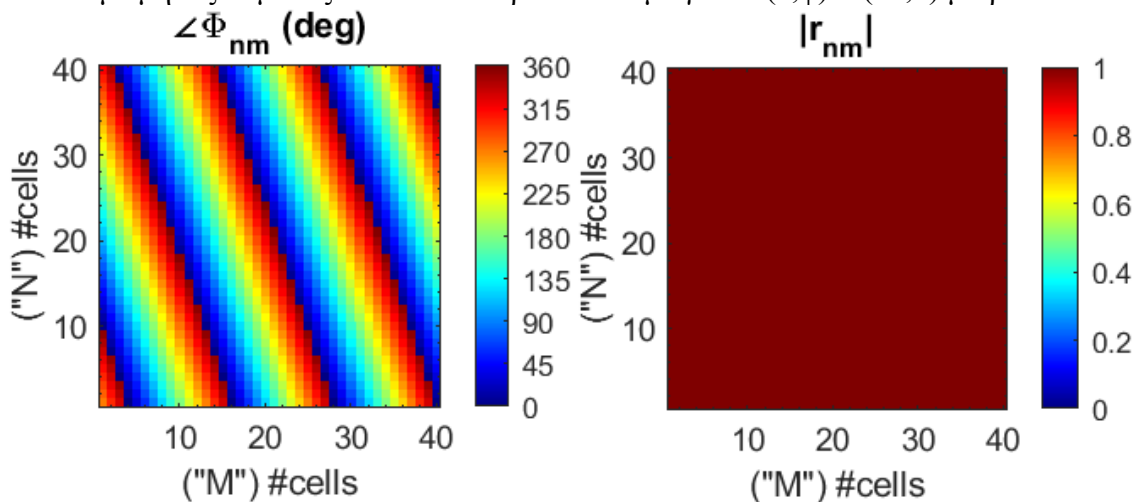


Εικόνα 20: Διάγραμμα ακτινοβολίας Beam Steering

3.2.2 Ανακατεύθυνση σε πολλαπλές δέσμες (beam splitting)

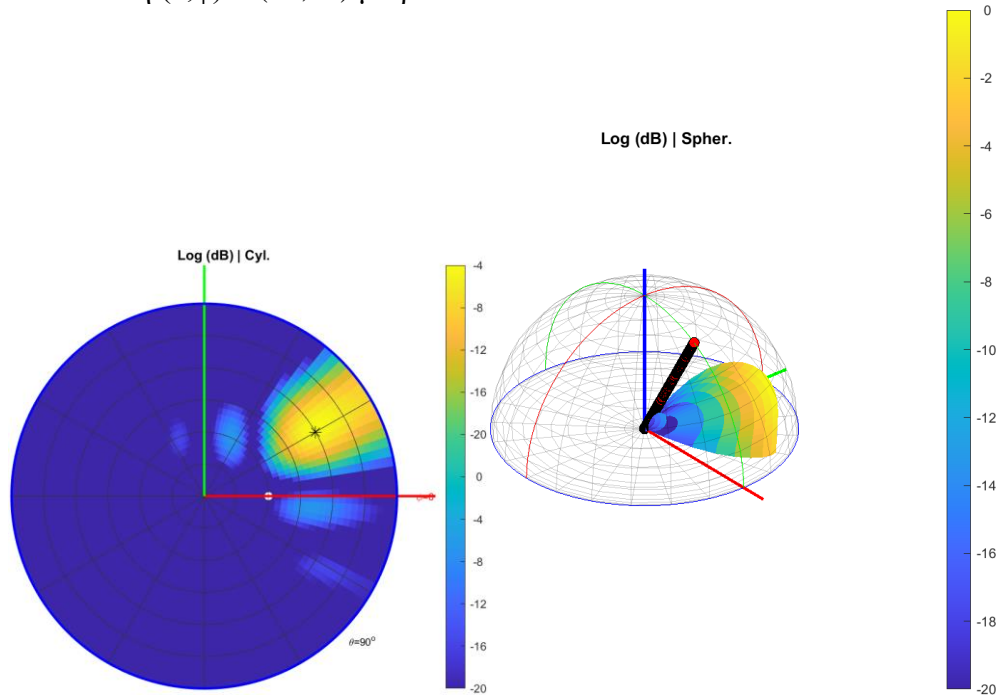
Στο κομμάτι του beam splitting ακολουθούμε νοοτροπία παραπλήσια του beam steering. Πιο συγκεκριμένα ο διαχωρισμός του προσπίπτων σε πολλαπλές κατευθύνσεις επιτυγχάνετε μέσω της σύνθεσης των φάσεων της μεταεπιφάνειας μας που θα είχε αν θέλαμε να κάνουμε beam steering στην κάθε μια κατεύθυνση μεμονωμένα.

Έστω ότι έχουμε μια 40x40 μεταεπιφάνεια με μέγεθος κελιού 2 mm και επίπεδο κύμα από το μακρινό πεδίο με μήκος κύματος 30 mm που προσπίπτει με γωνία $(\theta, \varphi) = (30, 0)$ μοιρών.



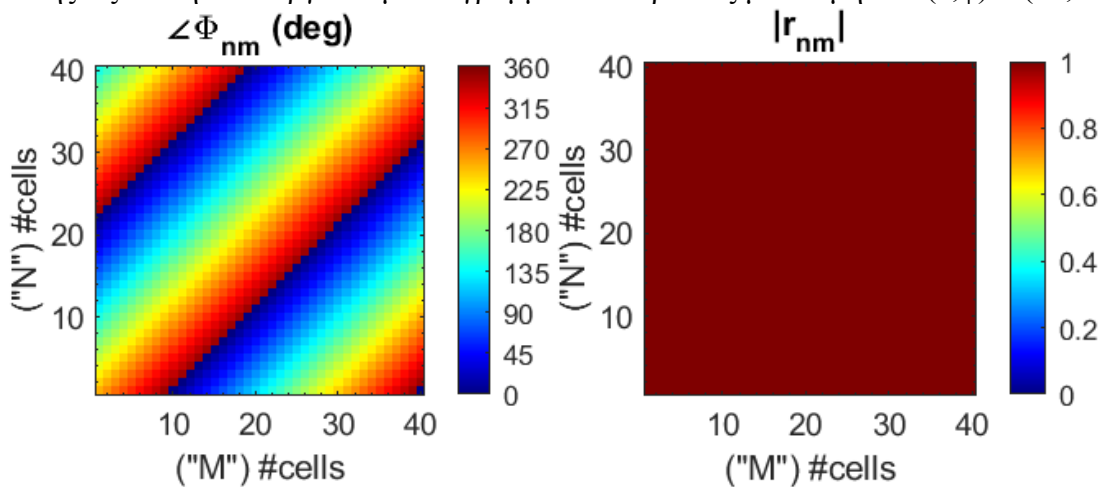
Εικόνα 21: Πρώτο κομμάτι απόδειξης Beam Splitting FF2FF (Φάση & Πλάτος)

Υπολογίζοντας το διάγραμμα ακτινοβολίας από την Εξίσωση 39 παρατηρούμε πως έχουμε beam steering στην διεύθυνση $(\theta, \varphi) = (60, 30)$ μοιρών

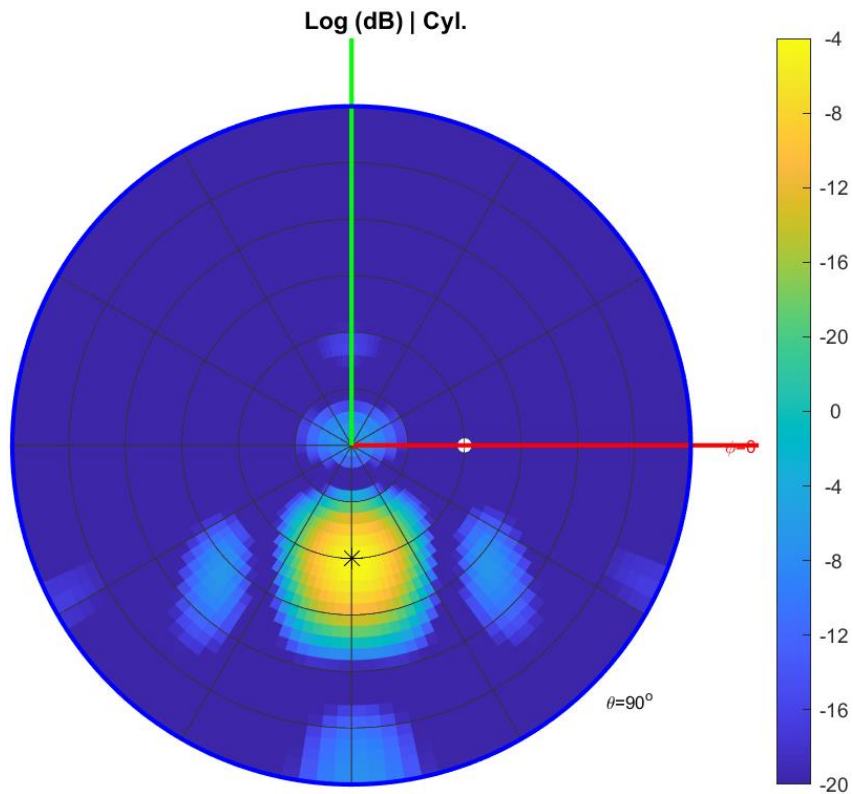


Εικόνα 22 : Πρώτο κομμάτι απόδειξης Beam Splitting FF2FF (Διάγραμμα ακτινοβολίας)

Στην ίδια μεταεπιφάνεια και κύμα αν μας δοθεί η παρακάτω φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας πάλι μέσω της Εξίσωση 39 θα βγάλουμε διάγραμμα ακτινοβολίας με δέσμη στο $(\theta, \varphi) = (30, 270)$

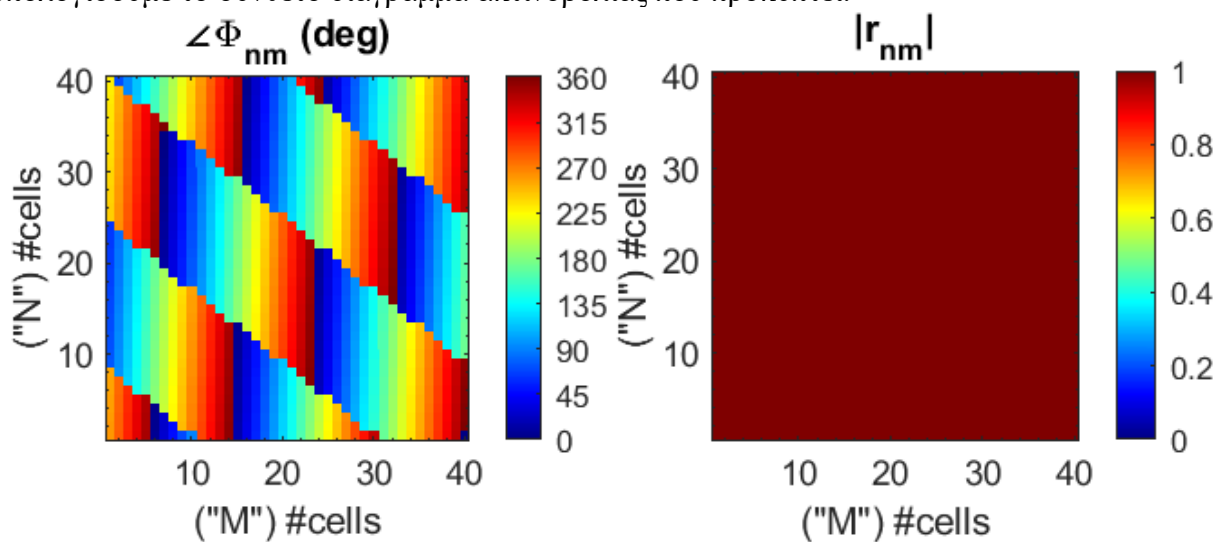


Εικόνα 23: Δεύτερο κομμάτι απόδειξης Beam Splitting FF2FF (Φάση & Πλάτος)



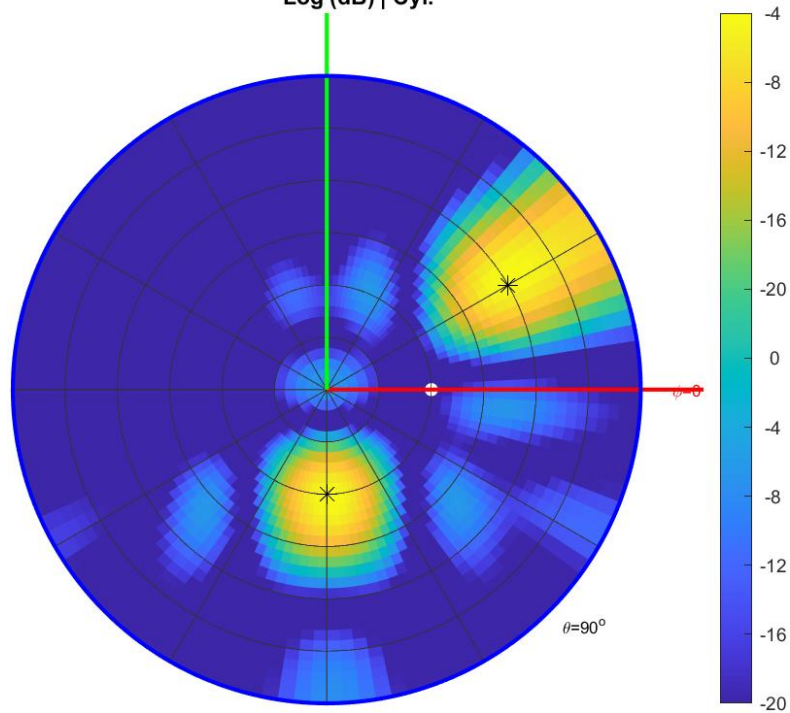
Εικόνα 24: Δεύτερο κομμάτι απόδειξης Beam Splitting FF2FF (Διάγραμμα ακτινοβολίας)

Επομένως αν μας δοθεί μια μεταεπιφάνεια με το παρακάτω προφίλ φάσης και πλάτους μπορούμε να υπολογίσουμε το σύνθετο διάγραμμα ακτινοβολίας που προκύπτει.



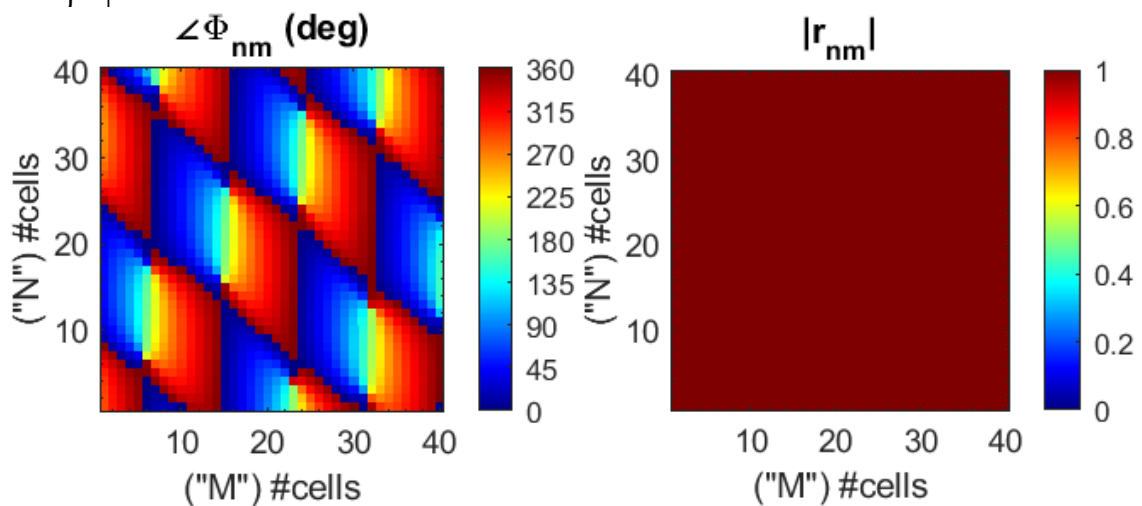
Εικόνα 25: Φάση και Πλάτος Beam Splitting (FF2FF)

Δίνοντας το αναμενόμενο αποτέλεσμα στο διάγραμμα ακτινοβολίας
 Log (dB) | Cyl.



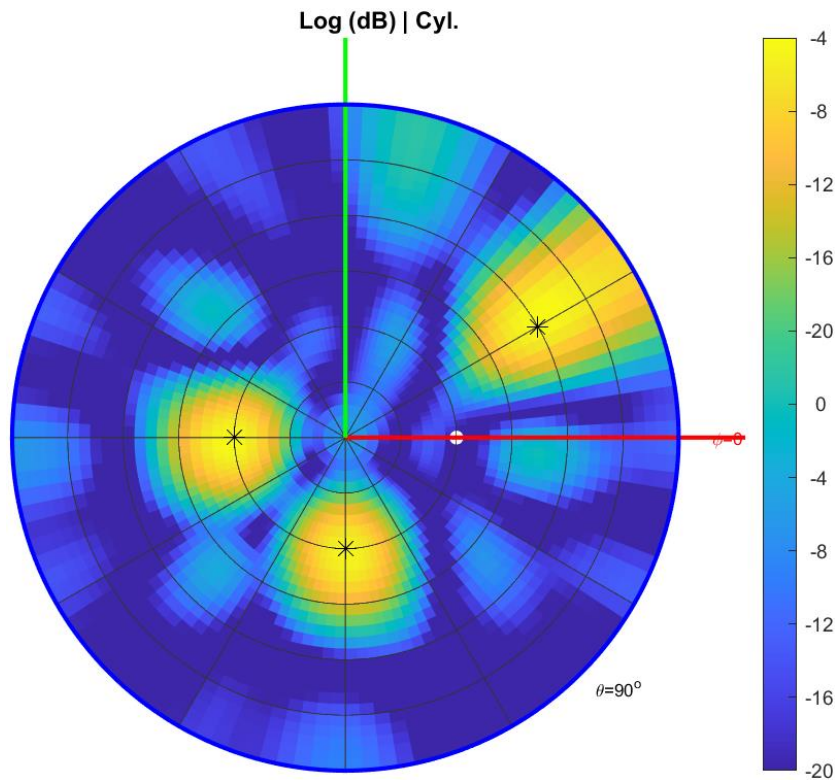
Εικόνα 26 : Διάγραμμα Beam Splitting 2 δέσεων

Με την αύξηση των απαιτούμενων διασπόμενων δέσεων περιμένουμε και επαυξημένη περιπλοκότητα του προφίλ φάσης της μεταεπιφάνειας. Παραδείγματος χάρη μας δίνεται το παρακάτω προφίλ.



Εικόνα 27: Φάση και Πλάτος Beam Splitting σε 3 λοβούς

Επαναλαμβάνοντας τον τρόπο υπολογισμού του διαγράμματος ακτινοβολίας βλέπουμε έναν νέο λοβό με διεύθυνση $(\theta, \varphi) = (30, 180)$

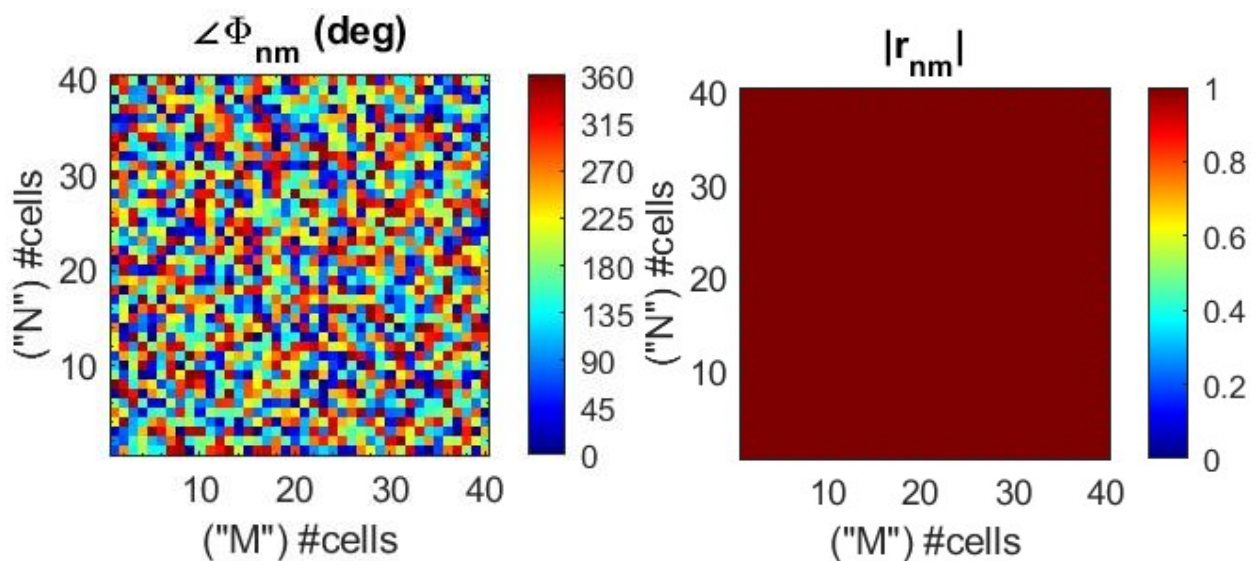


Εικόνα 28: Διάγραμμα ακτινοβολίας Beam Splitting 3 λοβών

3.2.3 Διάχυτη σκέδαση (diffused scattering)

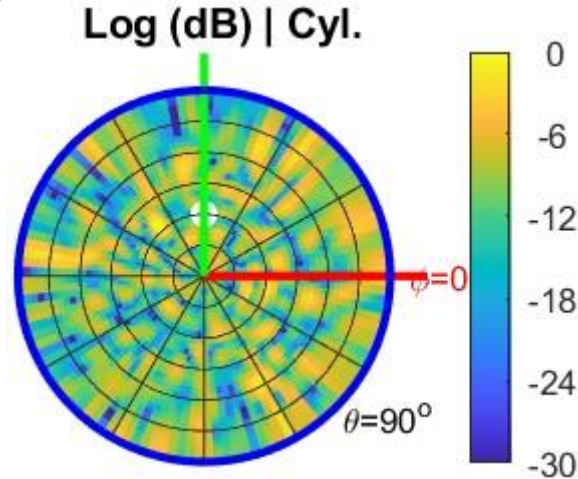
Με τον όρο diffused scattering εννοούμε την τυχαία σκέδαση του προσπίπτοντος σε διάφορες και αδιάκριτες κατευθύνσεις. Με την χρήση της αρχής Huygens-Fresnel και γνωρίζοντας την φάση και το πλάτος του κάθε κελιού μεμονωμένα της μεταεπιφάνειας εύκολα μπορούμε να διαμορφώσουμε και να δείξουμε την μορφή ακτινοβολίας του σκεδαζόμενου κύματος.

Χρησιμοποιώντας τις προδιαγραφές των προηγούμενων μεταεπιφανειών σε συνδυασμό με το πλάτος και τη φάση του κάθε κελιού μπορούμε να υπολογίσουμε το σκεδαζόμενο. Για παράδειγμα:



Εικόνα 19: Φάση και πλάτος για Diffused Scattering FF2FF

Θα έχουμε ένα διάγραμμα ακτινοβολίας στον τρισδιάστατο χώρο, πιο συγκεκριμένα σε σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων της παρακάτω μορφής.



Εικόνα 29: Διάγραμμα ακτινοβολίας για diffused scattering

3.3 Από το κοντινό στο μακρινό

3.3.1 Παραλληλισμός (Collimating)

Σε αυτή την ενότητα, θα μελετήσουμε την ακτινοβολία που παράγεται από μια μεταεπιφάνεια από ένα προσπίπτον κύμα που προέρχεται από το κοντινό πεδίο. Αυτό σημαίνει ότι το κύμα μας θα είναι σφαιρικό, θα προέρχεται από μια σημειακή πηγή και θα επεκτείνεται προς τα έξω προς όλες τις κατευθύνσεις. Καθώς τα μέτωπα των κυμάτων διαδίδονται μακριά από την πηγή, σχηματίζουν ομόκεντρες σφαίρες που φυσικά αποκλίνουν, οδηγώντας σε ταχεία μείωση της έντασης και της συνοχής με την απόσταση. Το προφίλ φάσης ενός σφαιρικού κύματος είναι μια ουσιαστική πτυχή που πρέπει να εξεταστεί, ειδικά όταν εξετάζεται ο τρόπος διάδοσης του κύματος στο χώρο. Η φάση ενός σφαιρικού κύματος μεταβάλλεται ακτινικά από την πηγή και συνήθως περιγράφεται με όρους της ακτινικής απόστασης από τη σημειακή πηγή.

$$\Delta\varphi = kr - \omega t$$

Εξίσωση 44

Όπου,

k : είναι ο αριθμός κύματος, σχετίζεται με το μήκος κύματος λ , μέσω $k = 2\pi/\lambda$

r : είναι η ακτινική απόσταση από την πηγή έως το σημείο ενδιαφέροντος,

ω : είναι η γωνιακή συχνότητα, που σχετίζεται με τη συχνότητα f , μέσω $\omega = 2\pi f$

t : χρόνος

Στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, όπου η απόσταση από την πηγή σε ένα σημείο της μεταεπιφάνειας δίνεται από τον τύπο $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ η φάση του σφαιρικού κύματος σε τρισδιάστατο χώρο μπορεί να εκφραστεί καλύτερα:

$$\phi(x, y) = k\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - \varphi_0$$

Εξίσωση 45

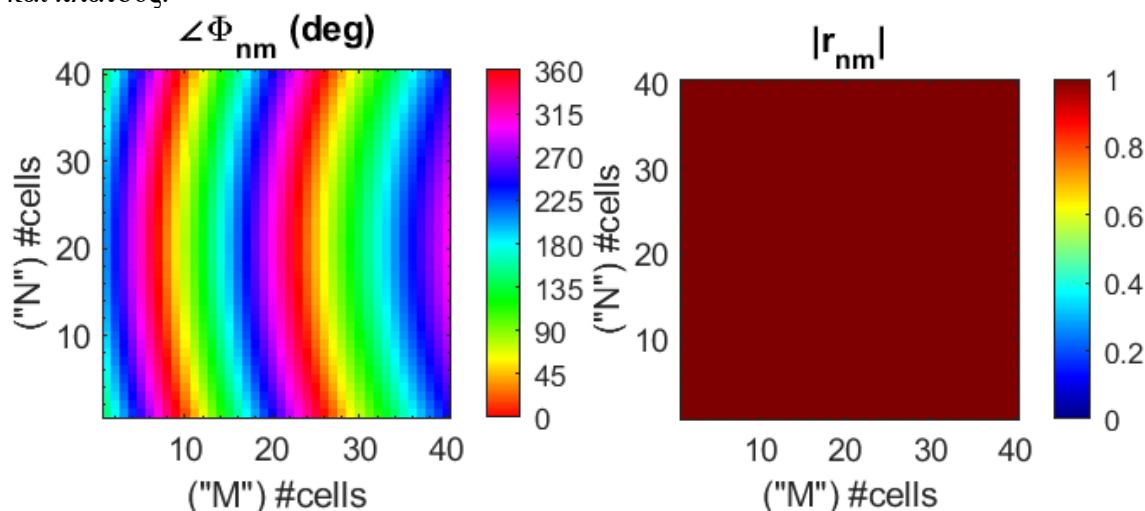
Ο παραλληλισμός, επομένως, αποτελεί μια κρίσιμη διαδικασία σε αυτό το πλαίσιο. Ο παραλληλισμός περιλαμβάνει την ευθυγράμμιση των μετώπων κύματος έτσι ώστε να είναι

παράλληλα, μετατρέποντας το φυσικά αποκλίνον σφαιρικό κύμα σε ένα επίπεδο μέτωπο κύματος που διατηρεί την ένταση και την κατεύθυνσή του σε μεγαλύτερες αποστάσεις [18]. Οι μεταεπιφάνειες, οι οποίες είναι κατασκευασμένες επιφάνειες με δομές κάτω του μήκους κύματος, μπορούν να το επιτύχουν αυτό επιβάλλοντας χωρικά μεταβαλλόμενες μετατοπίσεις φάσης στα προσπίπτοντα κύματα μέσω της εξίσωσης κατανομής φάσης Εξίσωση 45 σε συνδυασμό με την γενική εξίσωση των πλεγμάτων περίθλασης Εξίσωση 43 [19].

3.3.2 Κατευθυντικότητα δέσμης μέσω grating για σφαιρικό προσπίπτον (beam steering)

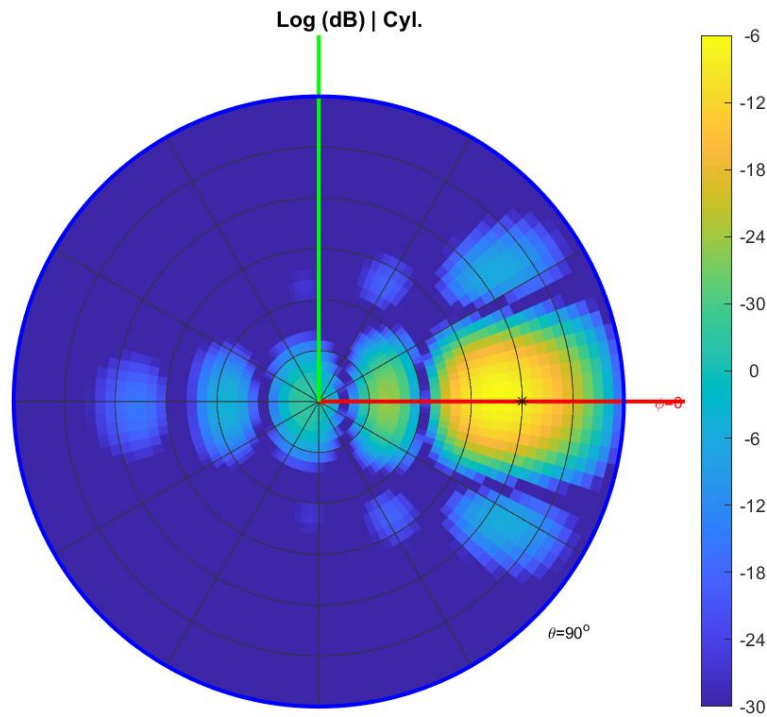
Όπως αναφέραμε και στην παραπάνω υποενότητα ο παραλληλισμός δέσμης (collimation) επιτυγχάνεται με την χρήση των gratings που χρησιμοποιήσαμε και στην Ενότητα 3.2.1 εφόσον βάλουμε σε χρήση την αλλαγή φάσης του σφαιρικού κύματος πάνω στην μεταεπιφάνεια, δίνοντας την δυνατότητα του υπολογισμού διαγράμματος ακτινοβολίας κατά την λειτουργία κατευθυντικότητας δέσμης.

Για παράδειγμα εάν έχουμε μια μεταεπιφάνεια 40x40 με μέγεθος κελιού 2mm και το σφαιρικό κύμα έχει μήκος κύματος 30mm από σημειακή πηγή $(x,y,z) = (0,0,5*wl)$ με το παρακάτω προφίλ φάσης και πλάτους.



Εικόνα 30: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για σφαιρικό κύμα (NF2FF)

Με την βοήθεια της αρχής Huygens-Fresnel του μακρινού πεδίου Εξίσωση 39, μιας και το σκεδαζόμενο κύμα το μετατρέψαμε σε επίπεδο κύμα με την βοήθεια της γενικής εξίσωσης πλεγμάτων περίθλασης Εξίσωση 41, γίνεται ο υπολογισμός της ακτινοβολίας που δίνεται παρακάτω. Έχοντας ως αποτέλεσμα την δημιουργία μιας δέσμης στο με κατεύθυνση $(\theta,\varphi)=(60,0)$.

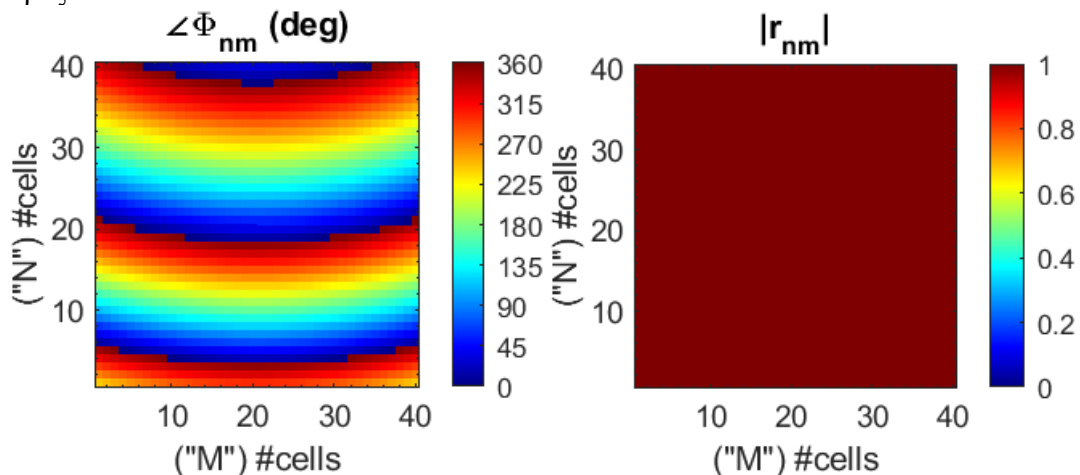


Εικόνα 31: Διάγραμμα ακτινοβολίας σφαιρικού κύματος για Beam Steering

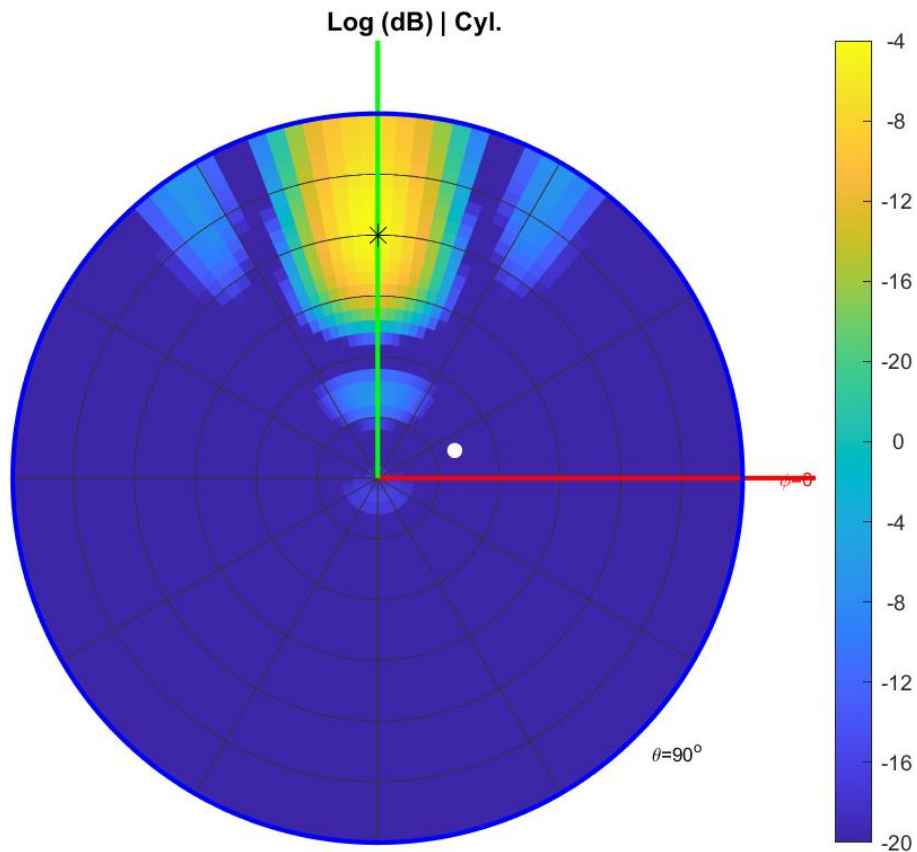
3.3.3 Διάσπαση σε πολλαπλές δέσμες για σφαιρικό προσπίπτον (beam splitting)

Η λογική λειτουργίας της διάσπασης δέσμεων μένει ίδια με το κεφάλαιο 3.2.2 πράγμα που κάνει επίσης δυνατή την κατανόηση και υπολογισμό του σύνθετου διαγράμματος ακτινοβολίας.

Διατηρώντας τα χαρακτηριστικά της μεταεπιφάνειας ίδια με τη προηγούμενη ενότητα και παρατηρώντας το προφίλ φάσης και πλάτους που δίνεται παρακάτω εύκολα μπορούμε να καταλάβουμε και να υπολογίσουμε ξανά το διάγραμμα ακτινοβολίας για μονή δέσμη σε $(\theta, \varphi) = (60, 90)$ μοίρες.

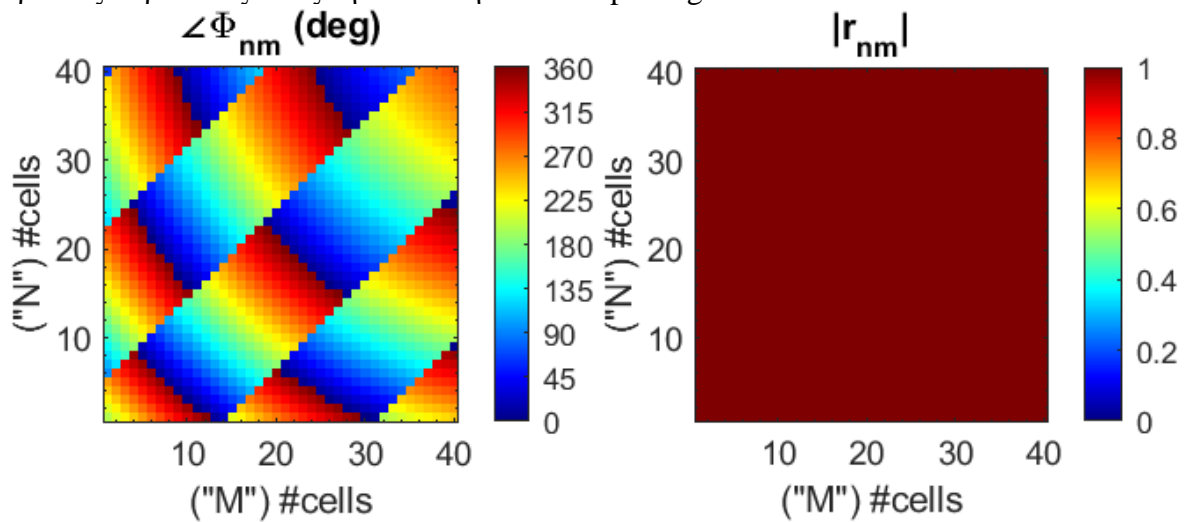


Εικόνα 32: Φάση και πλάτος επιπέδων μονής δέσμης σφαιρικού

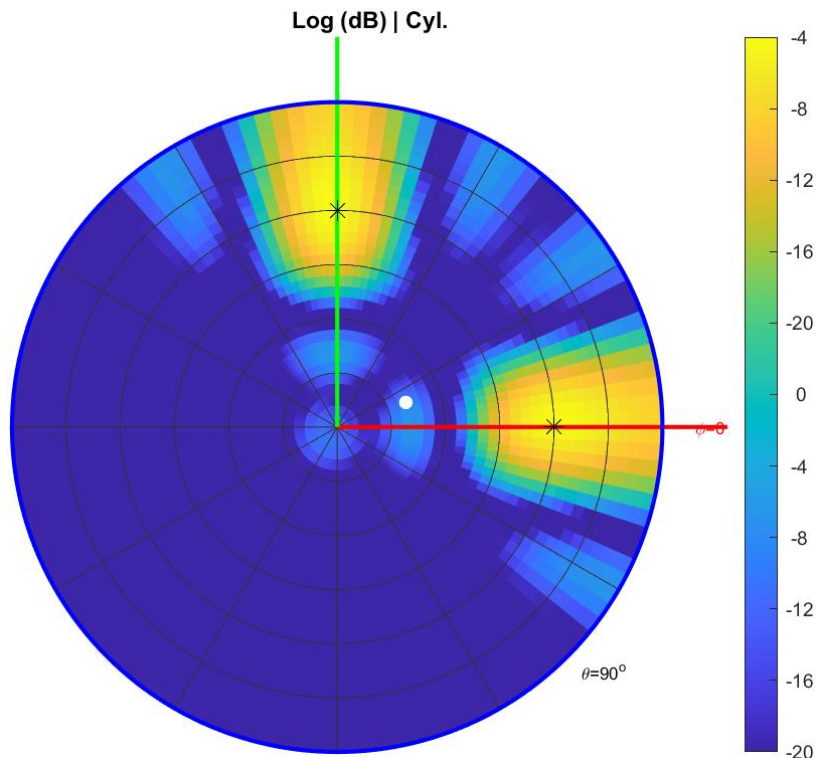


Εικόνα 33: Διάγραμμα ακτινοβολίας επιπλέον μονής δέσμης σφαιρικού

Επομένως με την άθροιση των μεμονομένων προφίλ φάσης και πλάτους που είχε η μεταεπιφάνεια για τις παραπάνω δέσμες υπολογίζουμε με την Εξίσωση 39 δίνοντας το σύνθετο διάγραμμα ακτινοβολίας παρουσιάζοντας την ικανότητα beam splitting.



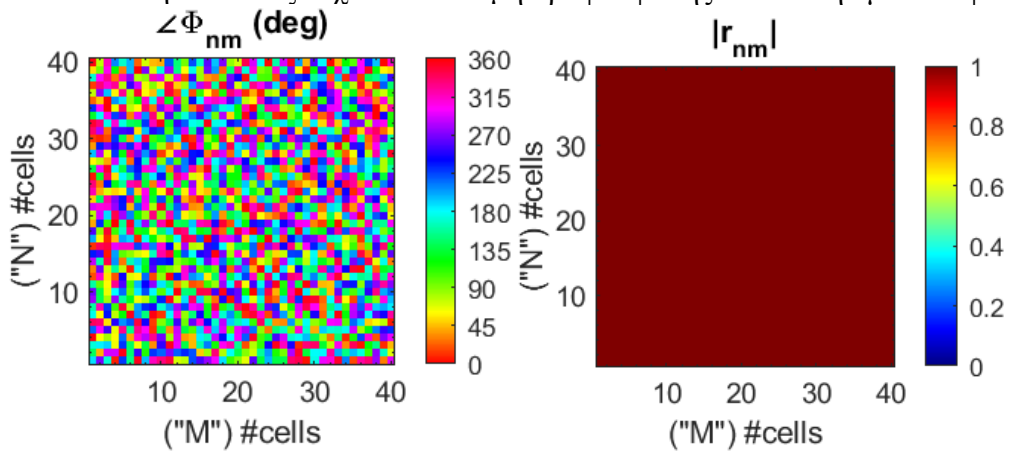
Εικόνα 34: Προφίλ φάσης και πλάτους M/E για σφαιρικό προσπίπτον για Beam Splitting



Εικόνα 35: Διάγραμμα ακτινοβολίας σφαιρικού κύματος για Beam Splitting

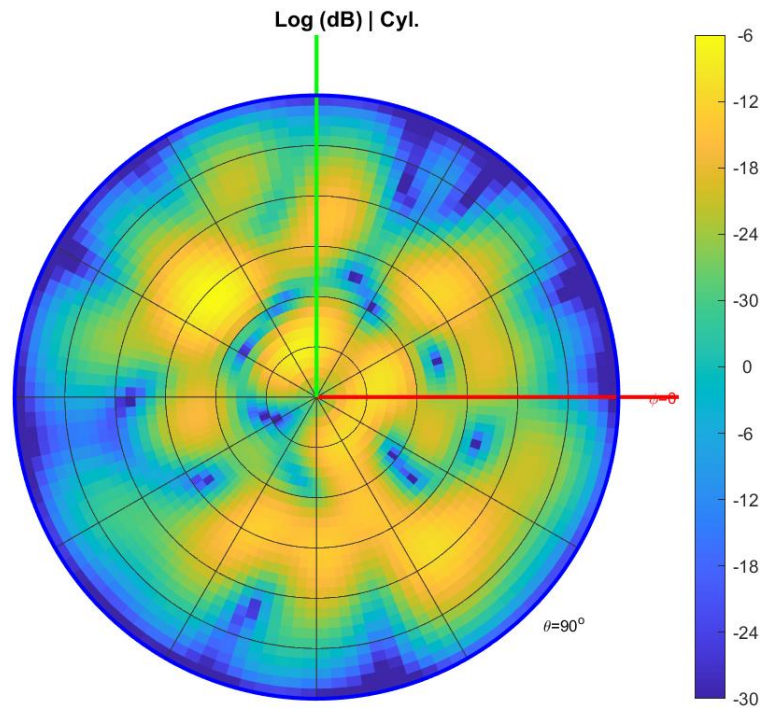
3.3.4 Διάσπαση Δέσμης (Diffused scattering)

Τα χαρακτηριστικά υλοποίησης της διάσπασης δέσμης αλλιώς diffused scattering παραμένουν ίδια μιας και αποτελούν την εντελώς τυχαία κατανομή προφίλ φάσης πάνω στην μεταεπιφάνεια.



Εικόνα 36: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για diffused scattering σφαιρικού προσπίπτοντος

Με την χρήση της Εξίσωση 39 γίνεται ο υπολογισμός του ακανόνιστου διαγράμματος ακτινοβολίας στο μακρινό επίπεδο που ακολουθεί.



Εικόνα 37: Διάγραμμα ακτινοβολίας για diffused scattering σφαιρικού κύματος

3.4 Από το μακρινό στο κοντινό

3.4.1 Εστίαση σε 1 σημείο (Singular Focusing)

Η εστίαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα μόνο σημείο είναι μια βασική ικανότητα των μεταεπιφανειών, η οποία ενεργοποιείται από την ικανότητά τους να χειρίζονται με ακρίβεια τη φάση και το πλάτος των εισερχόμενων κυμάτων. Αυτή η εστίαση επιτυγχάνεται με το σχεδιασμό της μεταεπιφάνειας με ένα συγκεκριμένο προφίλ φάσης που προκαλεί την εποικοδομητική αλληλεπίδραση των δευτερευόντων κυμάτων σε ένα εστιακό σημείο. Οι σχεδιασμένες μετατοπίσεις φάσης σε όλη τη μεταεπιφάνεια εξασφαλίζουν ότι τα κύματα από διαφορετικά μέρη της επιφάνειας φθάνουν στο εστιακό σημείο σε φάση, ενισχύοντας την ένταση του πεδίου σε αυτό το σημείο.

Για την οπτικοποίηση και την ανάλυση της επίδρασης εστίασης των μεταεπιφανειών, χρησιμοποιούνται συνήθως δύο τύποι διαγραμμάτων: το διάγραμμα κηλίδας και η κατανομή του πεδίου στο επίπεδο XZ. Το διάγραμμα σημείου, ιδωμένο από το επίπεδο XY, δείχνει τη συγκέντρωση της εστιασμένης δέσμης στο σημείο-στόχο, απεικονίζοντας την υψηλή ανάλυση και ακρίβεια της ικανότητας εστίασης. Εν τω μεταξύ, το διάγραμμα στο επίπεδο XZ παρέχει μια εγκάρσια άποψη της κατανομής πεδίου κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης, καταδεικνύοντας τον τρόπο με τον οποίο τα κύματα συγκλίνουν προς το εστιακό σημείο και το προφίλ έντασης κατά μήκος της διαδρομής της δέσμης.

Απαραίτητη για την επίτευξη εστίασης στο κοντινό πεδίο του σκεδασμένου κύματος που παράγεται από επίπεδο προσπίπτον είναι η μεταεπιφάνεια να διαθέτει προφίλ φάσης που να ακολουθεί το μοντέλο της παραβολικής φάσης για on-axis εστίαση [16].

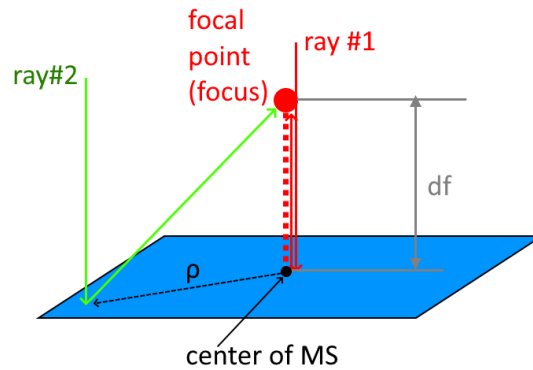
$$\varphi(\rho)_{scatt} = d_f - \sqrt{d_f^2 + \rho^2},$$

Εξίσωση 46

Όπου

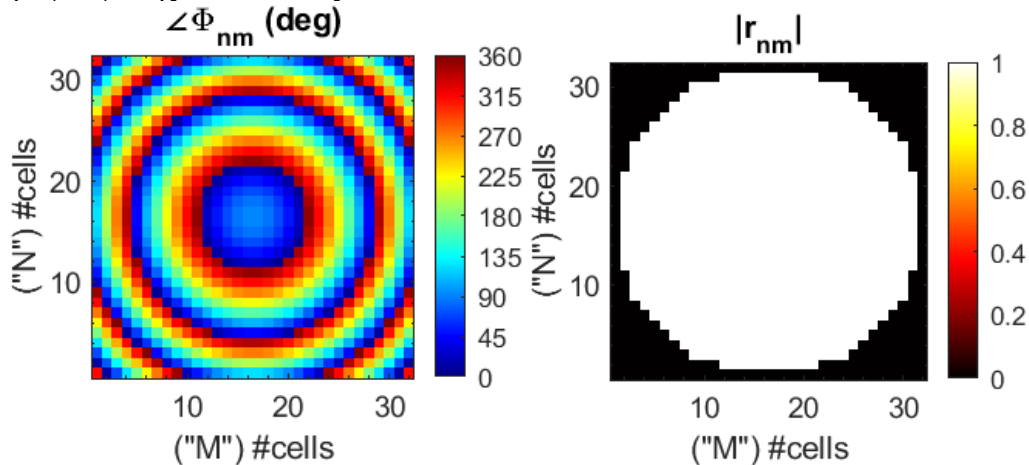
d_f : είναι η κάθετη απόσταση εστίασης από τη μεταεπιφάνεια

ρ : απόσταση του κάθε κελιού της μεταεπιφάνειας από τον κάθετο άξονα του σημείου εστίασης



Εικόνα 38: Αναπαράσταση Μεταεπιφάνειας με on-axis focus

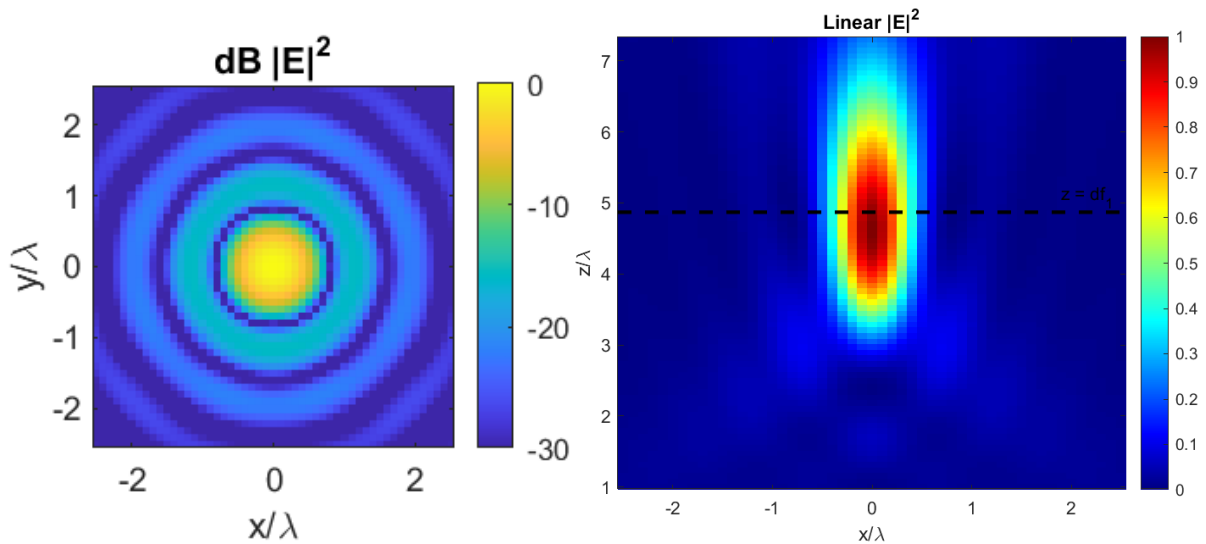
Για παράδειγμα εάν έχουμε 32x32 μεταεπιφάνεια με μήκος κελιού 3.26 mm και επίπεδο προσπίπτον κύμα συχνότητας 28 GHz ($\lambda \sim 10.07$ mm) με on-axis εστίαση σε $f=4.37w_l$ και το παρακάτω προφίλ φάσης και πλάτους.



Εικόνα 39: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για on-axis focusing (FF2NF)

Το σχήμα που δημιουργήθηκε στο XY πεδίο ακτινοβολίας ονομάζεται δίσκος Airy. Ο δίσκος Airy (Airy Disk) σχετίζεται με τα μοντέλα περίθλασης που παράγονται από ένα κυκλικό ‘άνοιγμα’ όταν επικεντρώνονται σε ένα σημείο από φακό. Πιο συγκεκριμένα όταν μια παράλληλη δέσμη φωτός διαπερνά από ένα στρογγυλό άνοιγμα όπως ένα τηλεσκοπικό φακό περιθλά και δημιουργεί ένα μοτίβο από ομόκεντρους κύκλους με το κεντρικό και πιο φωτεινό σημείο να αποτελεί τον δίσκο Airy ενώ οι υπόλοιποι ομόκεντροι κύκλοι μικρότερης έντασης ονομάζονται δακτύλιοι περίθλασης [20].

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω πληροφορίες μαζί με την Εξίσωση 41 μπορούμε να υπολογίσουμε το πεδίο ακτινοβολίας του σκεδαζόμενου κύματος στο XZ και XY επίπεδο.



Εικόνα 40: Διαγράμματα ακτινοβολίας on-axis μονής εστίασης στο XY και XZ επίπεδο

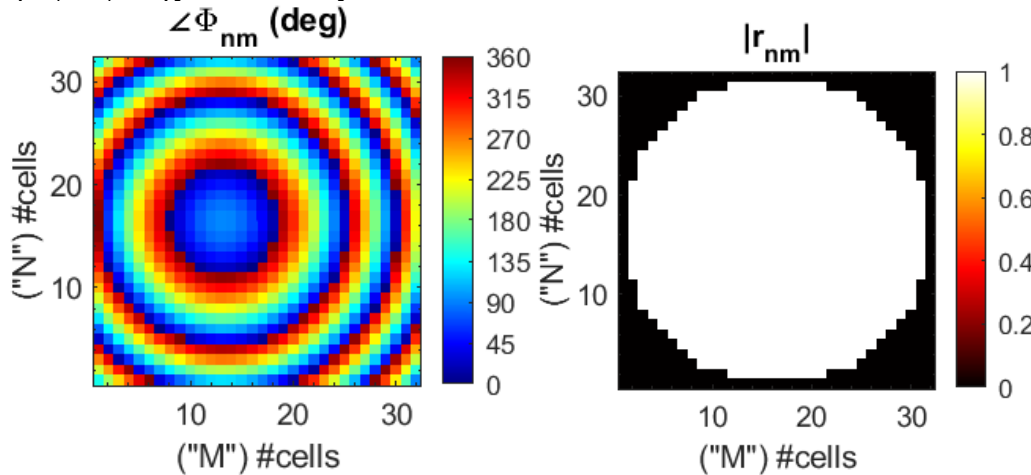
3.4.2 Εστίαση σε 1 σημείο εκτός του άξονα z (off-axis focusing)

Για τις περιπτώσεις εστίασης πάνω στον άξονα z θεωρούμε ότι η εστιακή απόσταση ισούται αποκλειστικά με την κάθετη απόσταση της μεταεπιφάνειας από το σημείο εστίασης.

$$d_f = \sqrt{\rho f x^2 + \rho f y^2 + \rho f z^2}$$

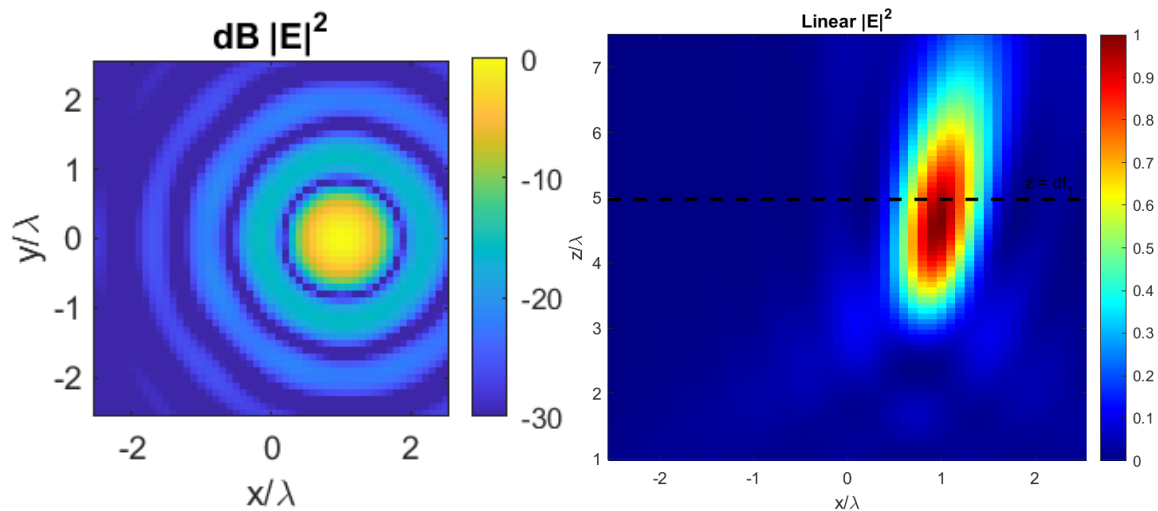
Εξίσωση 47

Με την παραπάνω τροποποίηση του τύπου τις εστιακής απόστασης έχουμε την δυνατότητα να υπολογίσουμε διαγράμματα ακτινοβολίας δίσκου Airy και εστιακού πεδίου που εστιάζουν εκτός του άξονα z. Παραδείγματος χάρη εάν κρατήσουμε τα χαρακτηριστικά του κύματος και της μεταεπιφάνειας αλλάζοντας μόνο το εστιακό μέτωπο σε $(x,y,z)=(w_l, 0, 4.37w_l)$ και έχουμε το παρακάτω προφίλ φάσης και πλάτους.



Εικόνα 41: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για off-axis focus

Ο συνδυασμός των εξισώσεων Εξίσωση 41, Εξίσωση 47 παρέχει την δυνατότητα υπολογισμού του διαγράμματος κηλίδας (Airy Disk XY πεδίο) και του πεδίου XZ.



Εικόνα 42: Διαγράμματα ακτινοβολίας σε πεδίο XY και XZ για off-axis focus

3.4.3 Εστίαση σε 2 σημεία (Dual Focusing)

Μετά τη διερεύνηση των δυνατοτήτων μοναδικής εστίασης των μεταεπιφανειών, επεκτείνουμε τη μελέτη μας στη διπλή εστίαση, όπου οι μεταεπιφάνειες σχεδιάζονται για την ταυτόχρονη εστίαση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε δύο διαφορετικά σημεία [21]. Αυτή η προηγμένη λειτουργικότητα ενισχύει την ευελιξία των μεταεπιφανειών, επιτρέποντάς τους να εξυπηρετούν ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών που απαιτούν πολλαπλά εστιακά σημεία, όπως σε πολύπλοκα συστήματα απεικόνισης ή πολυεστιακές οπτικές συσκευές.

Η διπλή εστίαση περιλαμβάνει τον ακριβή χειρισμό της φάσης και του πλάτους σε ολόκληρη τη μεταεπιφάνεια για τη δημιουργία δύο ξεχωριστών αλλά ταυτόχρονων εστιακών σημείων. Αυτή η ικανότητα είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές που απαιτούν παράλληλη επεξεργασία οπτικών σημάτων ή για τη δημιουργία περίπλοκων φωτεινών μοτίβων που είναι απαραίτητα σε προηγμένους οπτικούς υπολογιστές και αισθητήρες πολλαπλών σημείων. Αυτή η τεχνική μπορεί να επιτευχθεί με τον παρακάτω τύπο που δίνει το προφίλ της φάσης της μεταεπιφάνειας.

$$\Delta\phi_i = k_0 \cdot |\mathbf{r}_s - \rho| - \arg \left(\sum_{n=1}^2 \Gamma \cdot \exp(-jk_0 \cdot |d_f - \rho|) \right),$$

Εξίσωση 48

Όπου:

k_0 : είναι ο αριθμός κύματος του ελεύθερου χώρου

r_s : η απόσταση της πηγής από το σύστημα αξόνων

ρ : η επιφανειακή απόσταση ($z=0$) του κάθε σημείου της μεταεπιφάνειας από το σημείο αναφοράς

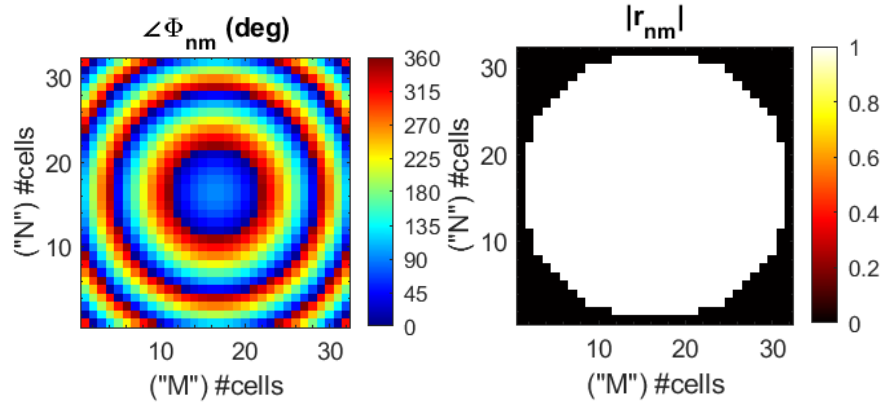
d_f : η εστιακή απόσταση

3.5 Από το κοντινό στο κοντινό

Στις προηγούμενες ενότητες συζητήσαμε τις δυνατότητες ακριβούς εστίασης των μεταεπιφανειών και τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να σχεδιαστούν για να συγκεντρώνουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε ένα μόνο σημείο. Ωστόσο, η απόδοση αυτών των μεταεπιφανειών μπορεί να διαφέρει σημαντικά με τις αλλαγές στην απόσταση μεταξύ της πηγής και της μεταεπιφάνειας. Η παρούσα

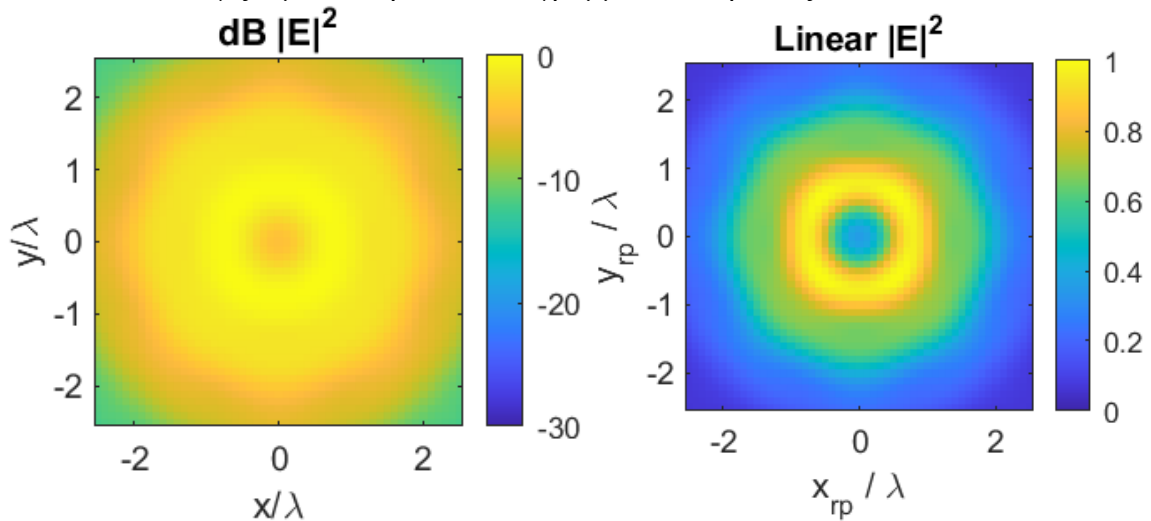
ενότητα διερευνά τον τρόπο με τον οποίο το εστιακό σημείο εξαπλώνεται καθώς μειώνεται η απόσταση της πηγής, χωρίς να υπολογίζεται εκ νέου η κωδικοποίηση της μεταεπιφάνειας.

Αρχικά διατηρώντας την μορφή της μεταεπιφάνειας από την ενότητα 3.5.1 και το σημείο εστίασης θα υπολογίσουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας για σφαιρικό κύμα από πηγή $(x,y,z)=(0,0,10w_1)$ και το παρακάτω προφίλ φάσης και πλάτους.



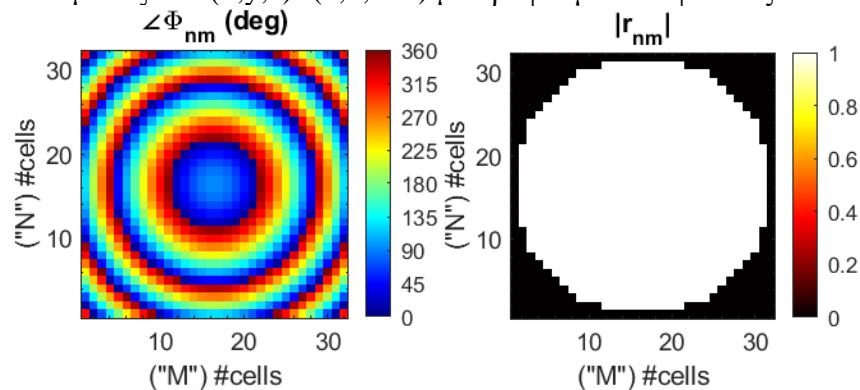
Εικόνα 43: Φάση και πλάτος Μεταεπιφάνειας για NF2NF εστίασης

Με την χρήση των εξισώσεων εστιακού φακού Εξίσωση 47 και με την αρχή Huygens-Fresnel για το κοντινό πεδίο υπολογίζουμε το παρακάτω διάγραμμα ακτινοβολίας στο XY επίπεδο.



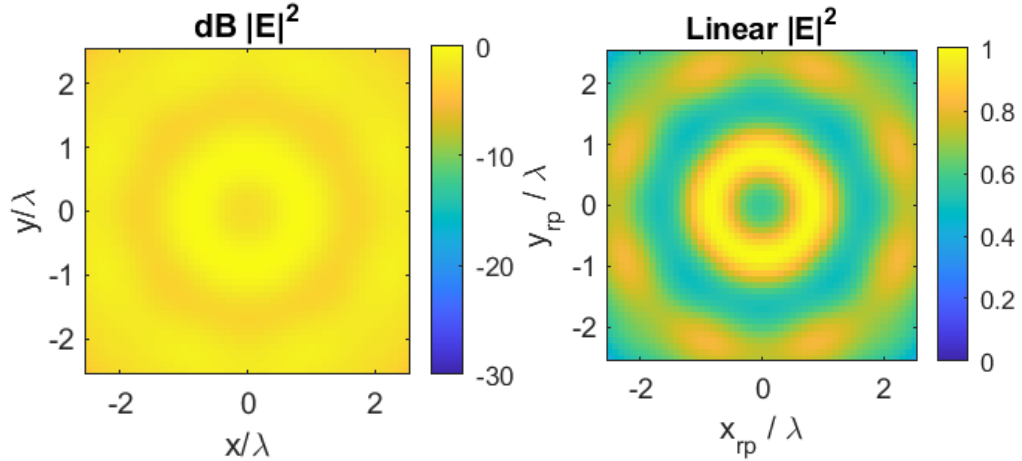
Εικόνα 44: Διάγραμμα ακτινοβολίας για σφαιρικό κύμα στο κοντινό πεδίο

Στην συνέχεια διατηρώντας πάλι τα ίδια δεδομένα θα φέρουμε πιο κοντά στην μεταεπιφάνεια την πηγή του σφαιρικού κύματος στο $(x,y,z)=(0,0,5w_1)$ με προφίλ μεταεπιφάνειας:



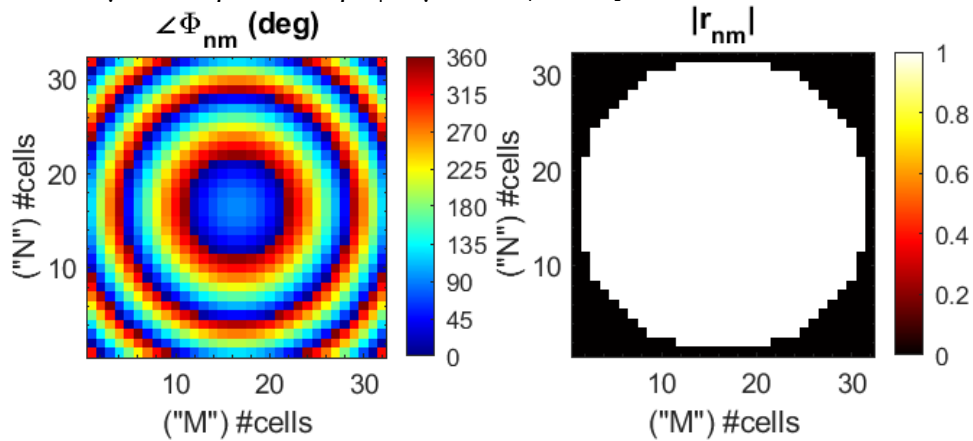
Εικόνα 45: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για εστίαση σφαιρικού σε κοντινό πεδίο

Υπολογίζουμε ξανά μέσω των Εξίσωση 47 και Εξίσωση 41 ένα διάγραμμα ακτινοβολίας στο οποίο φαίνεται ότι ο δίσκος Airy έχει διευρυνθεί αρκετά.

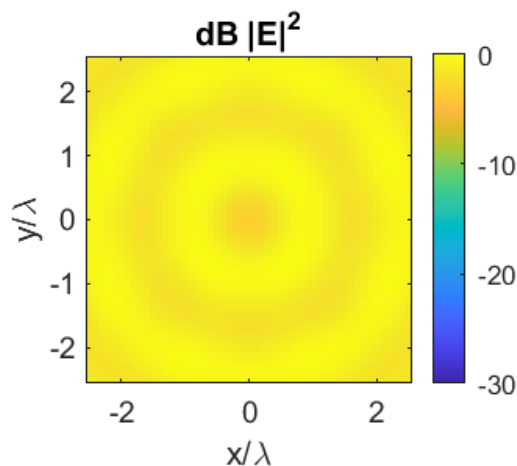


Εικόνα 46: Διάγραμμα ακτινοβολίας spot-diagram για σφαιρικό κύμα

Τέλος θα φέρουμε ακόμα πιο κοντά την πηγή του σφαιρικού κύματος διατηρώντας σταθερή την εστιακή απόσταση. Η σημειακή πηγή θα γίνει $(x,y,z)=(0,0,2w_1)$, αφηρώντας τους περιορισμούς που θέσαμε στον κώδικα, με το παρακάτω προφίλ μεταεπιφάνειας.



Εικόνα 47: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για εστίαση σφαιρικού κύματος πολύ κοντά στην μεταεπιφάνεια



Εικόνα 48: Διάγραμμα ακτινοβολίας για εστίαση σφαιρικού κύματος πολύ κοντά στην μεταεπιφάνεια

Βλέπουμε πλέον ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας δεν αντιπροσωπεύει σε κανένα βαθμό τον δίσκο Airy που θα έπρεπε να έχουμε καθιστώντας έτσι αδύνατη την εστίαση του σφαιρικού κύματος στο σημείο που θέλουμε.

Κεφάλαιο 4: Σύνθεση και Εφαρμογές Μεταεπιφανειών

Στα προηγούμενα κεφάλαια, εξετάσαμε σχολαστικά τον περίπλοκο σχεδιασμό και τα θεωρητικά θεμέλια των μεταεπιφανειών, καθώς και τη βαθιά επιρροή τους στα ηλεκτρομαγνητικά (ΗΜ) κύματα. Διερευνήσαμε πώς συγκεκριμένα προφίλ φάσης και πλάτους, προσαρμοσμένα σε μεταεπιφάνειες, μπορούν να χειραγωγήσουν τα ΗΜ κύματα με επιθυμητούς τρόπους, επιτρέποντας λειτουργίες όπως η καθοδήγηση δέσμης, η εστίαση και η απεικόνιση.

Έχοντας εδραιώσει μια ολοκληρωμένη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι μεταεπιφάνειες αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, στρέφουμε τώρα την προσοχή μας στη σύνθεση και τις πρακτικές εφαρμογές αυτών των προηγμένων δομών. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα ξεκινήσουμε με τον καθορισμό των επιθυμητών αποτελεσμάτων και λειτουργιών για τις μεταεπιφάνειες, όπως συγκεκριμένες γωνίες διεύθυνσης δέσμης, εστιακά σημεία ή αναλύσεις απεικόνισης. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε τη διαδικασία σχεδιασμού μεταεπιφανειών που επιτυγχάνουν αυτά τα αποτελέσματα με τη δημιουργία κατάλληλων προφίλ φάσης και πλάτους.

Αυτή η συνθετική προσέγγιση περιλαμβάνει την αντιστροφή της προηγούμενης μεθοδολογίας μας. Αντί να ξεκινήσουμε με ένα σχέδιο μεταεπιφάνειας και να αναλύσουμε τα αποτελέσματά του στα ΗΜ κύματα, θα ξεκινήσουμε με τους επιθυμητούς στόχους χειρισμού των κυμάτων και θα εργαστούμε προς τα πίσω για να καθορίσουμε τις απαραίτητες διαμορφώσεις μεταεπιφάνειας. Με αυτόν τον τρόπο, στοχεύουμε στην ανάπτυξη μεταεπιφανειών που μπορούν να επιτύχουν με ακρίβεια στοχευμένες ηλεκτρομαγνητικές αποκρίσεις για διάφορες εφαρμογές.

Το κεφάλαιο αυτό θα αναδείξει επίσης τις πρακτικές εφαρμογές αυτών των συνθετικών μεταεπιφανειών, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά τους σε πραγματικές εφαρμογές όπως οι τηλεπικοινωνίες, η ιατρική απεικόνιση και όχι μόνο. Μέσω αυτής της εστιασμένης διαδικασίας σύνθεσης, θα καταδείξουμε τις μετασχηματιστικές δυνατότητες των μεταεπιφανειών στη σύγχρονη τεχνολογία, αναδεικνύοντας την ευελιξία και την προσαρμοστικότητά τους στην επίτευξη πολύπλοκων ηλεκτρομαγνητικών χειρισμών.

Γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ του θεωρητικού σχεδιασμού και της πρακτικής εφαρμογής, αυτό το κεφάλαιο υπογραμμίζει τη σημασία των μεταεπιφανειών στην προώθηση των σημερινών τεχνολογικών δυνατοτήτων και ανοίγει την πόρτα σε νέες καινοτομίες στον τομέα του ελέγχου των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

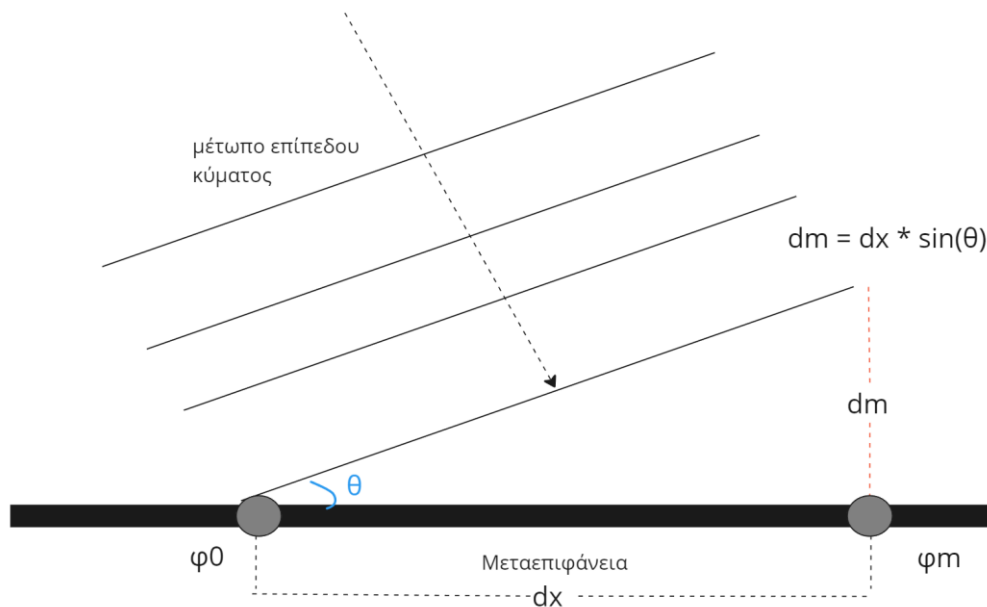
Μια σημαντική παράμετρος σε αυτή τη διαδικασία είναι η αρχή της υπέρθεσης, η οποία δηλώνει ότι τα γειτονικά κύτταρα της μεταεπιφάνειας δεν είναι συνδεδεμένα- δεν επηρεάζουν το ένα το άλλο. Αυτό εξασφαλίζει ότι η μεταεπιφάνεια λειτουργεί γραμμικά, επιτρέποντάς μας να σχεδιάσουμε κάθε κύτταρο ανεξάρτητα για να επιτύχουμε το συνολικό επιθυμητό αποτέλεσμα. Αυτή η γραμμικότητα απλοποιεί τη διαδικασία σύνθεσης και ενισχύει την προβλεψιμότητα και την αξιοπιστία της απόδοσης της μεταεπιφάνειας.

4.1 Σχεδίαση μεταεπιφάνειας Beam steering

4.1.1 Ανακατεύθυνση δέσμης επίπεδου κύματος στο μακρινό πεδίο

Στην ενότητα 3.2.1, παρουσιάσαμε την θεμελιώδη εξίσωση της σχάρας, ευρέως αναγνωρισμένη στην επιστημονική κοινότητα ως Diffraction Grating Equation Εξίσωση 43. Αυτή η εξίσωση παίζει καθοριστικό ρόλο στην κατανόηση της διεύθυνσης δέσμης μέσω μεταεπιφανειών. Σε αυτήν την ενότητα, εμβαθύνουμε στη μηχανική και τις επιπτώσεις της για να ενισχύσουμε την κατανόηση και την ικανότητά μας να χρησιμοποιούμε αποτελεσματικά αυτή την αρχή. Στόχος μας είναι να αναλύσουμε σχολαστικά και να βελτιώσουμε αυτή την εξίσωση, εξοπλίζοντάς μας έτσι με ένα ισχυρό εργαλείο για τον σχεδιασμό μεταεπιφανειών. Συγκεκριμένα, στοχεύουμε στην προσαρμογή αυτών των επιφανειών με βάση τη γωνία πρόσπτωσης (θ, ϕ) του εισερχόμενου επίπεδου κύματος και της

επιθυμητής γωνίας αναπροσανατολισμού της δέσμης. Αυτή η ενδελεχής εξέταση θα μας επιτρέψει να βελτιστοποιήσουμε τις παραμέτρους του πλέγματος για να επιτύχουμε ακριβή έλεγχο της κατεύθυνσης των κατευθυνόμενων ακτίνων, διασφαλίζοντας ότι οι μεταεπιφάνειες που σχεδιάζουμε είναι τόσο αποτελεσματικές όσο και αποδοτικές στην αναπροσανατολισμό των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όπως προβλέπεται.



Εικόνα 49: Διαφορά φάσης σε σημείο της μεταεπιφάνειας σε σχέση με σημείο αναφοράς

Αρχικά αναφορά πρέπει να γίνει σχετικά με την διαφορά φάσης σε σημεία του επίπεδου προσπίπτοντος κύματος $\Delta\varphi = \varphi_m - \varphi_0$. Η παρακάτω εικόνα δείχνει την διαφορά φάσης του κύματος πάνω στην μεταεπιφάνεια σε σύστημα αξόνων xy . Καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση στον δισδιάστατο χώρο.

$$\Delta\varphi_{plane} = k_0 \cdot dx \cdot \sin(\theta) - \varphi_0$$

Εξίσωση 49

Όπου

k_0 : είναι ο αριθμός κύματος του ελεύθερου χώρου

dx : η απόσταση στον άξονα x των δύο σημείων

θ : η γωνία πρόσπτωσης του επίπεδου κύματος

Δεδομένου όμως ότι η μελέτη γίνεται στον τρισδιάστατο χώρο, με την βοήθεια του σφαιρικού συστήματος αξόνων μπορούμε να φτάσουμε στον υπολογισμό διαφοράς φάσης ενός κελιού της μεταεπιφάνειας με την παρακάτω σχέση.

$$\Delta\varphi = k_0 \cdot [(x - x_0) \cdot D_u \cdot \cos(\varphi) - (y - y_0) \cdot D_u \cdot \sin(\varphi)] \cdot \sin(\theta) - \varphi_0$$

Εξίσωση 50

Όπου

k_0 : είναι ο αριθμός κύματος του ελεύθερου χώρου.

x, y : οι συντεταγμένες του κελιού του οποίου την φάση υπολογίζουμε.

x_0, y_0 : θέση του κελιού αναφοράς της μεταεπιφάνειας.

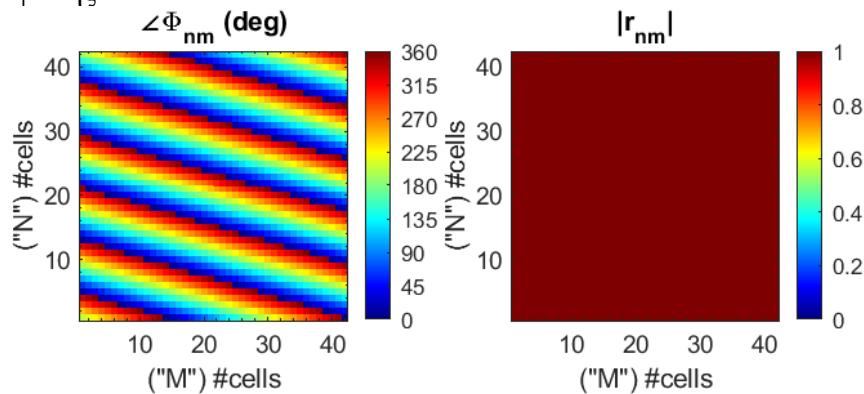
D_u : μέγεθος του τετραγωνικού κελιού.

Εφόσον τέθηκαν οι βάσεις για την κατανόηση της διάδοσης και της διαφοράς φάσης που παρατηρείτε σε ένα επίπεδο κύμα κατά την πρόσπτωση του σε μια μεταεπιφάνεια μπορούμε να εμβαθύνουμε στην σχεδίαση των grating. Η εξίσωση πλέγματος μπορεί να εκφραστεί ως εξής [22].

$$\Phi_{xy} = \Delta\varphi_{scatt} - \Delta\varphi_{inc}$$

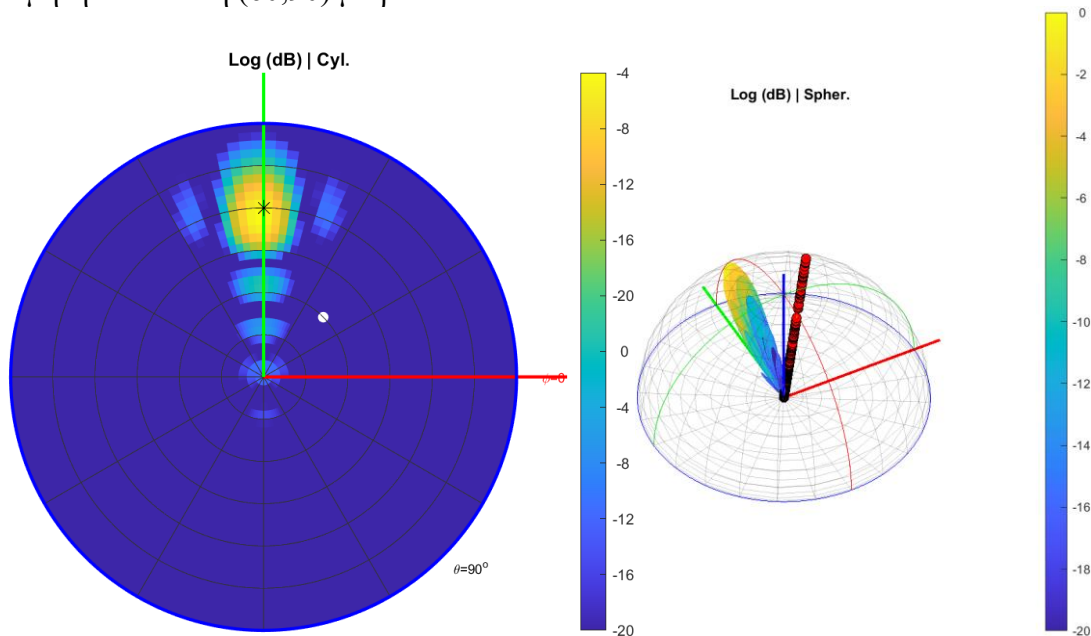
Εξίσωση 51

Η παραπάνω σχέση μας δίνει την δυνατότητα υπολογισμού του προφίλ φάσης που χρειάζεται να έχει μια μεταεπιφάνεια με σκοπό την ανάκλαση ενός επίπεδου κύματος σε συγκεκριμένη διεύθυνση $(\theta, \varphi)_{scatt}$. Επομένως εάν δοθεί μεταεπιφάνεια 42x42 με μέγεθος τετραγωνικού κελιού 35μm με επίπεδο προσπίπτον υπό γωνία (30,45) μοιρών και 850 GHz για beam steering στην κατεύθυνση (60,90) υπολογίζουμε με την βοήθεια της εξίσωσης Εξίσωση 51 μπορούμε να υπολογίσουμε το παρακάτω προφίλ φάσης.



Εικόνα 50: Υπολογισμένο προφίλ φάσης grating και standard πλάτος μεταεπιφάνειας

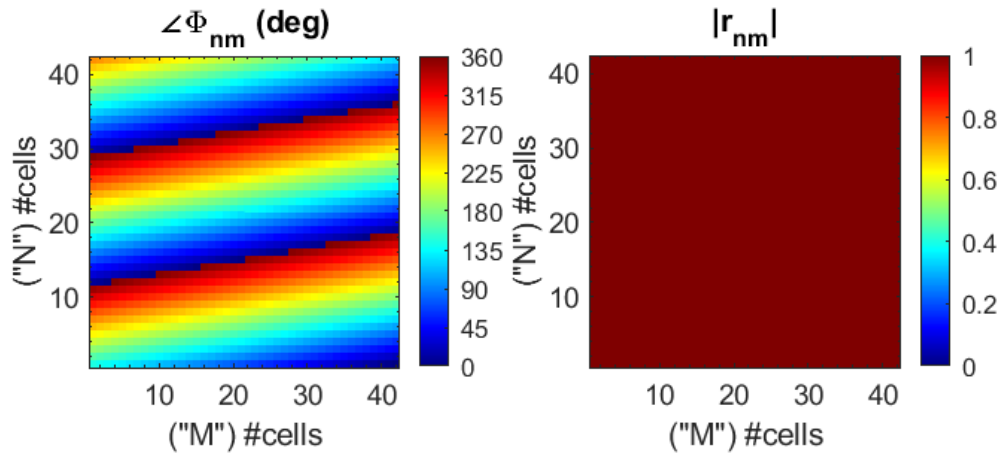
Και με την χρήση της εξίσωσης Huygens-Fresnel για το μακρινό πεδίο παράγουμε το πεδίο ακτινοβολίας που επιβεβαιώνει την ορθή σχεδίαση της μεταεπιφάνειας, μιας και βλέπουμε την δέσμη στην επιθυμητή διεύθυνση (60,90) μοιρών.



Εικόνα 51 : Διάγραμμα ακτινοβολίας για beam steering επίπεδου κύματος σε $(\theta, \varphi)=(60,90)$

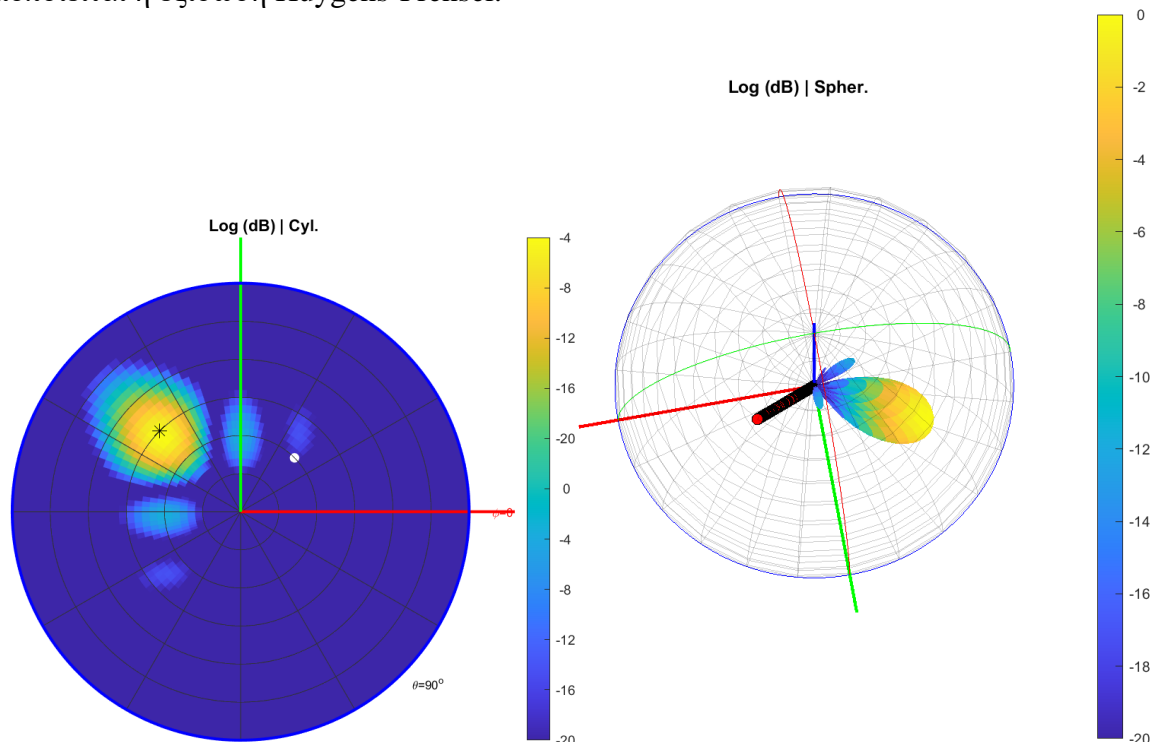
Για μεταεπιφάνεια 42x42 με μέγεθος τετραγωνικού κελιού $\lambda/15$ m και επίπεδο προσπίπτον στα 175 GHz ($\lambda \sim 1.713$ mm) ερχόμενο υπό γωνία $(\theta, \varphi)=(30,45)$ και ζητείται να κάνει ανακατεύθυνση

δέσμης σε διεύθυνση $(\theta, \varphi) = (45, 135)$ μοιρών, υπολογίζουμε το παρακάτω προφίλ φάσης με την (4 Εξίσωση 50).



Εικόνα 52: Φάση και πλάτος επίπεδου κύματος ανακατεύθυνσης δέσμης

Για επιβεβαίωση ορθής σχεδίασης της μεταεπιφάνειας και υπολογισμού του προφίλ φάσης, χρησιμοποιείται η εξίσωση Huygens-Fresnel.



Εικόνα 53: Διάγραμμα ανακατεύθυνσης δέσμης επίπεδου κύματος 175GHz σε (45,135)

4.1.2 Ανακατεύθυνση δέσμης σφαιρικού κύματος στο μακρινό πεδίο

Βασιζόμενοι στην κατανόηση των αλληλεπιδράσεων των επίπεδων κυμάτων με τις μεταεπιφάνειες, όπως διερευνήθηκε στη προηγούμενη υποενότητα 4.1.1, στρέφουμε τώρα την προσοχή μας προς την πολυπλοκότητα των σφαιρικών κυμάτων. Τα σφαιρικά κύματα διαφέρουν σημαντικά από τα επίπεδα κύματα, κυρίως λόγω της ακτινικής διάδοσής τους, η οποία επηρεάζει τον τρόπο αλληλεπίδρασής τους με τις μεταεπιφάνειες.

Ένα σφαιρικό κύμα διαδίδεται στον τρισδιάστατο χώρο με φορά μακριά από τη σημειακή του πηγή ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Στο πλαίσιο της κυματικής φυσικής, η διαφορά φάσης για ένα τυχαίο σημείο σε σφαιρικό κύμα μπορεί να χαρακτηριστεί από το πόσο διαφέρει η φάση του

σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς. Για ένα σφαιρικό κύμα, η φάση σε οποιοδήποτε σημείο στο χώρο εξαρτάται κυρίως από την απόσταση r από την πηγή του κύματος. Η γενική εξίσωση για τη φάση ϕ ενός σφαιρικού κύματος μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\varphi(r)_{sph} = k \cdot r + \varphi_0$$

Εξίσωση 52

Όπου:

k : ο κυματάριθμος, σχετίζεται με το μήκος κύματος $k=2\pi/\lambda$

r : η απόσταση του σημείου μελέτης από την πηγή του κύματος

φ_0 : η αρχική φάση του σφαιρικού κύματος

Στο πλαίσιο της τρισδιάστατης διάδοσης του σφαιρικού κύματος, η διαφορά φάσης που έχει το κύμα σε σημείο της μεταεπιφάνειας δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$\Delta\varphi_{sph,inc} = k_0 \cdot \sqrt{(x_{src} - x_{mn})^2 + (y_{src} - y_{mn})^2 + (z_{src} - z_{mn})^2} + \varphi_0$$

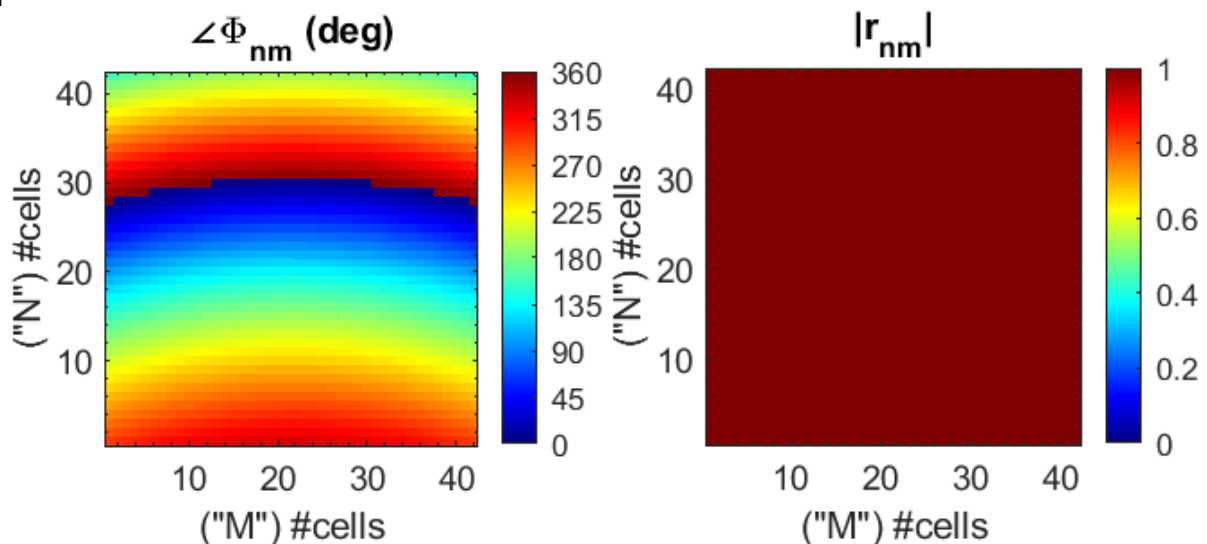
Εξίσωση 53

Εφόσον θέσαμε τα θεμέλια κατανόησης για την διάδοση και υπολογισμό της διαφοράς φάσης σε σημεία του σφαιρικού κύματος, δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού του συντελεστή ανάκλασης που πρέπει να έχει η μεταεπιφάνεια προκειμένου να σχεδιαστεί για να πληροί τις προδιαγραφές για την ανακατεύθυνση δέσμης σε (θ, ϕ) . Ο συντελεστής ανάκλασης για σφαιρικό προσπίπτον δίνεται ως εξής.

$$\Phi_{mn} = \Delta\varphi_{plane,scatt} - \Delta\varphi_{spherical,inc}$$

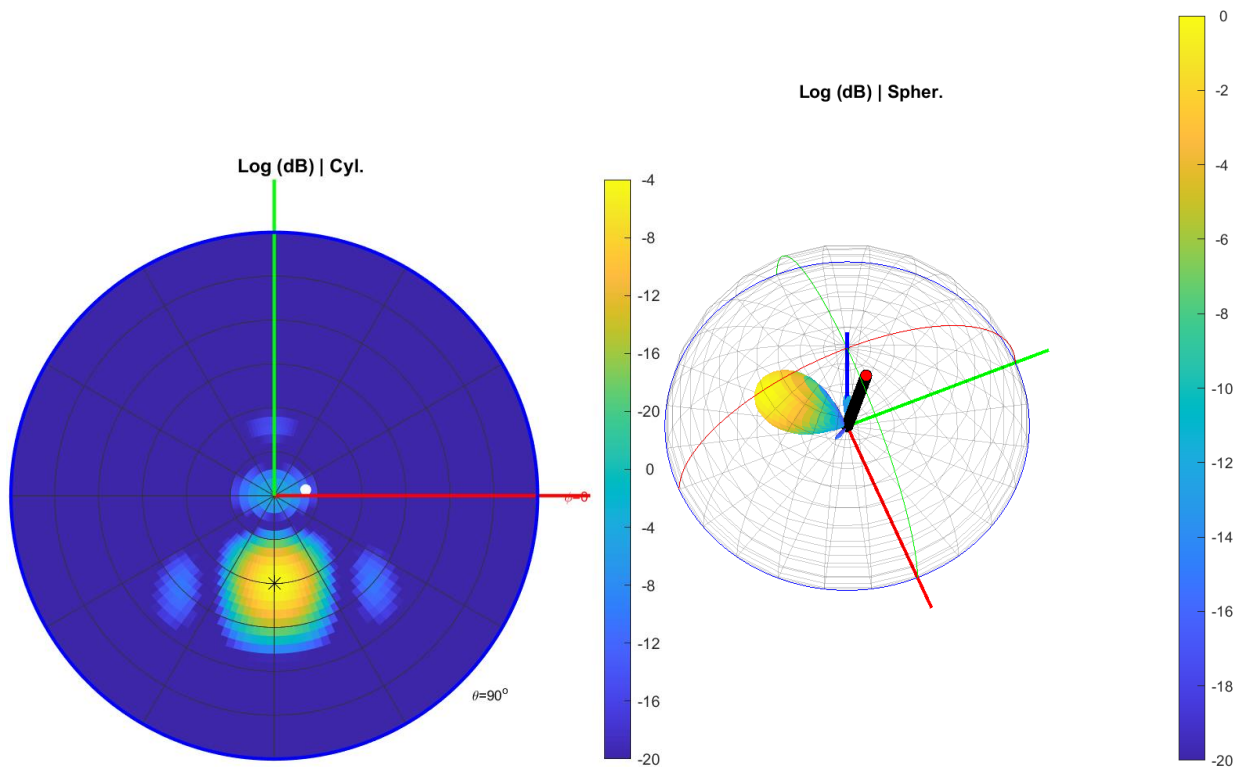
Εξίσωση 54

Στην περίπτωση που θέλουμε να κάνουμε ανακατεύθυνση δέσμης σε $(\theta, \phi)=(30,270)$ με σφαιρικό προσπίπτον 250 GHz ($\lambda \sim 1.199$ mm) με σημειακή πηγή $(x,y,z)=(0,0,10 \cdot \lambda)$ για μεταεπιφάνεια 42×42 με μήκος τετραγωνικού κελιού $\lambda/15$, με την χρήση της Εξίσωσης 54 σχεδιάζουμε το παρακάτω προφίλ.



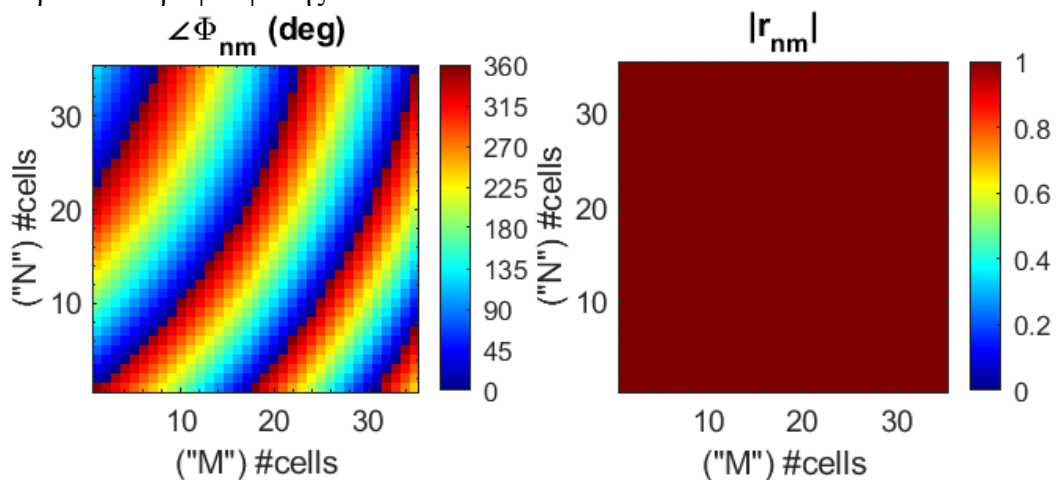
Εικόνα 54: Προφίλ φάσης και πλάτους μεταεπιφάνειας για ανακατεύθυνση δέσμης σφαιρικού κύματος

Για λόγους πιστοποίησης ορθού αποτελέσματος με την χρήση της Εξίσωσης 39 για τον υπολογισμό του διαγράμματος ακτινοβολίας στο μακρινό πεδίο έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.



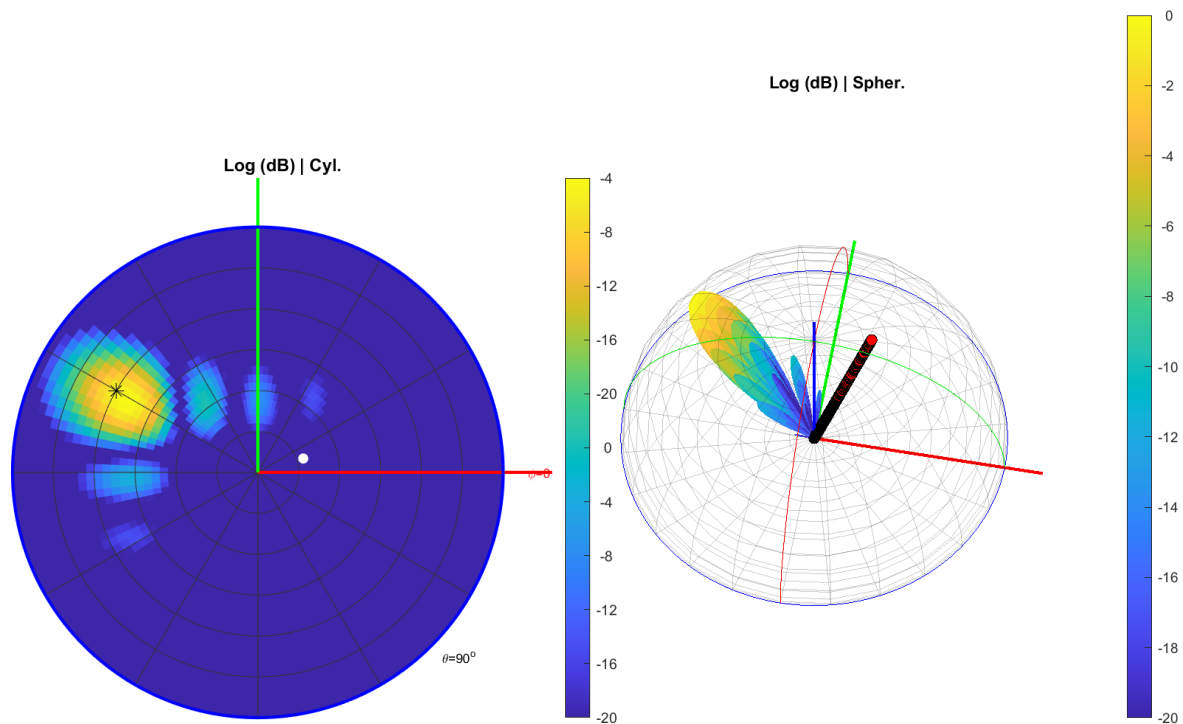
Εικόνα 55: Διάγραμμα ακτινοβολίας για ανακατεύθυνση δέσμης σφαιρικού κύματος σε $(\theta, \varphi)=(30, 270)$

Για σφαιρικό προσπίπτον κύμα που έχει ως σημειακή πηγή $(x, y, z)=(0, 0, 7 \cdot \lambda)$ στα 740 GHz ($\lambda \sim 0.405$ mm) σε 35×35 μεταεπιφάνεια με μέγεθος τετραγωνικού κελιού $30 \mu\text{m}$ που θέλουμε να κάνει ανακατεύθυνση δέσμης σε $(\theta, \varphi)=(60, 150)$ μοιρών, με την βοήθεια των Εξίσωση 53 και Εξίσωση 54 έχουμε το παρακάτω προφίλ φάσης.



Εικόνα 56: Προφίλ φάσης και πλάτους μεταεπιφάνειας για ανακατεύθυνση δέσμης σφαιρικού κύματος

Με την εξίσωση HFP για μακρινό πεδίο Εξίσωση 39 παράγουμε και το διάγραμμα ακτινοβολίας.



Εικόνα 57: Διάγραμμα ακτινοβολίας για ανακατεύθυνση δέσμης σφαιρικού κύματος σε $(\theta, \varphi)=(60,150)$

4.2 Παράδειγμα Beam splitting

Βασιζόμενοι στα θεμέλια που τέθηκαν στην ενότητα 4.1, όπου διερευνήσαμε το σχεδιασμό προφίλ φάσης μεταεπιφάνειας για την καθοδήγηση δέσμης, επεκτείνουμε τώρα την εστίασή μας στη διάσπαση δέσμης - μια κρίσιμη λειτουργία στην οπτική και ηλεκτρομαγνητική μηχανική. Ο διαχωρισμός δέσμης επιτρέπει τον διαχωρισμό μιας ενιαίας εισερχόμενης δέσμης σε δύο ή περισσότερες ξεχωριστές διαδρομές, μια δυνατότητα απαραίτητη σε μια πληθώρα εφαρμογών που κυμαίνονται από τηλεπικοινωνίες και συστήματα ραντάρ έως οπτικούς υπολογιστές και τεχνολογίες ανίχνευσης.

Οι μεταεπιφάνειες, με την αξιοσημείωτη ικανότητά τους να χειρίζονται τη φάση και το πλάτος σε κλίμακες κάτω του μήκους κύματος, είναι ιδανικές για τη δημιουργία ακριβών και ελεγχόμενων διαμορφώσεων διαχωρισμού δέσμης. Σχεδιάζοντας συγκεκριμένες ασυνέχειες φάσης σε όλη τη μεταεπιφάνεια, είναι δυνατόν να κατευθύνονται τμήματα της προσπίπτουσας δέσμης σε διαφορετικές κατευθύνσεις, καθενιά από τις οποίες μεταφέρει ένα μέρος της ενέργειας της αρχικής δέσμης. Αυτή η ενότητα θα εμβαθύνει στα θεωρητικά θεμέλια της διάσπασης δέσμης, εξετάζοντας πώς μπορεί να αξιοποιηθεί η αλληλεπίδραση της περίθλασης και της παρεμβολής για την επίτευξη των επιθυμητών σχημάτων διάσπασης.

Η διάσπαση δέσμης (beam splitting) λειτουργεί κατά βάση με την ίδια νοοτροπία της ανακατεύθυνσης δέσμης. Πιο συγκεκριμένα διατηρεί την χρήση της DGE (Diffraction Grating Equation) με μόνη διαφορά ότι φάση του κάθε κελιού της μεταεπιφάνειας είναι προϊόν άθροισης των συντελεστών ανάκλασης που θα είχε το κελί για να παράγει την κάθε δέσμη μεμονωμένα.

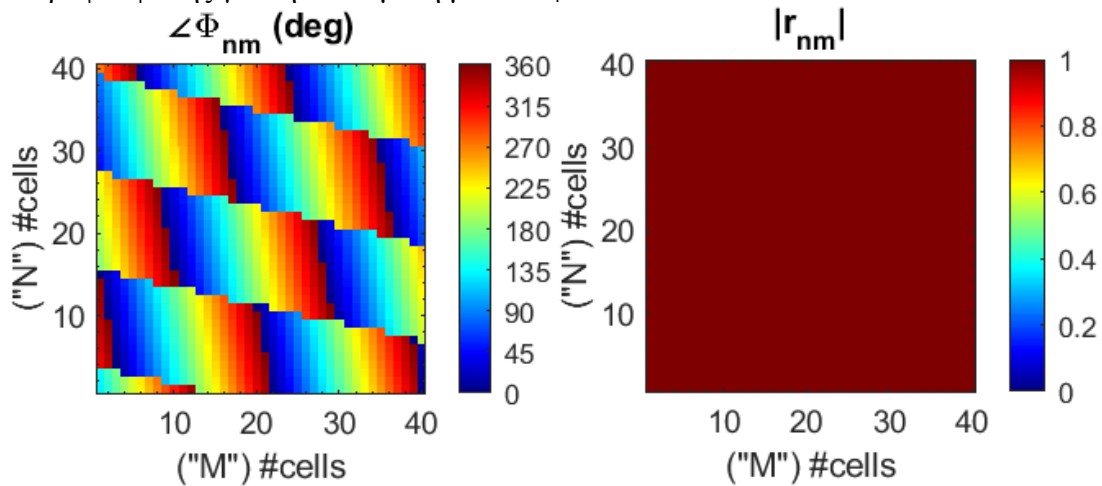
$$\Phi_{scatt,total} = arg[A_{scatt} \cdot e^{(j \cdot \Phi_{\alpha} + j \cdot \Phi_{\beta} + j \cdot \Phi_{...})}]$$

Εξίσωση 55

4.2.1 Διαχωρισμός δέσμης επίπεδου κύματος στο μακρινό πεδίο

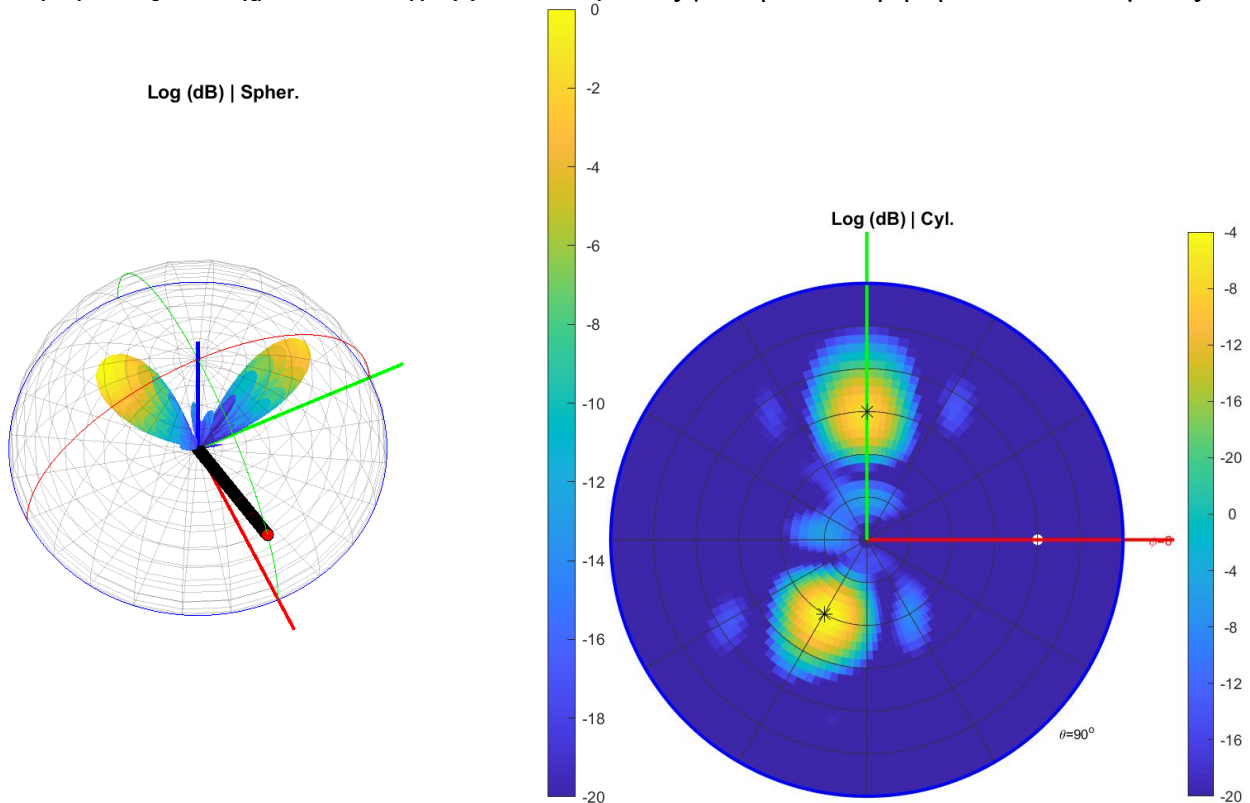
Για μία μεταεπιφάνεια 40x40 με μέγεθος τετραγωνικού κελιού 30 μm και επίπεδο προσπίπτον κύμα στα 740 GHz ($\lambda \sim 0.405 \text{ mm}$) υπό γωνία $(\theta, \varphi)=(60,0)$ μας ζητείται να παράγουμε 2 δέσμες στις διευθύνσεις $(\theta, \varphi)=(45,90)$ και $(\theta, \varphi)=(30,240)$ μοίρες. Αρχικά υπολογίζουμε τον συντελεστή

ανάκλασης που έχει η μεταεπιφάνεια για την κάθε διεύθυνση ξεχωριστά μέσω της εξίσωσης Εξίσωση 51 και στην συνέχεια τοποθετούμε τα αποτελέσματα στον τύπο Εξίσωση 55 δίνοντας μας το παρακάτω προφίλ φάσης για την δεδομένη μεταεπιφάνεια.



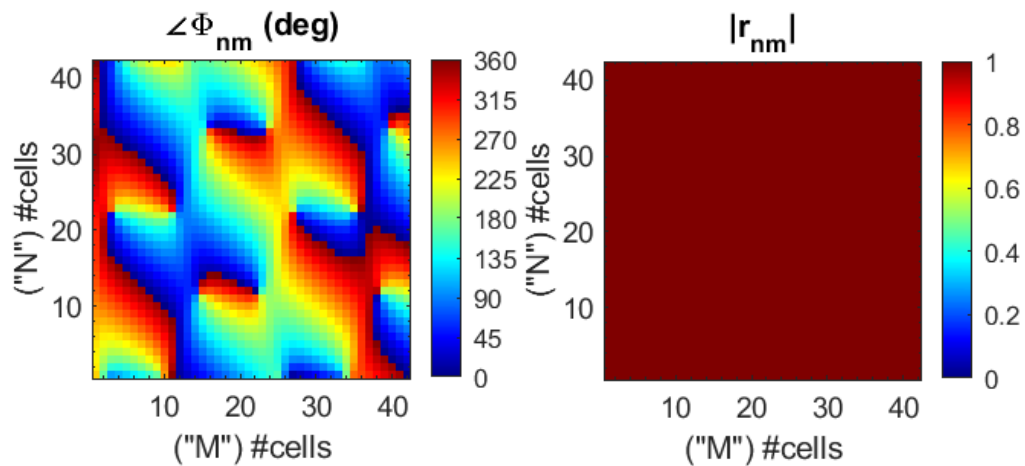
Εικόνα 58: Φάση και Πλάτος μεταεπιφάνειας για beam splitting 2 λοβών επίπεδου κύματος σε $(\theta, \varphi)=(45,90)$ και $(\theta, \varphi)=(30,240)$

Παράγοντας ταυτόχρονα το διάγραμμα ακτινοβολίας για την επιθεώρηση του αποτελέσματος.



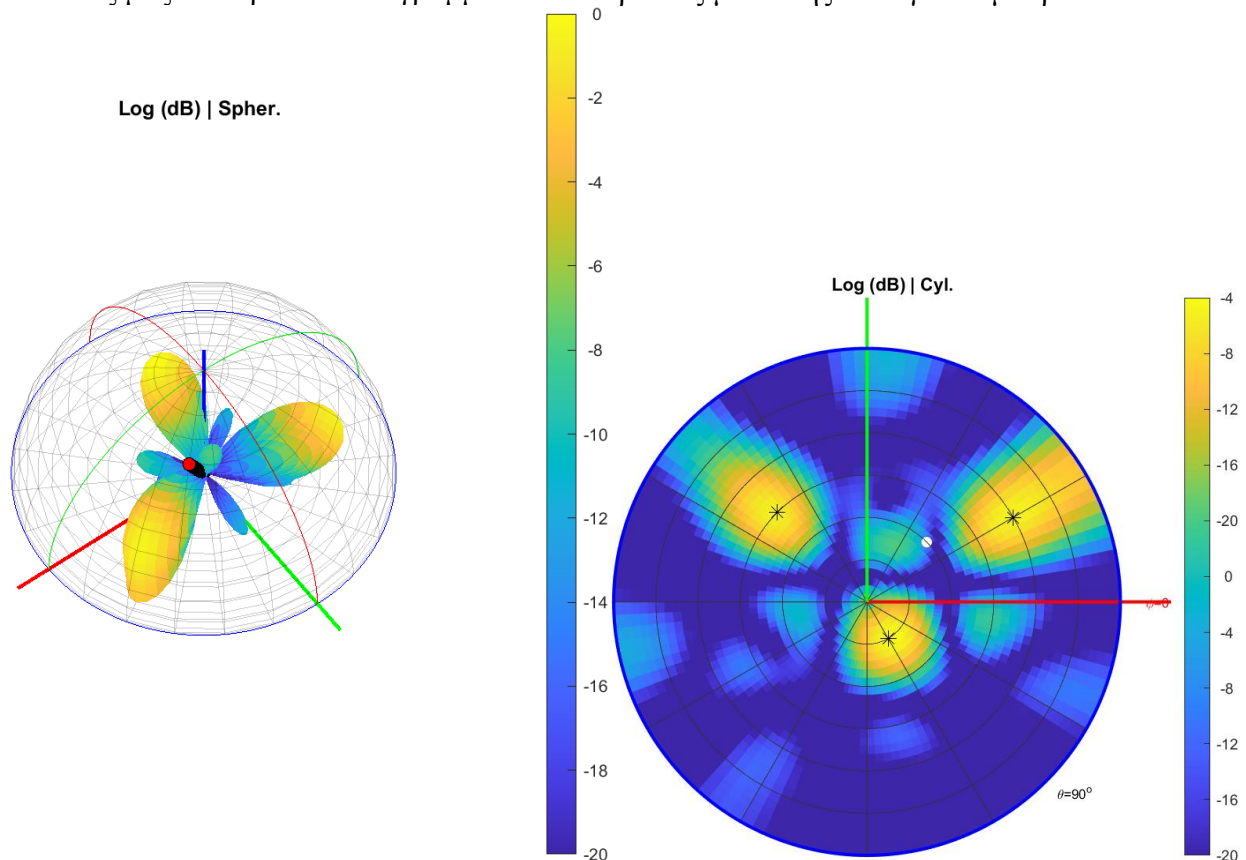
Εικόνα 59: Διάγραμμα ακτινοβολίας beam splitting 2 λοβών επίπεδου κύματος σε $(\theta, \varphi)=(45,90)$ και $(\theta, \varphi)=(30,240)$

Η χρήση των παραπάνω εξισώσεων μας δίνει την δυνατότητα να διαχωρίσουμε το προσπίπτον σε όσες περισσότερες από 2 διευθύνσεις. Για παράδειγμα μεταεπιφάνεια 42x42 με μέγεθος τετραγωνικού κελιού $\lambda/15$ m και επίπεδο προσπίπτον στα 175 GHz ($\lambda \sim 1.713$ mm) ερχόμενο υπό γωνία $(\theta, \varphi)=(30,45)$ και ζητείται να κάνει διάσπαση δέσμης σε διεύθυνση $(\theta, \varphi)=(45,135)$ $(\theta, \varphi)=(60,30)$ και $(\theta, \varphi)=(15,300)$ μοιρών, υπολογίζουμε το παρακάτω προφίλ φάσης με την Εξίσωση 50, Εξίσωση 55.



Εικόνα 60: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για διάσπαση δέσμης σε 3 λοβούς για επίπεδο προσπίπτον

Δίνοντας μας τα παρακάτω διαγράμματα ακτινοβολίας μέσω της HFP για το μακρινό πεδίο.

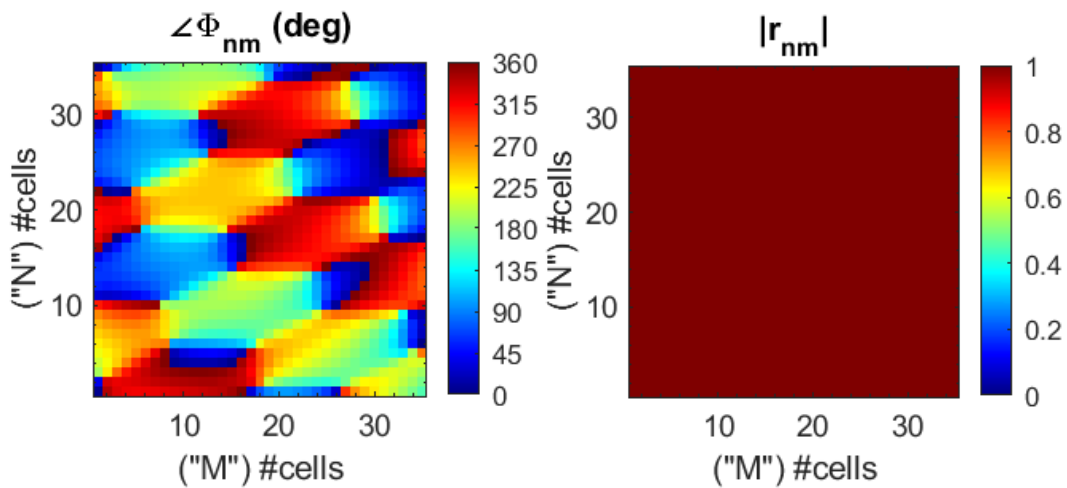


Εικόνα 61: Διάγραμμα ακτινοβολίας beam splitting 3 λοβών για επίπεδο κύμα

4.2.2 Διαχωρισμός δέσμης σφαιρικού κύματος στο μακρινό πεδίο

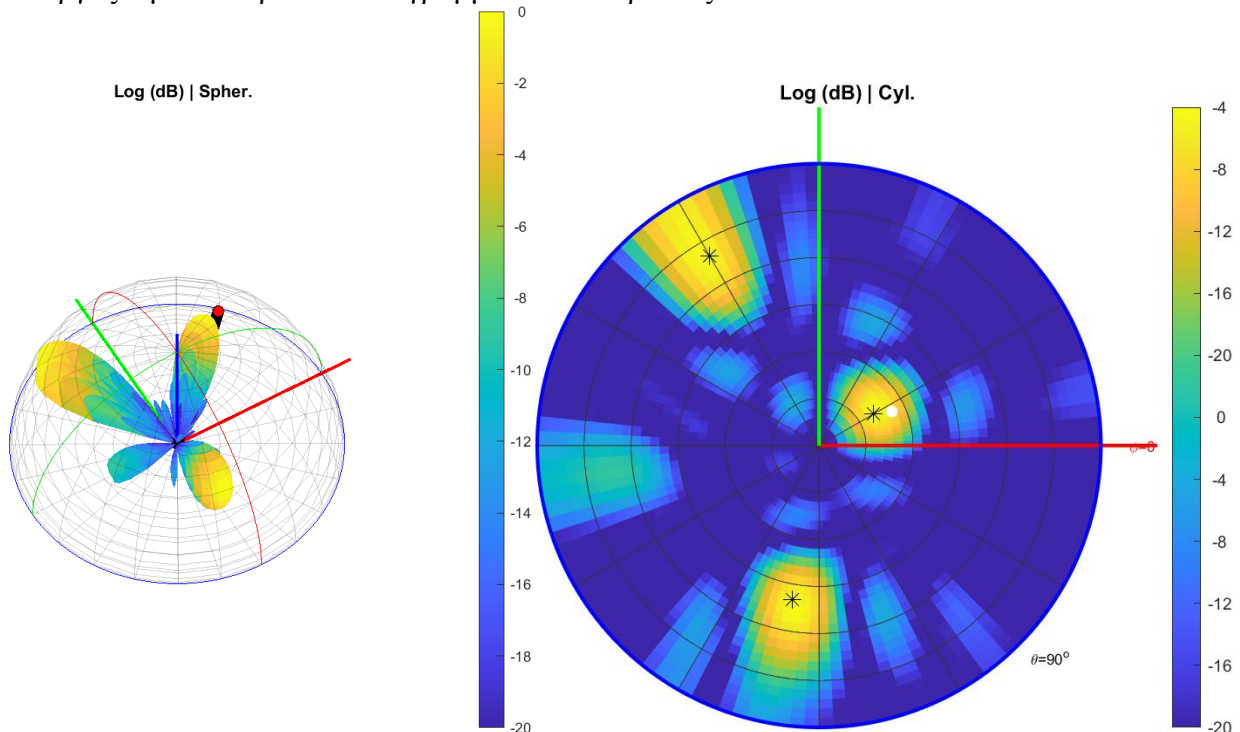
Η χρήση σφαιρικού προσπίπτοντος κύματος δεν έχει καμία αλλαγή στον τρόπο αντιμετώπισης και σχεδιασμού του διαχωρισμού δέσμης. Η μόνη διαφορά που παρατηρείτε και πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι πως κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ανάκλασης ανά κατεύθυνση η φάση του προσπίπτον πρέπει να ακολουθεί την μορφή της εξίσωσης Εξίσωση 51.

Για σφαιρικό προσπίπτον κύμα που έχει ως σημειακή πηγή $(x,y,z)=(0,0,5*\lambda)$ στα 280 GHz ($\lambda \sim 1.070\text{mm}$) σε 35×35 μεταεπιφάνεια με μέγεθος τετραγωνικού κελιού $\lambda/10$ m διάσπαση δέσμης σε $(\theta,\varphi)=(20,30)$, $(\theta,\varphi)=(70,120)$ και $(\theta,\varphi)=(50,260)$ μοιρών, με την βοήθεια των Εξίσωση 51 και Εξίσωση 54 έχουμε το παρακάτω προφίλ φάσης.



Εικόνα 62: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για beam splitting 3 λοβών σφαιρικού κύματος

Για άλλη μια φορά χρησιμοποιούμε την HFP για το κοντινό πεδίο και με την βοήθεια του κώδικα Matlab βγάζουμε τα παρακάτω διαγράμματα ακτινοβολίας.



Εικόνα 63: Διάγραμμα ακτινοβολίας για beam splitting 3 λοβών από σφαιρικό κύμα

4.3 Παράδειγμα Diffused scattering (διάχυτη/τυχαία σκέδαση δέσμης)

Σε αυτή την ενότητα, στρέφουμε την προσοχή μας στη διάχυτη σκέδαση, ένα σημαντικό φαινόμενο στη σφαίρα των εφαρμογών των μεταεπιφανειών. Σε αντίθεση με τον ακριβή έλεγχο που απαιτείται για την καθοδήγηση και τη διάσπαση δέσμης, ο σχεδιασμός μεταεπιφανειών για διάχυτη σκέδαση παρουσιάζει ένα διαφορετικό σύνολο προκλήσεων και ευκαιριών. Η διάχυτη σκέδαση περιλαμβάνει τη διασπορά ενός προσπίπτοντος κύματος σε πολλές κατευθύνσεις, διαχέοντας αποτελεσματικά την ενέργεια σε μια ευρύτερη περιοχή, αντί να τη συγκεντρώνει σε συγκεκριμένα σημεία ή κατά μήκος συγκεκριμένων κατευθύνσεων.

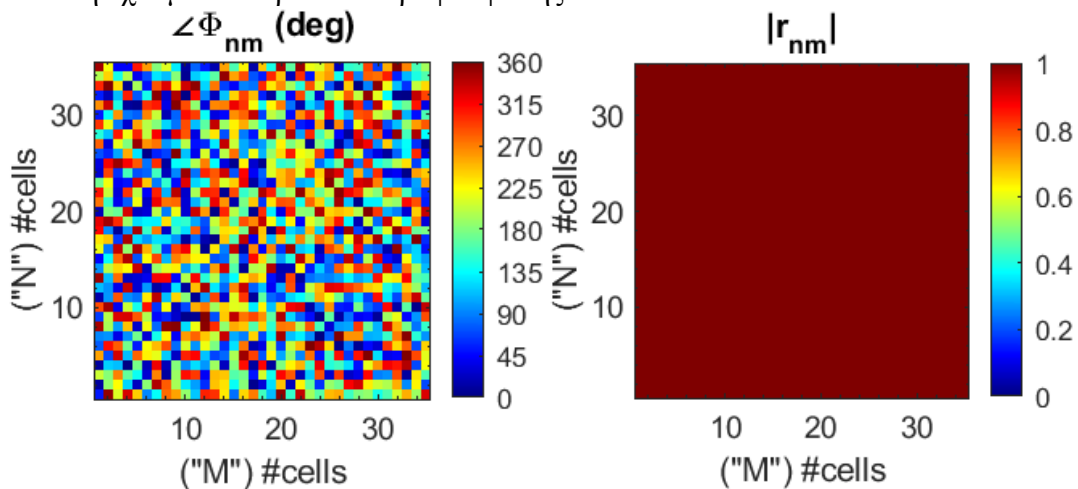
Ο σχεδιασμός μεταεπιφανειών σκέδασης που διαχέουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν είναι εγγενώς δύσκολος- αξιοποιεί τις εγγενείς ιδιότητες των μεταεπιφανειών για να μεταβάλλει τις ασυνέχειες φάσης σε ένα ευρύ φάσμα. Εισάγοντας σκόπιμα τυχαίες μεταβολές φάσης σε ολόκληρη

τη μεταεπιφάνεια, δίνεται η ευκαιρία δημιουργίας δομών που διαχέουν τα εισερχόμενα κύματα με διάχυτο τρόπο. Αυτή η ικανότητα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη σε εφαρμογές όπως το καμουφλάζ ραντάρ, όπου είναι επιθυμητή η μείωση της ανιχνευσιμότητας των αντικειμένων μέσω της σκέδασης των κυμάτων ραντάρ, ή σε εφαρμογές φωτισμού όπου η ομοιόμορφη κατανομή του φωτός είναι επωφελής.

4.3.1 διάχυτη σκέδαση σε μακρινό πεδίο από επίπεδο προσπίπτον κύμα

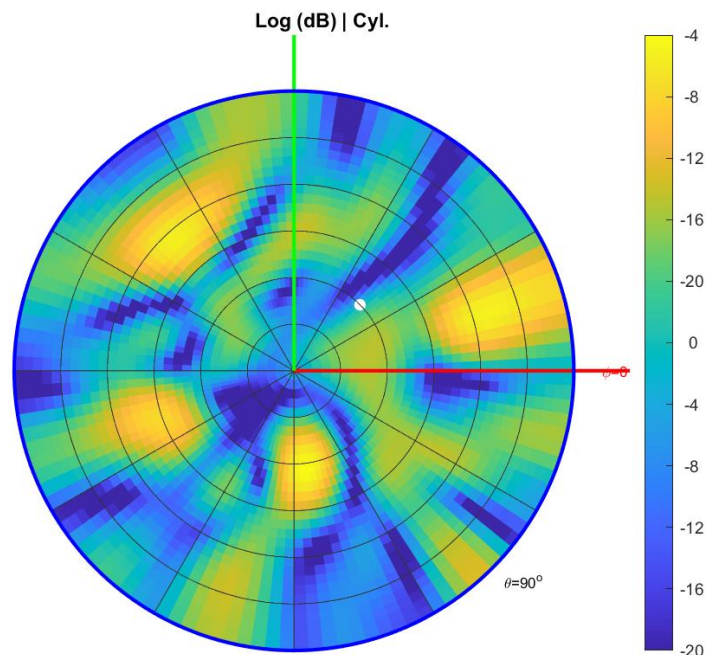
Ο σχεδιασμός μιας μεταεπιφάνειας για την επίτευξη διάχυτης σκέδασης δεν έχει κάποιον αυστηρό τύπο ή εξίσωση για την δημιουργία του προφίλ φάσης της. Το προφίλ αυτό δημιουργείται από ένα σύνολο τυχαίων φάσεων που απονέμετε σε κάθε κελί της ξεχωριστά με αποτέλεσμα να δίνει την εντύπωση τυχαίου θορύβου, είτε το προσπίπτον είναι επίπεδο είτε σφαιρικό κύμα.

Για επίπεδο προσπίπτον κύμα διεύθυνσης $(\theta, \varphi) = (30, 45)$ μοιρών στα 280 GHz ($\lambda \sim 1.070 \text{ mm}$) σε 35×35 μεταεπιφάνεια με μέγεθος τετραγωνικού κελιού $\lambda/10$ m και θέλουμε να πραγματοποιήσουμε διάχυτη σκέδαση έχουμε το παρακάτω προφίλ φάσης.



Εικόνα 64: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας για diffused scattering επίπεδου κύματος.

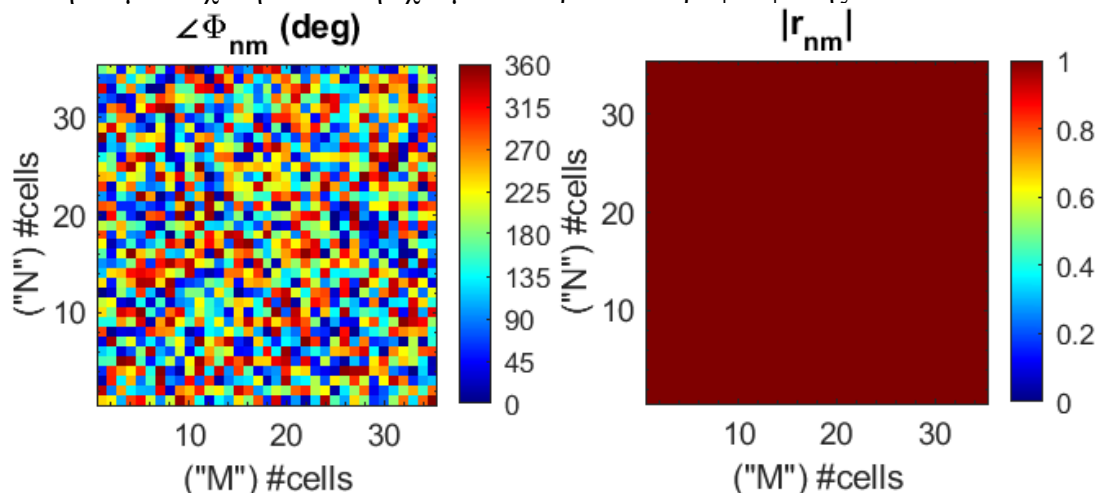
Και μέσω την Huygens-Fresnel για το μακρινό πεδίο παράγουμε το αναμενόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας.



Εικόνα 65: Διάγραμμα ακτινοβολίας για diffused scattering επίπεδου κύματος

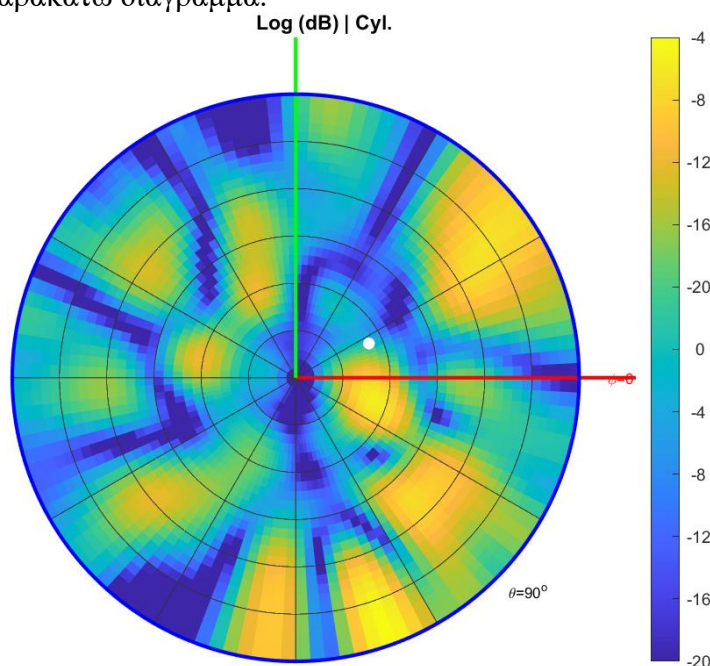
4.3.2 διάχυτη σκέδαση σε μακρινό πεδίο από σφαιρικό προσπίπτον κύμα

Για σφαιρικό προσπίπτον κύμα που έχει ως σημειακή πηγή $(x,y,z)=(0,0,5*\lambda)$ στα 280 GHz ($\lambda \sim 1.070\text{mm}$) σε 35×35 μεταεπιφάνεια με μέγεθος τετραγωνικού κελιού $\lambda/10$ m και θέλουμε να πραγματοποιήσουμε διάχυτη σκέδαση έχουμε το παρακάτω προφίλ φάσης.



Εικόνα 66: Φάση και πλάτος σφαιρικού κύματος για diffused scattering

Μέσω της εξίσωσης HFP επιβεβαιώνουμε την αδιάκριτη σκέδαση της δέσμης μας σε τυχαίες κατευθύνσεις, από το παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 67: Διάγραμμα ακτινοβολίας για diffused scattering σφαιρικού κύματος

4.4 Εστίαση

Σε αυτή την ενότητα, θα εμβαθύνουμε στην προηγμένη ικανότητα των μεταεπιφανειών να εστιάζουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η μοναδική ιδιότητα των μεταεπιφανειών να μετατρέπουν ένα επίπεδο κύμα σε σφαιρικό κύμα, το οποίο στη συνέχεια συγκλίνει σε ένα συγκεκριμένο εστιακό σημείο που ορίζεται από τις συντεταγμένες x,y,z , αναδεικνύει τη χρησιμότητά τους στην εστίαση

ακτίνων ακριβείας. Αυτή η διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει τη μηχανική επεξεργασία του ανακλώμενου κύματος από τη μεταεπιφάνεια για την επίτευξη παραλληλισμού της δέσμης, είναι κρίσιμη για εφαρμογές που απαιτούν στόχευση και χειρισμό φωτεινών ή ραδιοκυμάτων υψηλής ανάλυσης.

Το αποτέλεσμα εστίασης των μεταεπιφανειών επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός παραβολικού προφίλ φάσης σε όλη την επιφάνεια Εξίσωση 46. Αυτό το προφίλ εξασφαλίζει ότι η φάση του προσπίπτοντος μετώπου κύματος ρυθμίζεται έτσι ώστε όλα τα τμήματα του μετώπου κύματος να συγκλίνουν ακριβώς στο επιθυμητό σημείο εστίασης [16]. Η ανάλυση της εστίασης, η οποία χαρακτηρίζεται από τη διάμετρο του σημείου στο οποίο συγκλίνει το κύμα, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στη διαδικασία σχεδιασμού. Καθορίζει την ευκρίνεια και την αποτελεσματικότητα της ικανότητας εστίασης, η οποία είναι απαραίτητη σε εφαρμογές που κυμαίνονται από συστήματα οπτικής απεικόνισης έως την κατεργασία με λέιζερ και τις ιατρικές θεραπείες όπου απαιτείται στοχευμένη παροχή ενέργειας.

Στην ενότητα 3.4.1 είδαμε για πρώτη φορά την μορφή της παραβολικής φάσης που πρέπει να πληροί η μεταεπιφάνεια μας. Σε συνδυασμό με την εμβάθυνση που κάναμε στην υποενότητα 4.1.2 για το σφαιρικό κύμα, θα μελετήσουμε την μεταβλητή ρ .

$$\rho = \sqrt{(\rho f x - x_{mn})^2 + (\rho f y - y_{mn})^2}$$

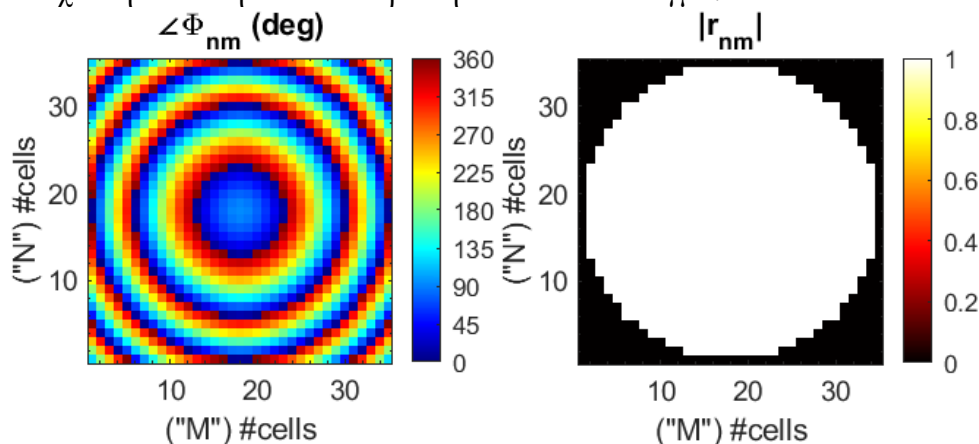
Εξίσωση 56

Εφόσον μελετήσαμε και την ρ μεταβλητή μπορούμε να παραθέσουμε και την πιο γενικευμένη μορφή της παραβολικής φάσης η οποία δίνετε να υπολογίσει την φάση της μεταεπιφάνειας με σκοπό την εστίαση on και off axis αλλά και όταν το επίπεδο προσπίπτον έρχεται υπό οποιαδήποτε διεύθυνση πλέον σε αντίθεση με πριν που ήταν μόνο για κάθετα επίπεδα κύματα.

$$\Delta\varphi_{scatt} = k_0 \left[- \left(\sqrt{p_{ofz}^2 + r_0^2} + p_{ofz} \right) + \sin(\theta_{S_{mn}}) \left((x_{uc} - p_{ofx}) \cos(\phi_{S_{mn}}) + (y_{uc} - p_{ofy}) \sin(\phi_{S_{mn}}) \right) \right]$$

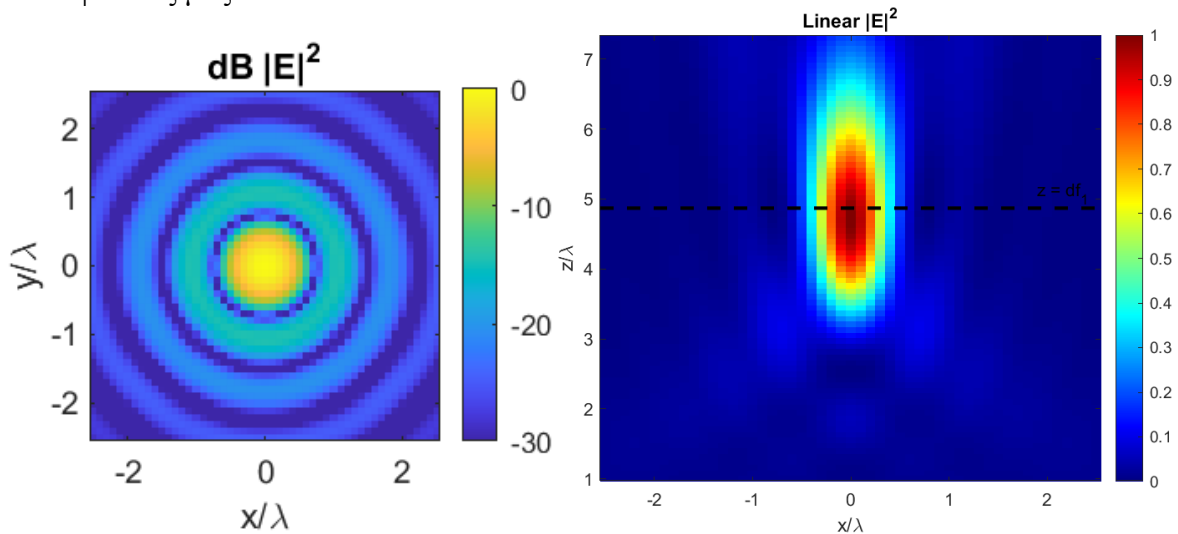
Εξίσωση 57

Έστω ότι θέλουμε να διαμορφώσουμε το προφίλ φάσης μιας μεταεπιφάνειας 35x35 και μέγεθος τετραγωνικού κελιού 0.326 mm για να έχουμε εστίαση στο σημείο $(x,y,z) = (0,0,4.87*\lambda)$ για επίπεδο κύμα μακρινού πεδίου συχνότητας 280 GHz κάθετο σε σχέση με την μεταεπιφάνεια. Με την χρήση των εξισώσεων Εξίσωση 56 και Εξίσωση 57 βγάζουμε το παρακάτω προφίλ φάσης που πρέπει να έχει για να επιτευχθεί η εστίαση και το απαραίτητο κυκλικό άνοιγμα.



Εικόνα 68: Φάση και Πλάτος μεταεπιφάνειας για focusing σε $f = 4.87*\lambda$

Χρησιμοποιώντας την HFP για το κοντινό πεδίο Εξίσωση 40, επαληθεύεται η σωστή σχεδίαση της μεταεπιφάνειάς μας.

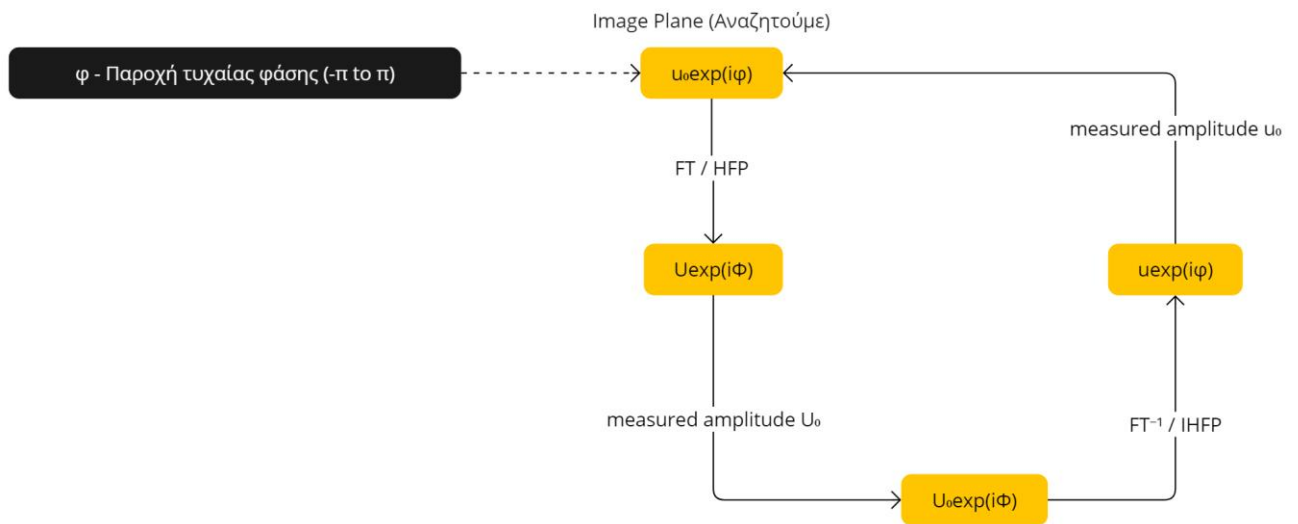


Εικόνα 69: Διάγραμμα ακτινοβολίας XY και XZ πεδίου για focusing στα 280 GHz

4.5 Αλγόριθμος Gerchberg -Saxton για point cloud

Σε αυτή την ενότητα, θα ασχοληθούμε με τον αλγόριθμο Gerchberg-Saxton, μια βασική υπολογιστική τεχνική που αναπτύχθηκε αρχικά για την ηλεκτρονική μικροσκοπία και προσαρμόστηκε για οπτικές εφαρμογές για να βοηθήσει στην ανάκτηση φάσης και τη διαμόρφωση του μετώπου κύματος [23]. Αυτή η ισχυρή επαναληπτική μέθοδος είναι ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό μεταεπιφανειών, ιδίως όταν απαιτείται ακριβής έλεγχος της φάσης του φωτός για πολύπλοκες οπτικές λειτουργίες όπως η εστίαση και η διαμόρφωση δέσμης. Ο αλγόριθμος λειτουργεί με επαναληπτική εναλλαγή μεταξύ του χωρικού και του πεδίου Fourier, βελτιώνοντας μια εκτίμηση της κατανομής φάσης ώστε να παραχθεί ένα επιθυμητό μοτίβο πλάτους στο επίπεδο του στόχου. Αυτή η προσέγγιση είναι καθοριστική για τη δημιουργία συγκεκριμένων μοτίβων έντασης ή την εστίαση του φωτός με μεγάλη ακρίβεια. Θα διερευνήσουμε τις θεμελιώδεις αρχές του αλγορίθμου Gerchberg-Saxton, συζητώντας την εφαρμογή του και τις βελτιώσεις που αυξάνουν την ταχύτητα σύγκλισης και την ακρίβειά του. Επιπλέον, θα εξετάσουμε πρακτικές εφαρμογές στο σχεδιασμό μεταεπιφανειών, παρουσιάζοντας πώς αυτός ο αλγόριθμος μεταφράζει θεωρητικά μοντέλα σε αποτελεσματικές οπτικές διατάξεις ικανές για εξελιγμένες λειτουργίες, υπογραμμίζοντας έτσι τον κρίσιμο ρόλο των προηγμένων υπολογιστικών μεθόδων στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση των τεχνολογιών μεταεπιφανειών.

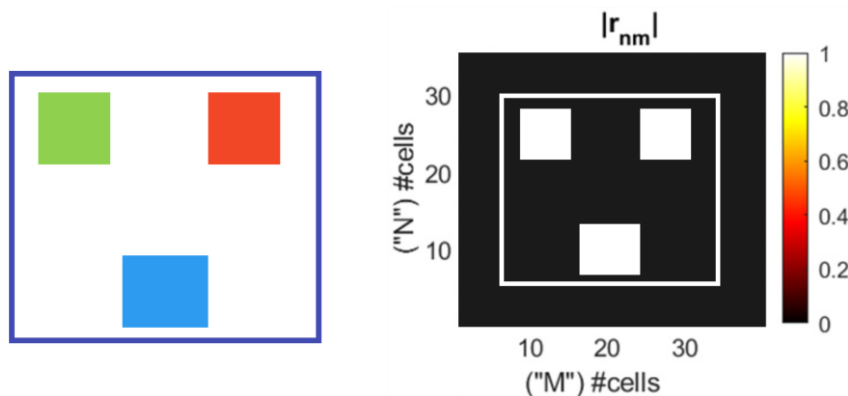
Εμβαθύνουμε στις θεμελιώδεις αρχές του αλγορίθμου Gerchberg-Saxton, συζητώντας την εφαρμογή του και τις διάφορες βελτιώσεις που αναπτύχθηκαν για την αύξηση της ταχύτητας σύγκλισης και της ακρίβειάς του. Περαιτέρω διερεύνηση θα εξετάσει πρακτικές εφαρμογές στο σχεδιασμό μεταεπιφανειών, καταδεικνύοντας πώς αυτός ο αλγόριθμος μεταφράζει θεωρητικά μοντέλα σε αποτελεσματικές οπτικές συσκευές ικανές για εξελιγμένες λειτουργίες (Saxton, 1978). Μέσω αυτής της διερεύνησης, αναδεικνύεται ο κρίσιμος ρόλος των προηγμένων υπολογιστικών μεθόδων στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση των τεχνολογιών μεταεπιφανειών.



Εικόνα 70: Διάγραμμα λειτουργίας του αλγόριθμου Gerchberg – Saxton.

4.5.1 Ορισμός του Point Cloud

Το πρώτο βήμα για την έναρξη του Gerchberg – Saxton είναι ο ορισμός του ολογράμματος που θέλουμε να αναπαράγουμε στο focal plane, Σχήμα 66. Αυτό το ολόγραμμα μπορεί να είναι οτιδήποτε, στην δική μας περίπτωση θα είναι η εικόνα του σχήματος, στη συνέχεια δημιουργούμε το πλάτος που θα έχει η είσοδος της μεταεπιφάνειας βάση του ολογράμματος, το πλάτος θα είναι μονάδα με λευκό χρώμα όπως στα προηγούμενα πλάτη μεταεπιφανειών δημιουργώντας έτσι ένα περίγραμμα του ζητούμενου point cloud, με την ονομασία Amp_Point_Cloud.



Εικόνα 71: Point Cloud που θέλουμε να αναπαράγουμε στο Image/Focal Plane και μετατροπή σε πλάτος.

4.5.2 Διαμόρφωση Μεταεπιφάνειας για FT / HFP

Αφού διαμορφώσαμε το ‘προσπίπτον’, με βάση τον τρόπο λειτουργίας σε προηγούμενες ενότητες, σε αυτή την υποενότητα θα διαμορφώσουμε το προφίλ της μεταεπιφάνειας που θα χρησιμοποιήσουμε. Ο τρόπος λειτουργίας του αλγόριθμου προαπαιτεί την παροχή προφίλ φάσης που μπορεί να έχει 3 διαφορετικές καταστάσεις, να είναι μοναδιαίο, μηδενικό ή να χρησιμοποιεί τυχαίες φάσεις. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής θα χρησιμοποιήσουμε τυχαίο προφίλ φάσης που σχεδιάζουμε με τον ίδιο τρόπο που μελετήσαμε στην ενότητα 4.3 για το diffused scattering. Για το πλάτος το προφίλ θα είναι μονάδα σε όλο το μήκος της μεταεπιφάνειας. Το μιγαδικό προφίλ της μεταεπιφάνειας που δημιουργήσαμε δίνεται από τον τύπο Εξίσωση 54 και θα το ονομάσουμε M1.

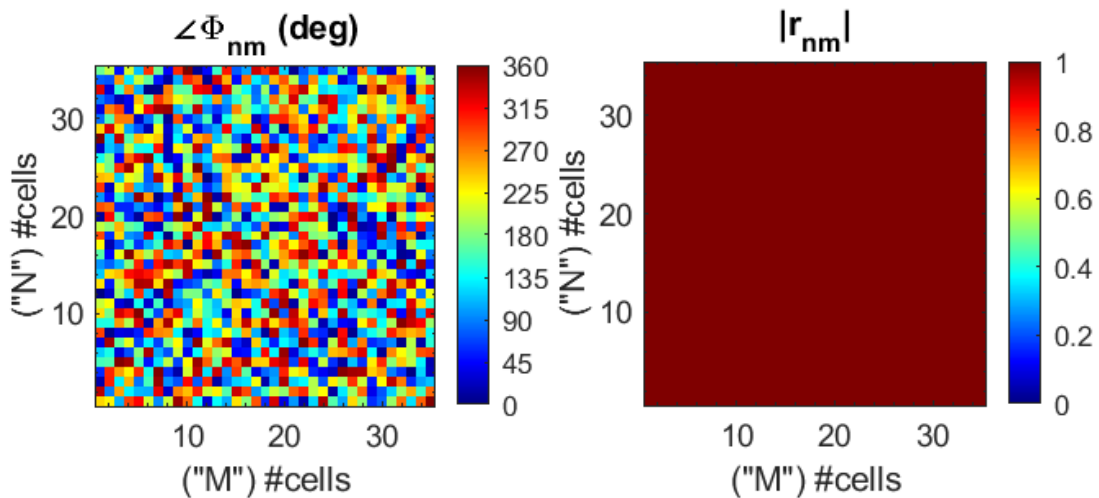
$$u(x, y) = A(x, y)e^{i\phi(x, y)}$$

Εξίσωση 58

Όπου:

$A(x, y)$: το προφίλ μοναδιαίου πλάτους της μεταεπιφάνειας.

$\phi(x, y)$: το τυχαίο προφίλ φάσης της μεταεπιφάνειας.



Εικόνα 72: Φάση και πλάτος μεταεπιφάνειας στην έναρξη του αλγόριθμου Gerchberg – Saxton.

3.4.3 Λειτουργία αλγόριθμου Gerchberg – Saxton

Με το πέρασ της διαμόρφωσης του προσπίπτοντος κύματος υπό την μορφή ολογραφίας και τον σχεδιασμό της μεταεπιφάνειας και τον υπολογισμό του μιγαδικού της προφίλ, θα εμβαθύνουμε στον τρόπο λειτουργίας του Gerchberg – Saxton.

Αρχικά φωτίζουμε την μεταεπιφάνεια με μιγαδικό προφίλ M1, Σχήμα 68, με το προσπίπτον που σχεδιάσαμε στην ενότητα 3.4.1 και υπολογίζουμε το πεδίο ακτινοβολίας στο κοντινό πεδίο, focal plane, μέσω της Forward Fourier Transform που στα δεδομένα αυτής της διπλωματικής είναι η Huygens-Frensel για το κοντινό πεδίο Εξίσωση 40. Το διάγραμμα ακτινοβολίας που θα προκύψει μπορεί να μας δώσει το μιγαδικό προφίλ του πεδίου αν το εκφράσουμε με την χρήση της παρακάτω εξίσωσης.

$$E = U \cdot e^{i \cdot \Phi}$$

Εξίσωση 59

Όπου:

U: είναι το καινούργιο πλάτος, προϊόν της HFP

Φ: το προφίλ φάσης του πεδίου ακτινοβολίας.

Επόμενο βήμα του αλγορίθμου είναι η σύγκριση μεταξύ των προφίλ φάσης. Παίρνουμε το προφίλ φάσης του πεδίου ακτινοβολίας από HFP U και το συγκρίνουμε το αρχικό πλάτος μας Amp_Point_Cloud. Επειδή είναι η πρώτη εκτέλεση του αλγορίθμου είναι σχεδόν απίθανη η ισότητα των δυο προφίλ πλάτους, οπότε κρατάμε την φάση που προέκυψε Φ την οποία θα ονομάσουμε Φ2 και θα επιβάλουμε το επιθυμητό πλάτος που θέλουμε να έχει το point cloud, Εικόνα(67). Με αυτή την επιβολή πλάτους ωθείται ο αλγόριθμος σταδιακά στην ορθή επιλογή του προφίλ φάσης διαμορφώνοντας έτσι το σωστό point cloud που βάλαμε.

Για να προχωρήσουμε στο επόμενο κομμάτι λειτουργίας του αλγορίθμου θα χρειαστούμε την IFT (Inverse Fourier Transform) που είναι η αντίστροφη λειτουργία της FFT και δίνεται από τον παρακάτω τύπο [14].

$$f(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{2\pi i(ux+vy)} du dv$$

Εξίσωση 60

Με το καινούργιο μιγαδικό προφίλ του πεδίου ακτινοβολίας, συνδυασμός πλάτους Amp_Point_Cloud και της φάσης Φ2, θα βρούμε το καινούργιο πεδίο ακτινοβολίας με την χρήση της IFT που μας επιστρέφει στο Image Plane. Από το καινούργιο μιγαδικό προφίλ στο Image Plane M3 κρατάμε αποκλειστικά την φάση Φ3 και απορρίπτουμε το πλάτος. Την φάση Φ3 που βρήκαμε στο Image Plane θα τη αφαιρέσουμε από την τυχαία που βάλουμε στην αρχή προκειμένου να βρούμε την απόκλιση του που είναι πιο κοντά στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

Σε αυτό το σημείο του αλγορίθμου κρατάμε αυτή τη φάση και υπολογίζουμε το μιγαδικό προφίλ φάσης με το Amp_Point_Cloud επαναλαμβάνοντας την διαδικασία που περιγράψαμε μέχρι τώρα με σκοπό την δημιουργία του σχήματος που θέλαμε να αναπαράγουμε στο point cloud.

Κεφάλαιο 5: Επίλογος & Μελλοντικές κατευθύνσεις

5.1 Σύνοψη

Κατά τη διάρκεια αυτής της διπλωματικής, ξεκινήσαμε μια εκτεταμένη εξερεύνηση των μεταεπιφανειών, ξεκινώντας με θεμελιώδεις θεωρίες που σχετίζονται με την εξήγηση των μεταεπιφανειών, αρχή Huygens-Fresnel και τον τρόπο με τον οποίο καθοδηγεί τον χειρισμό των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω των μεταεπιφανειών. Αναλύσαμε διεξοδικά τις προσαρμογές των προφίλ φάσης και πλάτους που επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο της διάδοσης, της κατεύθυνσης και της συμπεριφοράς των κυμάτων. Λεπτομερείς περιγραφές κάλυψαν συγκεκριμένες λειτουργίες στο πεδίο σχεδιασμού μεταεπιφανειών, όπως η καθοδήγηση δέσμης, η διάσπαση δέσμης και η εστίαση - η καθεμία προσαρμοσμένη σε διαφορετικούς τύπους προσπίπτον κυμάτων και στόχους μηχανικής. Εμβαθύνουμε επίσης σε προηγμένες υπολογιστικές τεχνικές, ιδίως στον αλγόριθμο Gerchberg-Saxton, ο οποίος βελτιστοποιεί το σχεδιασμό μεταεπιφανειών για ακριβείς χειρισμούς του μετώπου κύματος.

Καθ' όλη την διάρκεια της, περάσαμε από τις θεωρητικές κατασκευές στις πρακτικές εφαρμογές των μεταεπιφανειών σε διάφορους τομείς, όπως οι τηλεπικοινωνίες, τα συστήματα ραντάρ και οι οπτικές συσκευές. Κάθε κεφάλαιο βασίστηκε μεθοδικά στο προηγούμενο, καταλήγοντας σε εξελιγμένα σχέδια ικανά για πολύπλοκους χειρισμούς κυμάτων. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση όχι μόνο ενίσχυσε την κατανόηση των δυνατοτήτων των μεταεπιφανειών αλλά και ανέδειξε τις ποικίλες εφαρμογές αυτών των προηγμένων υλικών στη σύγχρονη τεχνολογία.

Η συνεισφορά μου σε αυτόν τον τομέα μέσω της έρευνας που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή περιλαμβάνει την επέκταση των θεωρητικών μοντέλων σε πρακτικά σενάρια, ιδίως στους τομείς της διεύθυνσης δέσμης, της διάσπασης δέσμης και των τεχνικών εστίασης. Επέκτεινα την εφαρμογή των μοντέλων διεύθυνσης δέσμης ενσωματώνοντας προσεγγίσεις τόσο επίπεδων όσο και σφαιρικών κυμάτων, αποδεικνύοντας πώς οι μεταεπιφάνειες μπορούν να προσαρμοστούν για πραγματικές εφαρμογές όπου οι πηγές κυμάτων δεν βρίσκονται σε θεωρητικά άπειρα σημεία. Αυτή η ενσωμάτωση διευκολύνει έναν πιο διαφοροποιημένο έλεγχο των διαδικασιών διεύθυνσης, ενισχύοντας την εφαρμοσιμότητά τους σε πρακτικά σενάρια.

Στον τομέα της διάσπασης δέσμης, βελτίωσα τις τεχνικές διαμόρφωσης φάσης και πλάτους για να επιτύχω ακριβή και ελεγχόμενη διάσπαση δέσμης, η οποία γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ θεωρητικών προβλέψεων και πρακτικών εφαρμογών. Η εργασία αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για εφαρμογές στην οπτική πληροφορική, όπου οι ακριβείς διαδρομές των ακτίνων είναι ζωτικής σημασίας.

Συνολικά, οι συνεισφορές αυτές όχι μόνο επεκτείνουν τη θεωρητική και πρακτική κατανόηση των μεταεπιφανειών, αλλά και ανοίγουν το δρόμο για μελλοντικές καινοτομίες στον τομέα, φέρνοντας ενδεχομένως επανάσταση στον τρόπο χειρισμού των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε διάφορες τεχνολογίες.

5.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Καθώς προσβλέπουμε στην επέκταση του πεδίου εφαρμογής και του αντίκτυπου της έρευνάς μας στις μεταεπιφάνειες, παρουσιάζονται διάφοροι πολλά υποσχόμενοι δρόμοι για περαιτέρω διερεύνηση και εφαρμογή. Οι θεωρητικές και πειραματικές βάσεις που τέθηκαν σε αυτή τη διατριβή θέτουν τις βάσεις για μια σειρά προηγμένων υλοποιήσεων και δοκιμών που θα προωθήσουν την πρακτική χρησιμότητα των μεταεπιφανειών στις τηλεπικοινωνίες και πέραν αυτών.

Μια κρίσιμη μελλοντική κατεύθυνση περιλαμβάνει την υλοποίηση του πολύπλοκου αλγορίθμου Gerchberg-Saxton στο MATLAB. Αυτός ο αλγόριθμος έχει δείξει σημαντικές υποσχέσεις σε θεωρητικά μοντέλα για τη βελτιστοποίηση των σχεδίων μεταεπιφανειών, ιδίως στην καθοδήγηση, την εστίαση και τη διάσπαση της δέσμης. Με την ανάπτυξη ενός ισχυρού σεναρίου MATLAB για

την υλοποίηση αυτού του αλγορίθμου, μπορούμε να επιτύχουμε ακριβέστερο έλεγχο των προφίλ φάσης και πλάτους των μεταεπιφανειών. Αυτή η υλοποίηση θα επιτρέψει την επαναληπτική προσομοίωση και τη βελτίωση των παραμέτρων της μεταεπιφάνειας, οδηγώντας σε βελτιστοποιημένους σχεδιασμούς με βελτιωμένα χαρακτηριστικά απόδοσης.

Επιπλέον, η δοκιμή αυτών των βελτιστοποιημένων σχεδίων θα είναι ζωτικής σημασίας. Σκοπεύουμε να χρησιμοποιήσουμε προηγμένα προγράμματα προσομοίωσης, όπως το CST Microwave Studio, για να ελέγξουμε τη λειτουργικότητα των μεταεπιφανειών στον έλεγχο των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτές οι προσομοιώσεις θα επικεντρωθούν στην καθοδήγηση δέσμης, τη διάσπαση δέσμης, την εστίαση και τη διάχυτη σκέδαση, παρέχοντας ολοκληρωμένα δεδομένα σχετικά με τις επιδόσεις και τους περιορισμούς των σχεδίων μας υπό διάφορες συνθήκες. Μέσω της λεπτομερούς προσομοίωσης, μπορούμε να εντοπίσουμε πιθανές βελτιώσεις και προσαρμογές που απαιτούνται για τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των μεταεπιφανειών.

Μια άλλη κατεύθυνση για μελλοντική επέκταση είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση πειραματικών μεταεπιφανειών που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την ενίσχυση των λειτουργιών των τηλεπικοινωνιών. Οι δυνατότητες της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing) την καθιστούν ιδανικό εργαλείο για τη δημιουργία σύνθετων γεωμετριών μεταεπιφανειών προσαρμοσμένων σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Αυτά τα πρωτότυπα μπορούν στη συνέχεια να δοκιμαστούν για την βελτίωση WiFi και άλλες τηλεπικοινωνιακές λειτουργίες σε συχνότητες χιλιοστομετρικών κυμάτων και μικροκυμάτων. Δοκιμάζοντας αυτές τις τρισδιάστατα εκτυπωμένες μεταεπιφάνειες σε περιβάλλοντα πραγματικού κόσμου, μπορούμε να αξιολογήσουμε τον πρακτικό αντίκτυπό τους και να βελτιώσουμε τα σχέδιά τους ώστε να ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Αυτές οι μελλοντικές επεκτάσεις δεν βασίζονται μόνο στις θεωρητικές γνώσεις που αποκτήθηκαν από την παρούσα διπλωματική, αλλά κινούνται επίσης προς απτές εφαρμογές και καινοτομίες που θα μπορούσαν να εξελίξουν τον τρόπο με τον οποίο χειριζόμαστε και ελέγχουμε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Μέσω προσεκτικής εφαρμογής, αυστηρών δοκιμών και καινοτόμων πρωτοτύπων, στοχεύουμε να φέρουμε τις δυνατότητες των μεταεπιφανειών σε νέα πεδία τεχνολογικής προόδου.

Παράρτημα

Παρακάτω δίνεται ο κώδικας που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας σε κοντινό και μακρινό πεδίο με την χρήση του HFP σε αντίστοιχα πεδία αλλά και για το σχεδιασμό των μεταεπιφανειών για ζητούμενες προδιαγραφές και λειτουργίες.

```
%ATHANASIADIS IOANNIS 1444
% The following script is used to study the Diffraction Grating on a
% Metasurface for a Spherical Wave

clearvars; close all; clc;

% ----- Users preferred General/Metasurface Parameters -----

c0 = 3e8; % [m/s] Light speed in vacuum
wl = 0.0010706874; % [m] Wavelength
M = 35; % # of rows
N = 35; % # of columns
Du = 0.000326; % [m] unit cell size
freq = c0/wl; % [Hz] Frequency Required for Power_Rad_final_Func

MetaSurf.ScattPat_Exp = 0; % [.] exponent in expression: cos(theta)^n

% 3D coordinates for the center of the wave front & Amplitude
Illumin.xyz = [ 0, Inf , 0]; % [m] wavefront center
Illumin.Inc_Ampli = ones(M,N); % ones(M,N) = Even Amplitude / Anything else for
Uneven[.]

% desired field calculation
% Scatt.field_Dist = 0; % 0=farfield / 1=nearfield Defines the field of plotting the
scattered/reflected Wave

% for the FAR-field we need the following variables to be set:
% For the Direction Of Departure we can put the sets of theta,phi angles
% i.e. if we put 1 set of theta,phi we have beam steering and from 2 sets &
% up we will have beam splitting to the given sets of directions. The sets
% must be placed in rows!
% Scatt.DOD = [ deg2rad(30) , deg2rad(0)]; % [rad] theta,phi angles
Scatt.DOD = []; % this no-scat-dir produces a default pattern

% for the NEAR-field we need the following variables to be set:
% PoF follows the same principle as the DOD matrix
Scatt.PoF = [0, 0 , 4.87*wl]; %4.87*wl
           % 0 , 0 , 7*wl ]; % (Point of Focus) a 3x1 vector that decides where the
Spotdiagram will be vertical from the MS
Scatt.IPD = 0; % (Image Point Diagram FOR NEAR FIELD ONLY) 0 = XY Plane Spot-Diag / 1 =
XZ Plane Field Plot

% ----- Calculations & Initializations for Param -----

MetaSurf.Du = Du; % [m] cell-width (square)
MetaSurf.NumCellsXY = [ M N ]; % [.] number of cells in each dimension
MetaSurf.Refl_Ampli = ones(M,N); % [.]
```

```

% Converting the xyz coordinates to spherical
ro = sqrt(Illumin.xyz(1)^2 + Illumin.xyz(2)^2 + Illumin.xyz(3)^2);
phi_i = acos(Illumin.xyz(3)/ro);
theta_i = sign(Illumin.xyz(2)) * acos(Illumin.xyz(1) / ( sqrt(Illumin.xyz(1)^2 +
Illumin.xyz(2)^2) ) );

% Display the calculated spherical coordinates
disp(['phi_i: ', num2str(phi_i)]);
disp(['theta_i: ', num2str(theta_i)]);
disp(['ro: ', num2str(ro)]);

% We use the following if to check the distance of the wave center in
% relevance to the metasurface. If the distance is greater than 10^5 times
% the wavelength of the wave we consider it a plane wave, else its spherical.
if isinf(ro)

    disp ('Incident Wave is in Far-Field, as a Plane Wave')
    Illumin.Type = 0; % Source/Illumination type: 0=Plane, 1=Spherical

    if ~isempty(Scatt.PoF)
        Illumin.DOA = [ pi/6 , 0 ]; % (MUST BE CALLED FOR PLANE WAVE) [rad] theta+phi
angles
    else
        Illumin.DOA = [ theta_i , phi_i ]; % (MUST BE CALLED FOR PLANE WAVE) [rad]
theta+phi angles
    end
else

    disp ('Incident Wave is in Near-Field, as a Spherical Wave')
    Illumin.Type = 1; % Source/Illumination type: 0=Plane, 1=Spherical
end

Scatt.scatt_Type = size(Scatt.DOD,1); % [.] 1 = Beam Steering / 2 >= Beam Splitting

% ----- Call function to calc. scat-patt -----
HFP_ScatPat_SpotDiag_Main( freq , MetaSurf , Illumin , Scatt );

```

```

%ATHANASIADIS IOANNIS 1444

function [E,the,phi] = HFP_ScatPat_SpotDiag_Main( freq , MetaSurf , Illumin , Scatt )

% FUNCTION [E,the,phi] = HFP_ScatPat_Func_Sph( freq , MetaSurf , Illumin , Scatt )
%
% ===== Inputs =====
% Check the "nargin==0" block for values of these arguments
% * frequency [Hz] scalar
% * MetaSurf -- structure defining the MS properties, with fields:
%   .duc [m] scalar // cell-width (square)
%   .NumCellsXY [.] 1x2 vector // # of cells in Ny/rows and Mx/columns
%   .Refl_Ampli [.] Ny-by-Mx matrix // reflection-coeff amplitude profile
%   .Refl_Phase [rad] Ny-by-Mx matrix // reflection-coeff phase profile
%   .Cell_ScatPat_Exp [.] scalar // exponent in expression: cos(theta)^n
% * Illumin -- structure defining the illumination/incident wave properties
%   .Type [.] Illumination/source type: 0=Plane wave, 1=Spherical
%   .DOA [rad] 1x2 vector // Direction-of-Arrival for plane wave [theta,phi]
%   .xyz [m] 1x3 vector // coordinates to the spherical wave center

```

```

% * Scatt -- structure defining the Scattered/Reflected wave properties
%   .DOD [rad] nx2 vector // Direction-Of-Departure for plane wave [theta,phi] the n
parameter represents
% the amount of split rays we want to have in the event of Beam splitting (in the
event of beam steering the vector is 1x2)
%   .scatt_Type [.] Type of scattering // 0 = Random MS Config , 1 = Beam Steering ,
2 = Beam Splitting
%   .field_Dist [.] Defining Distance field for the Scattering Diagram // 0 = Far-
field , 1 = Near-field
% ===== Outputs =====
% * E -- scattering pattern (E-field complex amplitude)
% * [the,phi] -- matrices from meshgrid, with the directions corresponding
%   to the scattering patter. They are: theta=0:SPAR:90, phi=0:SPAR:360

% -----
% ===== Parameter Initialization WITHOUT Inputs =====
% -----

if nargin == 0
    clearvars;
    close all; clc;
    disp([' Starting to Calculate and Produce the Radiation Diagram for a MxN MS ' ...
        'using default parameters ']);

    freq = 1e12; % [Hz] Operating frequency
    wl = 3e8 / freq;

    % Metasurface Standard Parameters
    MetaSurf.Du = wl/5; % [m] unit-cell size (square)
    MetaSurf.NumCellsXY = [ 20 20 ]; % [.] number of cells in each dimension
    MetaSurf.ScatPat_Exp = 0; % [.] exponent in expression: cos(theta)^n

    % Apertures' Phase and Amplitude
    MetaSurf.Refl_Ampli = ones( MetaSurf.NumCellsXY(1) , MetaSurf.NumCellsXY(2) );

    % Illumination Angles / Angles of Arrival
    Illumin.Inc_Ampli = ones( MetaSurf.NumCellsXY(1) , MetaSurf.NumCellsXY(2) );
    Illumin.DOA = deg2rad([ 30 , 90 ]); % [rad] theta+phi angles (plane waves)
    Illumin.Type = 0; % Source/Illumination type: 0=Plane, 1=Spherical

    % Scattered Wave Direction Of Departure
    Scatt.scatt_Type = 0; % 0 -> Random MS Phase Config for random Beam Steering
    % Scatt.field_Dist = 0; % 0=farfield / 1=nearfield Defines the field of plotting
the scattered/reflected Wave
end

% -----
% ===== Function Parameter Preperation =====
% -----

% ----- Metasurface Parameter Prep -----
Du = MetaSurf.Du; % [m] unit-cell size (square)
N = MetaSurf.NumCellsXY(1); % y-dim (up/down, #-of-row)
M = MetaSurf.NumCellsXY(2); % x-dim (left/right, #-of-column)
Ra_mnFF = MetaSurf.Refl_Ampli ; % [.] amplitude profile
n = MetaSurf.ScatPat_Exp ; % exponent for lateral directions of scattered wave

% ----- Illumination Parameter Prep -----
ill_Type = Illumin.Type; % Source/Illumination type: 0=Plane, 1=Spherical

```

```

if ill_Type == 0
    theta_i = Illumin.DOA(1); % [rad] theta incident/illum (for plane)
    phi_i = Illumin.DOA(2); % [rad] phi incident/illum (for plane)
elseif ill_Type ==1
    Sph_Cntr = Illumin.xyz; % [m] sphere center (for spherical)
else
    error(['The value of the ill_Type variable must be either 0 for PW' ...
        'or 1 for Spherical Wave.'])
end

%----- Scattering/ Reflection Parameters -----
% Defining the Distance of the plotting Diagram in refrence to the MS
Scatt_Type = Scatt.scatt_Type; % 0 = Random MS Config , 1 = Beam Steering , 2 = Beam
Splitting

% -----
% ===== Basic Parameter Initialization =====
% -----
w1 = 3e8 / freq;
k0 = 2*pi/w1; % [rad/m] free-space wavenumber

%creating MS grid and Parameters
[mm,nn] = meshgrid(1:M,1:N); % index-array in MS rows/columns
dxk = k0 * Du; % unit cell size, x-dimension*kappa (d*k0=2*pi * d/w1)
dyk = k0 * Du; % unit cell size, y-dimension*kappa

% Ms grid parameters used for the Spherical Wave & Near-Field Calculations
[xuc,yuc] = meshgrid( -(M-1)/2:(M-1)/2*dxk , -(N-1)/2:(N-1)/2*dyk ) ; % [.]
zuc = k0*zeros(size(xuc)); % [.] N-by-M size (rs has M*N cells)

% -----
% ===== Incident Wave/Source Parameters =====
% -----

% For simplification purposes we use a Plane Wave for the Incident Wave and
% we set the amplitude to 1.

% Source/Illumination type: 0=Plane, 1=Spherical
if ill_Type == 0
    % Direction of Source/Incident Wave , for each unit-cell
    % For Plane-Wave (PW) incidence, theta & phi are constant across the MS
    theSmn = zeros(M,N) + theta_i; % (rad)
    phiSmn = zeros(M,N) + phi_i; % (rad)

    % Amplitude and Phase of Incident Plane Wave
    Ia_mn = ones(M,N) ;
    Ip_mn = ( dxk*(mm-1).*cos(phiSmn) - dyk*(nn-1).*sin(phiSmn) ).*sin(theSmn);
    IncDirec = rad2deg([theta_i, phi_i]); % [deg] Calling theta,phi DOA
elseif ill_Type == 1

    % If the Spherical Waves center is in the far-field the Wave reaches
    % the MS as a Plane Wave so we terminate the Function.
    if Sph_Cntr(3) < 3*w1
        error('Spherical Wave Center too close to m/s. Stopping function execution.')
    end

    xyzks = k0*Sph_Cntr; % [.] spher-source xyz, normed to kappa0

```

```

% For Spherical-Wave (SW, point source), theta & phi are rigorously
% calculated from geometric formulas.Using the meshgrid 104-106

% 1. Transform source coords
xsrc = xyzks(1);
ysrc = xyzks(2);
zsrc = xyzks(3);
% 2. cartesian dists of source from each unit-cell center
xd_sfuc = xsrc - xuc;
yd_sfuc = ysrc - yuc;
zd_sfuc = zsrc - zuc;
% 3. transform to sphericals
dist_suc = sqrt(xd_sfuc.^2 + yd_sfuc.^2 + zd_sfuc.^2);

theSmn = atan(sqrt(xd_sfuc.^2 + yd_sfuc.^2)./zd_sfuc); % (rad)
phiSmn = atan2( yd_sfuc, xd_sfuc ); % (rad)

% Point Source :
if Illumin.Inc_Ampli == ones(M,N)
    % for even Amplitude Illumination
    disp(' Using the default EVEN Amplitude for Spherical Wave = 1 ')
    Ia_mn = ones(M,N);
else
    % for uneven Amplitude Illumination
    disp(' Using the UNEVEN Amplitude for Spherical Wave ')
    R_cs = norm(dist_suc);

    % Giving E0 this value so the center of the MS has an Amplitude of 1
    E0 = 4*pi*mean(R_cs);

    Ia_mn = E0./40*(4*pi*dist_suc);
end
Ip_mn = dist_suc; % Because phase=beta*dz-->k0*distance
IncDirec = rad2deg([theSmn, phiSmn]); % [deg] Calling theta,phi DOA for Sph;
end

% -----
% ===== MS Grating Calculations / Scattered wave Parameter Prep =====
% -----
% Given input phase at each unit cell (from Dir-of-Arrival)
Phase_inc = Ip_mn ;
if ~isnan(Scatt.DOD)

% Depending on the Scatt_Type we have:
% 0 -> Random MS Phase Config for random Beam Steering
% 1 -> Beam Steering to the theta and phi angles that we used to call Func
% 2 -> Beam Splitting in 2 or more directions rows in DOD decide the split
% lobes
if (Scatt_Type == 0) || (nargin == 0)

% -----
% ===== Apertures' Phase Initialization WITHOUT parameters given =====
% -----
disp(' Creating phase profile with random noise (diffused scattering) ')
Rp_mnFF = rand(size(nn))*2*pi;

elseif Scatt_Type >= 1

```

```

if Scatt_Type == 1
    disp(' Performing Beam Steering ')
elseif Scatt_Type >= 2
    disp([' Performing Beam Splitting in ', num2str(Scatt_Type), ' lobes '])
end

% Initialize Rp_mn to zeros
Rp_mnFF = zeros(M, N);

for lobe = 1:Scatt_Type
    % Get the direction of departure (DOD) for the current lobe
    theta_sL = Scatt.DOD(lobe, 1);
    phi_sL = Scatt.DOD(lobe, 2);

    % Calculate the output phase at each unit cell (for DOD)
    Phase_scaL = (-dxk*(mm-1).*cos(phi_sL) + dyk*(nn-
1).*sin(phi_sL)).*sin(theta_sL);

    % Calculate the reflection phase coefficient of the MS for the current lobe
    Refl_Coef_phL = Phase_scaL - Phase_inc;

    % Ensure that the phase of each cell is inside the [0, 2*pi) rad
    Phi_mnL = mod(Refl_Coef_phL, 2*pi);

    % Accumulate the reflection phase coefficients for each lobe
    Rp_mnFF = Rp_mnFF + exp(1i*Phi_mnL);
end
% Take the angle of the accumulated complex reflection coefficients
Rp_mnFF = angle(Rp_mnFF);
Rp_mnFF = mod( Rp_mnFF , 2*pi );
end

% -----
% === Huygens-Fresnel Principle for Radiation Diagram Far OR Near Field ===
% -----

% ----- Calculating Far-field Scattering -----
disp([' Calculation of the complex E-field for Far-Field scattering using' ...
' the Huygens-Fresnel Principle for the given values '])

% Angle-resolution of Scatt-Patt:
dsp = 3; % degree-step-phi
dst = 3; % degree-step-theta
angspan = 0; % [deg] ang-span on lobe-focus-direction
thef = 0; % [deg] lobe-focus theta
phif = 0; % [deg] lobe-focus phi

% Directions on "hemisphere" space. If angspan>0, it only calculates
% around a specific direction (e.g. around the approx reflection-lobe)
% to cut-down on simulation times.
if angspan > 0
    phi = deg2rad( (-angspan/2:dsp:angspan/2) + phif );
    the = deg2rad( (-angspan/2:dst:angspan/2) + thef );

    if any( the < 0 )
        in = the<0;
        phi( in ) = phi(in)+180;
    end
end

```

```

the = abs(the);
end

else
    phi = (0:dsp:360)*pi/180 ;
    the = (0:dst:90)*pi/180 ;
end

% Directions in the "hemisphere", gridded
[phi,the]=meshgrid(phi,the);

% Scat-Patt formation:
EFF = 0*the; % this will hold the pattern (complex)

for m1 = 1:M
    for n1 = 1:N

        % Variable that denotes the scattering pattern of the mn-th unit
        % cell , the choice n=1 describes real-world dipolar scatterers.
        % When n==0, scatterers scatter isotropically (unrealistic).
        fmni = cos(theSmn(n1,m1))^n; % how each cell "gathers" from inc dirs
        fmns = cos(the).^n; % how each cell "diffuses" in scat dirs

        % complex-valued reflected/scattered profile
        R_w = Ra_mnFF(n1,m1).* fmns .* exp( 1i * Rp_mnFF(n1,m1) );

        % complex-valued illumination/incidence profile
        Il_w = Ia_mn(n1,m1) .* fmni .* exp( 1i * Ip_mn(n1,m1) );

        Il_R_w = Il_w .* R_w ;

        % Array parameter
        zeta_mn = exp( +1j*dxk*m1.*sin(the).*cos(phi))...
            .*exp( -1j*dyk*n1.*sin(the).*sin(phi));

        EFF = EFF + Il_R_w .* zeta_mn;
    end
end

Rad_LinearFF = abs(EFF).^2/max(abs(EFF(:)).^2);
Rad_dBFF= 10 * log10(Rad_LinearFF);
end

% ----- Calculating near field SpotDiagram -----
if ~isnan(Scatt.PoF)
disp([' Calculation of the complex E-field regarding the Near-Field' ...
    ' Scattering using the Fresnel-Kirchhoff Principle '])

    % Recall the xyz coordinates of the (centers of all the) unit cells.
    % These points are the "rs".Using the meshgrid 104-106. denormalize them
    xuc = xuc / k0; % [m]
    yuc = yuc / k0; % [m]
    zuc = zuc / k0; % [m]

    % Assign the first Point of Focus
    pofx = Scatt.PoF(1);
    pofy = Scatt.PoF(2);
    pofz = Scatt.PoF(3);
    df =sqrt(pofx^2 + pofy^2 + pofz^2);

```

```

% Check the z coordinate condition for each Point of Focus
if df < 3 * wl
    error(['The z coordinate for the Point of Focus must be greater ' ...
        'than 3 times the wavelength of the incoming wave!'])
end

% Now defining the Image Plane in which the radiation Diagram will be
% portrayed.
K = 51; % this is the pixel-number in one dimension (rp has K^2 "pixels")
x1d = linspace(-1/2,+1/2, K) *5* wl; % [m]
switch Scatt.IPD
    case 0 % xy-plane at some z ---> you should see a spot!
        [u,v] = meshgrid(x1d); % [m] these two are K-by-K matrix
        w = df + 0*u; % [m] z-coord of points on image-plane, K-by-K
    case 1 % xz-plane at y=0 ---> you should see E-field diffraction
        z1d = linspace(wl, 1.5*df, K+30); % [m]
        [u,w] = meshgrid(x1d,z1d); % [m] these two are K-by-K matrix
        v = 0*u; % [m] y-coord of points on image-plane, K-by-K
    otherwise
        error(['Value Scatt.IPD must be 0 = XY Plane Spot-Diag' ...
            ' / 1 = XZ Plane Field Plot'])
end
% Calculate the distance between each rs (unit cell) to the focus.
% Its the distance between each rs on the MS (z=0).
ro = sqrt((pofx - xuc).^2 + (pofy - yuc).^2 ); % MxN matrix
Rp_mnNF = k0*(-(sqrt(pofz.^2 + ro.^2)+pofz) + sin(theSmn)*((xuc-
pofx)*cos(phiSmn)...
    +(yuc-pofy)*sin(phiSmn)));
% Required parabolic phase to have on-axis focus spot
Rp_mnNF = mod(Rp_mnNF, 2*pi);

% Creating the aperture so the Airy Disk can be created
% Determine the center of the unit cell array
center_x = (M-1) / 2;
center_y = (N-1) / 2;

% Define the radius of the circle (in units of cell indices)
radius = (M-1) / 2;
% Calculate the distance of each unit cell from the center
distance_from_center = sqrt((mm-1 - center_x ).^2 + (nn-1 - center_y ).^2);

Ra_mnNF = ones(size(xuc)); % unitary amplitude (full reflection)
% Set Rp_mn to zero outside the defined circle
Ra_mnNF(distance_from_center >= radius) = 0;

% Define the vertical vector
u_vert = [0, 0, 1];

% Initialize the combined E-field
ENF = zeros(size(u));

for i = 1:M*N

    rs = [xuc(i), yuc(i), zuc(i)]; % rs = xyz of this cell of the MS

    % 3D-vectors connecting rs to all rp points
    dspx = u - rs(1); % K-by-K
    dspy = v - rs(2);

```



```

dspz = w - rs(3);

dot_dsp_uvert = dspx*u_vert(1) + dspy*u_vert(2) + dspz*u_vert(3); % K-by-K
norm_dsp = sqrt( dspx.^2 + dspy.^2 + dspz.^2 ); % K-by-K
theta_scat = acos( dot_dsp_uvert ./ ( norm_dsp * norm(u_vert) ) );

% Variable that denotes the scattering pattern of the mn-th unit
% cell , the choice n=1 describes real-world dipolar scatterers.
% When n==0, scatterers scatter isotropically (unrealistic).
fmni = cos(theSmn(i)).^n; % how each cell "gathers" from inc dirs
fmns = cos(theta_scat).^n; % how each cell "diffuses" in scat dirs

% Calculating the obliquity factor
Psi = 0.5 * (cos(theSmn(i)) + cos(theta_scat)); % MxN matrix

% Calculating the Distance related Var
Dst_Var = exp(1i*k0.*norm_dsp)./norm_dsp; % MxN matrix

% complex-valued reflected/scattered profile
R_w = Ra_mnNF(i) .* fmns .* exp(1i * Rp_mnNF(i));
% complex-valued illumination/incidence profile
Il_w = Ia_mn(i) .* fmni .* exp(1i * Ip_mn(i));
Il_R_w = Il_w .* R_w ;

CF = (1/(1i*wl)) .* Il_R_w .* Psi .* Dst_Var;
ENF = ENF + CF;% Accumulate CF into E
end

% Calculate the dB values for the plot
Rad_LinearNF = abs(ENF).^2/max(abs(ENF(:)).^2);
Rad_dBNF= 10 * log10(Rad_LinearNF);

% Find the x-coordinate where E reaches its max value
[max_ENF, max_idx] = max(Rad_LinearNF(:));
[max_row, max_col] = ind2sub(size(Rad_LinearNF), max_idx);
x_max_E = x1d(max_col);
disp(['The x-coordinate where E reaches its max value: ', num2str(x_max_E)])

% Find the first x-coordinate where E reaches its min value
[min_ENF, min_idx] = min(Rad_LinearNF(:));
[min_row, min_col] = ind2sub(size(Rad_LinearNF), min_idx);
x_min_E = x1d(min_col);
disp(['The first x-coordinate where E reaches its min value: ', num2str(x_min_E)])
end
% -----
% == Inc Plot / MS PHASE & AMPLITUDE CONF / Creating the Power Radiation ==
% -----

% ----- Incident Uneven Amplitude config -----
if Illumin.Inc_Ampli ~= ones(M,N)
    % Plot the incident amplitude distribution
    figure;
    imagesc(Ia_mn);set(gca,'YDir','Normal')
    axis equal tight;
    xlabel('("M") #cells'); ylabel('("N") #cells');
    title('Uneven Amplitude Distribution for Spherical Wave Illumination');
    set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on')
    colormap(jet);
    hcb1 = colorbar;

```

```

    caxis([0 1])
end

% -----
% ----- Far-Field MS Config & Power Radiation Diagram -----
% -----

if ~isempty(Scatt.DOD)

    figure('Name', 'MS Phase and Amplitude Config FF');

    % Phase-profile across the MS
    subplot(1,2,1);
    imagesc(fliplr(rad2deg(Rp_mnFF)));
    set(gca, 'YDir', 'Normal');
    axis equal tight;
    xlabel('("M") #cells'); ylabel('("N") #cells');
    title('\angle\Phi_{nm} (deg)');
    set(gca, 'XMinorTick', 'on', 'YMinorTick', 'on');
    colormap(gca, hsv); % Set colormap for this subplot
    caxis([0 360]);
    colormap(jet)
    hcb1 = colorbar;
    set(hcb1, 'YTick', 0:45:360);

    % Uneven amplitude plot across the MS
    subplot(1,2,2);
    imagesc(fliplr(abs(Ra_mnFF)));
    axis equal tight;
    set(gca, 'YDir', 'Normal');
    colorbar;
    colormap(gca, hot); % Set colormap for this subplot
    xlabel('("M") #cells'); ylabel('("N") #cells');
    title('|r_{nm}|');
    set(gca, 'XMinorTick', 'on', 'YMinorTick', 'on');
    caxis([0 1]);
    colormap(jet)

    figure('Name', 'Far-Field Power Radiation Diagram');

    imagesc(0:360, 0:90, Rad_dBFF) ; set(gca, 'YDir', 'Normal')
    set(gca, 'XTick', 0:45:360) % horz-axis tick-labels
    colormap(hot);
    colorbar;
    title('Magnitude of Radiation Pattern (dB)');
    xlabel('\phi');
    ylabel('\theta');
    caxis([-30 0]); % don't show too negative values. -30 is enough for "zero"

    figure('Name', '3D Pattern for Far-Field');
    plot_3D_Pattern_altered( rad2deg(the), rad2deg(phi), Rad_LinearFF , [3 6] ,IncDirec
)
    hold on;

% ----- Beam Steering/Splitting plotting the centers of each lobe -----
if Scatt_Type >= 1

    subplot (1,2,2)
    % Plotting the center of the split rays

```

```

    for n1 = 1:Scatt_Type
        center_cos = rad2deg(Scatt.DOD(n1,1).*cos(Scatt.DOD(n1,2)));
        center_sin = rad2deg(Scatt.DOD(n1,1).*sin(Scatt.DOD(n1,2)));
        % Plotting white dot for the incident wave
    end
plot3(center_cos,center_sin,0,'*','Color','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',10)
end
end
% -----
% ----- Near-Field MS Conf & Near-Field Plots -----
% -----

if ~isempty(Scatt.PoF)

    figure('Name', 'MS Phase and Amplitude Config NF');

    % Phase-profile across the MS
    subplot(1,2,1);
    imagesc(fliplr(rad2deg(Rp_mnNF)));
    set(gca, 'YDir', 'Normal');
    axis equal tight;
    xlabel('("M") #cells'); ylabel('("N") #cells');
    title('\angle\Phi_{nm} (deg)');
    set(gca, 'XMinorTick', 'on', 'YMinorTick', 'on');
    colormap(gca, hsv); % Set colormap for this subplot
    caxis([0 360]);
    colormap(jet)
    hcb1 = colorbar;
    set(hcb1, 'YTick', 0:45:360);

    % Uneven amplitude plot across the MS
    subplot(1,2,2);
    imagesc(fliplr(abs(Ra_mnNF)));
    axis equal tight;
    set(gca, 'YDir', 'Normal');
    colorbar;
    colormap(gca, hot); % Set colormap for this subplot
    xlabel('("M") #cells'); ylabel('("N") #cells');
    title('|r_{nm}|');
    set(gca, 'XMinorTick', 'on', 'YMinorTick', 'on');
    caxis([0 1]);

    if Scatt.IPD == 0
        % Plotting the spot diagram. To have a succesfull focusing point above
        % the metasurface we need a Airy disc to form on the xy plane.

        figure('Name', 'Near-Field Radiation Pattern in the XY Plane');

        subplot(1,2,1)
        imagesc( x1d/w1, x1d/w1, Rad_LinearNF ); set(gca,'YDir','normal')
        title( 'Linear |E|^2' );
        colorbar
        xlabel( 'x_{rp} / \lambda' );
        ylabel( 'y_{rp} / \lambda' );
        caxis([0 1])
        axis equal tight
    end
end

```

```

subplot(1,2,2)
imagesc( x1d/wl, x1d/wl, Rad_dBNF ); set(gca,'YDir','normal')
title( 'dB |E|^2' );
colorbar;
xlabel( 'x/\lambda' );
ylabel( 'y/\lambda' );
caxis([-30 0]); % don't show too negative values. -30 is enough for "zero"
axis equal tight

% ----- Near-Field Field Plot -----
else
% Assuming Unorm_dB and x1d are already defined in your script.
% We will plot Unorm_dB against x1d with a constant z (df).

figure('Name', 'Near-Field Radiation Pattern in the XZ Plane');
imagesc(x1d/wl, z1d/wl , Rad_LinearNF);
colormap(jet);
colorbar;
title('Linear |E|^2');
xlabel('x/\lambda');
ylabel('z/\lambda');
axis xy; % Ensures the origin is at the bottom-left
caxis([0 1]);

% creating a line on the field plot to mark the z = df plane
hold on
for kdf = 1:length(df)
line(xlim, df(kdf)*[1 1] / wl, 'Color', 'k', 'LineWidth', 2,
'LineStyle', '--');
x_limits = xlim; % Get the current x-axis limits
text(x_limits(2) * 0.95, df(kdf) / wl, ...
sprintf( 'z = df_%d' ,kdf ) ,...
'VerticalAlignment', 'bottom', 'HorizontalAlignment',
'right','FontSize', 10, 'Color', 'k');
end
end
end
end

```

Βιβλιογραφία

- [1] H.-T. Chen, A. J. Taylor, and N. Yu, “A review of metasurfaces: physics and applications,” *Rep. Prog. Phys.*, vol. 79, no. 7, p. 076401, Mar. 2016, doi: 10.1088/0034-4885/79/7/076401.
- [2] T. J. Cui, “Microwave metamaterials—from passive to digital and programmable controls of electromagnetic waves,” *J. Opt.*, vol. 19, no. 8, p. 084004, Apr. 2017, doi: 10.1088/2040-8986/aa7009.
- [3] A. Wang, Z. Meng, and C. Q. Chen, “Static topological mechanics with local resonance,” *J. Mech. Phys. Solids*, p. 105705, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.jmps.2024.105705.
- [4] “Veselago: Electrodynamics of substances with simultaneous... - Μελετητής Google.” Accessed: Jun. 07, 2024. [Online]. Available: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=The%20electrodynamics%20of%20substances%20with%20simultaneously%20negative%20values%20of%20and%20%CE%BC&author=V.G.%20Veselago&publication_year=1968
- [5] R. Kumar, M. Kumar, J. S. Chohan, and S. Kumar, “Overview on metamaterial: History, types and applications,” *Mater. Today Proc.*, vol. 56, pp. 3016–3024, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.423.
- [6] C. L. Holloway, E. F. Kuester, J. A. Gordon, J. O’Hara, J. Booth, and D. R. Smith, “An Overview of the Theory and Applications of Metasurfaces: The Two-Dimensional Equivalents of Metamaterials,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, no. 2, pp. 10–35, Apr. 2012, doi: 10.1109/MAP.2012.6230714.
- [7] O. Luukkonen *et al.*, “Simple and Accurate Analytical Model of Planar Grids and High-Impedance Surfaces Comprising Metal Strips or Patches,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 6, pp. 1624–1632, Jun. 2008, doi: 10.1109/TAP.2008.923327.
- [8] O. Luukkonen, F. Costa, C. R. Simovski, A. Monorchio, and S. A. Tretyakov, “A Thin Electromagnetic Absorber for Wide Incidence Angles and Both Polarizations,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 10, pp. 3119–3125, Jul. 2009, doi: 10.1109/TAP.2009.2028601.
- [9] “Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction | Science.” Accessed: Jun. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1210713>
- [10] L. Bao and T. J. Cui, “Tunable, reconfigurable, and programmable metamaterials,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 62, no. 1, pp. 9–32, 2020, doi: 10.1002/mop.32164.
- [11] A. M. Shaltout, V. M. Shalaev, and M. L. Brongersma, “Spatiotemporal light control with active metasurfaces,” *Science*, vol. 364, no. 6441, p. eaat3100, May 2019, doi: 10.1126/science.aat3100.
- [12] L. Huang, S. Zhang, and T. Zentgraf, “Metasurface holography: from fundamentals to applications,” *Nanophotonics*, vol. 7, no. 6, pp. 1169–1190, Jun. 2018, doi: 10.1515/nanoph-2017-0118.
- [13] F. Liu *et al.*, “Intelligent Metasurfaces with Continuously Tunable Local Surface Impedance for Multiple Reconfigurable Functions,” *Phys. Rev. Appl.*, vol. 11, no. 4, p. 044024, Apr. 2019, doi: 10.1103/PhysRevApplied.11.044024.
- [14] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*. Roberts and Company Publishers, 2005.
- [15] H. Taghvaei *et al.*, “Scalability Analysis of Programmable Metasurfaces for Beam Steering,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 105320–105334, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000424.
- [16] “Wave Phenomena in Space/Time Varying Metamaterials/Metasurfaces 2.” Accessed: Jun. 18, 2024. [Online]. Available: <https://cd2024.piers.org/session.html?sid=S287>
- [17] H. Taghvaei *et al.*, “Multiwideband Terahertz Communications Via Tunable Graphene-Based Metasurfaces in 6G Networks: Graphene Enables Ultimate Multiwideband THz Wavefront

- Control,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 17, no. 2, pp. 16–25, Jun. 2022, doi: 10.1109/MVT.2022.3155905.
- [18] Y. Ma, D. Sang, Y. Lin, Q. An, Z. Sun, and Y. Fu, “Polarization-Dependent Fiber Metasurface with Beam Collimating and Deflecting,” *Photonics*, vol. 11, no. 5, Art. no. 5, May 2024, doi: 10.3390/photonics11050474.
- [19] W. Guo, G. Wang, H. Li, Y. Zhuang, and C. Shuai, “Ultra-thin reflecting polarization beam splitter under spherical waves’ illumination by using single-layered anisotropic metasurface,” *Appl. Phys. A*, vol. 123, no. 1, p. 103, Dec. 2016, doi: 10.1007/s00339-016-0713-4.
- [20] U. Rivera-Ortega and B. Pico-Gonzalez, “Wavelength estimation by using the Airy disk from a diffraction pattern with didactic purposes,” *Phys. Educ.*, vol. 51, no. 1, p. 015012, Sep. 2015, doi: 10.1088/0031-9120/51/1/015012.
- [21] S. Yu, H. Liu, and L. Li, “Design of Near-Field Focused Metasurface for High-Efficient Wireless Power Transfer With Multifocus Characteristics,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 5, pp. 3993–4002, Feb. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2815991.
- [22] “PGL_TechNote_GratingEquation3.pdf.” Accessed: Jun. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.plymouthgrating.com/wp-content/uploads/2018/08/PGL_TechNote_GratingEquation3.pdf
- [23] “Entropy | Free Full-Text | Modified Gerchberg–Saxton (G-S) Algorithm and Its Application.” Accessed: Jun. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1099-4300/22/12/1354>

Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια

π.χ.	παραδείγματος χάρη
κ.τ.λ.	και τα λοιπά
βλπ.	βλέπε
HIS	High Impedance Surface
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface
HFP	Huygens-Frensel Principle
FF2FF	Far-Field to Far-Field
NF2FF	Near-Field to Far-Field
FF2NF	Far-Field to Near-Field
NF2NF	Near-Field to Near-Field
FFT	Forward Fourier Transform
IFT	Inverse Fourier Transform

Απόδοση ξενόγλωσσων ορών

Ξενόγλωσσος όρος

mmWave
High Impedance Surface
Absorber
Reconfigurable Intelligent Surface
Beam Steering
Beam Splitting
Diffused Scattering
Focusing
Far-Field
Near-Field
Dual Focusing

Απόδοση

Χιλιοστομετρικές συχνότητες
Επιφάνεια Υψηλής αντίστασης
Απορροφητής
Έξυπνη Αναπρογραμματιζόμενη επιφάνεια
Ανακατεύθυνση δέσμης
Διάσπαση δέσμης
Διάχυτη σκέδαση
Εστίαση
Μακρινό πεδίο
Κοντινό πεδίο
Διπλή εστίαση