

■ ■ ■ ΣΧΟΛΗ
■ ■ ■ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ
■ ■ ■ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
Τμήμα: ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

Πτυχιακή Εργασία

Μελέτη, σχεδίαση και έλεγχος ολοκληρωμένης κεραίας για εφαρμογές σε ασύρματα οπτικά δίκτυα

ΚΑΡΠΑΘΙΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

ΜΠΕΪΝΤΟ ΜΠΙΤΙΛΑ

A.M.:

5906

5913

Επιβλέπων : ΜΙΚΡΟΥΛΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

Αθίνα, 21 Δεκεμβρίου 2012

Ευχαριστίες

Η πτυχιακή αυτή εργασία συντάχθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 στη Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, στο τμήμα Ηλεκτρονικής. Μέσα από τις γραμμές αυτές θέλουμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον κύριο Μικρούλη, εισηγητή του θέματος της εργασίας μας, για την ευκαιρία που μας έδωσε να ασχοληθούμε με ένα σύγχρονο και ενδιαφέρον θέμα των οπτικών και ασύρματων επικοινωνιών καθώς και για την εποικοδομητική συνεργασία μας και την βοήθεια που μας προσέφερε, όσο και για τις νέες γνώσεις που αποκτήσαμε κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Παράλληλα θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον κύριο Ιωάννη Πετρόπουλο, όχι μόνο για τις καθοριστικής σημασίας γνώσεις του και τις συμβουλές του επάνω στο αντικείμενο που πραγματεύεται η πτυχιακή μας εργασία, αλλά και για την υπομονή που έδειξε απέναντι μας, απαντώντας πρόθυμα στις πολλές απορίες μας.

Τέλος, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον κύριο Βουδούρη, για τις συμβουλές και την καθοδήγηση που μας πρόσφερε, γύρω από τα θέματα που αφορούν την πτυχιακή εργασία.

Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή-Περίληψη	10
2. Συστήματα Radio over Fiber με συχνότητα λειτουργίας 60GHz	12
2.1 Το φάσμα των 60 GHz	12
2.2 Radio over fiber	17
3.Εισαγωγή και περιγραφή των χρησιμοποιηθέντων προγραμμάτων	21
3.1 Advanced Design System (ADS).....	21
3.2 High Frequency Structure Simulator (HFSS)	26
4. Μικροταινιακή Κεραία.....	32
5. Συνεπίπεδοι Κυματοδηγοί (Coplanar waveguides -CPW)	41
6. Καλώδια Σύνδεσης (Bond wires).....	43
7. Φωτοδίοδος	45
8.Διαμόρφωση Ορθογώνιας Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM)	53
9. Λειτουργία της OFDM	63
9.1 Απλή εξομοίωση της OFDM	64
9.2 Εξομοίωση της OFDM μαζί με την σχεδιασμένη patch κεραία.....	69
10. Συμπεράσματα	i
11. Αναφορές.....	78

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1.1: Εφαρμογές των ασύρματων συστημάτων στα 60 GHz: α) ζεύξη σημείο προς σημείο σε LOS συνθήκες, β) υψηλής ταχύτητας ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN) (100 Mbps-1 Gbps).....	12
Εικόνα 2.1.2: Επαναπροσδιορισμός των οικιακών δικτύων με τα χιλιοστομετρικά κύματα.	13
Εικόνα 2.1.3: Με τη χρήση κατευθυντικής κεραίας γίνεται αύξηση της λαμβανόμενης ισχύος.. ..	15
Εικόνα 2.1.4: Παγκόσμια διαθεσιμότητα του φάσματος γύρω από τα 60 GHz.	16
Εικόνα 2.2.1: Απλοποιημένο Διάγραμμα Λογικής RoF δικτύου.....	17
Εικόνα 2.2.2: Ενδεικτικό σύστημα RoF ζεύξης.....	19
Εικόνα 3.1.1: Περιβάλλον εργασίας του Advanced Design System (ADS)	21
Εικόνα 3.1.2: Δημιουργία project	22
Εικόνα 3.1.3: Άνοιγμα project	23
Εικόνα 3.1.4: Ο ελεγκτής S-παραμέτρων	24
Εικόνα 3.1.5: Διαδικασία δημιουργίας απεικόνισης αποτελεσμάτων στο περιβάλλον του Data Display.	25
Εικόνα 3.2.1: Το περιβάλλον εργασίας του HFSS	26
Εικόνα 3.2.2.: Άνοιγμα των project.	27
Εικόνα 3.2.3: Δομή του project.....	28
Εικόνα 3.2.4: Προβολή τυχόν σφαλμάτων ή προειδοποιήσεων που εμφανίζονται πριν την προσομοίωση	29
Εικόνα 3.2.5: Αλλαγή του μοντέλου παραμέτρων ή χαρακτηριστικών	29
Εικόνα 3.2.6: Πρόοδος της λύσης.....	30
Εικόνα 3.2.7: Το 3D Modeler Window	30
Εικόνα 3.2.8: HFSS Desktop	31
Εικόνα 3.2.9: HFSS Toolbars.	31
Εικόνα 4.1: Μικροταινιακή κεραία σχεδιασμένη στο πρόγραμμα HFSS.	32
Εικόνα 4.2: Επιμέρους υποστρώματα κεραίας.	33

Εικόνα 4.3: Γραμμές μεταφοράς και επιμέρους γειώσεις.....	34
Εικόνα 4.4: Χρήση διπλών διηλεκτρικών, ενός υψηλής και ενός χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς, στα οποία θα παρεμβάλεται κενό αέρα (Foam Layer).	35
Εικόνα 4.5: Διάγραμμα των S-παραμέτρων εκφρασμένο σε db συναρτήσει της συχνότητας.	36
Εικόνα 4.6: Το εύρος ζώνης συχνότητα συντονισμού (60 GHz).....	37
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα ακτινοβολίας, πραγματοποιημένο κέρδος [dB] στο E-επίπεδο και H -επίπεδο στα 60 GHz.....	38
Εικόνα 1.8 : Διάγραμμα ακτινοβολίας, πραγματοποιημένο κέρδος [dB] στο H-επίπεδο στα 60 GHz	39
Εικόνα 4.9: Διάγραμμα ακτινοβολίας, πραγματοποιημένο κέρδος [dB] στο E-επίπεδο στα 60 GHz	39
Εικόνα 4.10: Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή, πραγματοποιημένο κέρδος [dB] στο E-επίπεδο και H-επίπεδο στα 60 GHz.....	40
Εικόνα 5.1: Συνεπίπεδος κυματοδηγός.....	41
Εικόνα 5.2: Στρώματα Γείωσης-Σήματος-Γείωσης.....	41
Εικόνα 5.3: Η δομή ενός CPW	42
Εικόνα 6.1: Καλώδιο Σύνδεσης (bond wire), όπου φαίνονται και οι προαναφερθείσες διαστάσεις, και το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμά του	44
Εικόνα 7.1: Διέγερση του ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας στον απορροφητή InGaAs (δίοδος p-i-n)..	46
Εικόνα 7.2: Διάφορα είδη φωτοδιόδου.....	47
Εικόνα 7.3: TWPD με υλικό απορρόφησης το InGaAs και τοποθετημένη πάνω σε υπόστρωμα κατασκευασμένο από InP	47
Εικόνα 7.4: TWPD.βλέπουμε την εισερχόμενη οπτική ισχύ και την εξερχόμενη ηλεκτρική ισχύ..	48
Εικόνα 7.5: Η ολοκλήρωση της φωτοδιόδου σε συνεπίπεδο κυματοδηγό.....	49
Εικόνα 7.6: Ισοδύναμο κύκλωμα της φωτοδιόδου σχεδιασμένο στο πρόγραμμα ADS.....	49
Εικόνα 7.7: Σύγκριση ηλεκτρικών φορτίων πυκνωτή και p-n επαφής.....	50
Εικόνα 7.8: Διάγραμμα του S_{11} εκφρασμένο σε db συναρτήσει της συχνότητας.	53
Εικόνα 8.1: Συστήματα μονού και πολλαπλών φερόντων.....	55

Εικόνα 8.2: Σύγκριση εύρους ζώνης FDM και OFDM.	57
Εικόνα 8.3: Όταν υπάρχει μέγιστο ενός φέροντος, αντιστοιχίζεται σε μηδενικά άλλων φερόντων, έτσι, κάθε φέρον μπορεί να αποδιαμορφωθεί ανεξάρτητα από τα άλλα... ..	58
Εικόνα 8.4: Παρεμβολές που εισάγονται από το κανάλι ακυρώνονται εισάγοντας μια κυκλική προέκταση με $T_g > \tau_{\max}$	59
Εικόνα 9.1.1: Απλή εξομοίωση της OFDM, πομπός και δέκτης.	64
Εικόνα 9.1.2: Διάγραμμα αστερισμού πομπού.	67
Εικόνα 9.1.3: Διάγραμμα αστερισμού δέκτη.	67
Εικόνα 9.1.2: Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης στον πομπό και στον δέκτη	68
Εικόνα 9.2.1: Το S2P αρχείο εισάγεται στο design μας, με την βοήθεια του block S2P.	73
Εικόνα 9.2.2: Εξομοίωση της OFDM, πομπός και δέκτης μαζί με το block S2P.	74
Εικόνα 9.2.3: Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης στον πομπό και στον δέκτη.	75
Εικόνα 9.2.4: Διάγραμμα αστερισμού πομπού.	76
Εικόνα 9.2.5: Διάγραμμα αστερισμού δέκτη.	76
Εικόνα 9.2.6: Διαγράμματα πομπού και δέκτη ώστε να φαίνεται η διαφορά στο πλάτος.	77

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Ο πίνακας παρέχει ένα παράδειγμα link budget για ένα σύστημα στα 60 GHz με εμβέλεια επικοινωνίας περίπου 1.0 km (αγνοώντας την εξασθένηση βροχής).....	14
Πίνακας 2: Διαστάσεις μικροταινιών όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.	33
Πίνακας 3: Ιδιότητες των υλικών InP και InGaAs... ..	48
Πίνακας 4: Παράμετροι της OFDM για τα 60 GHz για Narrowband και Wideband μετάδοση. ...	63

Ευρετήριο Όρων

AC	Alternating Current
ADS	Advanced Design System
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary phase-shift keying
BS	Base Station
CB	Conduction Band
CPW	Coplanar waveguides
CS	Control Station
DB	DeciBell
DFT	Discrete Fourier Transform
DSB-SC	Double-Side Band signal with a Suppressed Carrier
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
EMI	Electromagnetic Interference
FEC	Forward Error Correction
FDM	Frequency Division Multiplexing
FFT	Fast Fourier Transform
GI	Guard Interval
HDTV	High-Definition TV
HFSS	High Frequency Structure Simulator
ICI	InterCarrier Interference
IFI	Inter Frame Interference
ISI	Inter symbol Interference
LD	Laser Diode
LNA	Low-Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
MIMO	Multiple Input-Multiple Output
NRZ-OOK	Non Return to Zero On-Off Keying
OA	Optical Attenuator
OBPF	Optical Band Pass Filter
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
TWPD	Travelling Wave PhotoDetectors
PD	Photo Detector
QAM	Quadrature amplitude modulation
QPSK	Quadrature phase-shift keying
RAUs	Remote Antenna Units
RF	Radio Frequency
RoF	Radio over Fiber
VB	Valence Band
VLSI	Very Large Scale Integration
WNIC	Wireless Network Interface Controller
WLAN	Wireless Local Area Network

Key Words

60 GHz, Radio over Fiber, TWPD, ADS, HFSS, OFDM, InGaAS, InP

1. Εισαγωγή-Περίληψη

Οι ασύρματες επικοινωνίες αποτελούν πλέον στις μέρες μας αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής μας ζωής καθώς προσφέρουν ευκολία στην χρήση, ευελιξία και μεγάλη κινητικότητα. Ειδικά το φάσμα των 60 GHz, που μελετάται εντόνως τα τελευταία χρόνια, υπόσχεται να δημιουργήσει την επόμενη γενιά τοπικών ασύρματων δικτύων, παρέχοντας ένα ευρύτατο αξιοποιήσιμο φάσμα και πολύ μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων, χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένα κυκλώματα πολύ μικρών διαστάσεων, λόγω του πολύ μικρού μήκος κύματος (mm-waves), άρα και εύκολα τοποθετήσιμα σε κινητές συσκευές. Παράλληλα, οι οπτικές ίνες προσφέρουν ένα τεράστιο εύρος ζώνης και ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων με ελάχιστες απώλειες, αντισταθμίζοντας επιπλέον την περιορισμένη εμβέλεια των χιλιοστομετρικών δικτύων, με το συνδυασμό που είναι γνωστός ως Radio over Fiber.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία προτείνεται ένα οικονομικά αποδοτικό σύστημα για εσωτερικές κυρίως εφαρμογές, το οποίο χρησιμοποιεί την υβριδική τεχνολογία συνδυασμού ασύρματων και οπτικών δικτύων Radio over Fiber. Η τεχνολογία αυτή προβλέπεται να λειτουργεί στα 60GHz. Αποτελείται από μία InGaAS TWPD φωτοδίοδο πάνω σε υπόστρωμα κατασκευασμένο από InP, της οποίας το ηλεκτρικό ισοδύναμο για συχνότητα λειτουργίας 60GHz αναλύουμε στο Advanced Design System (ADS).

Η φωτοδίοδος ακολουθείται από μία ολοκληρωμένη μικροταινιακή κεραία (patch antenna), την οποία σχεδιάζουμε και αναλύουμε, με διαγράμματα ακτινοβολίας, στο πρόγραμμα High Frequency Structure Simulator (HFSS).

Χρησιμοποιείται OFDM διαμόρφωση (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) για την μετάδοση και λήψη των δεδομένων, η οποία είναι μια διαμόρφωση διαίρεση συχνοτήτων πολλαπλών, επικαλυπτόμενων και ορθογωνίων μεταξύ τους φερόντων, προκειμένου να υπερκαλυφθούν οι απώλειες κατά τη μετάδοση του σήματος στο κανάλι, που όπως είπαμε ειδικά στην συχνότητα των 60 GHz είναι πολύ μεγάλες, καθώς το απλό φέρον κρίνεται μη ικανοποιητικό.

Τόσο η λειτουργία της OFDM μεμονομένα, όσο και ολόκληρου του συστήματος, με την φωτοδίοδο και την κεραία σαν S-παραμέτρους, υλοποιήθηκε και εξετάστηκε μέσω προσομοιώσεων χρησιμοποιώντας το ADS .

1. Abstract

Wireless communications have become nowadays an essential part of our everyday life and offer convenience, flexibility and high mobility. Especially the 60 GHz spectrum, studied intensely in recent years, promises to create the next generation of wireless local networks, providing a wide usable frequency spectrum and very high data transmission rates, by using very small sized (because of the very small wavelength (mm-waves)) integrated circuits, and therefore easily installed in mobile devices. On the other side, optical fibers offer an enormous bandwidth and very high data rates, with minimal losses, offsetting the extra limited range of millimeter-wave networks, utilizing the technology widely known as Radio over Fiber.

In this thesis we propose a cost-efficient system for mainly indoor applications, which uses hybrid technology by combining wireless and optical networks. This technology is expected to operate at 60GHz. It consists of an InGaAS TWPD photodiode on a substrate made of InP, whose electrical equivalent for operating frequency at 60GHz is analyzed, using the Advanced Design System (ADS).

It is followed by an integrated microstrip antenna (patch antenna), which is designed and analyzed, using radiation patterns, in the High Frequency Structure Simulator (HFSS) program. OFDM modulation (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is used for the transmission and the reception of data, which is a frequency division modulation of multiple, overlapping and orthogonal carriers, in order to overcome losses during the transmission of the signal at the channel, especially at the frequency of 60 GHz, in which they are higher, as the single carrier system is considered unsatisfactory.

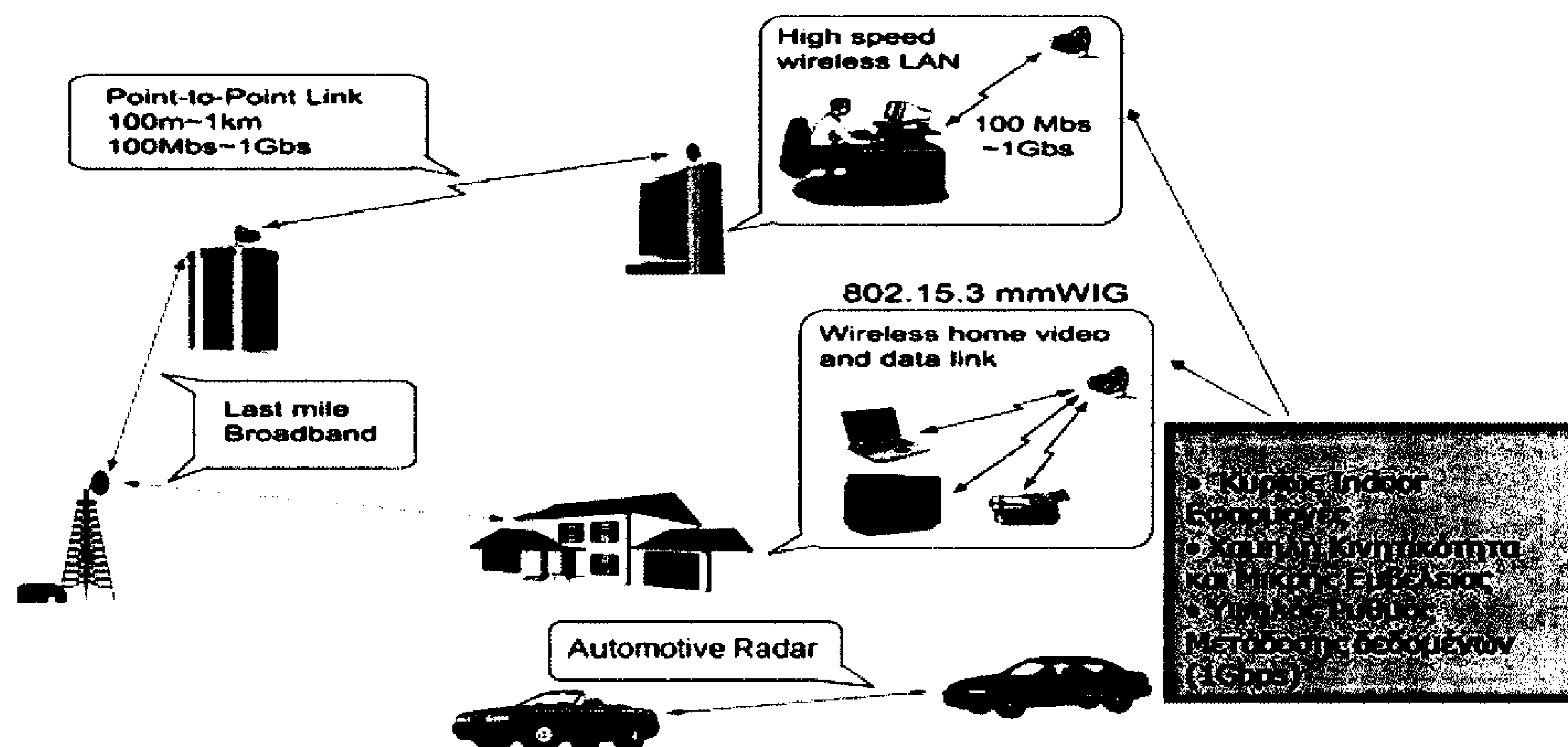
Both the operation of OFDM singularly, and the whole system, with the photodiode and the antenna implemented, as S-parameters, are tested through simulations using ADS.

2. Συστήματα Radio over Fiber με συχνότητα λειτουργίας 60GHz

2.1. Το φάσμα των 60 GHz

Τα τελευταία χρόνια οι υψηλές σε απαιτήσεις εύρους ζώνης και ρυθμό μετάδοσης δεδομένων πολυμεσικές εφαρμογές, όπως η high-definition τηλεόραση (HDTV), δημιουργούν την ανάγκη για ταχύτατα ασύρματα δίκτυα και νέες τεχνολογίες και υπηρεσίες. Παρ' όλο που τα συμβατικά και πολύ δημοφιλή ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) υποστηρίζουν θεωρητικά ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 54 Mbits/s δεν ενδείκνυνται για broadband και MIMO (Multiple input-multiple output, δηλαδή, πολλαπλών εισόδων- πολλαπλών εξόδων) μεταδόσεις. Για παράδειγμα, μία ασυμπιεστη ροή (streaming) HDTV (1080i) απαιτεί ρυθμό μετάδοσης δεδομένων περίπου 1.5 Gbits/s.

Μία λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η ανάπτυξη των ασύρματων συστημάτων σε πολύ υψηλότερες συχνότητες φέροντος από τις ήδη χρησιμοποιούμενες, στο χιλιοστομετρικό - μήκος κύματος (mm-wave), όπου είναι διαθέσιμο περισσότερο εύρος ζώνης (ρυθμός μετάδοσης μεγαλύτερος από 1 Gbits/s για εσωτερικές (indoor) εφαρμογές). Μερικές εφαρμογές των ασύρματων συστημάτων στα 60 GHz απεικονίζονται στην Εικόνα 2.1.1.



Εικόνα 2.1.1: Εφαρμογές των ασύρματων συστημάτων στα 60 GHz: α) ζεύξη σημείο προς σημείο σε LOS συνθήκες, β) υψηλής ταχύτητας ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN) (100 Mbps-1 Gbps). David A. Sobel, 2004, *Opportunities and Challenges in 60GHz Wideband Wireless System Design*, p.3.

Επομένως τα ευρυζωνικά συστήματα με συχνότητα λειτουργίας 60 GHz για μικρές αποστάσεις (εσωτερικές εφαρμογές) έχουν προκαλέσει μεγάλο ενδιαφέρον και μελετώνται παγκοσμίως. Αυτό

έχει ως συνέπεια την υψηλή διαθεσιμότητα και το χαμηλό κόστος των χρησιμοποιούμενων εξαρτημάτων. Άλλο ένα πλεονέκτημα είναι ότι σε αυτή τη ζώνη, δεν έχουμε συνωστισμό υπηρεσιών και προφέρονται έτσι ευκαιρίες για ευκολότερη αδειοδότηση και μεγαλύτερο φάσμα προς αξιοποίηση. Ακόμη, το χιλιοστομετρικό μήκος κύματος είναι φυσικά πολύ μικρό, επιτρέποντας έτσι την κατασκευή μικρών κεραιών και εξαρτημάτων, καθιστώντάς τα εύκολα τοποθετήσιμα σε μικρές κινητές συσκευές.

Παρ' όλο αυτά, το φάσμα των 60GHz εμφανίζει και κάποιες δυσκολίες στην αξιοποίηση του εξαιτίας:

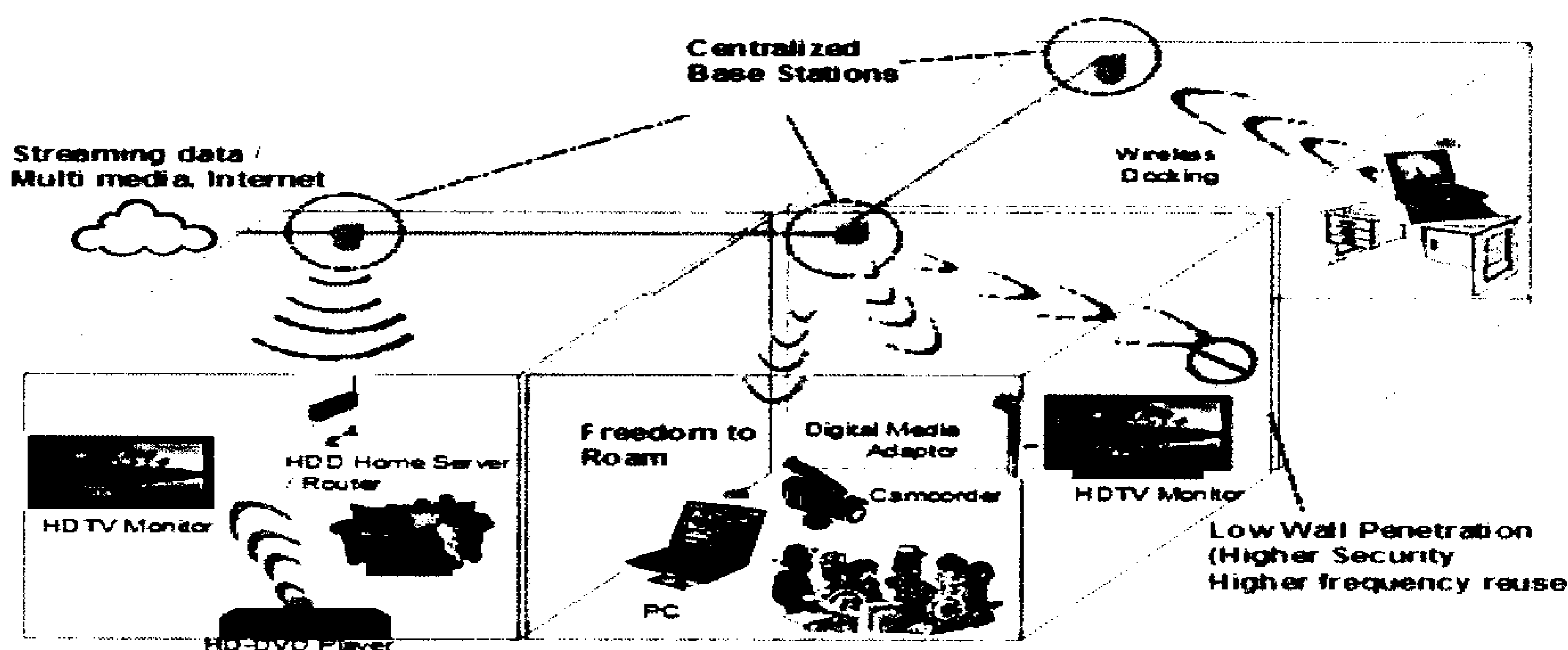
- της μειωμένης κάλυψης και των αυξημένων απωλειών διάδοσης (π.χ. απώλειες ελεύθερου χώρου, εξασθένιση λόγω τοίχων)(Εικόνα 2.1.2). Πράγματι, γίνεται φανερό από τον τύπο που μας δίνει το Free space attenuation:

$$FSL = 32.4 \text{ (db)} + 20 * \log F(\text{MHz}) + 20 * \log D(\text{km})$$

Για παράδειγμα, μια απόσταση ενός χιλιομέτρου (1 km) στα 60 GHz έχει την ίδια απώλεια ελεύθερου χώρου όσο μία απόσταση 100 km στα 600 MHz. Αυτό υποδηλώνει ότι, για πρακτικές στάθμες EIRP, μόνο μικρής εμβέλειας επικοινωνία θα είναι πρακτική.

- του φαινομένου της απορρόφησης του οξυγόνου, η οποία μειώνει την ισχύ εκπομπής κατά 10–15 dB/km , και συνεπώς την εμβέλεια του δικτύου, και το καθιστά κατάλληλο για κάλυψη μικρών εσωτερικών περιοχών.

Παρόλο που αυτοί οι παράγοντες περιορίζουν το εύρος της επικοινωνίας, αποτελούν ταυτόχρονα και μεγάλο πλεονέκτημα, καθώς επιτρέπεται ένα υψηλό επίπεδο της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων στη ζώνη των 60 GHz (Εικόνα 2.1.2).



Εικόνα 2.1.2: Επαναπροσδιορισμός των οικιακών δικτύων με τα χιλιοστομετρικά κύματα

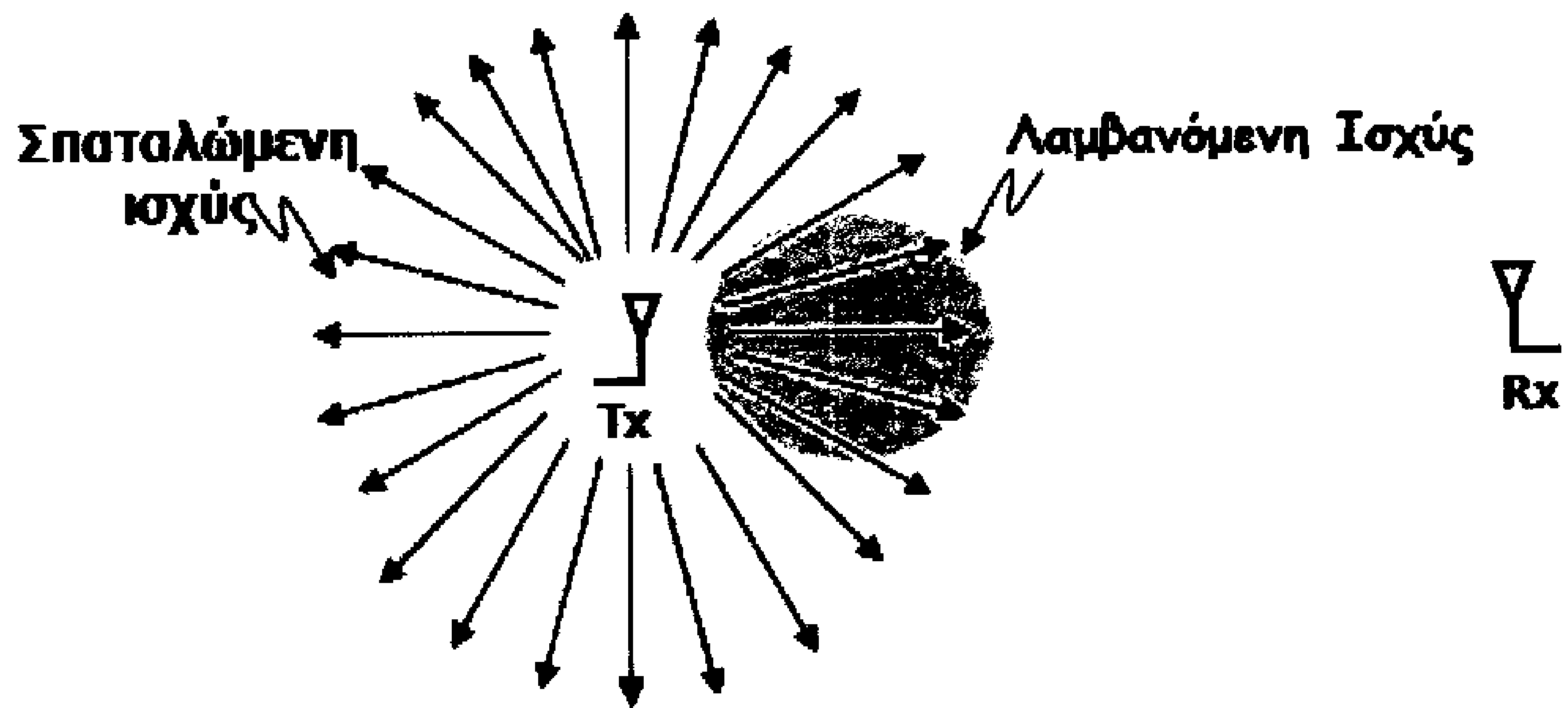
Πίνακας 1: Ο πίνακας παρέχει ένα παράδειγμα link budget για ένα σύστημα στα 60 GHz με εμβέλεια επικοινωνίας περίπου 1.0 km (αγνοώντας την εξασθένηση βροχής).

Transmit Power/ Ισχύς πομπού	8 dBm
Antenna Gain/ Κέρδος κεραίας	38 dBi
Path Length/ Μήκος διαδρομής	1 km
Free Space Attenuation/ Απώλειες Ελεύθερου Χώρου	127.96 dB
Oxygen Attenuation/km / Εξασθένηση οξυγόνου / km	16 dB/km
Received Power/ Ισχύς Δέκτη	59.96 dBm
Receiver Sensitivity / Ευαισθησία Δέκτη	78.2 dBm
S/N / Λόγος σήματος προς θόρυβο	18.24 dB
Minimum S/N / Ελάχιστος S / N	18 dB
Margin / Περιθώριο	0.24 dB
Bandwidth / Εύρος ζώνης	300 MHz
Temperature/ Θερμοκρασία	290 K
Thermal Noise / Θερμικός θόρυβος	89.20 dBm
Noise Figure / Σχήμα θορύβου	11.00 dB

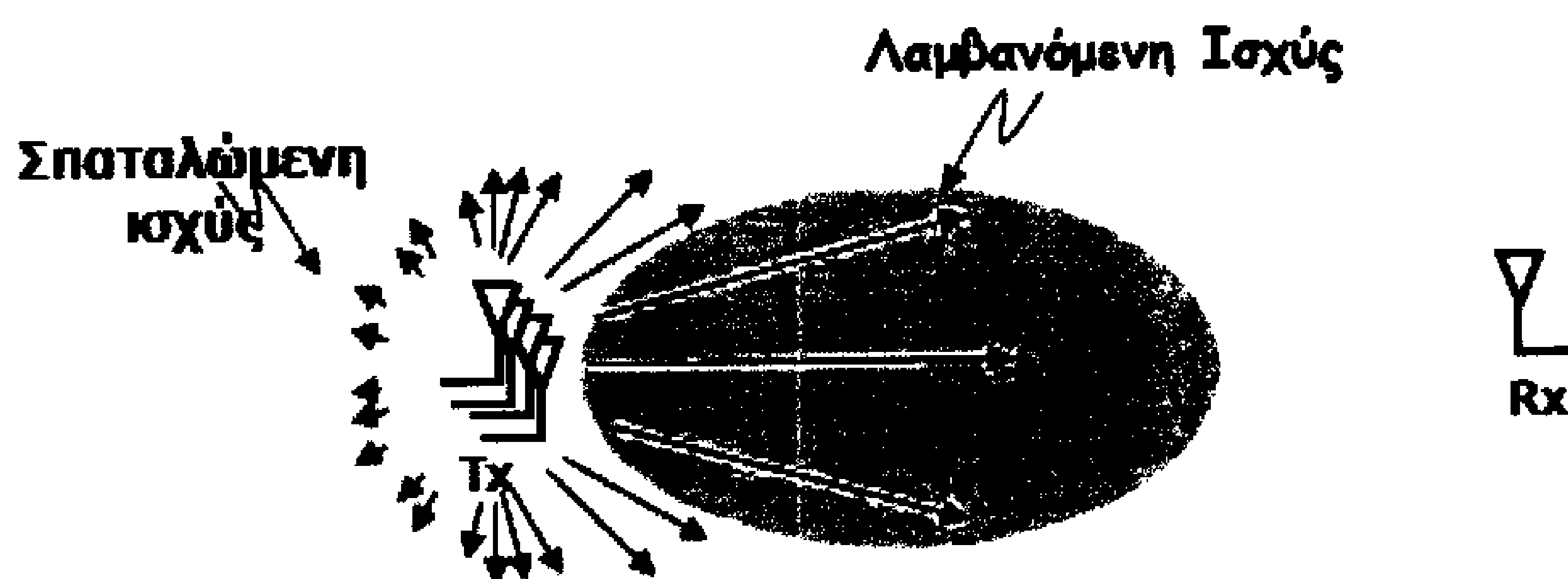
Gayan de Alwis and Murray Delahoy, 2004, "60 GHz Band Millimetre Wave Technology", *Australian Communications Authority*, Table 7.

Λόγω της προαναφερόμενης απώλειας ισχύος εκπομπής χρησιμοποιούμε κατευθυντικές κεραίες στον πομπό, ώστε να αυξήσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο την λαμβανόμενη ισχύ στον δέκτη. Αυτό γίνεται φανερό και από την Εικόνα 2.1.3.

Πολυκατευθυντική Κεραία Πομπού (Tx)

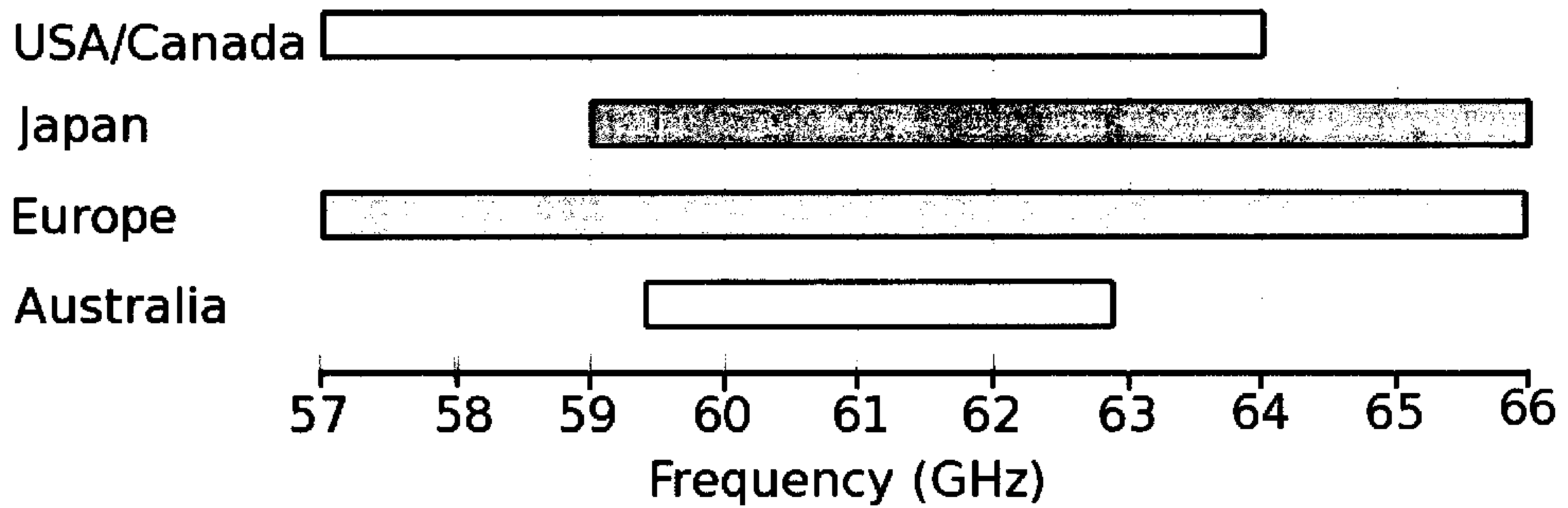


Κατευθυντική Κεραία Πομπού (Tx)



Εικόνα 2.1.3: Με τη χρήση κατευθυντικής κεραίας γίνεται αύξηση της λαμβανόμενης ισχύος.
David A. Sobel, 2004, *Opportunities and Challenges in 60GHz Wideband Wireless System Design*, p.5.

Οι διαθέσιμες συχνότητες ανά περιοχή γύρω από τα 60 GHz απεικονίζονται στην Εικόνα 2.1.4.



Εικόνα 2.1.4: Παγκόσμια διαθεσιμότητα του φάσματος γύρω από τα 60 GHz.

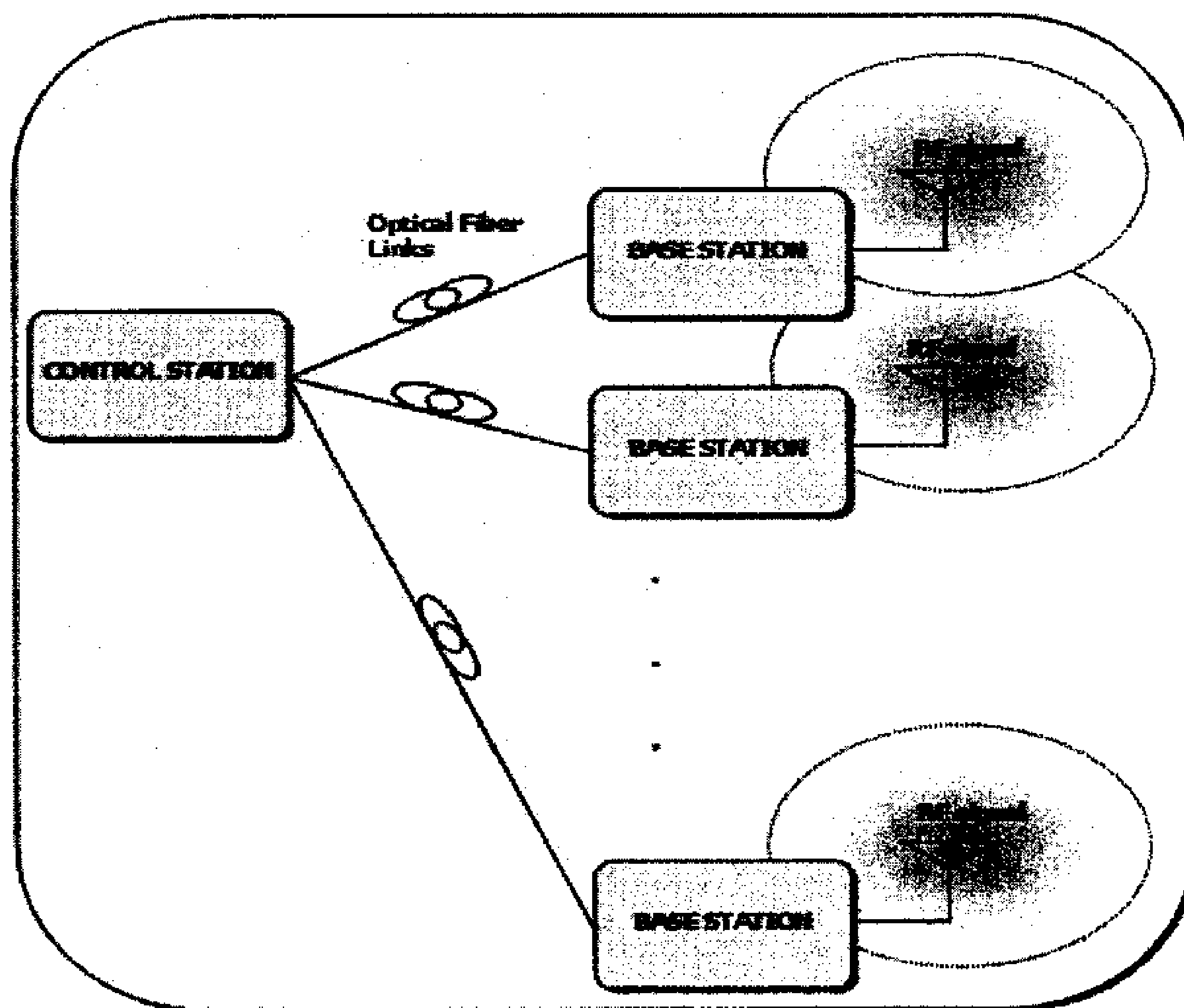
<http://www.ece.ucsb.edu/wcsl/mmwcsresearch/lib/exe/fetch.php?cache=&media=wm60ghzspectrumallocation.png>

2.2. Radio over fiber

Radio over Fiber (RoF) ονομάζεται η τεχνολογία του συνδυασμού ασύρματων και οπτικών δικτύων, η οποία αποτελείται από την διαδικασία της διαμόρφωσης του RF (για συχνότητες μεγαλύτερες από 10 GHz) ηλεκτρικού σήματος πάνω σε ένα οπτικό φέρον (σήμα) και στη συνέχεια την διάδοση του μέσω οπτικών ινών, προκειμένου να διευκολύνουμε την ασύρματη πρόσβαση.

Στα συστήματα επικοινωνιών στενής ζώνης και στα WLAN, η επεξεργασία των σημάτων, όπως το upconversion ('ανέβασμα στη συχνότητα'), η διαμόρφωση και η πολυπλεξία γίνονται στους σταθμούς βάσης (Base Station -BS) και ακολούθως το σήμα τροφοδοτείται στην κεραία για εκπομπή.

Αντίθετα στα RoF συστήματα είναι δυνατό, όλες οι παραπάνω λειτουργίες να γίνονται σε κάποιο κεντρικό σταθμό και έπειτα τα σήματα να διαμοιράζονται στα επιμέρους BS μέσω οπτικών ινών, οι οποίες επιφέρουν πολύ χαμηλές απώλειες (της τάξεως των 0.2 dB/km έως 0.5dB/km). Έτσι, τα BS απλοποιούνται σε ασύρματες μονάδες κεραιών (Remote Antenna Units - RAUs), καθιστώντας τα τελευταία απλά, ευέλικτα και οικονομικά αποδοτικά, τα οποία είναι συνδεδεμένα μέσω ενός κεντρικού σταθμού βάσης. Στο έкаστο BS-RAU γίνεται τώρα μόνο η μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό, ενίσχυση του RF ηλεκτρικού σήματος και τέλος η εκπομπή του.



Εικόνα 2.2.1: Απλοποιημένο Διάγραμμα Λογικής RoF δικτύου.

Sotiris Karabetsos, Spiros Mikroulis, Athanase Nassiopoulou, 2009, *Radio over Fiber for Broadband Communications*, British Library, New York, Figure 2.

Το RoF υπερτερεί καθώς συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο τεχνολογιών: υψηλή χωρητικότητα (οπτικά δίκτυα), καθώς είναι προφανές ότι η εκμετάλλευση της τεχνολογίας των οπτικών ινών, στο πλαίσιο των ευρυζωνικών ασύρματων δικτύων, δίνει τη δυνατότητα για εξαιρετικά υψηλή διαθεσιμότητα εύρους ζώνης και υψηλή κινητικότητα (ασύρματα δίκτυα).

Η βασική ιδέα, λοιπόν, και το πλεονέκτημα των Radio over Fiber συστημάτων είναι η συγκεντρωτική έννοια των κεντρικών σταθμών, οι οποίοι συνδέονται με τους σταθμούς βάσης μέσω οπτικών ινών και αυτό κατά συνέπεια οδηγεί στην ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης επεξεργασίας του βασικής ζώνης και RF σήματος στις RAUs.

Η παραπάνω εικόνα δείχνει την απεικόνιση μιας τυπικής ζεύξης RoF, όπου το σήμα βασικής ζώνης, στο οποίο εμπεριέχονται τα δεδομένα, παράγεται στο Control Station (CS) και γίνεται up-converted σε ένα RF σήμα που διαμορφώνει μία οπτική πηγή, είτε άμεσα, είτε εξωτερικά. Το οπτικό σήμα στη συνέχεια διανέμεται μέσω των δικτύων οπτικής ίνας (Optical Fiber Links) στα Base Station (BS), όπου μετατρέπεται και πάλι σε ηλεκτρικό σήμα από μία φωτοδίοδο και τροφοδοτείται στην κεραία για ασύρματη μετάδοση σε τελικούς χρήστες, που βρίσκονται εντός της εμβέλειας του έκαστου σταθμού βάσης.

Στην αντίστροφη περίπτωση, τα σήματα του τελικού χρήστη συλλαμβάνονται από την κεραία BS και μεταδίδονται στο CS μέσω ίνας ακολουθώντας την ίδια διαδικασία. Η όλη διαδικασία θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα, λίγο παρακάτω (παράδειγμα εικόνας 2.2.2).

Χρησιμοποιώντας την προαναφερθείσα ανάπτυξη, βλέπουμε ότι όλα τα σύνθετα καθήκοντα που αφορούν είτε τη λειτουργικότητα ή την επεξεργασία σήματος και των θεμάτων αναγνώρισης του δικτύου, μεταφέρονται στο CS, κάνοντας την όλη διαδικασία εντελώς συγκεντρωτική. Επιπλέον, το BS έχει μόνο μία απλουστευμένη λειτουργικότητα, δηλαδή ηλεκτρική σε οπτική μετατροπή (E/O), οπτική σε ηλεκτρική μετατροπή (O/E), ενίσχυση και μετάδοση ή λήψη. Αυτό είναι ιδιαίτερα επωφελές δεδομένου ότι επιτρέπει την ανάπτυξη μικρού μεγέθους, συμπαγή και αποδοτικά BS.

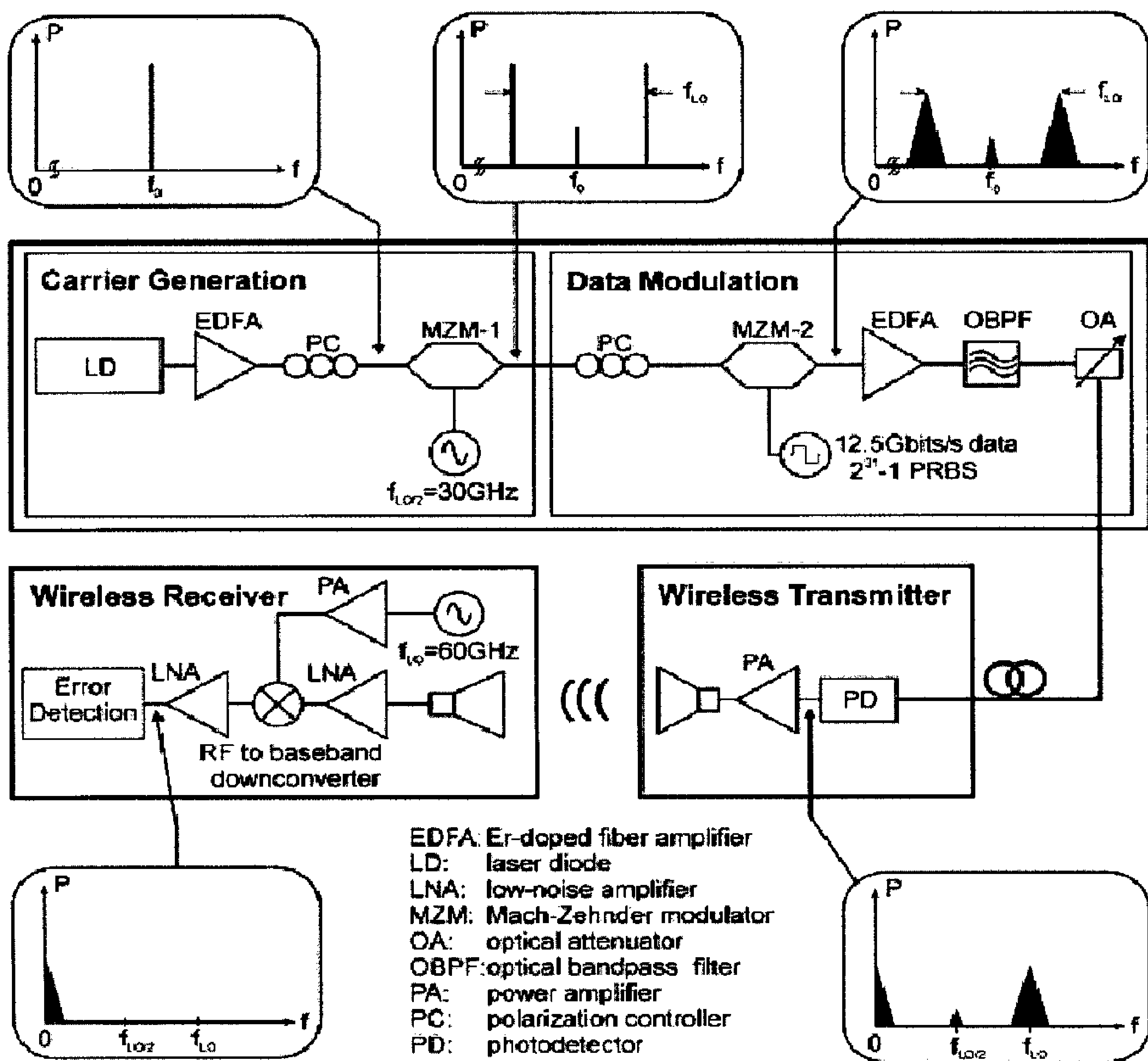
Λόγω αυτού, η RoF τεχνολογία έχει μια μεγάλη προοπτική για την υποστήριξη υψηλής ταχύτητας ασύρματης πρόσβασης, με επεκτάσιμη και ενισχυμένη κάλυψη μέσω μικρών κυψελών (micro/pico-cells), μεγέθη που επιτρέπουν την αποτελεσματική επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων, που υποστηρίζεται από ένα μεγάλο αριθμό BS.

Οφέλη:

- Καλύτερη κάλυψη και μεγάλη χωρητικότητα, λόγω του ότι η οπτική ίνα είναι ένα μέσο μεταφοράς με ελάχιστες απώλειες, μεγάλο εύρος ζώνης και ηλεκτρομαγνητικά θωρακισμένο, δηλαδή χωρίς ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (electromagnetic interference - EMI).
- Απλοποιημένη σχεδίαση και χαμηλότερου κόστους και ισχύος Base Station
- Κεντρική αναβάθμιση, προσαρμογή και δυναμική διαμόρφωση των ασύρματων πόρων
- Αυξημένη αξιοπιστία
- Μείωση του κόστους συντήρησης.
- Υποστήριξη για τις μελλοντικές ευρυζωνικές εφαρμογές, υπηρεσίες πολυμέσων και δικτύων επόμενης γενιάς

- Υποστήριξη πολλαπλών και διαφορετικών υπηρεσιών που χρησιμοποιούν την ίδια υποδομή, πράγμα το οποίο συμβάλλει σημαντικά στην αποτελεσματική εκμετάλλευση της ζώνης mm-wave και στην επίτευξη υψηλότερων χωρητικότητας από ό, τι στα συμβατικά ασύρματα δίκτυα.

Όπως σε όλα τα πράγματα σε αυτό τον κόσμο, υπάρχουν εκτός από πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα, τα οποία έγκεινται στους περιορισμούς που εισάγονται, λόγω του οπτικού διαμορφωτή, του οποίου η μη γραμμική συμπεριφορά, οδηγεί σε αρμονικές και ενδοδιαμόρφωσης παραμορφώσεις, των απωλειών και του θορύβου που οφείλονται σε E/O και O/E μετατροπές, κ.α..



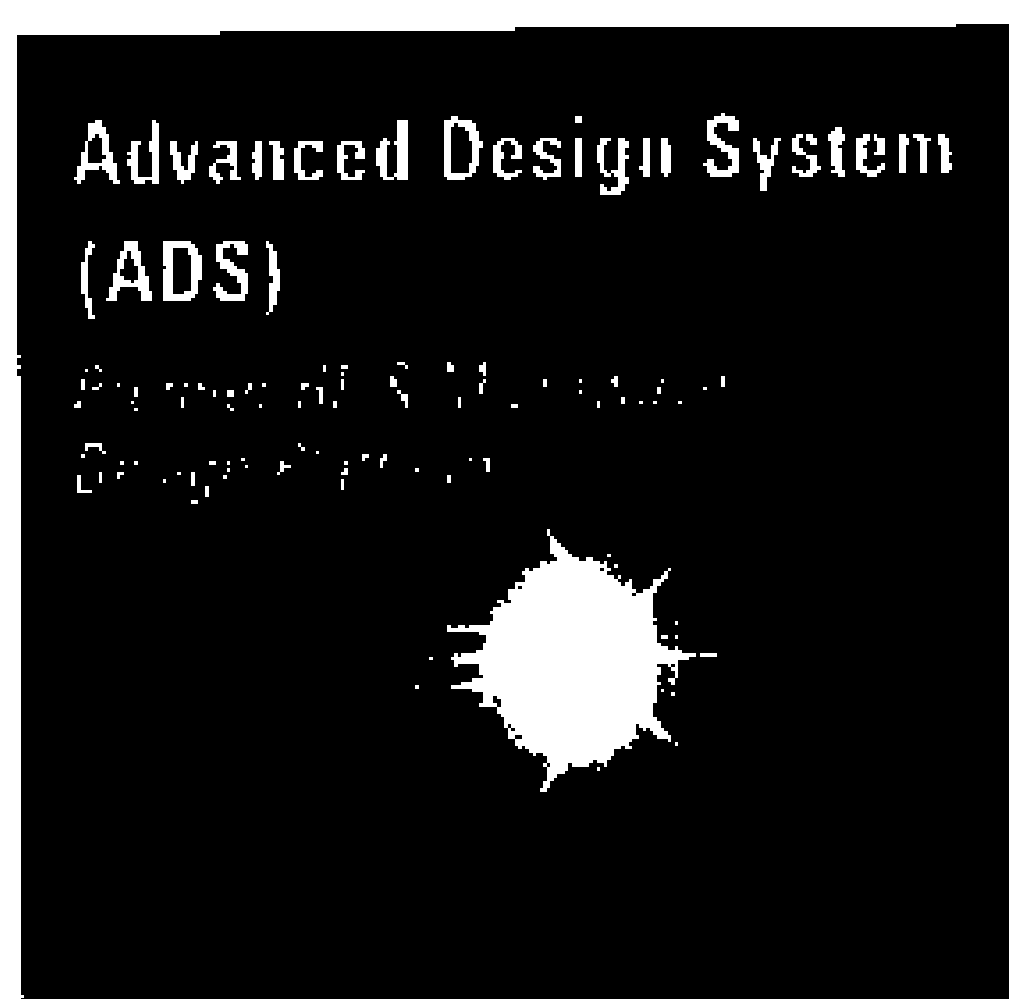
Εικόνα 2.2.2: Ενδεικτικό σύστημα RoF ζεύξης.

Η Εικόνα 2.2.2 παρουσιάζει ένα ενδεικτικό σύστημα RoF ζεύξης, το οποίο αποτελείται από τα εξής τμήματα:

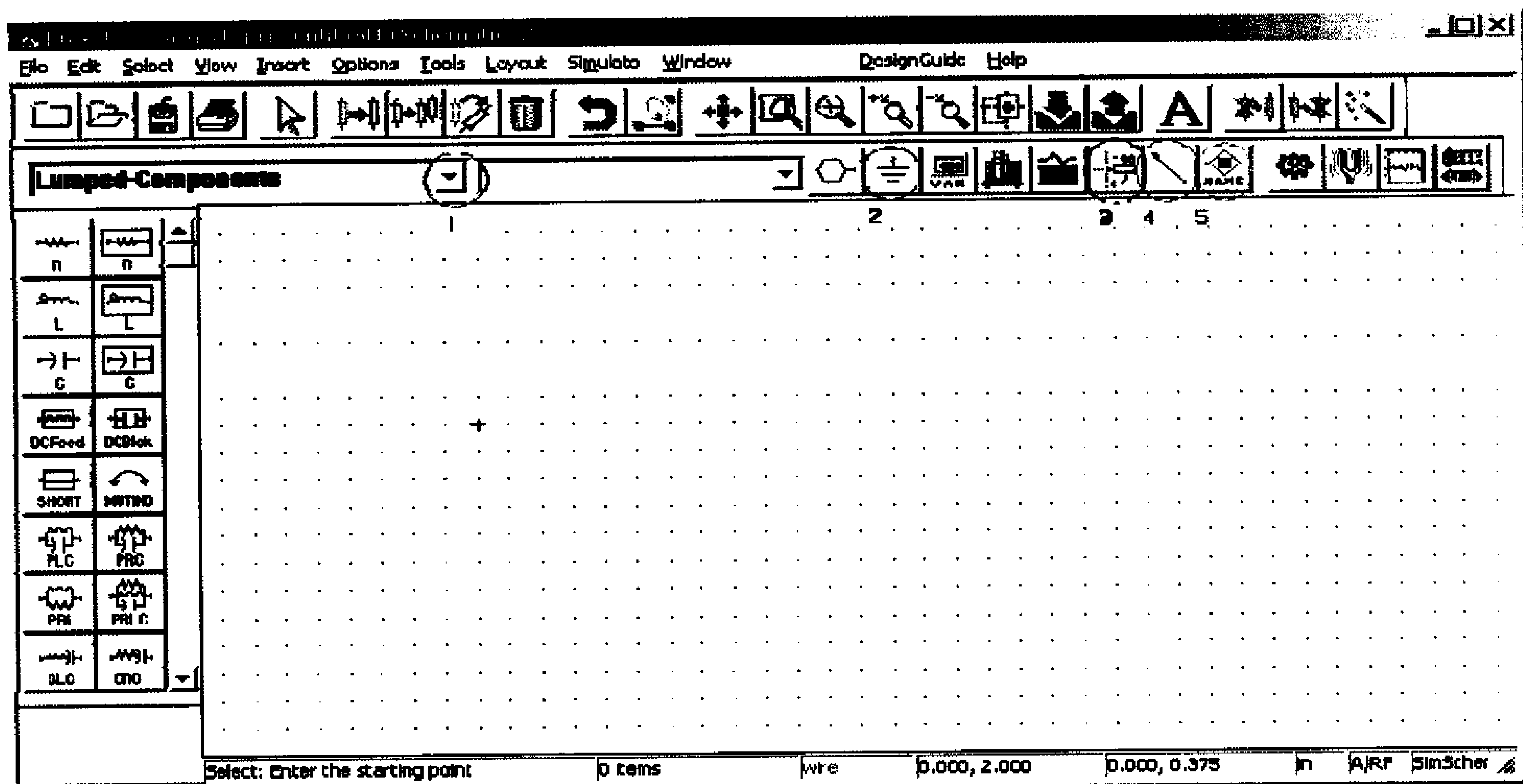
- Παραγωγή φέροντος από μια οπτική χιλιοστομετρικού μήκους κύματος γεννήτρια (LD: δίοδος laser) και ένα σύστημα διαμόρφωσης. Η δίοδος Mach-Zehnder, που λειτουργεί ως διαμορφωτής, είναι ρυθμισμένη στο μικρότερο σημείο μετάδοσης για παραγωγή οπτικού σήματος διπλής ζώνης με κατεσταλμένο φέρον (DSB-SC). Επομένως η συχνότητα του ταλαντωτή (LO-Local Oscillator) είναι το μισό από την απαιτούμενη RF συχνότητα μετάδοσης, $f_{LO/2}=30$ GHz.
- Διαμόρφωση δεδομένων από μια δίοδο Mach-Zehnder, που λειτουργεί ως διαμορφωτής NRZ-OOK (Non Return To Zero OOK), με π.χ. μήκος δεδομένων $2^{31} - 1$ και ρυθμός δεδομένων μέχρι 12.5 Gbits/s. Ο προσμεμιγμένος με έρβιο ενισχυτής (Erbium-Doped Fiber Amplifier - EDFA) και ο οπτικός εξασθεניתής (Optical Attenuator - OA) χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν την οπτική ισχύ. Το οπτικό ζωνοδιαβατό φίλτρο (Optical Band Pass Filter - OBPF) χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει τον ενισχυμένο θόρυβο ακτινοβολίας που παράγει ο ενισχυτής EDFA.
- Ασύρματος πομπός, ο οποίος βρίσκεται μετά την μεταφορά του σήματος με την οπτική ίνα, το οπτικό σήμα ανιχνεύεται από μια φωτοδίοδο (PD) ακολουθούμενη από έναν ενισχυτή με ενίσχυση +11 dBm και μεταδίδεται με μία χοανοκεραία με 20 dBi κέρδος.
- Ασύρματος δέκτης, ο οποίος ανιχνεύει το 60 GHz ασύρματο οπτικό σήμα με μία πανομοιότυπη χοανοκεραία με 20 dBi κέρδος ακολουθούμενη από έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου (Low Noise Amplifier - LNA). Έπειτα το σήμα υποβιβάζεται σε βασικής ζώνης χρησιμοποιώντας ένα χαμηλών απωλειών μείκτη και έναν ενισχυτή που πραγματοποιεί μετρήσεις ανίχνευσης λαθών (BER- Bit Error Rate).

3. Εισαγωγή και περιγραφή των χρησιμοποιηθέντων προγραμμάτων

3.1 Advanced Design System (ADS)



Το Advanced Design System (ADS) της εταιρίας Agilent Technologies είναι ένα πρόγραμμα για σχεδιασμό ηλεκτρονικών συστημάτων και ιδιαίτερα των RF και μικροκυματικών, όπως για παράδειγμα ασύρματα δίκτυα, μικροταινιακά στοιχεία και γραμμές μεταφοράς. Το ADS υποστηρίζει κάθε στάδιο της διαδικασίας του σχεδιασμού: όπως τη σχηματική διάταξη, τη προσομοίωση στο πεδίο της συχνότητας και του χρόνου και την προσομοίωση στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Επιτρέπει έτσι στον χρήστη να χαρακτηρίσει πλήρως και να βελτιστοποιήσει ένα RF σχέδιο (design).



Εικόνα 3.1.1: Περιβάλλον εργασίας του Advanced Design System (ADS).

Chris Sanabria, Sept 2002, *A Crash Course on Using Agilent Advanced Design System (ADS)*, fig.2.

Το ADS χρησιμοποιεί projects για την οργάνωση και την αποθήκευση των δεδομένων που παράγονται κατά τη δημιουργία, προσομοίωση και ανάλυση σχεδίων (design). Ένα project

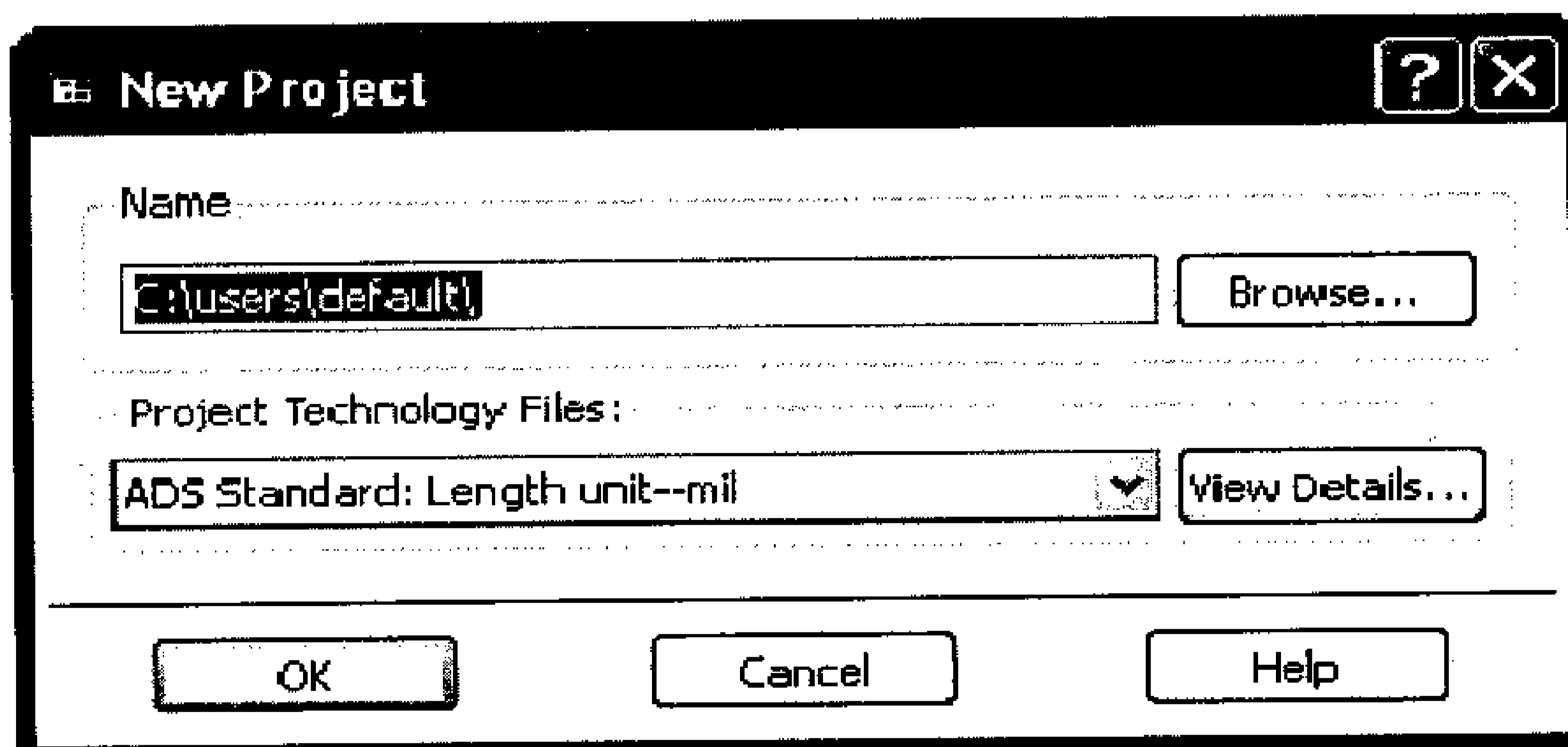
περιλαμβάνει το κύκλωμα, τη διάταξη, τη προσομοίωση, την ανάλυση, τις πληροφορίες εξόδου για τα πραγματοποιηθέντα design, μαζί με τυχόν συνδέσεις με άλλα design και projects.

Δημιουργία ενός Project

Χρησιμοποιώντας το κεντρικό παράθυρο μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα project, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την οργάνωση των designs.

Για να δημιουργηθεί ένα project ...

1. Επιλέγουμε File > New Project
2. Πληκτρολογούμε το Όνομα του Project και τον φάκελο αποθήκευσης του στον υπολογιστή.

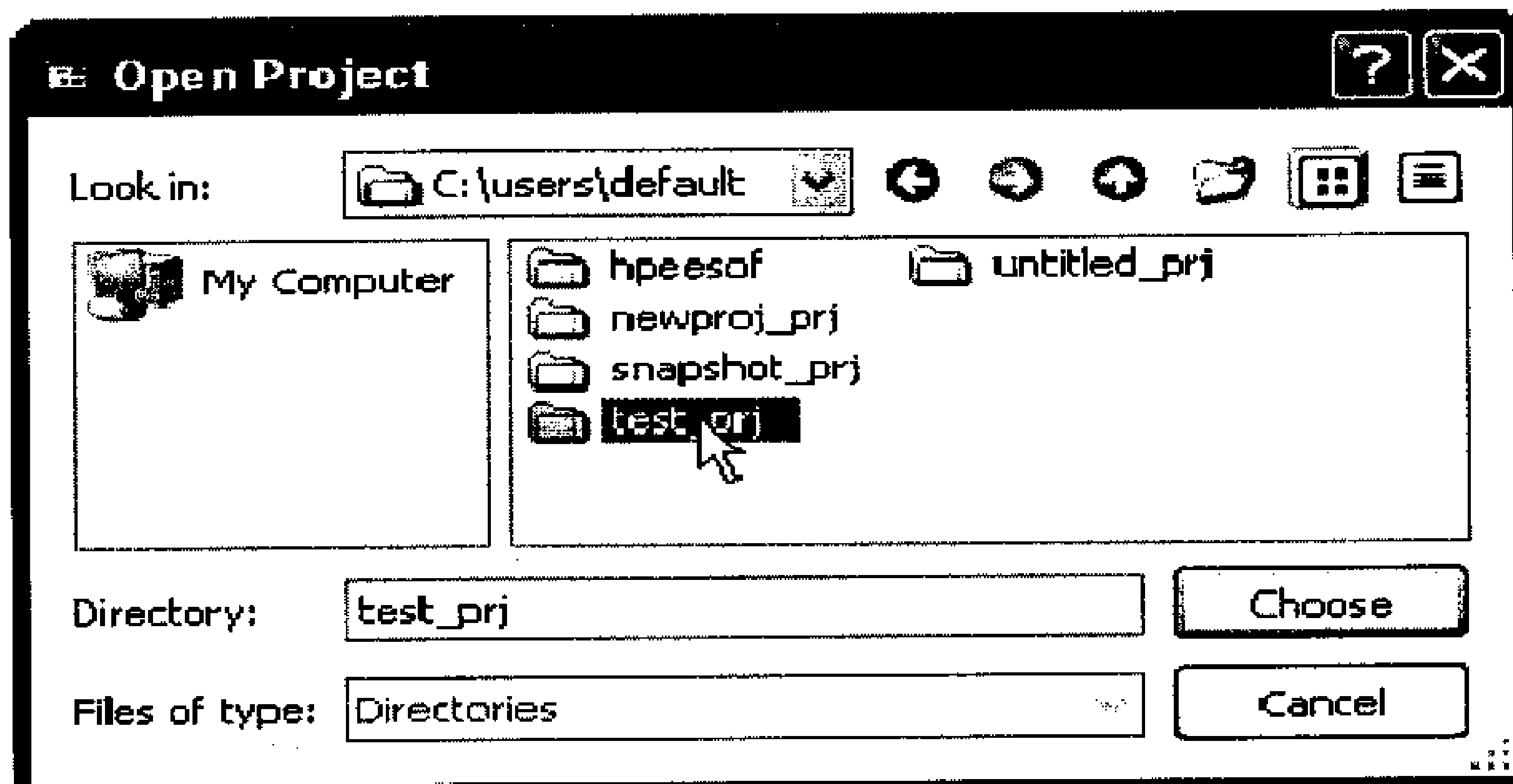


Εικόνα 3.1.2: Δημιουργία project

Άνοιγμα των project

Για να ανοίξουμε ένα project επιλέγουμε ...

- Από το μενού File > Open Project
- Άνοιγμα παραθύρου διαλόγου
- Αναζήτηση στο επιλεγμένο project και επιλογή του αρχείου prj
- Κλικ του πλήκτρο Άνοιγμα



Εικόνα 3.1.3: Άνοιγμα project

Χρησιμοποιώντας τα Design

Ένα σχέδιο μπορεί να αποτελείται από μία ή περισσότερες σχηματικές διατάξεις, οι οποίες εμφανίζονται ως ενσωματωμένα υποδίκτυα μέσα σε ένα ενιαίο design. Όλα τα design σε ένα project μπορεί να εμφανιστούν και να ανοιχτούν απευθείας από το κύριο παράθυρο ή μέσα από ένα παράθυρο σχεδίασης (Design window).

Σε ένα Design window μπορούμε ...

- Να δημιουργήσουμε και να τροποποιήσουμε κυκλώματα και σχεδιαγράμματα
- Να προσθέσουμε μεταβλητές και εξισώσεις
- Να τοποθετήσουμε και να ρυθμίσουμε στοιχεία, σχήματα και ελεγκτές προσομοίωσης
- Να δημιουργήσουμε δικές μας σημειώσεις κειμένου

Ο ελεγκτής S-παραμέτρων

Χρησιμοποιείται για να καθορίσει την απόκριση του σήματος-κύματος ενός n-θύρου ηλεκτρικού στοιχείου σε μία δεδομένη συχνότητα (συνήθως μελετάμε τη συχνότητα συντονισμού). Είναι ένα είδος προσομοίωσης μικρού σήματος AC, το οποίο χρησιμοποιείται συχνά για να χαρακτηρίσει μια παθητική συνιστώσα RF, όπως για παράδειγμα η φωτοδίοδος, και να καθορίσει τα χαρακτηριστικά μικρού σήματος μιας συσκευής σε συγκεκριμένη πόλωση και θερμοκρασία.



```
S_Param  
SP1  
Start=1.0 GHz  
Stop=10.0 GHz  
Step=1.0 GHz
```

Εικόνα 3.1.4 Ο ελεγκτής S-παραμέτρων

Χρησιμοποιούμε το εργαλείο αυτό για να...

- Εξάγουμε τις παραμέτρους σκέδασης (S-παράμετροι) του στοιχείου ή του κυκλώματος.
- Μετατρέψουμε τις S-παραμέτρους σε Y-ή Z-παραμέτρους.
- Σχεδιάσουμε τις μεταβολές στην συχνότητα σάρωσης S-παραμέτρων σε σχέση με κάποια άλλη μεταβαλλόμενη μεταβλητή.
- Προσομοιώσουμε τη καθυστέρηση ομάδας (group delay).
- Προσομοιώσουμε τον γραμμικό θόρυβο.
- Προσομοιώσουμε τις επιπτώσεις της μετατροπής συχνότητας στο μικρό σήμα.
- Υπολογίσουμε τις S-παραμέτρους σε ένα κύκλωμα που χρησιμοποιεί μείκτη.

Ανάλυση Αποτελεσμάτων (με το Data Display)

Το ADS χρησιμοποιεί σύνολα δεδομένων (datasets) για την αποθήκευση των πληροφοριών προσομοίωσης που παράγονται κατά την ανάλυση των σχεδίων. Μπορούμε να εμφανίσουμε τις πληροφορίες για την ανάλυση με τη χρήση του παραθύρου Data Display. Ένα παράθυρο Data Display μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εμφάνιση των δεδομένων που εισάγονται από άλλες πηγές (προγράμματα, όπως π.χ. το Matlab).

Σε ένα παράθυρο Data Display μπορούμε να:

- Εμφανίσουμε δεδομένα σε μια ποικιλία σχεδιαγραμμάτων και τύπων.
- Χρησιμοποιήσουμε δείκτες για να διαβάσουμε συγκεκριμένα σημεία δεδομένων των σχεδιαγραμμάτων.
- Χρησιμοποιήσουμε εξισώσεις για να εκτελέσουμε πράξεις σε δεδομένα.
- Να σχολιάσουμε τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας κείμενο και σχέδια.
- Μόλις ολοκληρωθεί η προσομοίωση, εμφανίζονται τα δεδομένα αυτόματα, εφόσον κάνουμε πρώτα ένα από τα ακόλουθα:
 - Ορίσουμε ένα σύνολο δεδομένων και τύπο απεικόνισης πριν την προσομοίωση

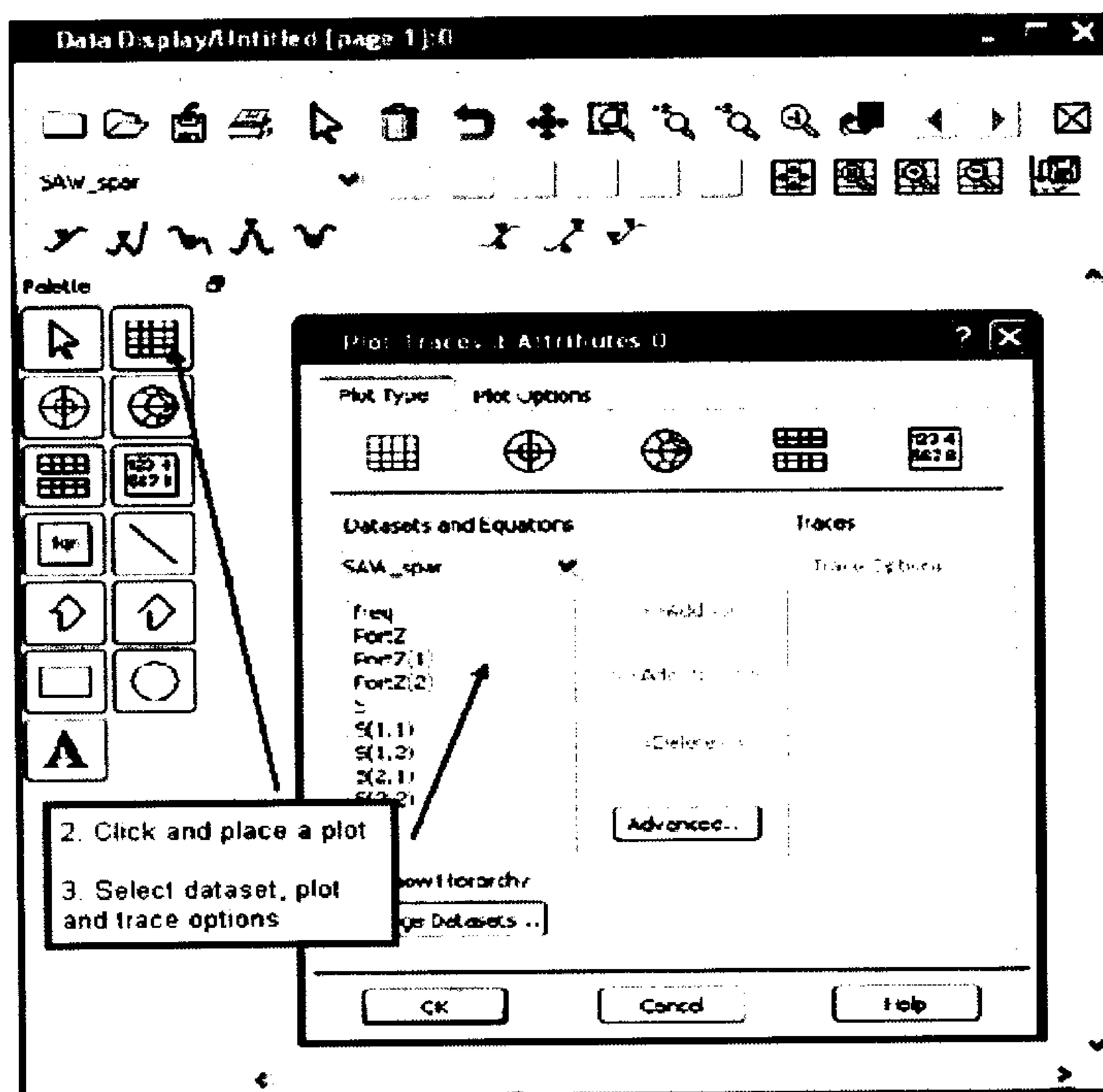
- Χρησιμοποιήσουμε ένα σχηματικό εργαλείο για μια αναλογική/RF προσομοίωση (π.χ. τον ελεγκτή S-παραμέτρων ή τον ελεγκτή AC)
- Ορίσουμε την παράμετρο plot (σχεδίαση γραφικής παράστασης) σε ένα sink (συσκευή απεικόνισης εξόδου - αποτελεσμάτων).

Η βασική διαδικασία για τη δημιουργία μιας οθόνης δεδομένων είναι η εξής, επιλέγοντας:

1. Τύπο διαγράμματος
2. Σύνολο δεδομένων (dataset), που περιέχει τα δεδομένα που θέλουμε να εμφανίσουμε
3. Τις εμφανιζόμενες μεταβλητές δεδομένων
4. Τύπο ίχνους (trace type) (δηλαδή, πως θα σχεδιαστεί το διάγραμμα)

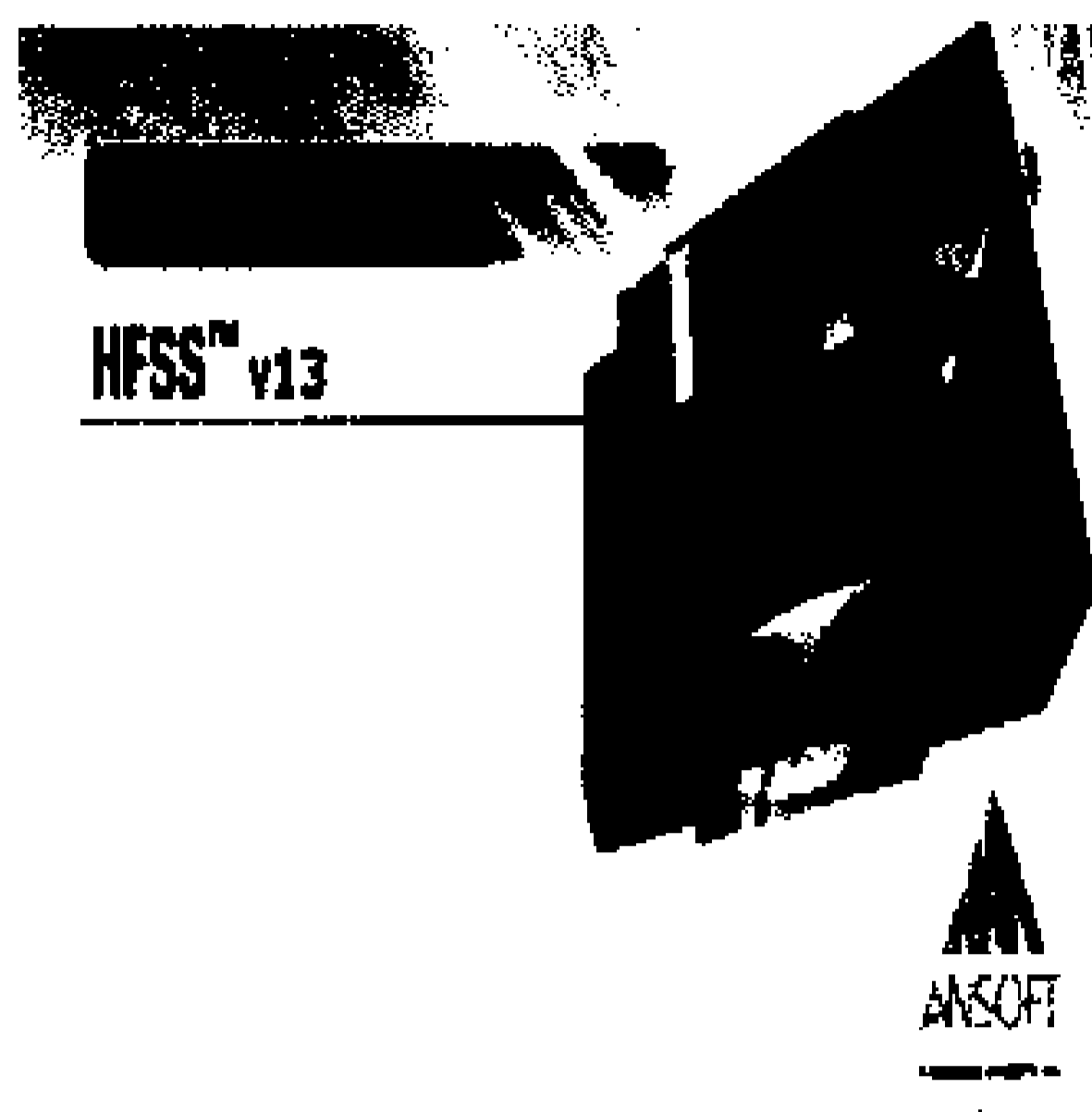
Προκειμένου να ενισχυθεί η απεικόνιση μπορούμε επίσης να προσθέσουμε:

- Δείκτες για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων σημείων δεδομένων.
- Σχόλια με κείμενο και εικόνες.
- Legends για να βοηθήσουν στον εντοπισμό συγκεκριμένων ιχνών.

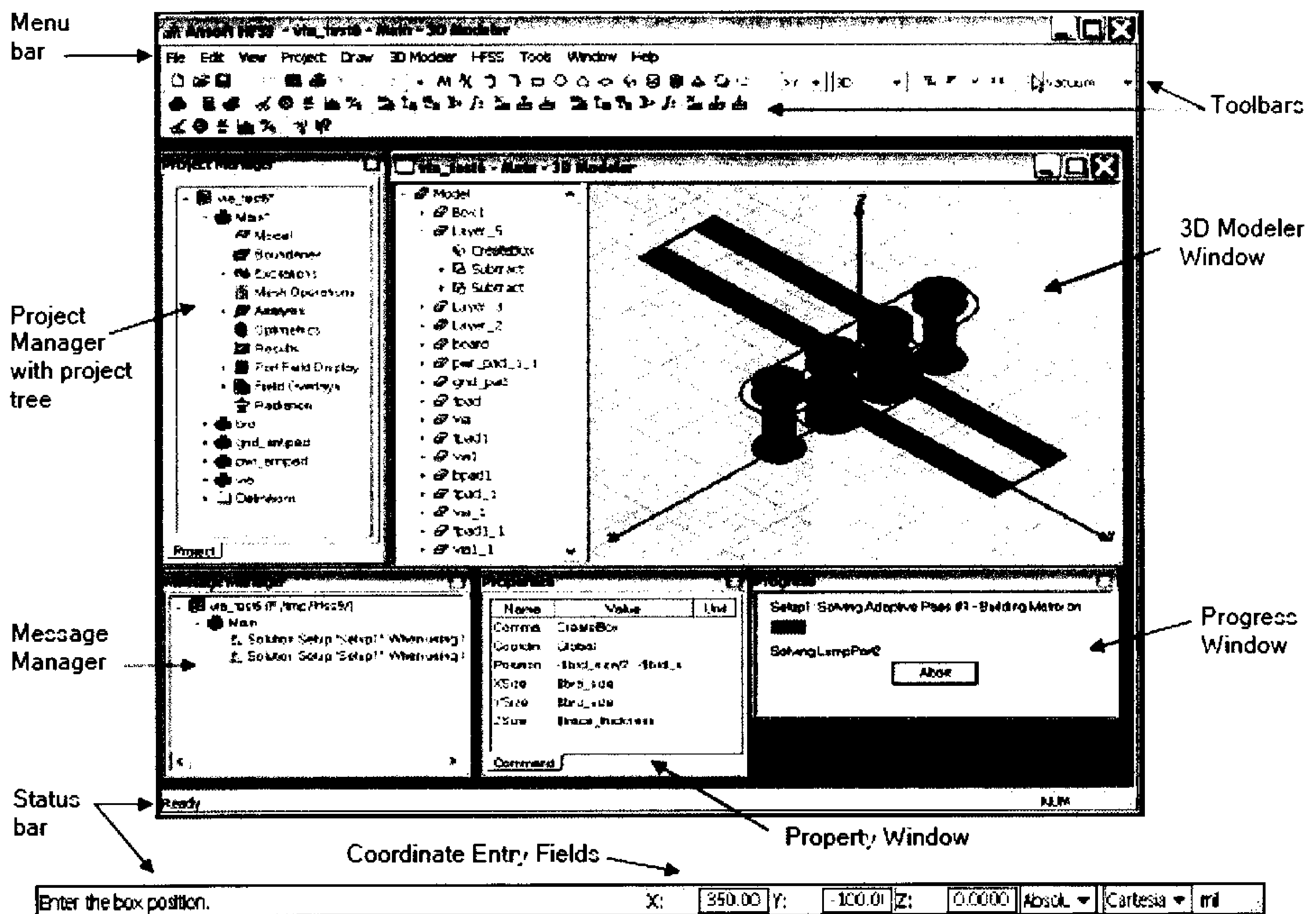


Εικόνα 3.1.5: Διαδικασία δημιουργίας απεικόνισης αποτελεσμάτων στο περιβάλλον του Data Display.

3.2 High Frequency Structure Simulator (HFSS)



Το High Frequency Structure Simulator (HFSS), της εταιρίας Ansoft είναι ένα πρόγραμμα υψηλής απόδοσης για σχεδιασμό ηλεκτρονικών συστημάτων που προσομοιώνει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (EM), για 3D μοντελοποίηση συσκευών και στοιχείων. Το HFSS υποστηρίζει κάθε στάδιο της διαδικασίας του σχεδιασμού: τη προσομοίωση, την απεικόνιση, τη στερεά μοντελοποίηση και την αυτοματοποίηση σε ένα εύκολο στην εκμάθηση περιβάλλον όπου οι λύσεις στα προβλήματα 3D EM λαμβάνονται γρήγορα και με ακρίβεια.



Εικόνα 3.2.1: Το περιβάλλον εργασίας του HFSS. Ansoft Corporation, June 2005, *High Frequency Structure Simulator*, USA, σελ.9.

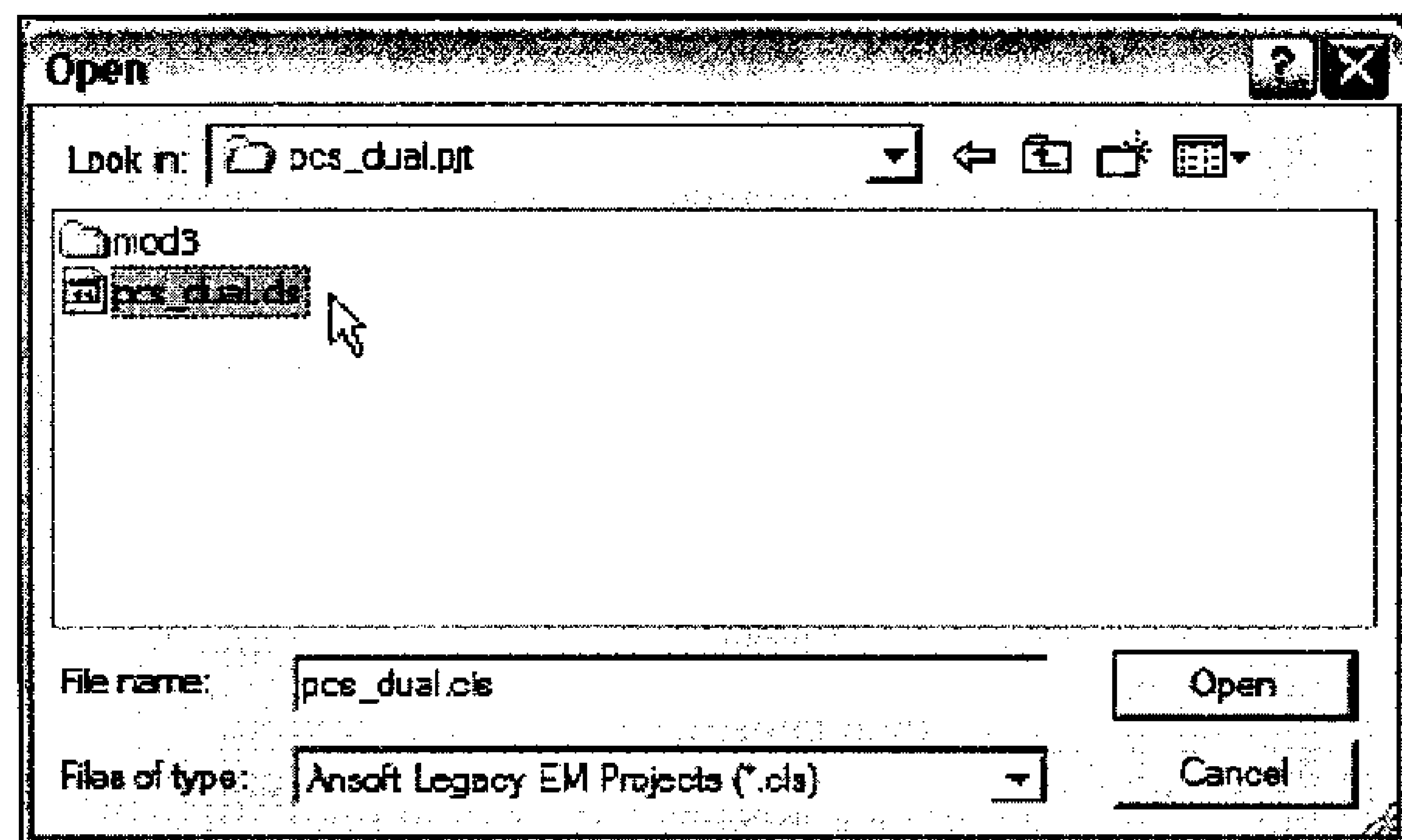
Χρησιμοποιεί τα projects για την οργάνωση και αποθήκευση των δεδομένων που παράγονται κατά τη δημιουργία, προσομοίωση και ανάλυση σχεδίων. Ένα project περιλαμβάνει το κύκλωμα, τη διάταξη, τη προσομοίωση, την ανάλυση, τις πληροφορίες εξόδου για τα πραγματοποιημένα design, μαζί με τυχόν συνδέσεις μπορεί να προστεθεί σε άλλα design και projects.

Το HFSS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό παραμέτρων όπως οι S-Parameters, συχνότητα συντονισμού και πεδία.

Άνοιγμα των project

Για να ανοίξουμε ένα project επιλέγουμε ...

- Από το μενού File > Open
- Άνοιγμα διαλόγου
- Αρχεία τύπου: Legacy Ansoft EM Projects (.cls).
- Αναζήτηση στο επιλεγμένο project και επιλογή του αρχείου .cls
- Κλικ στο πλήκτρο Άνοιγμα

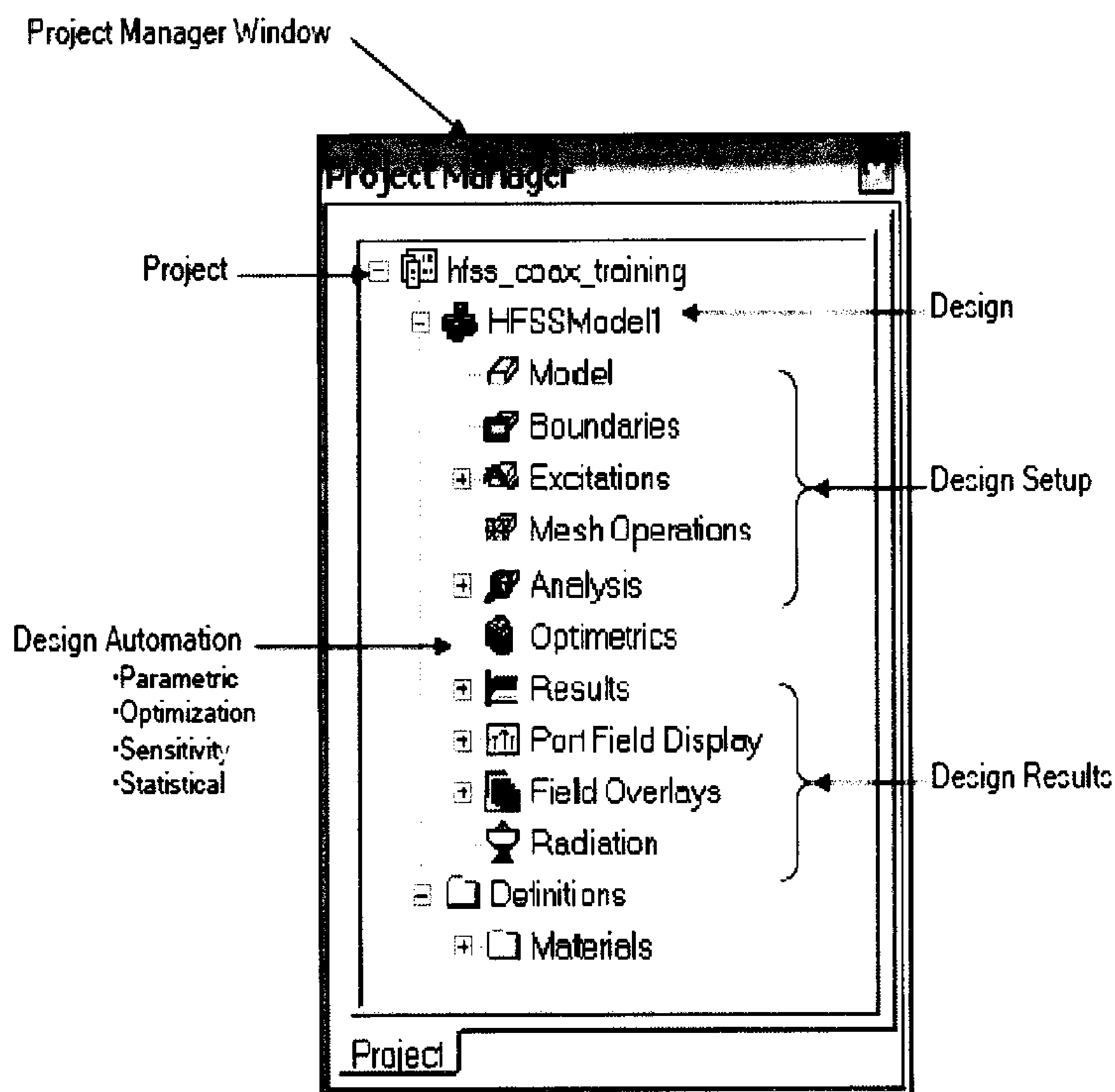


Εικόνα 3.2.2.: Άνοιγμα των project.

Ansoft Corporation, June 2005, *High Frequency Structure Simulator*, USA, σελ.5.

Το περιβάλλον εργασίας του HFSS έχει διάφορα πάνελ (Εικόνα 3.2.3):

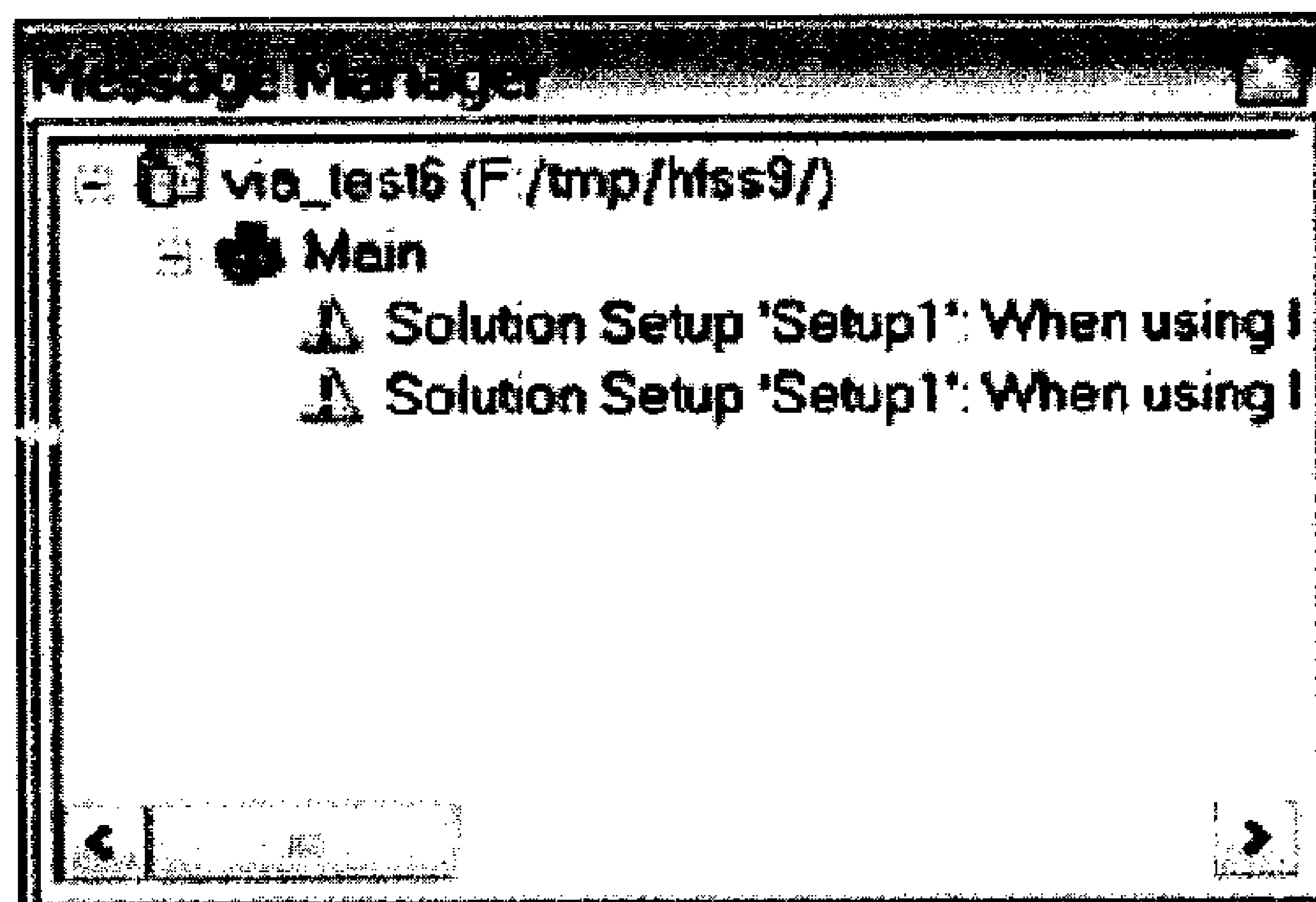
- Project Manager: Περιλαμβάνει ένα δομικό δέντρο που παραθέτει τη δομή του project.



Εικόνα 3.2.3: Δομή του project.

Ansoft Corporation, June 2005, *High Frequency Structure Simulator*, USA, σελ.10.

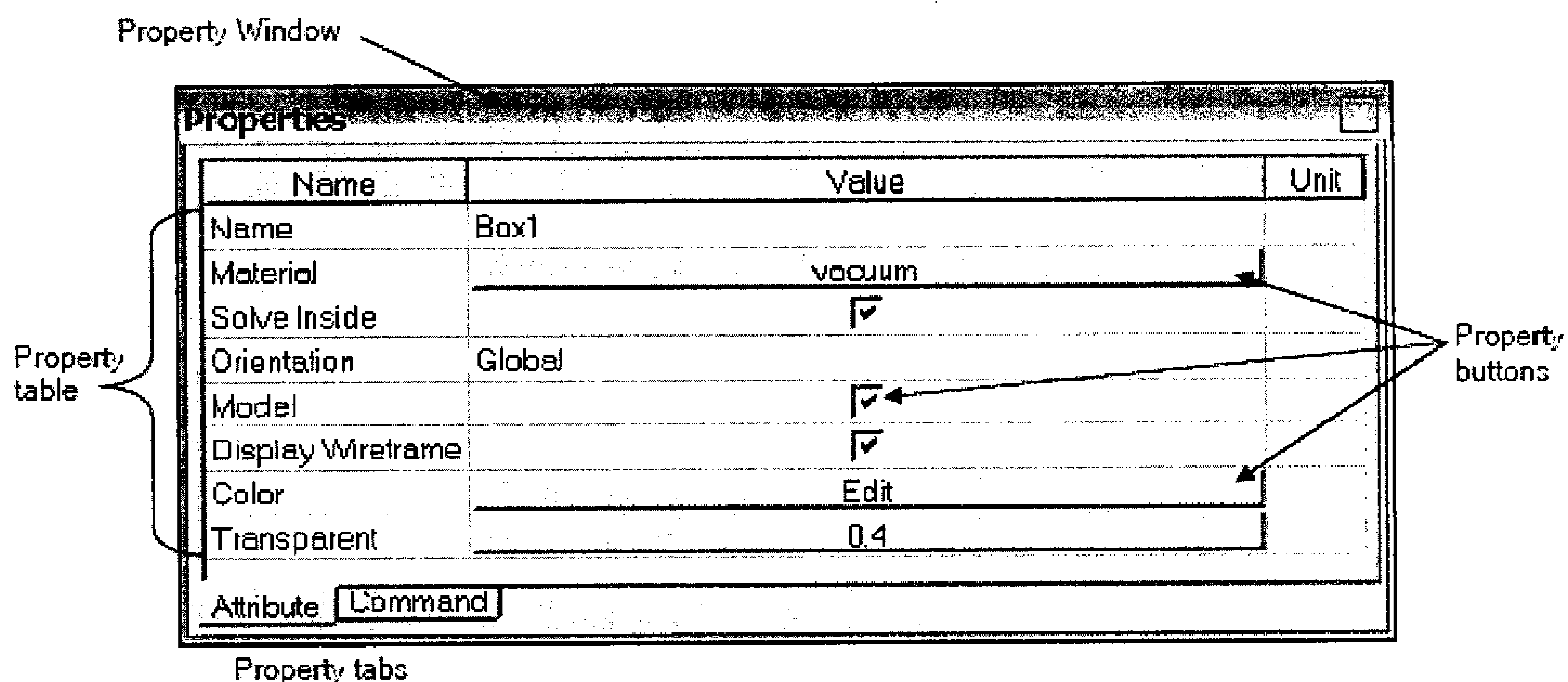
- Message Manager: Παρατήρηση τυχόν σφαλμάτων ή προειδοποιήσεις που συμβαίνουν πριν την πραγματοποίηση της προσομοίωσης.



Εικόνα 3.2.4: Προβολή τυχόν σφαλμάτων ή προειδοποιήσεων που εμφανίζονται πριν την προσομοίωση.

Ansoft Corporation, June 2005, *High Frequency Structure Simulator*, USA, σελ.9.

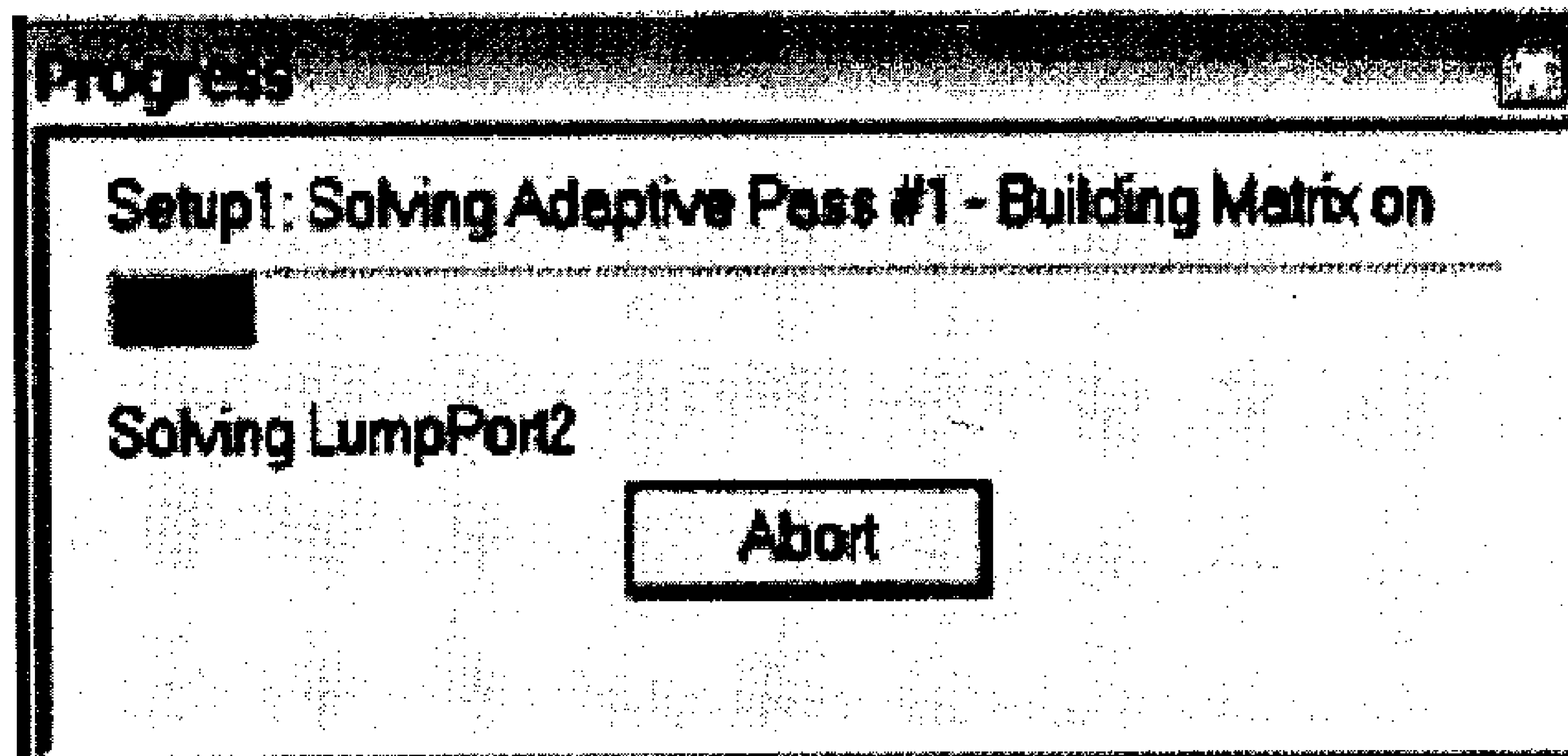
- Property Window: Εμφανίζει και επιτρέπει την αλλαγή του μοντέλου, παραμέτρων ή χαρακτηριστικών.



Εικόνα 3.2.5: Αλλαγή του μοντέλου παραμέτρων ή χαρακτηριστικών.

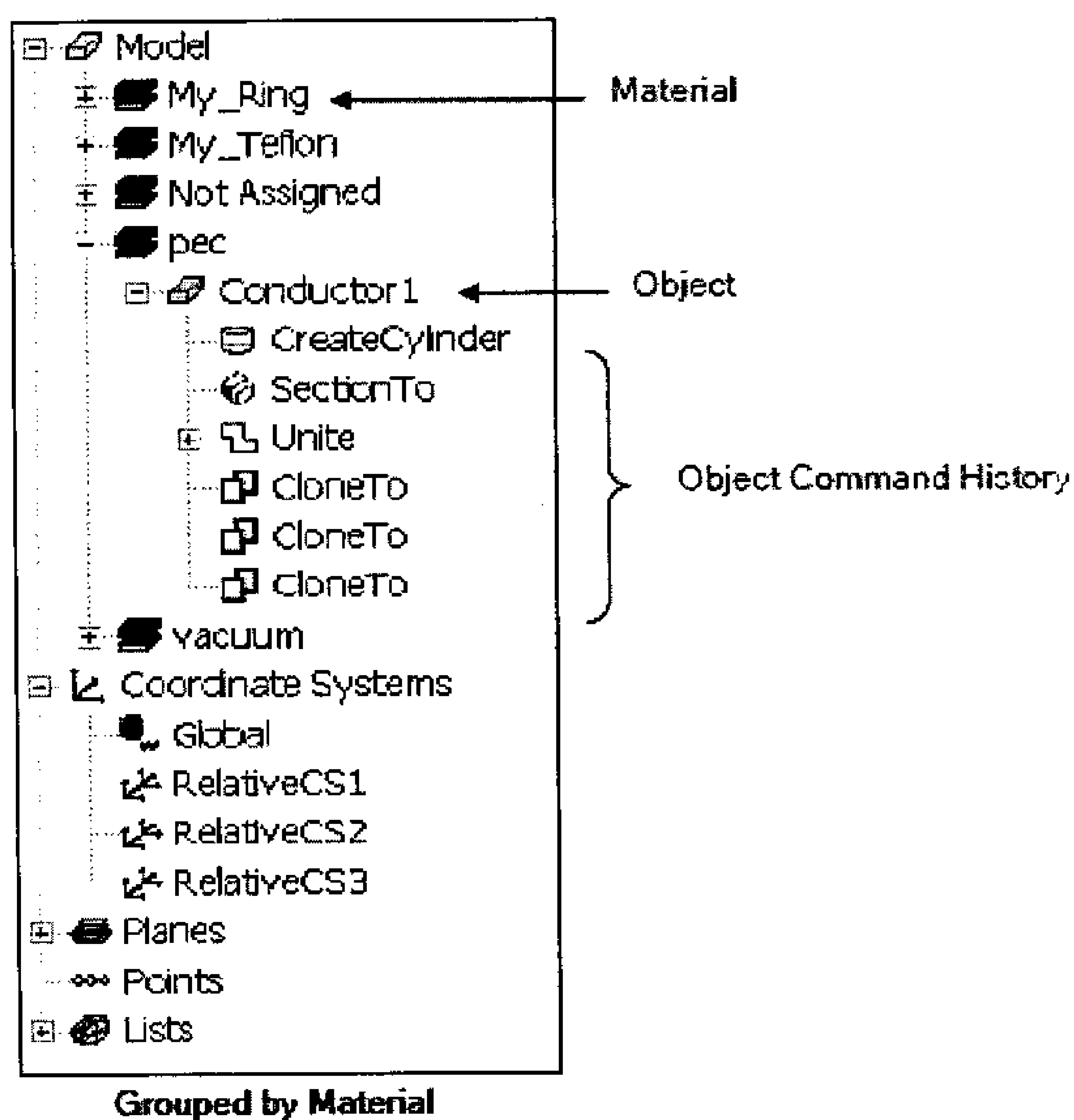
Ansoft Corporation, June 2005, *High Frequency Structure Simulator*, USA, σελ.11.

- Progress Window: Εμφάνιση της προόδου της λύσης.



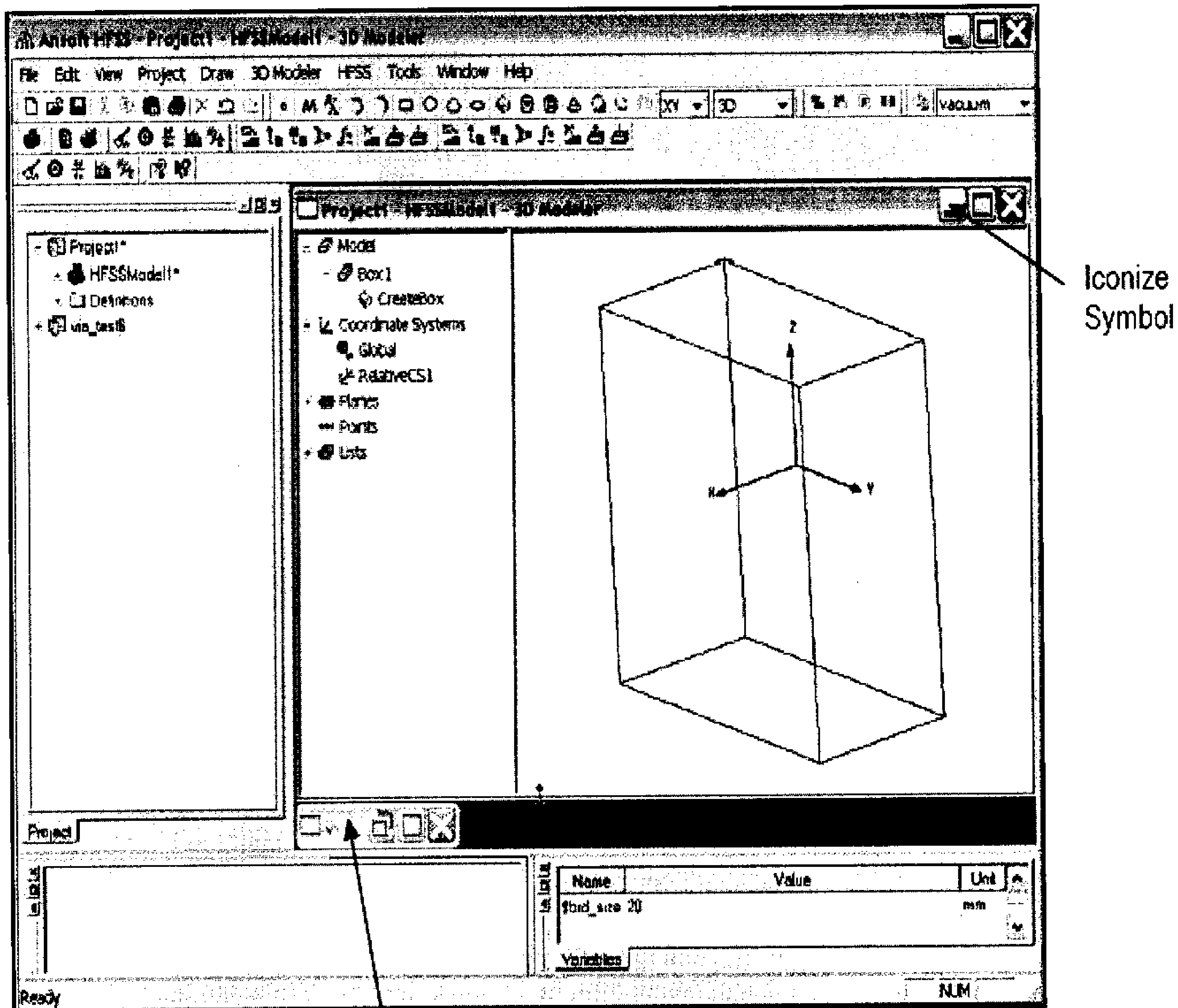
Εικόνα 3.2.6: Πρόοδος της λύσης.
Ansoft Corporation, June 2005, *High Frequency Structure Simulator*, USA, σελ.9.

- 3D Modeler Window: Περιέχει το μοντέλο και τη δομή (model tree) του ενεργού design.



Εικόνα 3.2.7: Το 3D Modeler Window.
Ansoft Corporation, June 2005, *High Frequency Structure Simulator*, USA, σελ.13.

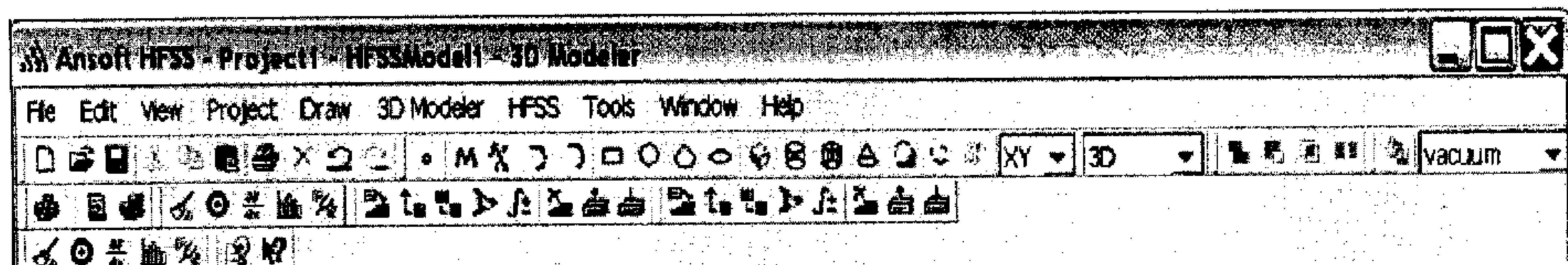
- Design Windows: Στο HFSS Desktop, κάθε project μπορεί να περιέχει πολλαπλά Design και κάθε Design εμφανίζεται σε ξεχωριστό παράθυρο.



Design icons

Εικόνα 3.2.8: HFSS Desktop
Ansoft Corporation, June 2005, *High Frequency Structure Simulator*, USA, σελ.14.

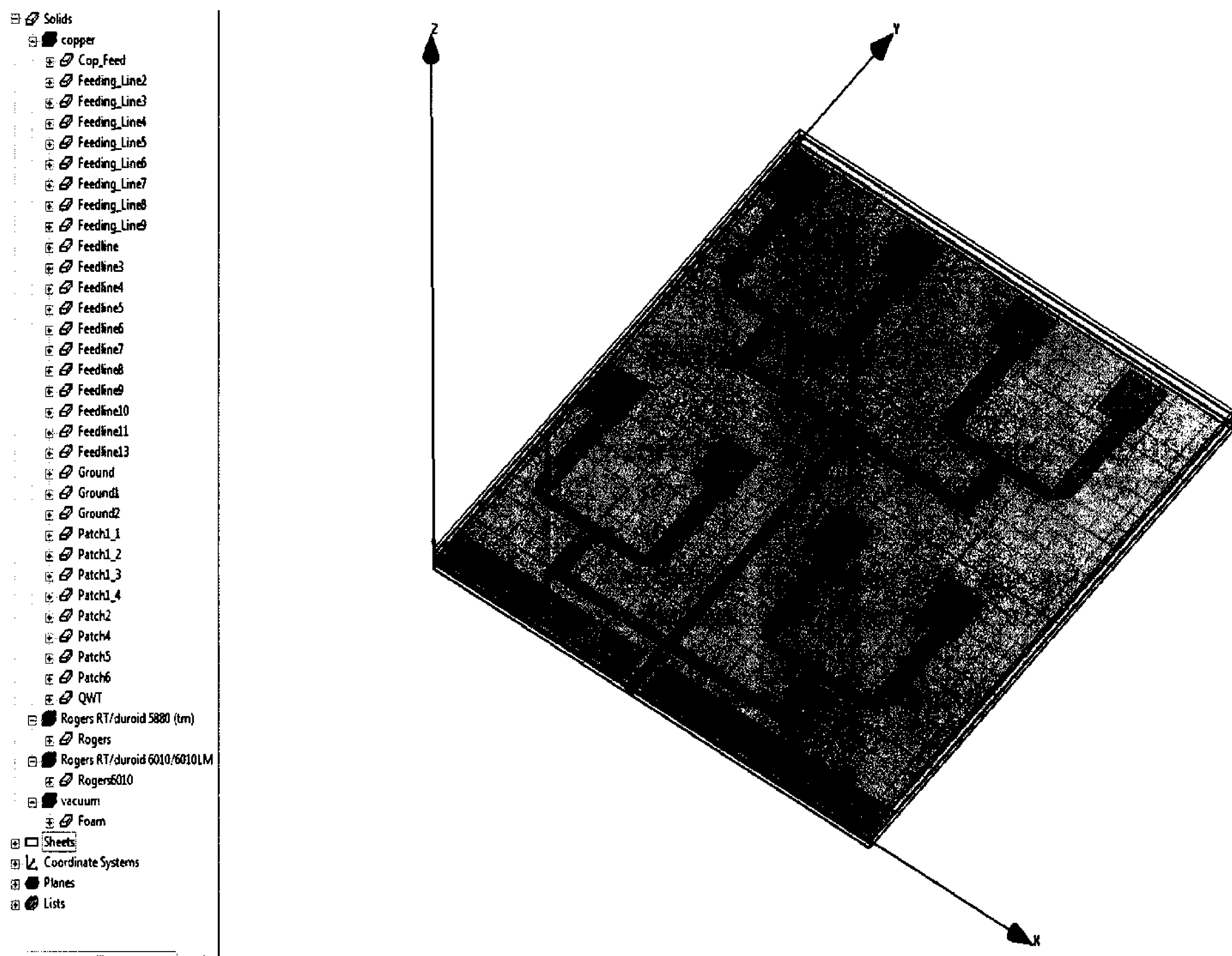
- Toolbars: Τα κουμπιά της γραμμής εργαλείων είναι συντομεύσεις των εντολών που χρησιμοποιούνται συχνά. Οι περισσότερες από τις διαθέσιμες γραμμές εργαλείων εμφανίζονται σε αυτή την αρχική οθόνη του HFSS.



Εικόνα 3.2.9: HFSS Toolbars.
Ansoft Corporation, June 2005, *High Frequency Structure Simulator*, USA, σελ.15.

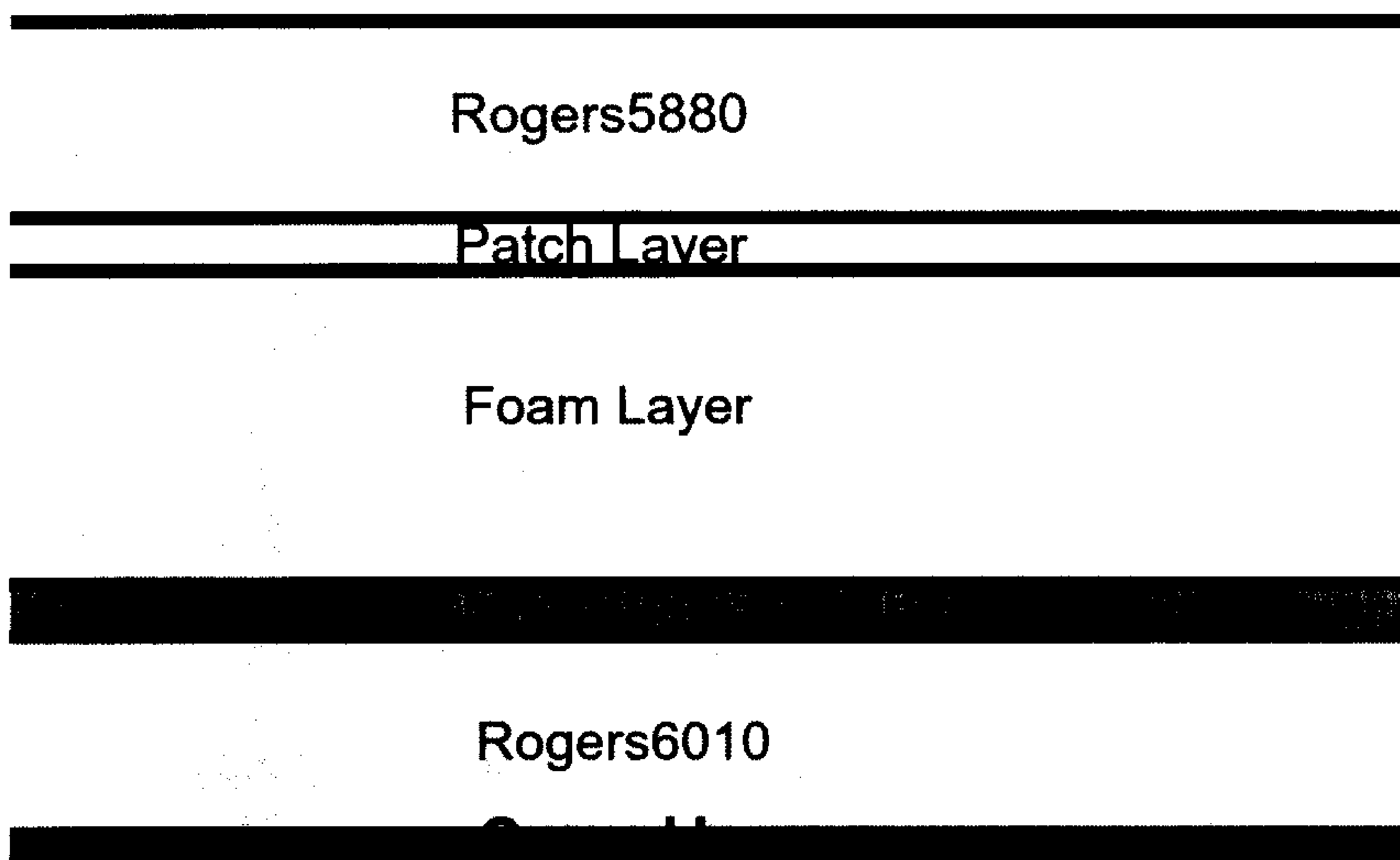
4. Μικροταινιακή Κεραία

Η μικροταινιακή κεραία με συχνότητα λειτουργίας τα 60 GHz (patch antenna) σχεδιάστηκε, εξομοιώθηκε και δοκιμάστηκε στο πρόγραμμα HFSS ως εξής:



Εικόνα 4.1: Μικροταινιακή κεραία σχεδιασμένη στο πρόγραμμα HFSS.

Περιγραφή των υποστρωμάτων της κεραίας:



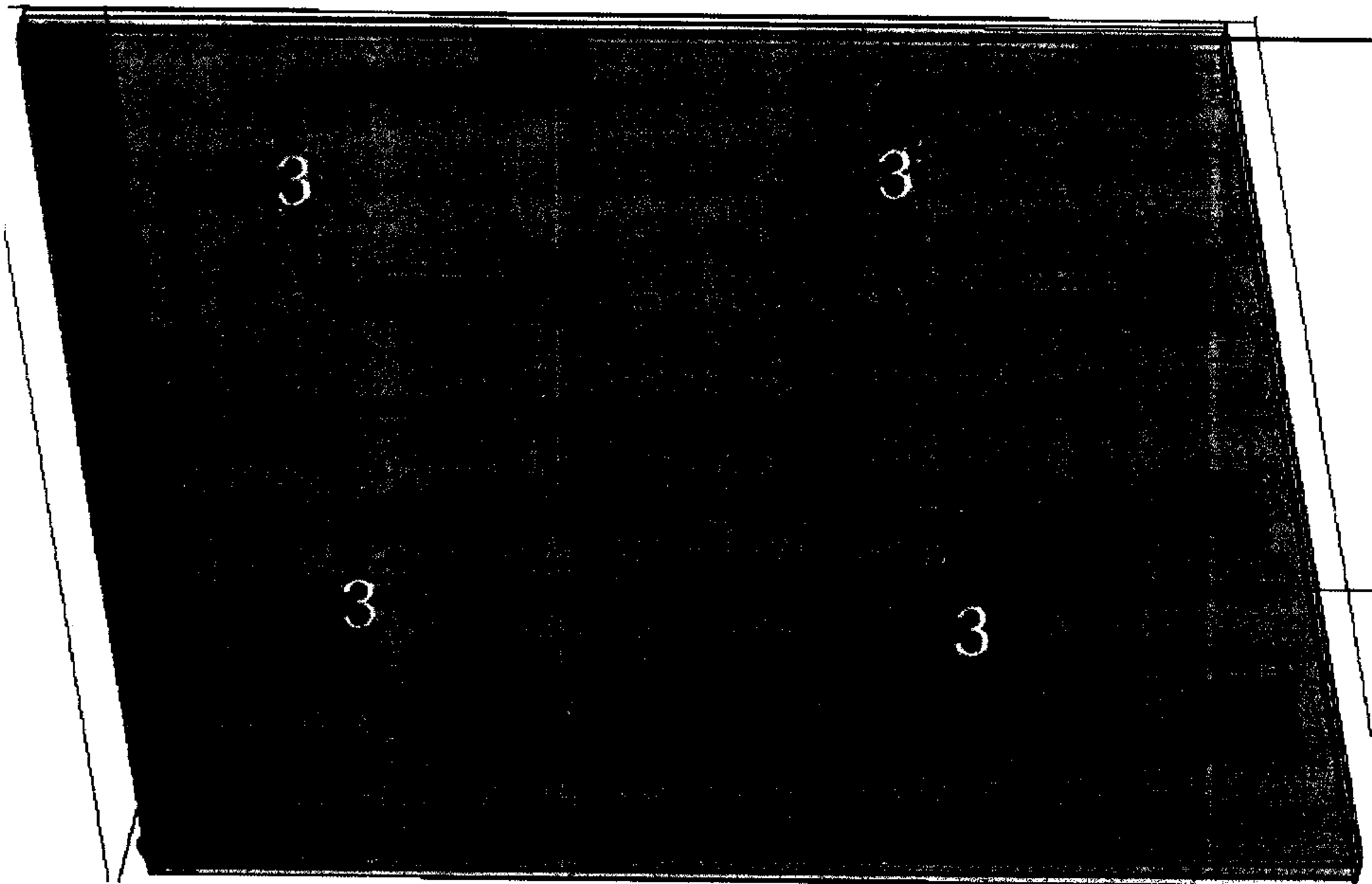
Εικόνα 4.2: Επιμέρους υποστρώματα κεραίας.

1. Ground Layer (Υπόστρωμα Γείωσης): Διαστάσεων: $X=13\text{mm}$, $Y=14.5\text{mm}$, $Z=-0.018\text{mm}$
2. Rogers6010 (Rogers RT/duroid 6010): Διαστάσεων: $X=13\text{mm}$, $Y=14.5\text{mm}$, $Z=0.127\text{mm}$ και διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r = 10$.
3. Feedline: 21 γραμμές μεταφοράς και δύο επιμέρους γειώσεις που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία των μικροταινιακών κεραίων, διαφορετικών διαστάσεων, αλλά ίδιου πάχους ($Z=0.035\text{ mm}$).

Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3, οι διαστάσεις των μικροταινιών είναι:

Πίνακας 2: Διαστάσεις μικροταινιών όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.

Δείκτης στην εικόνα	Διαστάσεις στοιχείου	
	X (mm)	Y (mm)
1	0.45	2.8
2	0.4	1.495
3	2.9	0.25
4	6.3	0.25
5	6.8725	1.019
6	0.3	0.39
7	0.25	7.02
8	0.2	1.019
9	5.5275	1.019

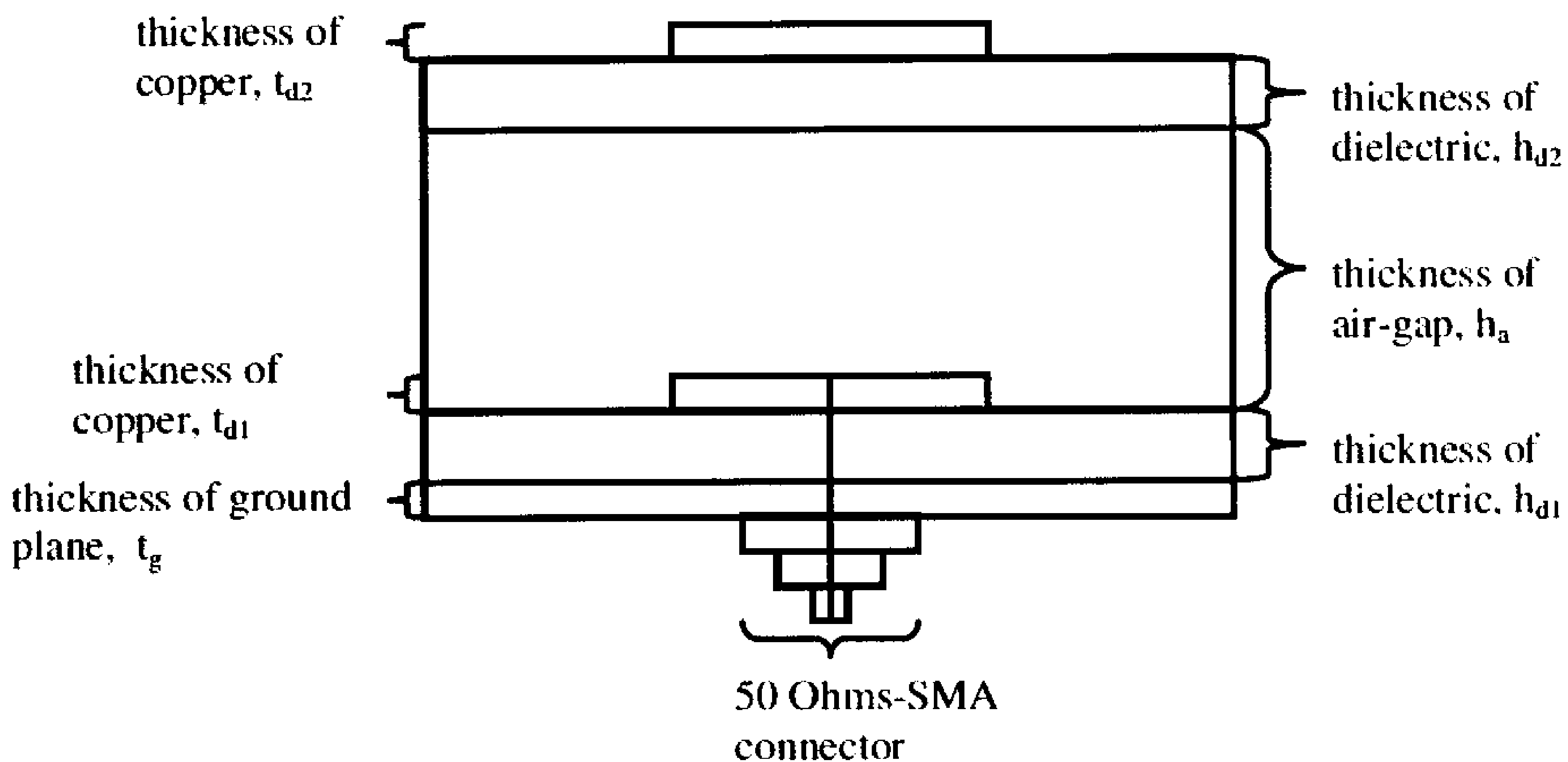


Εικόνα 4.3: Γραμμές μεταφοράς και επιμέρους γειώσεις.

4. Foam Layer (Υπόστρωμα αφρώδους υλικού): Διαστάσεων: $X=13\text{mm}$, $Y=14.5\text{mm}$, $Z=0.2\text{mm}$ και διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r=1$. Όπως βλέπουμε και στην εικόνα 4.2, η δομή της σχεδιασμένης κεραίας, περιλαμβάνει τρία επί της ουσίας υποστρώματα: Το Rogers 6010, το layer foam (air gap) και το Rogers 5880. Από τα τρία αυτά υποστρώματα προκύπτει μία μέση διηλεκτρική σταθερά σύμφωνα με τον τύπο που θα δούμε παρακάτω. Η μέση διηλεκτρική σταθερά σε συνδυασμό με την αύξηση του πάχους της κεραίας αυξάνει (ανοίγει) το BW. Ας το δούμε πιο αναλυτικά:

Τα βασικά χαρακτηριστικά για κεραίες σχεδιασμένες για ασύρματες εφαρμογές είναι τα εξής: μικρό μέγεθος, εύκολα τοποθετήσιμες και μεγάλου εύρους ζώνης. Η microstrip κεραία πληρεί όλες αυτές τις προϋποθέσεις, εκτός από το στενό εύρος ζώνης που την χαρακτηρίζει. Μία τεχνική η οποία μπορεί να ενισχύσει το εύρος ζώνης της μικροταινιακής κεραίας χωρίς να αυξήσει το μέγεθος και την πολυπλοκότητα της πάρα πολύ, είναι η χρήση διπλών διηλεκτρικών, ενός υψηλής (Rogers RT/duroid 6010) και ενός χαμηλής (RT/Duroid 5880) διηλεκτρικής σταθεράς, στα οποία θα παρεμβάλεται κενό αέρα (το Foam Layer δηλαδή). Η τεχνική αυτή ενίσχυσης εύρους ζώνης ονομάζεται Identical Dual Patch Microstrip Antenna with Air-Gap (IDMA). Χρησιμοποιούμε λοιπόν το πλεονέκτημα της χρήσης του διακένου αέρος για να χαμηλώσει η ενεργός

επιτρεπτότητα (effective permittivity) και να αυξηθεί το συνολικό πάχος της κεραίας, το οποίο είναι απαραίτητο για την ενίσχυση του εύρους ζώνης.



Εικόνα 4.4: Χρήση διπλών διηλεκτρικών, ενός υψηλής και ενός χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς, στα οποία θα παρεμβάλεται κενό αέρα (Foam Layer).

RSA Raja Abdullah, D. Yoharaaj, and Alyani Ismail, 2006, "Bandwidth Enhancement Technique in Microstrip Antenna for Wireless Applications", *PIERS ONLINE*, VOL. 2, NO.6, pp.633-639, Figure 4.

Η συχνότητα λειτουργίας της κεραίας μπορεί εύκολα να ρυθμιστεί χωρίς την ανάγκη νέου σχεδιασμού, απλά μεταβάλλοντας το μέγεθος του διακένου αέρος. Ο κύριος στόχος είναι η ενεργός διηλεκτρική σταθερά αυτής της τριπλής στρώσης microstrip κεραίας. Αυτή η παράμετρος και το συνολικό πάχος της κεραίας επηρεάζουν το εύρος ζώνης. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το σχεδιασμό είναι:

$$\epsilon_{av} = \left[\frac{(\epsilon_r * h_{d1} + \epsilon_r * h_a + \epsilon_r * h_{d2})}{\frac{h_t}{3}} \right], \text{ όπου } h_t = h_{d1} + h_a + h_{d2}$$

$$BW = \frac{\sqrt{2p}}{45\pi} \left(1 - \frac{1}{\epsilon_{av}} + \frac{2}{5\epsilon_{av}^2} \right) \left(\frac{1}{\epsilon_{av}} \right) \left(\frac{h_t}{\lambda} \right) \left(\frac{W}{L} \right)$$

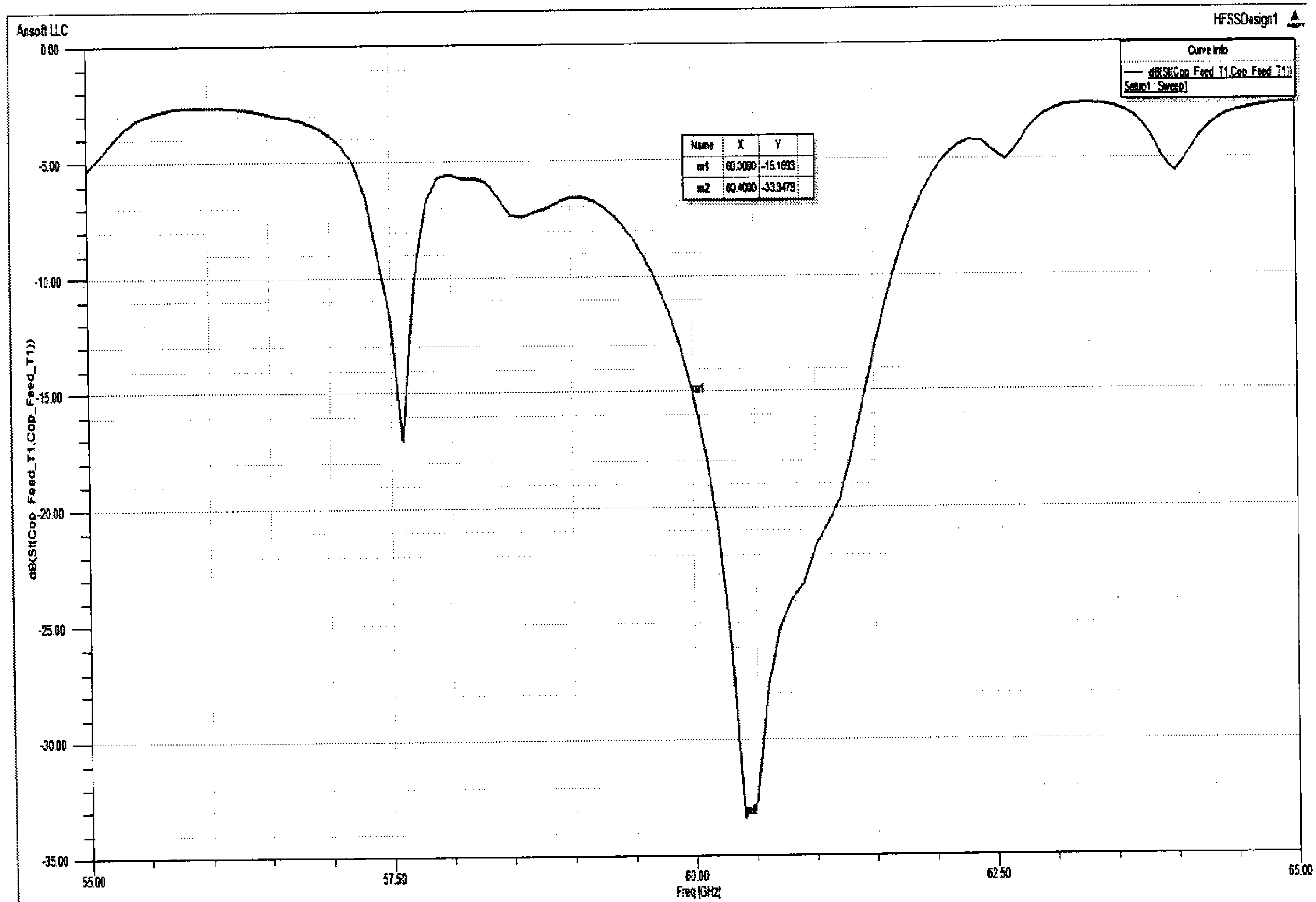
$$P = 1 + \frac{a_2}{20} (k_0 W)^2 + a_4 \left(\frac{3}{500} \right) (k_0 W)^4 + b_2 \left(\frac{1}{10} \right) (k_0 L)$$

Όπου, $a_2 = -0.16605$, $a_4 = 0.00761$, $b_2 = -0.09142$ και $k_0 = 2\pi/\lambda$

5. Patch Layer (Υπόστρωμα μικροταινιακών κεραιών): Διαστάσεων: $X=1.1\text{mm}$, $Y=1.3\text{mm}$, $Z=0.035\text{mm}$.
6. Rogers5880 (Rogers RT/duroid 5880): Διαστάσεων: $X=13\text{mm}$, $Y=14.5\text{mm}$, $Z=0.127\text{mm}$ και διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r=2.2$.

Απώλεια επιστροφών

Ένα μέτρο για να ελέγξουμε την αποδοτικότητα της μικροταινιακής κεραίας στη συχνότητα που επιθυμούμε να λειτουργεί (συχνότητα συντονισμού), είναι η παράμετρος της απώλειας επιστροφών, που είναι επί της ουσίας οι S-παράμετροι, από την θεωρία των δίθυρων. Στη συχνότητα των 60 GHz η μικροταινιακή κεραία έχει ισχύ -15.1693 db , ενώ η ελάχιστη απώλεια επιστροφών εμφανίζεται στη συχνότητα των 60.4 GHz με ισχύ -33.3479 db (Εικόνα 4.4).

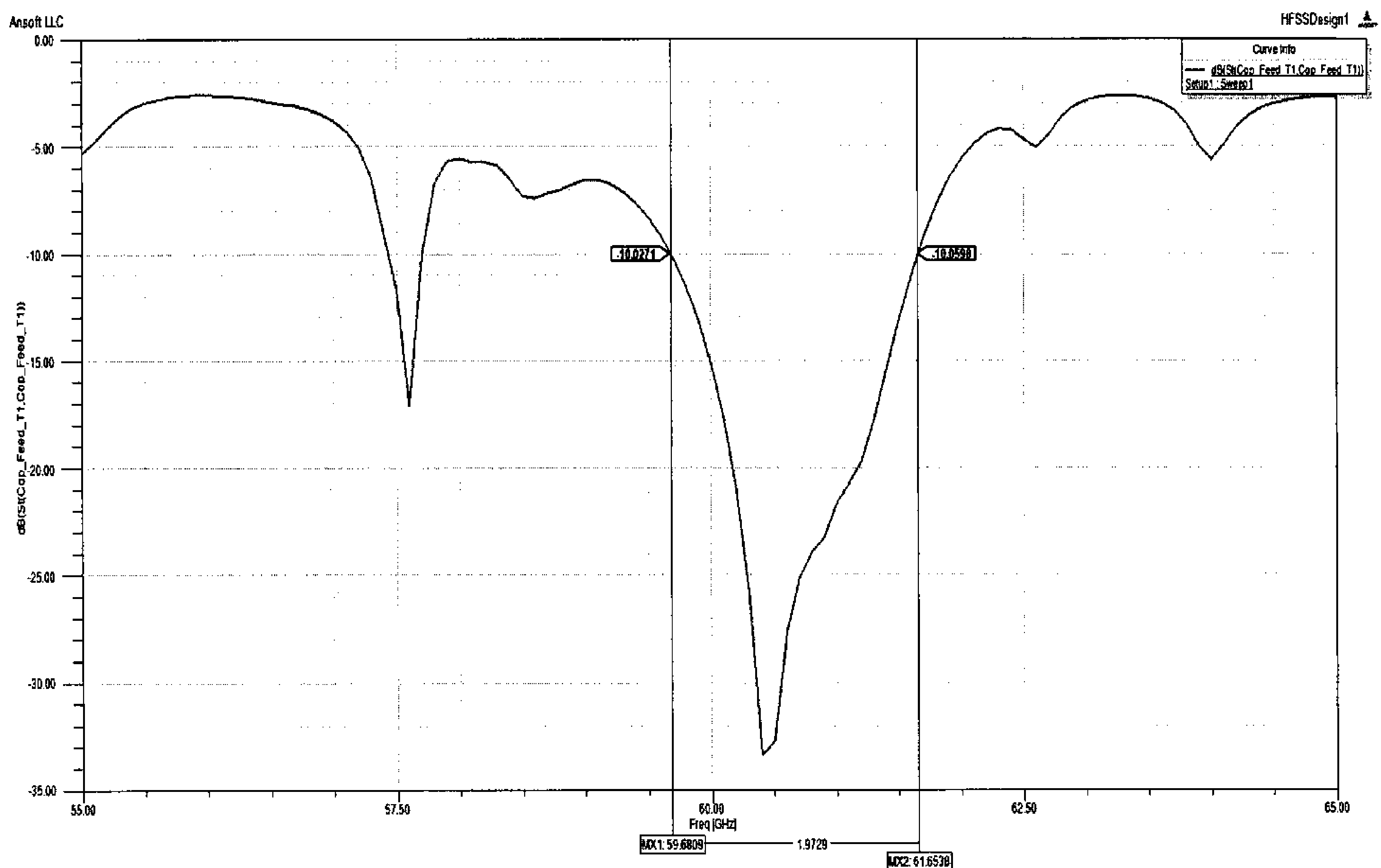


Εικόνα 4.5: Διάγραμμα των S-παραμέτρων εκφρασμένο σε db συναρτήσει της συχνότητας.

Εύρος Ζώνης

Ένα άλλο μέτρο για να ελέγξουμε την αποδοτικότητα της μικροταινιακής κεραίας στη συχνότητα συντονισμού είναι το εύρος ζώνης.

Το εύρος ζώνης μετριέται στο διάγραμμα των S-παραμέτρων με τιμή ισχύος περίπου ίση με 10 db. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5, το εύρος ζώνης υπολογίζεται από τους δείκτες MX1 και MX2. Ο δείκτης MX1 βρίσκεται στη συχνότητα 59.6809 GHz και ο δείκτης MX2 βρίσκεται στη συχνότητα 61.6538 GHz. Οπότε το εύρος ζώνης είναι 1.9729 GHz.

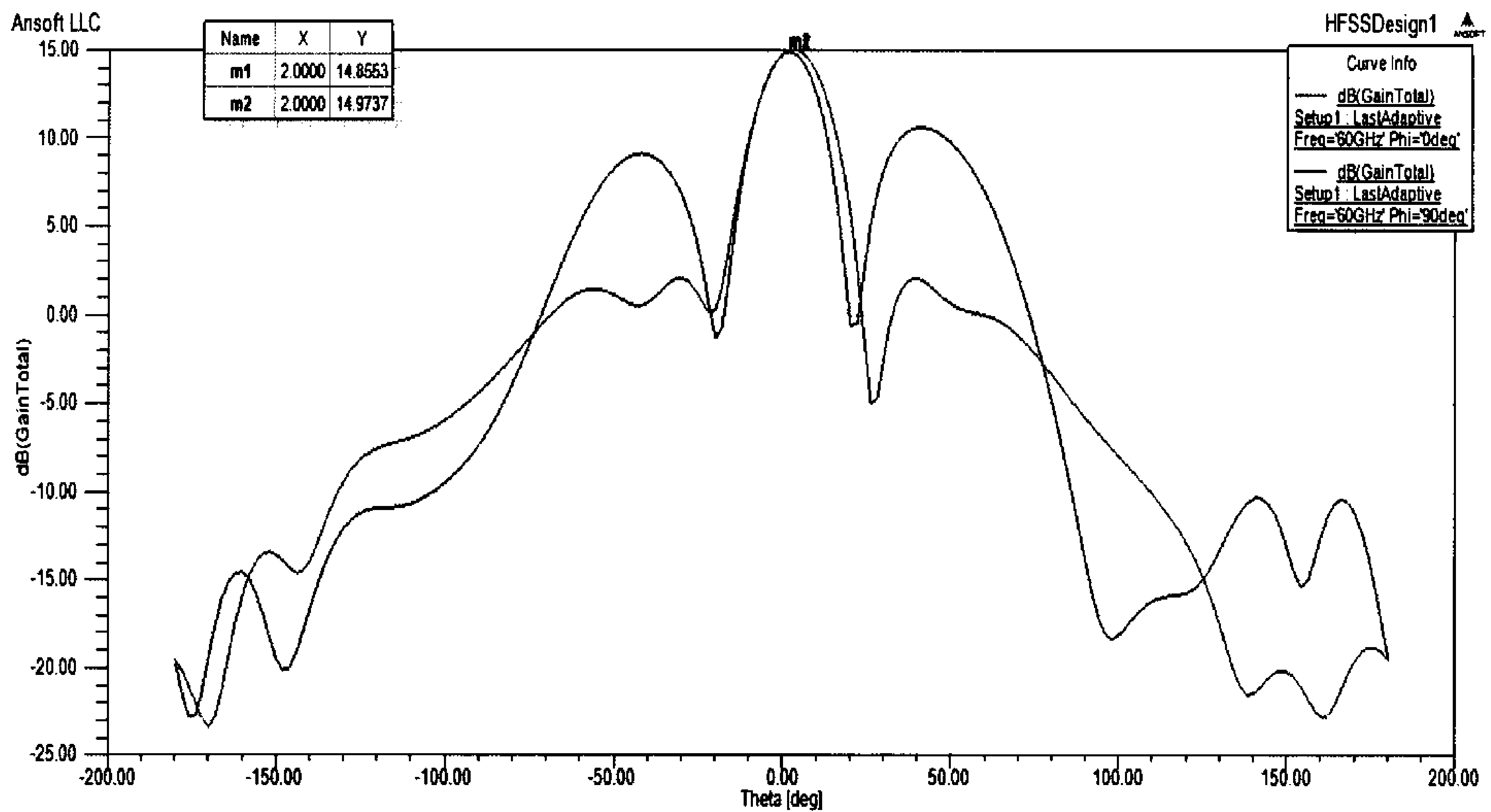


Εικόνα 4.6: Το εύρος ζώνης συχνότητα συντονισμού (60 GHz).

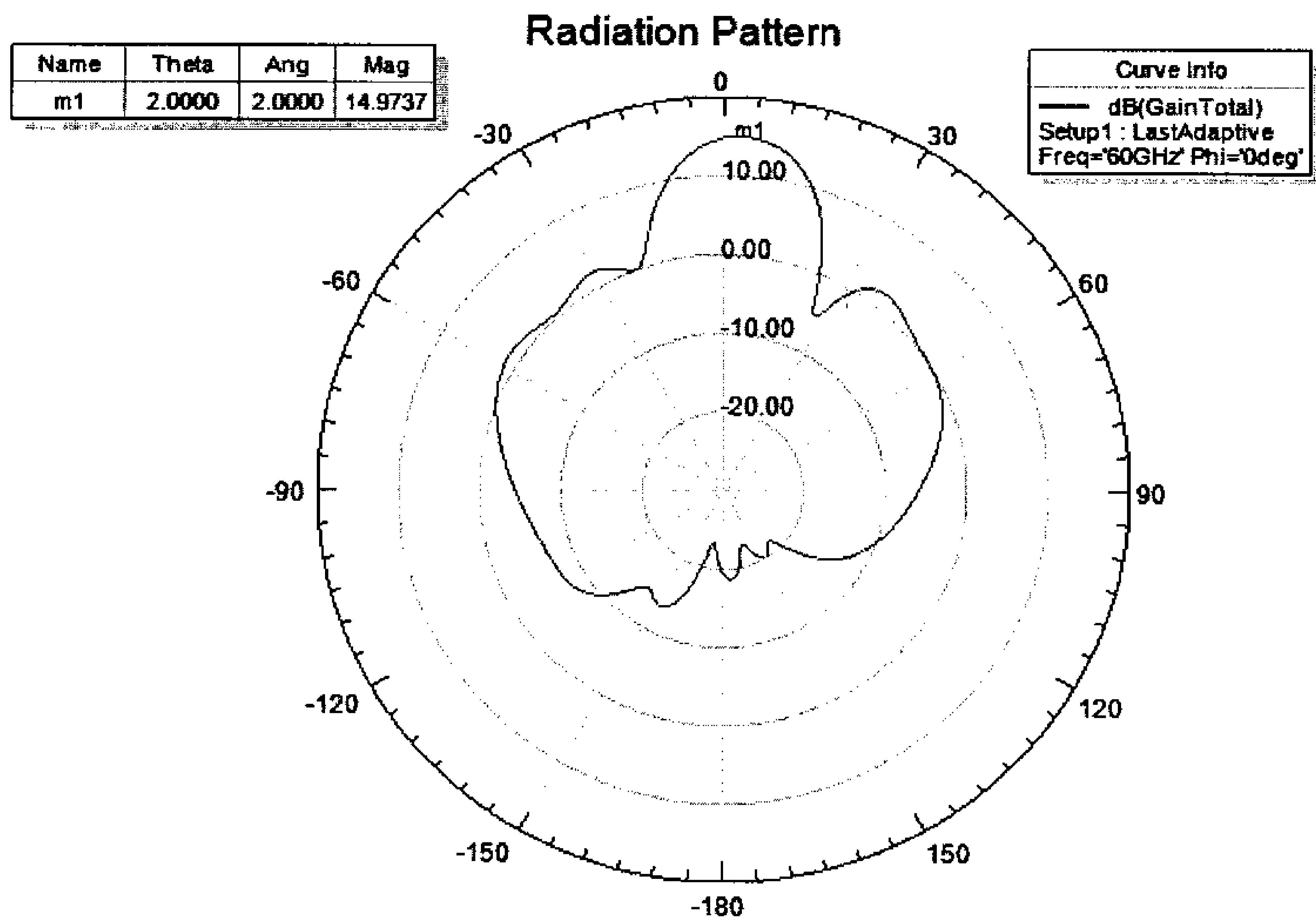
Διάγραμμα ακτινοβολίας

Ένα άλλο μέτρο για να ελέγξουμε την αποδοτικότητα της μικροταινιακής κεραίας στη συχνότητα συντονισμού είναι το διάγραμμα ακτινοβολίας και το πραγματοποιημένο κέρδος [dBi] στο E-επίπεδο και H-επίπεδο στα 60 GHz. Στη συχνότητα των 60 GHz η μικροταινιακή κεραία έχει

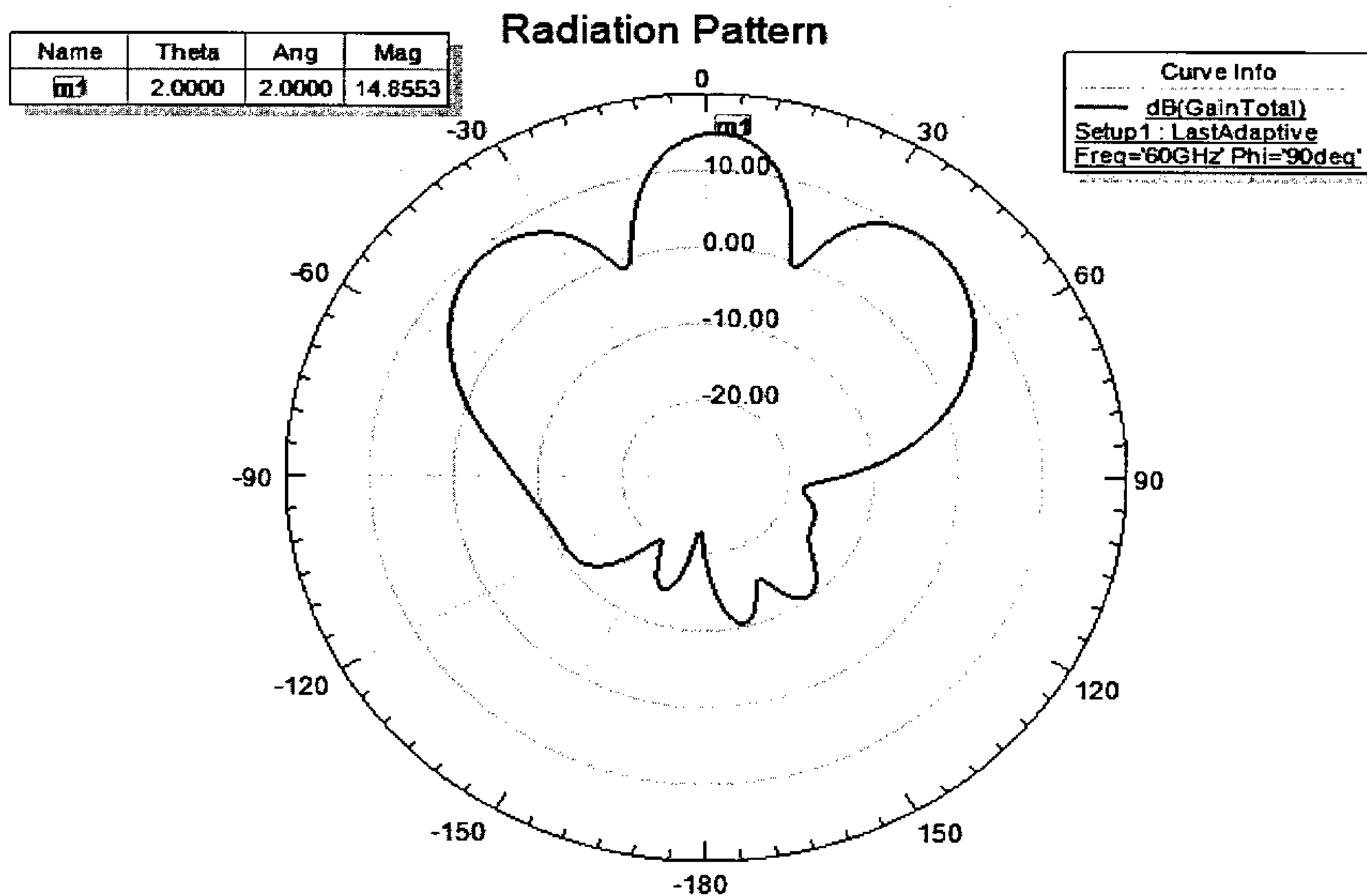
κέρδος 14.9737 db (Εικόνα 4.7) στο Η-επίπεδο, ενώ $^{\circ}$ στο Ε-επίπεδο έχει κέρδος 14.8553 db (Εικόνα 4.8).



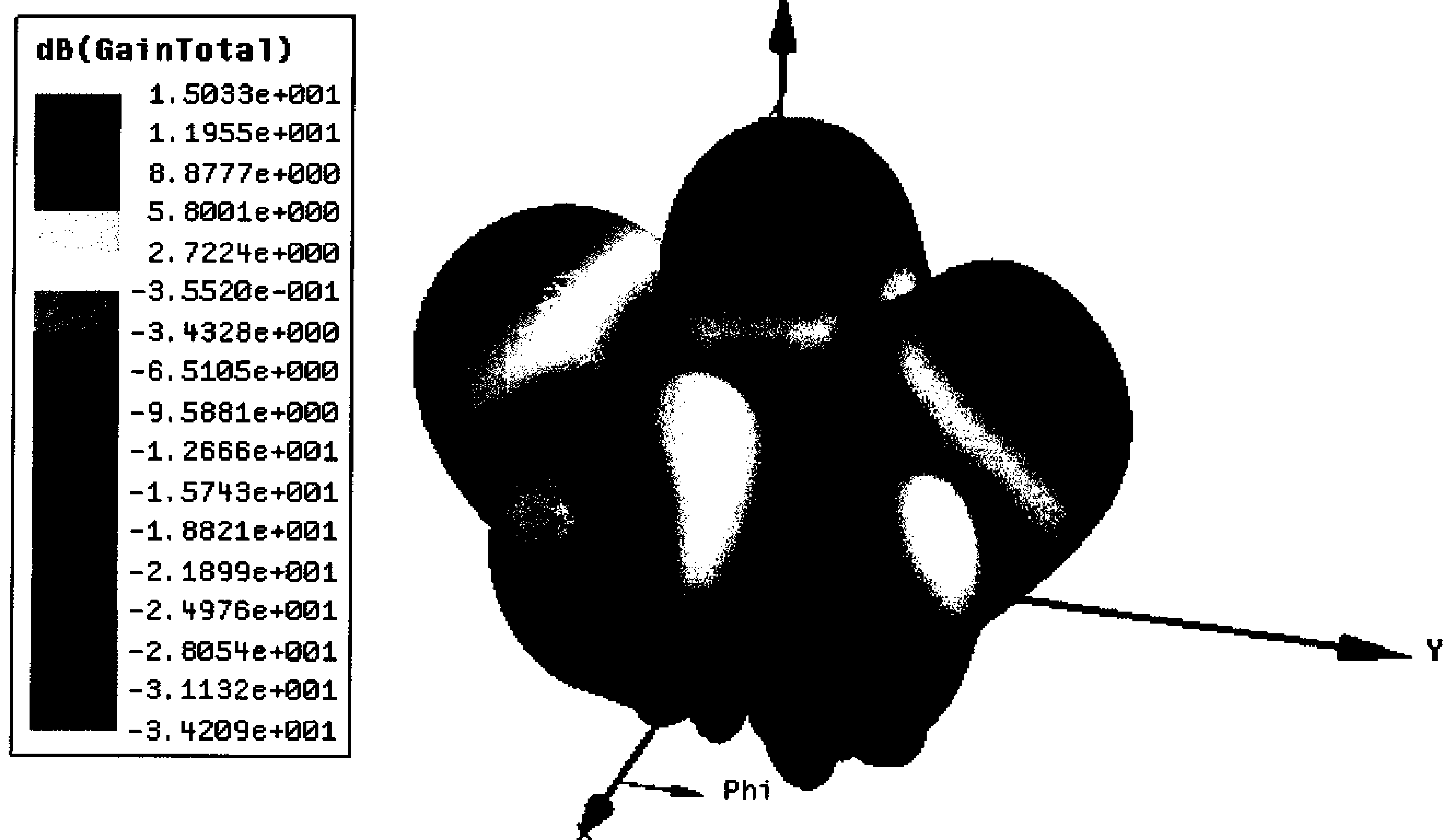
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα ακτινοβολίας , πραγματοποιημένο κέρδος [dB] στο Ε-επίπεδο και Η-επίπεδο στα 60 GHz.



Εικόνα 3.8 : Διάγραμμα ακτινοβολίας, πραγματοποιημένο κέρδος [dB] στο Η-επίπεδο στα 60 GHz.



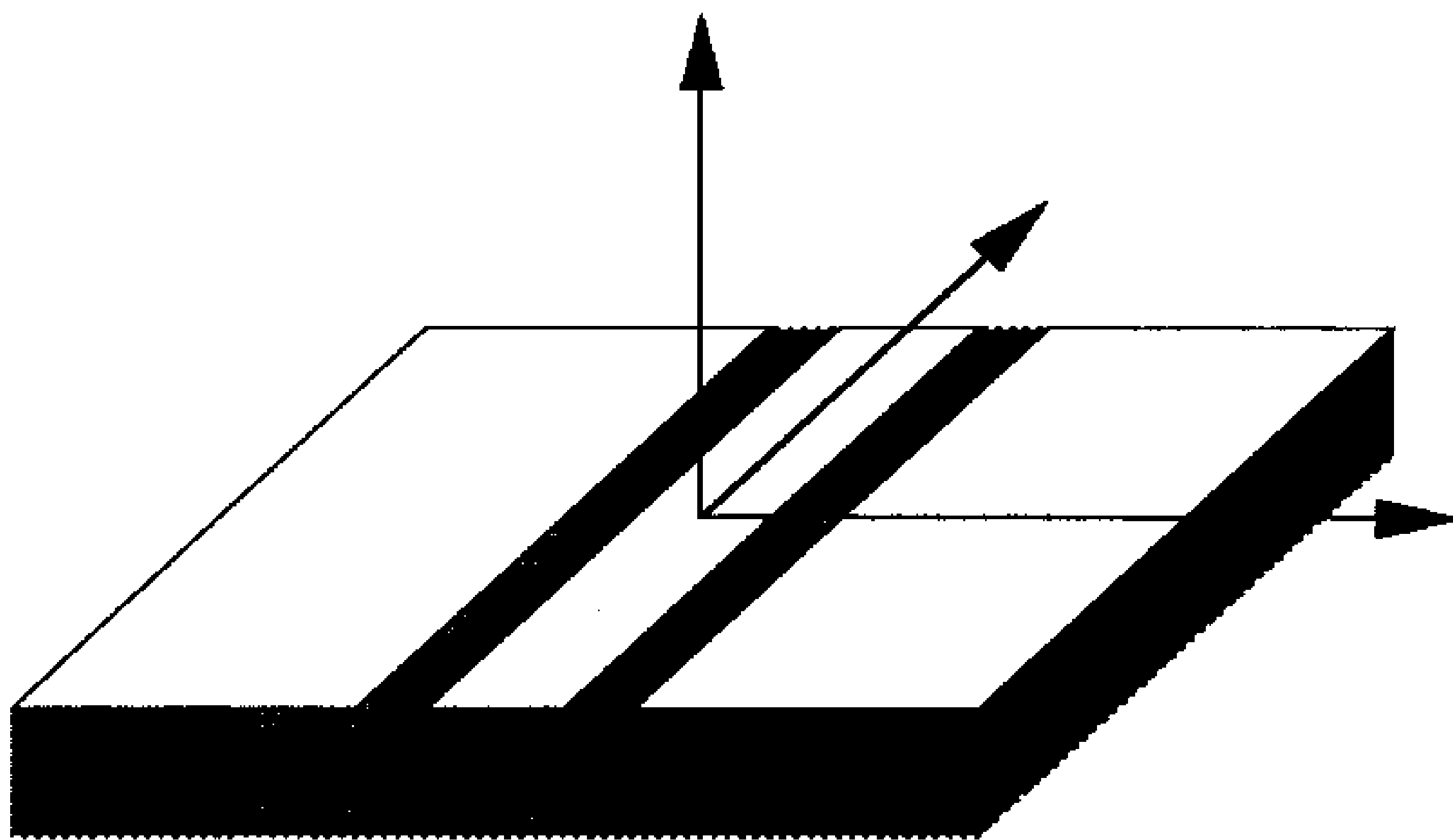
Εικόνα 4.9: Διάγραμμα ακτινοβολίας, πραγματοποιημένο κέρδος [dB] στο E-επίπεδο στα 60 GHz



Εικόνα 4.10: Διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη μορφή, πραγματοποιημένο κέρδος [dB] στο E-επίπεδο και H-επίπεδο στα 60 GHz.

5. Συνεπίπεδοι Κυματοδηγοί (Coplanar waveguides -CPW)

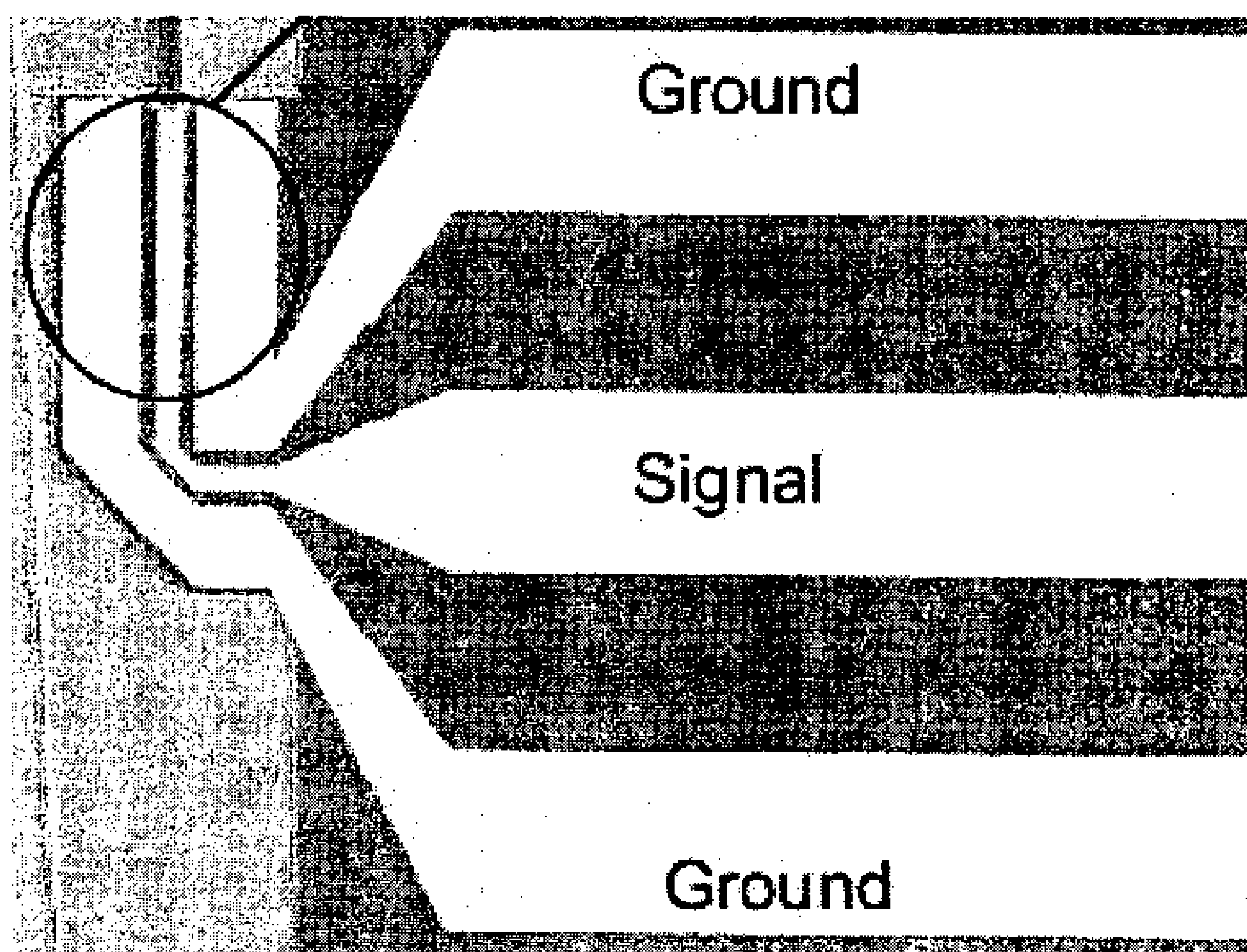
Μια συνεπίπεδη γραμμή είναι μια δομή κατά την οποία όλοι οι αγωγοί, οι οποίοι υποστηρίζουν κύματα διάδοσης, βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, δηλαδή συνήθως στην κορυφή ενός διηλεκτρικού υποστρώματος. Ένας τύπος συνεπίπεδων γραμμών είναι ο συνεπίπεδος κυματοδηγός (CPW), ο οποίος αποτελείται από μια μεταλλική ταινία στη μέση, χωριζόμενη από δύο στενές σχισμές γειώσεως, όπως μπορεί να δει κανείς στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.1: Συνεπίπεδος κυματοδηγός.

Coplanar waveguides (CPW), <http://qucs.sourceforge.net/tech/node86.html>.

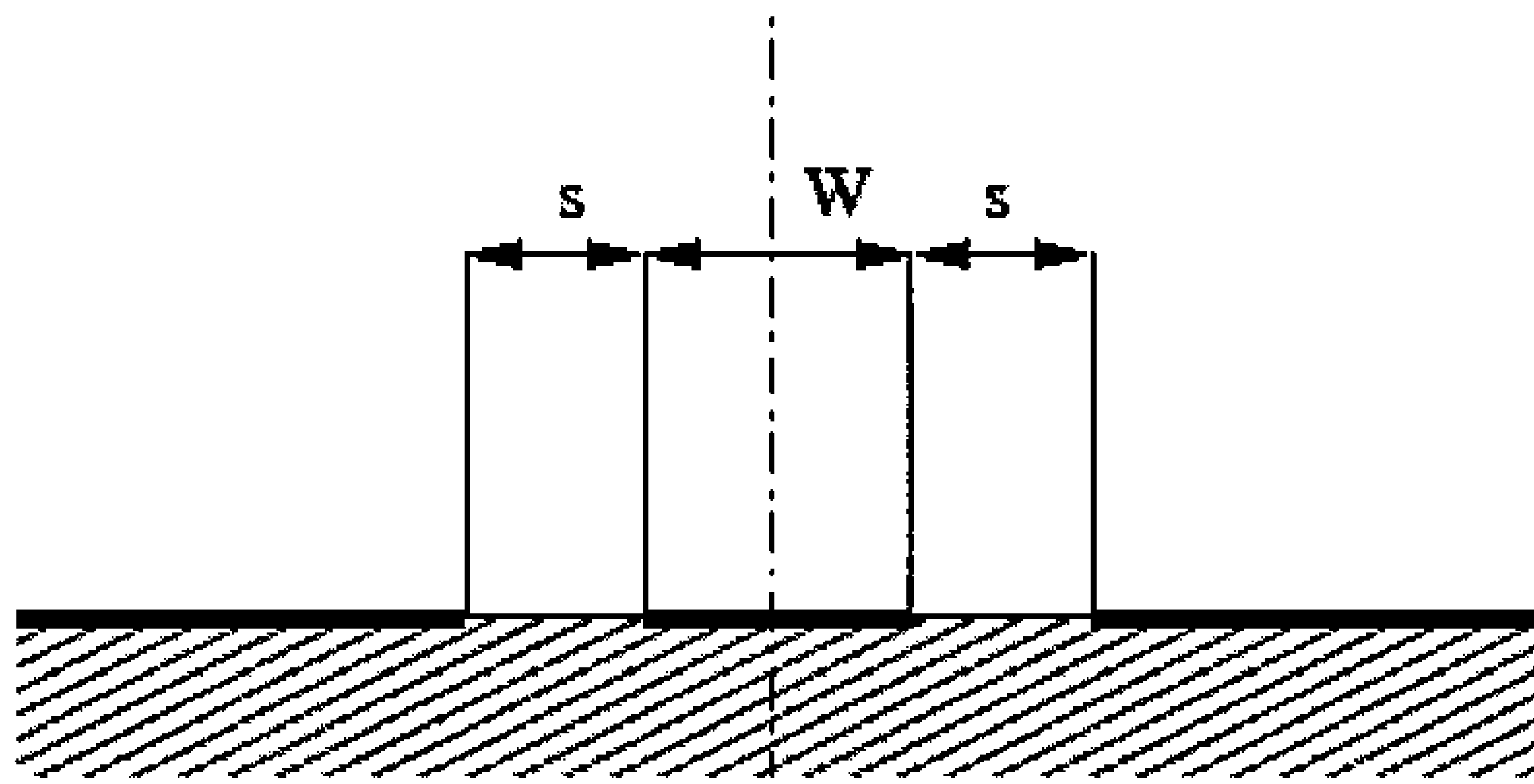
Οι συνεπίπεδοι κυματοδηγοί έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις μικροταινίες, όπως για παράδειγμα χαμηλή απώλεια ακτινοβολίας, μικρότερη διασπορά, μονοεπίπεδη διαμόρφωση και εύκολη τοποθέτηση των lumped στοιχείων (δηλαδή αντιστάσεις, πυκνωτές κλπ.) ή ενεργών συσκευών χωρίς οπές.



Εικόνα 5.2: Στρώματα Γείωσης-Σήματος-Γείωσης.

Mahmoud Nikoufard, 2008, *Integrated Wavelength Division Multiplexing Receivers*, Cip-Data Library Technische Universiteit Eindhoven, Netherlands, Figure 2.13.

Οι χαρακτηριστικές διαστάσεις ενός CPW αποτελούν το κεντρικό πλάτος λωρίδας (W) και το πλάτος των σχισμών (s). Η δομή είναι προφανώς συμμετρική κατά μήκος ενός κατακόρυφου επιπέδου που εκτείνεται στο μέσο της κεντρικής λωρίδας.



Εικόνα 5.3: Η δομή ενός CPW.

Coplanar waveguides (CPW), <http://qucs.sourceforge.net/tech/node86.html>.

Χρησιμοποιούνται ευρέως σε μικροταινιακές patch κεραίες, σε σύγκριση με την microstrip γραμμή τροφοδοσίας, καθώς έχουν μικρότερη απώλεια μετάδοσης ειδικά σε ζώνες υψηλής συχνότητας.

6. Καλώδια Σύνδεσης (Bond wires)

Η χρήση τυποποιημένων τεχνολογιών σύνδεσης για την επίτευξη χαμηλού κόστους συστημάτων, είναι εφικτή αν οι διασυνδέσεις της μικροταινιακής κεραίας έχουν ληφθεί υπόψη κατά τη διαδικασία σχεδιασμού, την επιτυχή ολοκλήρωση και έχουν αποδεκτή απόδοση σε συχνότητες χιλιοστομετρικών κυμάτων (mm wave).

Οι συνδέσεις RF διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα μικροκυματικά και φωτονικά κυκλώματα. Με τη χρησιμοποίηση των συνεπίπεδων κυματοδηγών (CPW) επί των οπτικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικρότεροι σύνδεσμοι (bonds). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζεται μικρότερη μικροκυματική εξασθένηση.

Τα καλώδια σύνδεσης, (στο εξής θα αναφέρονται με την διεθνή ορολογία τους, bond wires), χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση γραμμών μεταφοράς, κυκλωμάτων και στοιχείων εκπομπής καθώς είναι κατασκευαστικά σταθερά, οικονομικά και ανεκτικά σε θερμικές μεταβολές.

Η χρήση των bond wires για την σύνδεση της ολοκληρωμένης κεραίας με μια ημιαγωγική συσκευή (π.χ. φωτοδίοδος) ταιριάζει σε συνεπίπεδες (coplanar) δομές κεραίας, καθώς τα bond wires μπορούν να συνδεθούν άμεσα με τα συνεπίπεδα μπλοκ εξόδου της συσκευής. Στην προσέγγισή μας, τα bond wires μοντελοποιούνται ως γραμμές μεταφοράς. Αυτό μας επιτρέπει να χρησιμοποιούμε διασυνδέσεις με αυτά σε κεραίες τροφοδοτούμενες από CPW (Coplanar Waveguide) σε συχνότητες mm-wave.

Ωστόσο, η ενσωμάτωση τους έχει ανεπιθύμητες επιπτώσεις στην αύξηση σύνθετης αντίστασης (αυτεπαγωγή των bond wires σε μια κατάσταση συντονισμού), προκαλώντας αναντιστοιχίες και απώλειες ισχύος σε συχνότητες mm-wave και έτσι απαιτούνται δίκτυα αντιστάθμισης σύνθετης αντίστασης.

Ο συντελεστής ανάκλασης στη ζεύξη των bond wires με την κεραία είναι:

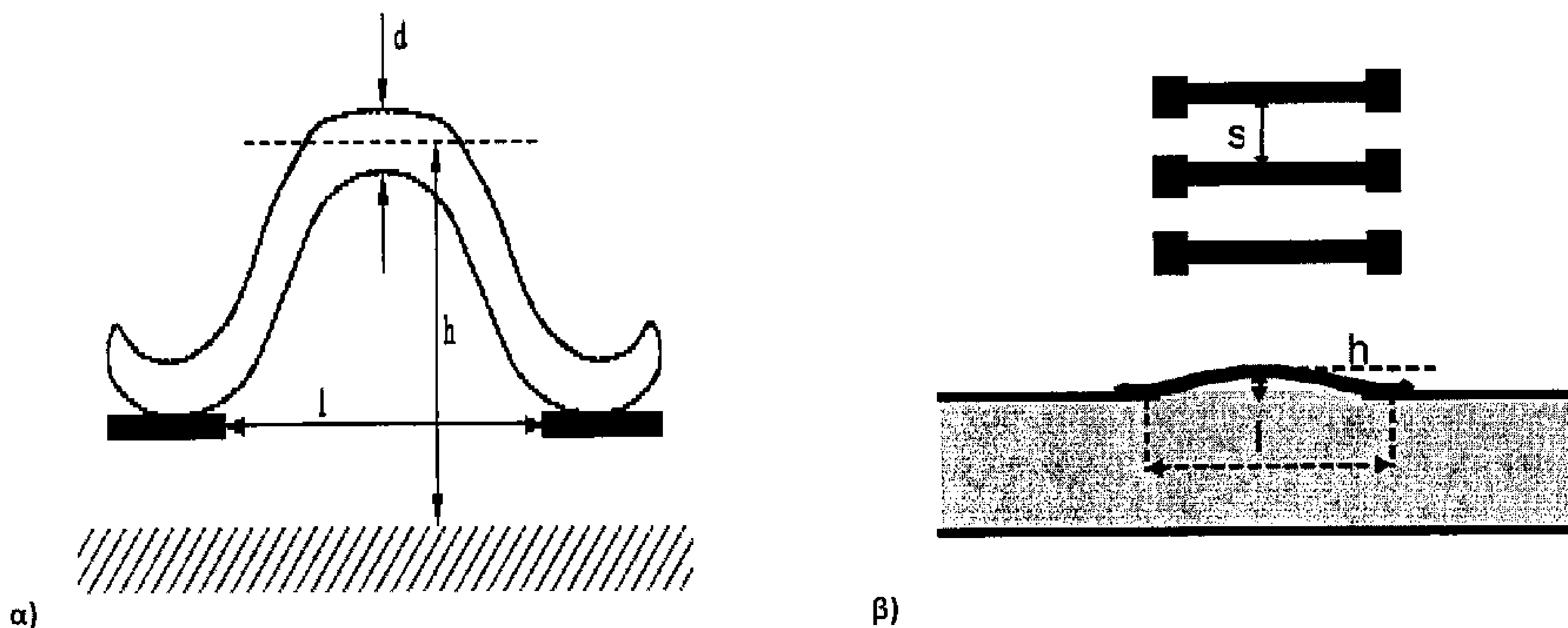
$$\Gamma = \frac{Z_{in} - 50\Omega}{Z_{in} + 50\Omega}$$

Ως εκ τούτου, για ένα καθορισμένο $Z_0=50\Omega$ (αντίσταση προσαρμογής) η ανάκλαση ορίζεται από την παραπάνω εξίσωση και η προσαρμογή της αντίστασης μπορεί να βελτιωθεί ρυθμίζοντας την αντίσταση εισόδου, η οποία εξαρτάται από το πάχος του bond wire και το πλάτος της μικροταινιαίας.

Τα bond wires για χρήση για την συχνότητα των 60 GHz έχουν σφηνοειδές σχήμα (wedge type), είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο (Al), η ακτίνα των καλωδίων είναι $r=12.25 \mu\text{m}$ και το

μήκος του σύρματος είναι $l=450 \mu\text{m}$. Η απόσταση μεταξύ των καλωδίων είναι $S=100 \mu\text{m}$ και το κενό μεταξύ υποστρώματος με το καλώδιο είναι $h=30 \mu\text{m}$. (Εικόνα 6.1.β)

Στην εικόνα 6.1.γ παρατηρούμε το ηλεκτρικό ισοδύναμο του bond wire, το οποίο είναι επί της ουσίας μία αντίσταση (οι απώλειες που εισάγει η ενσωμάτωση τους στο κύκλωμα) και ένα πηνίο (η αυτεπαγωγή που εισάγει η ενσωμάτωση τους στο κύκλωμα, όπως είπαμε και παραπάνω). Το παρακάτω ηλεκτρικό ισοδύναμο θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του ηλεκτρικού ισοδύναμου της φωτοδιόδου, παρακάτω, καθώς τα bond wire θα ενσωματωθούν μαζί με την φωτοδίοδο.



γ)

Εικόνα 6.1: Καλώδιο Σύνδεσης (bond wire), όπου φαίνονται και οι προαναφερθείσες διαστάσεις, και το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμά του.

Bondwire, <http://qucs.sourceforge.net/tech/node84.html>.

Gordana Klaric Felic and Efstratios Skafidas, 2011, *Integration of 60-GHz Microstrip Antennas with CMOS Chip*, InTech, Australia, fig 3.3.

7. Φωτοδίοδος

Η φωτοδίοδος είναι ουσιαστικά ένας αισθητήρας στερεάς καταστάσεως που μετατρέπει μία λαμβανόμενη οπτική ισχύ σε ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Λειτουργεί ως διεπαφή ανάμεσα στην οπτική ίνα που ενώνει το τερματικό με τον κεντρικό σταθμό βάσης και στην μικροταινιακή ταινία που τροφοδοτεί την μικροταινιακή κεραία, μετατρέποντας το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό.

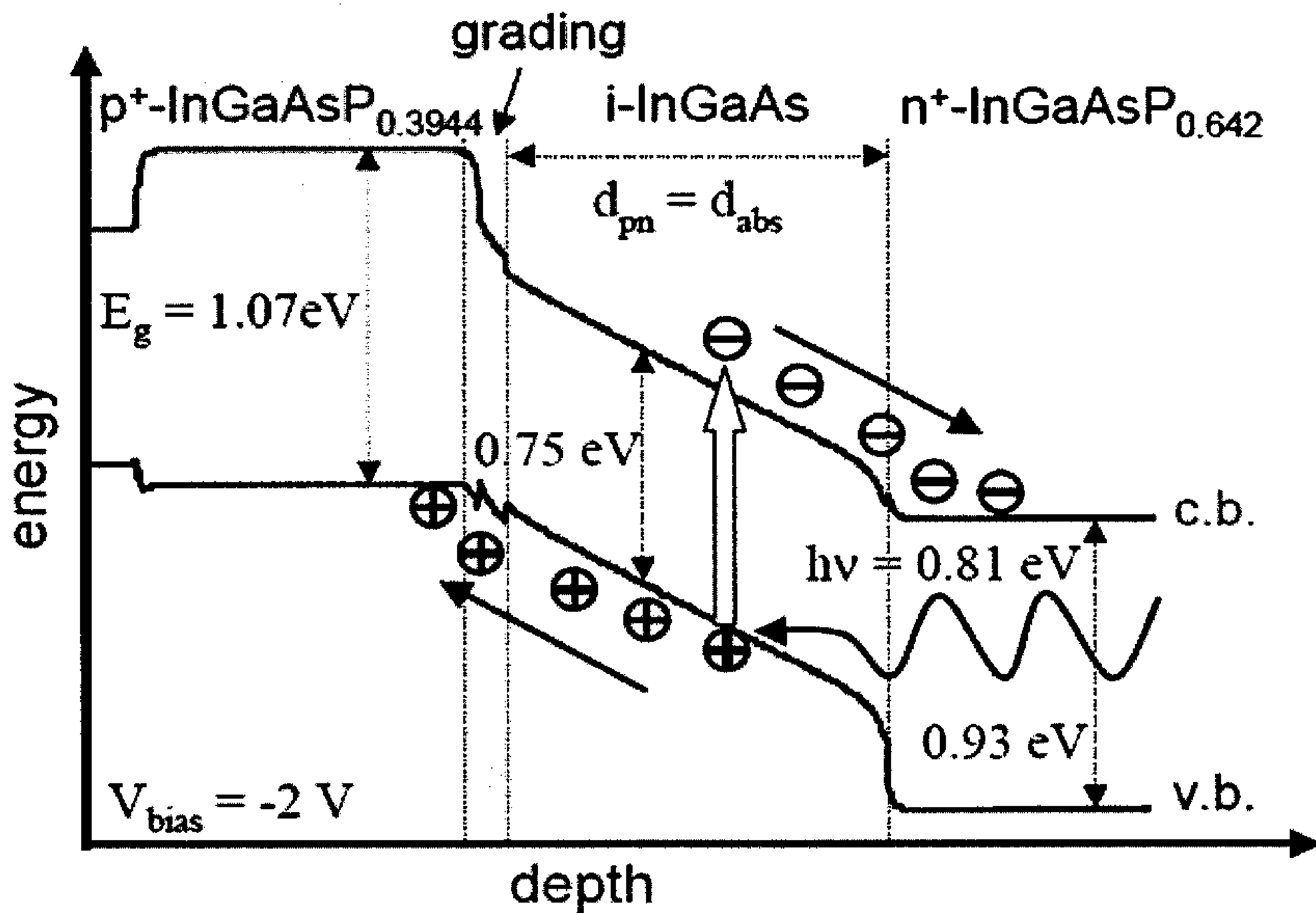
Η φωτοδίοδος μπορεί να θεωρηθεί ως μία δίθυρη διάταξη με μία οπτική είσοδο και μια ηλεκτρική έξοδο. Ως ένα γραμμικό σύστημα, χαρακτηρίζεται από την απόκριση συχνότητας. Η απόδοση συμβατικά συνοψίζεται καθορίζοντας δύο παραμέτρους: το εύρος ζώνης και την κβαντική απόδοση.

Οι εξαιρετικά γρήγορες συνδέσεις επικοινωνίας που θέλουμε να επιτύχουμε, απαιτούν φωτοδιόδους με την ικανότητα μετατροπής του οπτικού διαμορφωμένου σήματος σε ηλεκτρικό σήμα, σε υψηλές συχνότητες διαμόρφωσης. Οπότε, γίνεται κατανοητό ότι οι υψηλής ταχύτητας, κβαντικής απόδοσης και ικανότητας διαχείρισης υψηλής ισχύος φωτοδιόδοι, οι οποίες παρέχουν ηλεκτρικό σήμα εξόδου χωρίς παραμορφώσεις, είναι βασικά στοιχεία για αυτά τα συστήματα.

Η διαδικασία απορρόφησης του φωτός σε μία φωτοδίοδο για παραγωγή φωτός από ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών απαιτεί την ενέργεια του φωτονίου να είναι τουλάχιστον ίση με την ενέργεια του ενεργειακού χάσματος (E_g) του υλικού του απορροφητή (στην περίπτωσή μας είναι το InGaAS). Μόνο τότε, η διαθέσιμη ενέργεια ενός φωτονίου είναι επαρκής για να διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο από την ζώνη σθένους (Valence Band -VB) στην ζώνη αγωγιμότητας (Conduction Band -CB). Για τη μετάβαση αυτή από την μία ζώνη στην άλλη, το ανώτερο όριο του μήκους κύματος για την απορρόφηση φωτονίων δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_g[\mu\text{m}] = \frac{1.24}{E_g[\text{eV}]}$$

Μόλις ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής δημιουργηθεί, το ηλεκτρόνιο και η οπή 'ρέουν' σε αντίθετες κατευθύνσεις και δημιουργούν ένα επαγωγικό ρεύμα όσο υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. (Εικόνα 7.1)

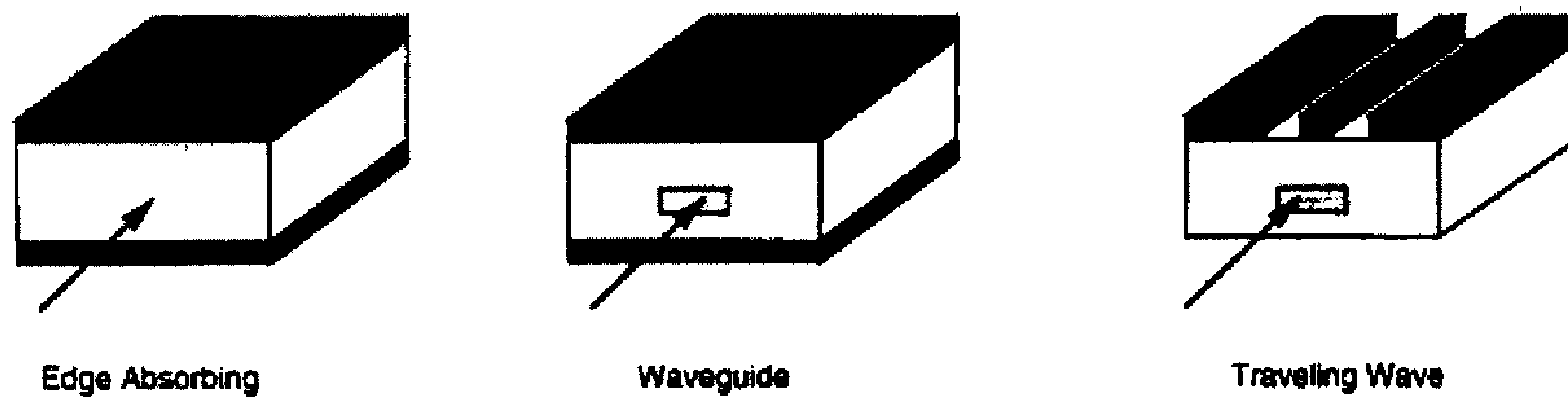


Εικόνα 7.1: Διέγερση του ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας στον απορροφητή InGaAs (διόδος p-i-n).

Andreas Beling aus Bonn, Nov 2006, *Periodic Travelling Wave Photodetectors with Serial and Parallel Optical Feed Based on InP*, Berlin, Germany, fig1.

Προκειμένου να επιτευχθεί μια υψηλής απόδοσης οπτικοηλεκτρονική μετατροπή και μεγάλο εύρος ζώνης, η φωτοδιόδος p-i-n χρησιμοποιείται ευρέως. Αποτελείται από ένα ενδογενή απορροφητή, ο οποίος βρίσκεται μεταξύ των ιδιαίτερα ενισχυμένων n+- και p+- στιβάδων, τα οποία αυξάνουν μια περιοχή φορτίων.

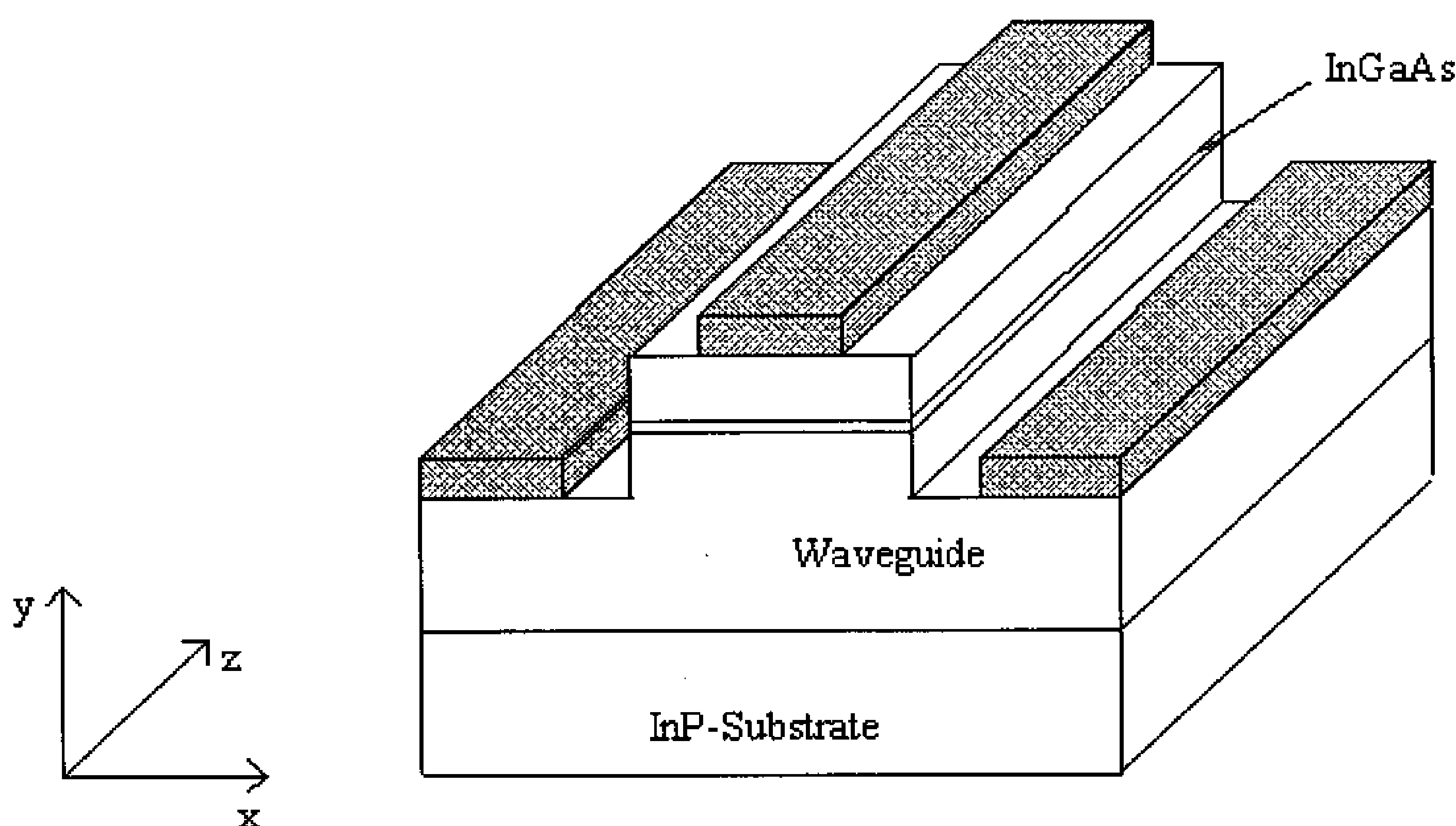
Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου στον απορροφητή (InGaAs) οι φωτοπαραγόμενοι φορείς επιταχύνονται προς τα ηλεκτρόδια και να συμβάλουν στο φωτορεύμα. Σε σύγκριση με μια απλή pn επαφή, ο σχεδιασμός αυτός παρουσιάζει χαμηλότερη χωρητικότητα διασταύρωσης (junction capacitance) και αποφεύγει την αργή διάχυση φωτορεύματος, δεδομένου ότι οι φορείς παράγονται αποκλειστικά στις υψηλά εξαντλημένες περιοχές. Ακόμη, αναφέρουμε το σκοτεινό ρεύμα, το οποίο, πα' όλο που δεν υπάρχει φωτισμός, λόγω της θερμικής παραγωγής, είναι μετρήσιμο σε κάποιο εξωτερικό κύκλωμα. Ο θόρυβος που προκαλείται λόγω σκοτεινού ρεύματος, μαζί με τον θερμικό θόρυβο, είναι αιτίες οι οποίες περιορίζουν την ευαισθησία της φωτοδιόδου.



Εικόνα 7.2: Διάφορα είδη φωτοδιόδου.

J. E. Bowers, Y. G. Wey, *High-Speed Photo detectors*, Chapter 17, Department of Electrical and Computer Engineering, Santa Barbara, California, Figure 1.

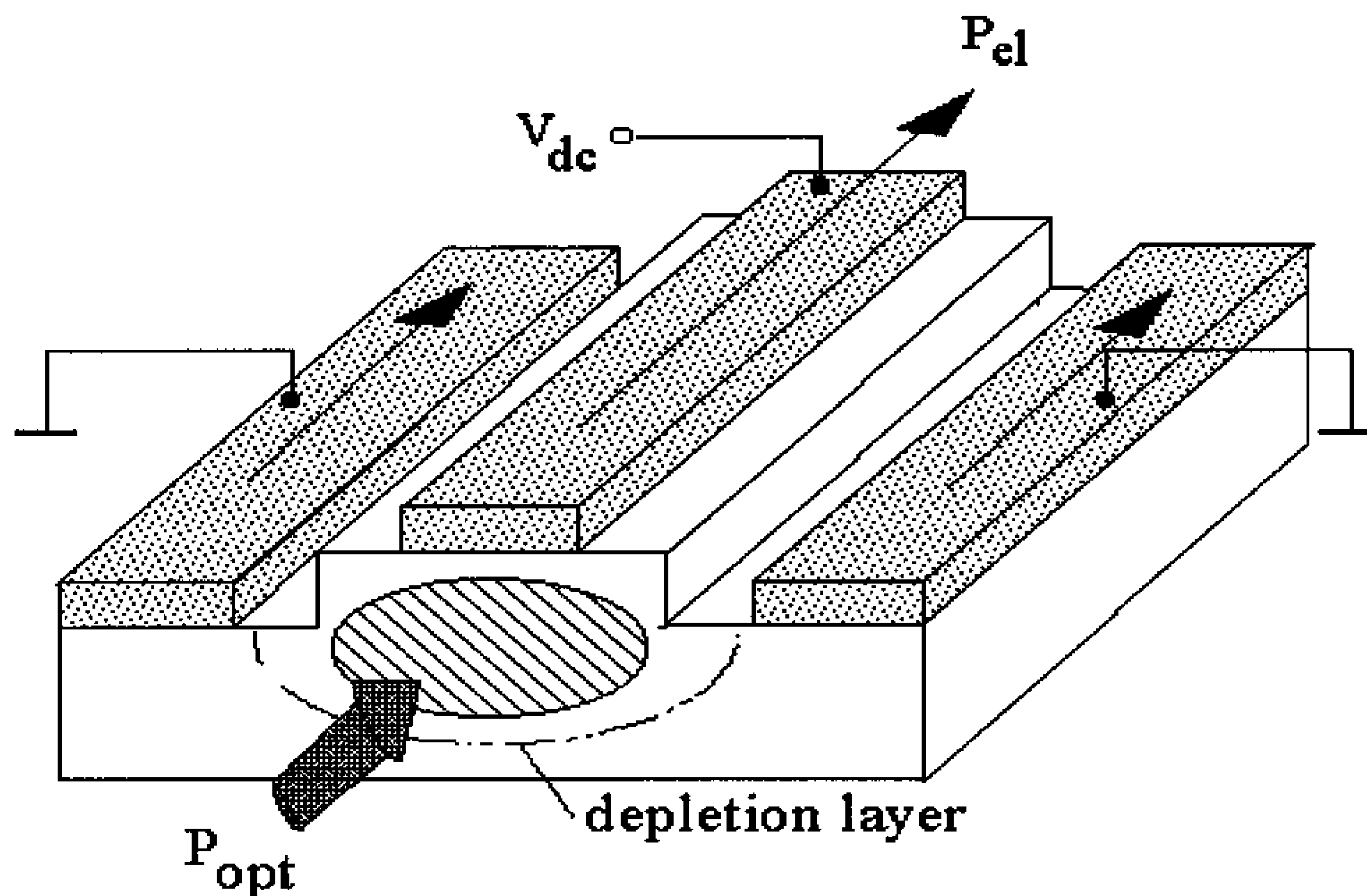
Στην εργασία μας, προκειμένου να έχουμε υψηλής ταχύτητας και ολοκληρωμένη σε κυματοδηγό-γραμμή μεταφοράς για ευρυζωνικές εφαρμογές χρησιμοποιούμε Travelling Wave PhotoDetectors (TWPD), με υλικό απορρόφησης το InGaAs και τοποθετημένη πάνω σε υπόστρωμα κατασκευασμένο από InP, καθώς οι ολοκληρωμένες πάνω σε κυματοδηγούς φωτοδιόδοι παρουσιάζουν υψηλή που αποκρισμότητα στις πολύ υψηλές συχνότητες. Ακόμη, οι συμβατικές φωτοδιόδοι, οι οποίες δέχονται την προσπίπτουσα ακτινοβολία από πάνω ή πίσω, δεν μπορούν να διαχειριστούν ικανοποιητικά ισχύς, καθώς οι φορείς παράγονται σε μικρή ποσότητα.



Εικόνα 7.3: TWPD με υλικό απορρόφησης το InGaAs και τοποθετημένη πάνω σε υπόστρωμα κατασκευασμένο από InP.

Calculation of the optical field distribution in travelling-wave photodetectors, <http://www.oe.uni-duisburg.de/Reports/jb95/mwp5.html>, Fig 1.

Η TWPD είναι επί της ουσίας ένας ηλεκτρικός και οπτικός κυματοδηγός. Εκτός από τον σχηματισμό της φωτοδιόδου, η επενδυμένη με μέταλλο, p-i-n δομή είναι ένας ηλεκτρικός κυματοδηγός παράλληλων πλακών, και τα ημιαγώγιμα στρώματα σχηματίζουν έναν επίπεδο διηλεκτρικό οπτικό κυματοδηγό.



Εικόνα 7.4: TWPD.βλέπουμε την εισερχόμενη οπτική ισχύ και την εξερχόμενη ηλεκτρική ισχύ.

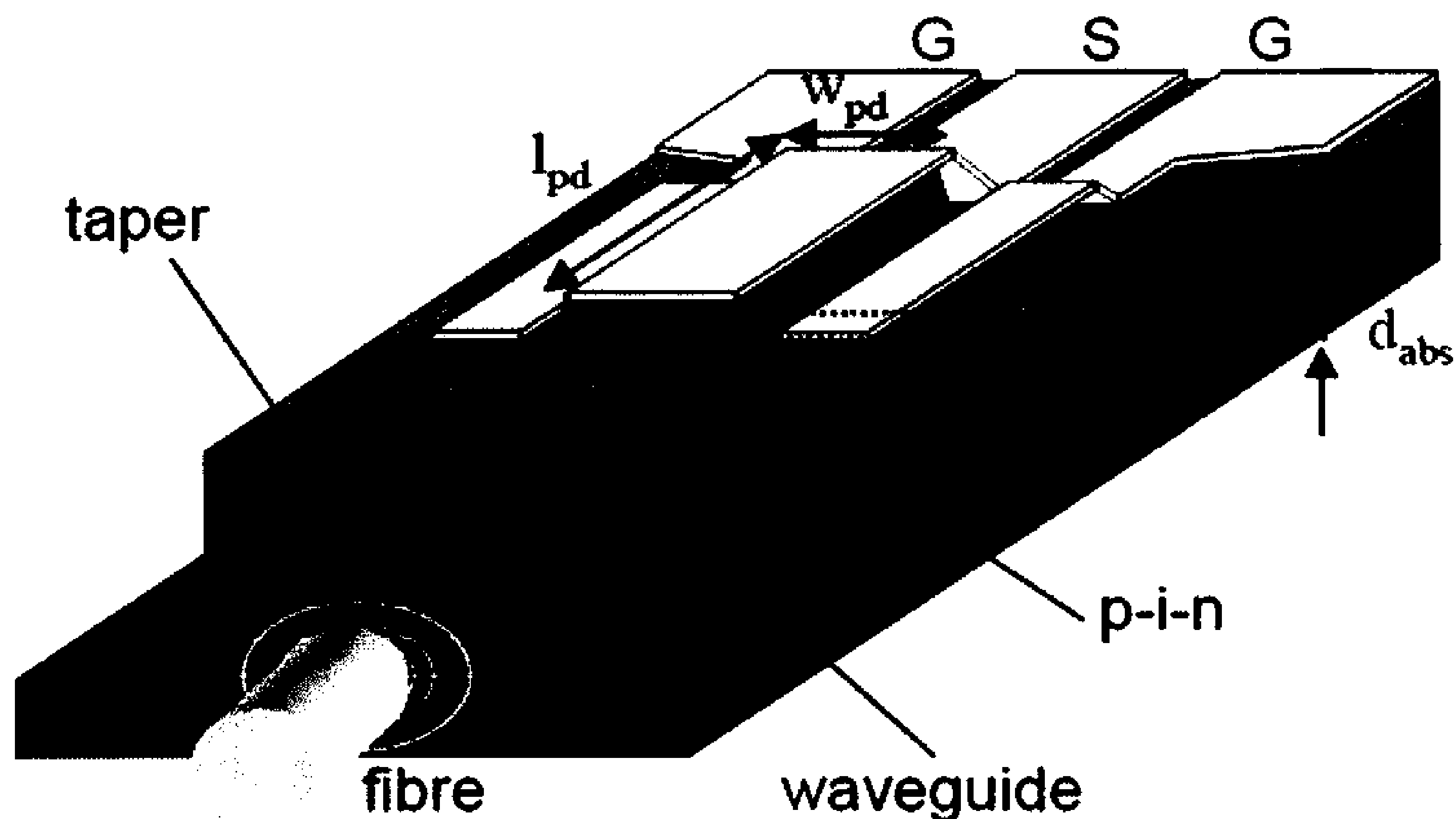
Calculation of the optical field distribution in travelling-wave photodetectors, <http://www.oe.uni-duisburg.de/Reports/jb95/mwp5.html>, Fig 4.

Οι ιδιότητες αυτών των δύο υλικών, καθώς και οι σταθερές που τα περιγράφουν, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3: Ιδιότητες των υλικών InP και InGaAs.

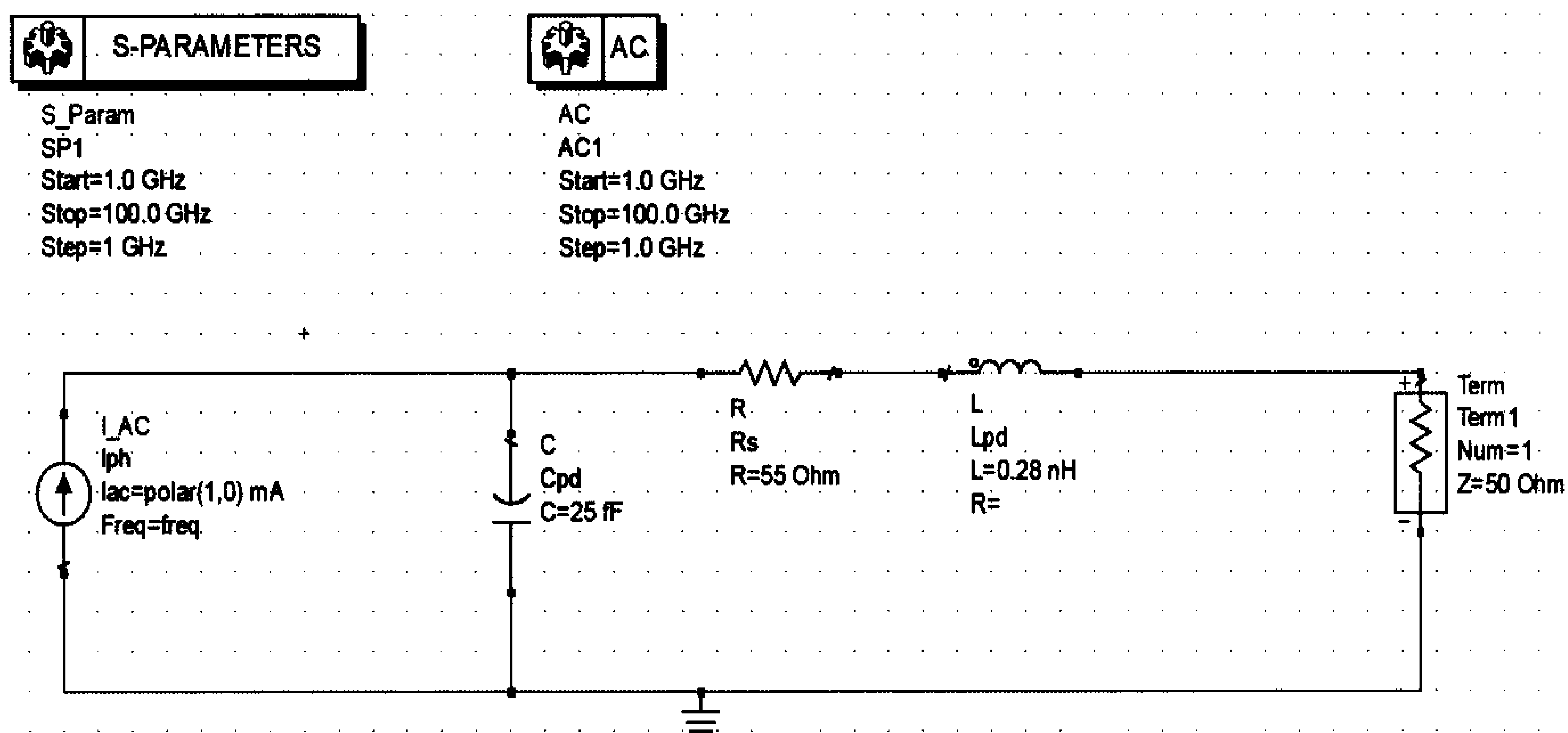
	InP	In _{0.53} Ga _{0.47} As
bandgap E _g	1.35 eV	0.75 eV
refractive index n @ 1.55 μm	3.18	3.56
static dielectric constant ε _r	12.5	13.8
absorption constant α @ 1.55 μm	→0	7000 cm ⁻¹
electron saturation velocity v _e ^{sat}	0.75 * 10 ⁷ cm/s	0.65 * 10 ⁷ cm/s
hole saturation velocity v _h ^{sat}		0.48 * 10 ⁷ cm/s
electron mobility μ _e	3500 cm ² /V s	8000 cm ² /V s
hole mobility μ _h	150 cm ² /V s	300 cm ² /V s
max. electric field E _{max}	> 400 kV/cm	250 kV/cm

Andreas Beling aus Bonn, Nov 2006, *Periodic Travelling Wave Photodetectors with Serial and Parallel Optical Feed Based on InP*, Berlin, Germany, Table 1.



Εικόνα 7.5: Η ολοκλήρωση της φωτοδιόδου σε συνεπίπεδο κυματοδηγό.
 Andreas Beling aus Bonn, Nov 2006, *Periodic Travelling Wave Photodetectors with Serial and Parallel Optical Feed Based on InP*, Berlin, Germany, fig.6.

Το ηλεκτρικό ισοδύναμο της φωτοδιόδου, σχεδιάστηκε και δοκιμάστηκε στο πρόγραμμα ADS ως εξής:



Εικόνα 7.6: Ισοδύναμο κύκλωμα της φωτοδιόδου σχεδιασμένο στο πρόγραμμα ADS.

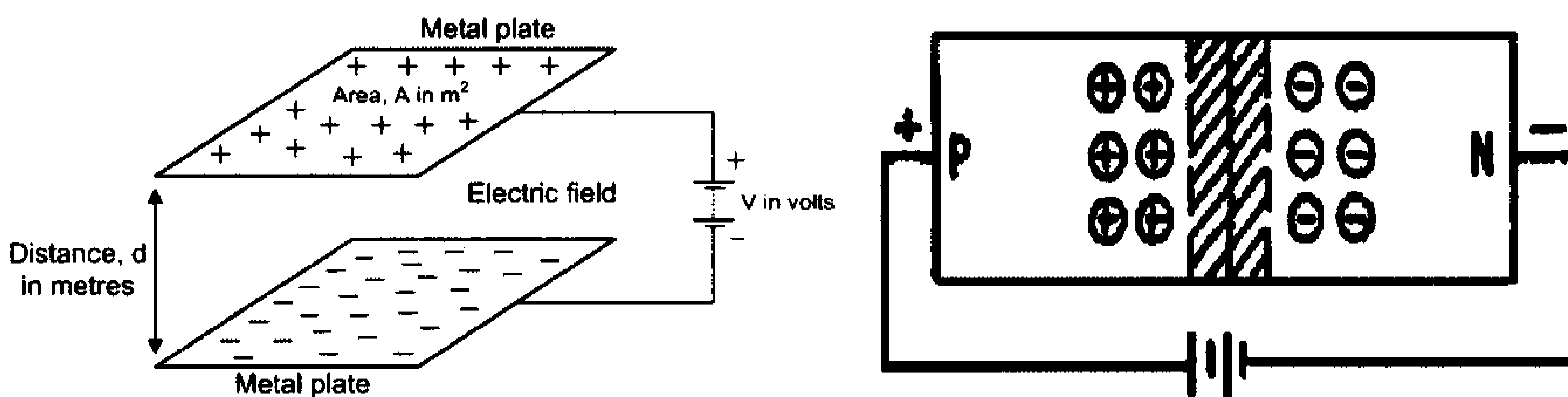
Η πηγή ρεύματος αντιπροσωπεύει το ρεύμα που παράγεται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία (φωτόνια).

Η χωρητικότητα της φωτοδιόδου (C) αντιπροσωπεύει την χωρητικότητα της p-n επαφής λόγω της κατανομής των αντίθετων φορτίων παράλληλα της περιοχής εξάντλησης, η οποία είναι αντίστοιχη με την κατανομή των αντίθετων φορτίων των δύο παράλληλων πλακών ενός πυκνωτή παράλληλα του διηλεκτρικού, καθώς τα όρια της περιοχής απογύμνωσης δρουν όπως οι παράλληλες πλάκες ενός πυκνωτή.

Η χωρητικότητα της φωτοδιόδου (C) δίνεται από τον εξής τύπο:

$$C = \frac{A \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0}{d_{pn}} + C_{st}, \text{ όπου:}$$

- A : η περιοχή εξάντλησης (η ενεργός περιοχή του υλικού)
- ϵ_r : η διηλεκτρική σταθερά του στρώματος εξάντλησης
- C_{st} : μια τυχαία παρασιτική χωρητικότητα
- d_{pn} : το πάχος της περιοχής εξάντλησης
- ϵ_0 : η σχετική διηλεκτρική σταθερά του κενού



Εικόνα 7.7: Σύγκριση ηλεκτρικών φορτίων πυκνωτή και p-n επαφής.

Η αυτεπαγωγή οφείλεται στην παρασιτική αυτεπαγωγή που εισάγουν τα bond wires, όπως είπαμε και παραπάνω, στην ενότητα με τα bond wires.

Η αυτεπαγωγή δίνεται από τον εξής τύπο:

$$L = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} * l * \left(\ln \left(2 * \frac{l}{r} - \frac{3}{4} \right) \right), \text{ όπου:}$$

- l: το μήκος των ηλεκτρικών ενώσεων (bond wires)
- r: η ακτίνα των ηλεκτρικών ενώσεων (bond wires)
- $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$: η μαγνητική επιδεκτικότητα του κενού

Η αντίσταση σειράς R_s προκύπτει από την αντίσταση των επαφών της φωτοδιόδου. Μία ιδανική φωτοδιόδος δεν έχει αντίσταση σειράς (δηλαδή δεν έχει εισάγει ούτε θορύβους, ούτε

απώλειες), καθώς η αντίσταση αυτή προσδιορίζει το ρεύμα θορύβου στη φωτοδίοδο, χωρίς τροφοδοσία (λειτουργία φωτοβολταϊκού). Πρακτικά οι τιμές της R_s κυμαίνονται από 10Ω μέχρι 1000Ω . Η R_s επηρεάζει επίσης την απώλεια επιστροφών στη συχνότητα συντονισμού (η αύξηση της αντίστασης συνεπάγεται αύξηση απωλειών επιστροφών) και το επιθυμητό εύρος ζώνης (BW).

Η αντίσταση τερματισμού R_{term} χρησιμοποιείται σαν στοιχείο τερματισμού εξόδου, για τον προσδιορισμό των S-παραμέτρων, τη χρησιμότητα των οποίων θα δούμε λίγο παρακάτω. Επειδή η πηγή ρεύματος παίζει το ρόλο του στοιχείου τερματισμού εισόδου, δεν χρειάζεται να βάλουμε αντίσταση τερματισμού στην είσοδο (σε αντίθετη περίπτωση θα ήταν αναγκαία η ύπαρξη της τερματικής αντίστασης και στην είσοδο για τον προσδιορισμό των S-παραμέτρων). Η τιμή της είναι φυσικά 50Ω (τιμή αντίστασης προσαρμογής).

Για το InGaAs, που χρησιμοποιούμε στην φωτοδίοδο έχουμε:

- $A=28\ \mu\text{m}^2$
- $d_{pn}=200\ \text{nm}$
- $C_{st}=8\ \text{fF}$
- $\epsilon_r=13,8$
- $\epsilon_0=8.85 * 10^{-12}$

Για τα bond wires που χρησιμοποιούνται στη συχνότητα των 60 GHz έχουμε:

- $l=450\ \mu\text{m}$
- $r=12,25\ \mu\text{m}$

Οπότε έχουμε:

$$C = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 13.8 \cdot 28 \cdot 10^{-12}}{200 \cdot 10^{-9}} = \frac{3419.64 \cdot 10^{-24}}{200 \cdot 10^{-9}} = 17.0982 \cdot 10^{-15} \text{F} = \underline{17\ \text{fF}}$$

$$C = 17\ \text{fF} + 8\ \text{fF} \quad \Leftrightarrow$$

$$\underline{C = 25\ \text{fF}}$$

$$L = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} * l * \left(\ln \left(2 * \frac{l}{r} - \frac{3}{4} \right) \right) = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} 450 * 10^{-6} \left(\ln \left(2 \frac{450 \cdot 10^{-6}}{12.25 \cdot 10^{-6}} - \frac{3}{4} \right) \right) = 3857.94 \cdot 10^{-13} \quad \Leftrightarrow$$

$$\underline{L = 0.38\ \text{nH}}$$

Στο μοντέλο προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα ADS παρατηρούμε μια μικρή διαφορά στην τιμή του πηνίου από το θεωρητικό λόγω της ρύθμισης (tuning) που χρειάζεται

Στο μοντέλο προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα ADS παρατηρούμε μια μικρή διαφορά στην τιμή του πηνίου από το θεωρητικό λόγω της ρύθμισης (tuning) που χρειάζεται προκειμένου να αυξηθεί η προσαρμογή μεταξύ θεωρητικού και πρακτικού μοντέλου. Το Tuning χρησιμοποιείται για να τροποποιήσει ελαφρώς οποιαδήποτε παράμετρο σε ένα κύκλωμα που θα βοηθήσει στη βελτίωση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης όπως για παράδειγμα, S-parameters, τιμή θορύβου (noise figure), ή οποιοδήποτε άλλο αποτέλεσμα. Αυτό συμβαίνει επειδή η αυτεπαγωγή είναι λίγο υψηλότερη λόγω της ζεύξης μεταξύ των bond wires και γραμμής μεταφοράς.

$R_s = 55 \Omega$ για BW=19 GHz και για return loss=26.393 db.

Η τερματική αντίσταση $Z_0 = 50 \Omega$ εισάγεται για λόγους προσαρμογής και για να εξάγουμε τις S - παραμέτρους.

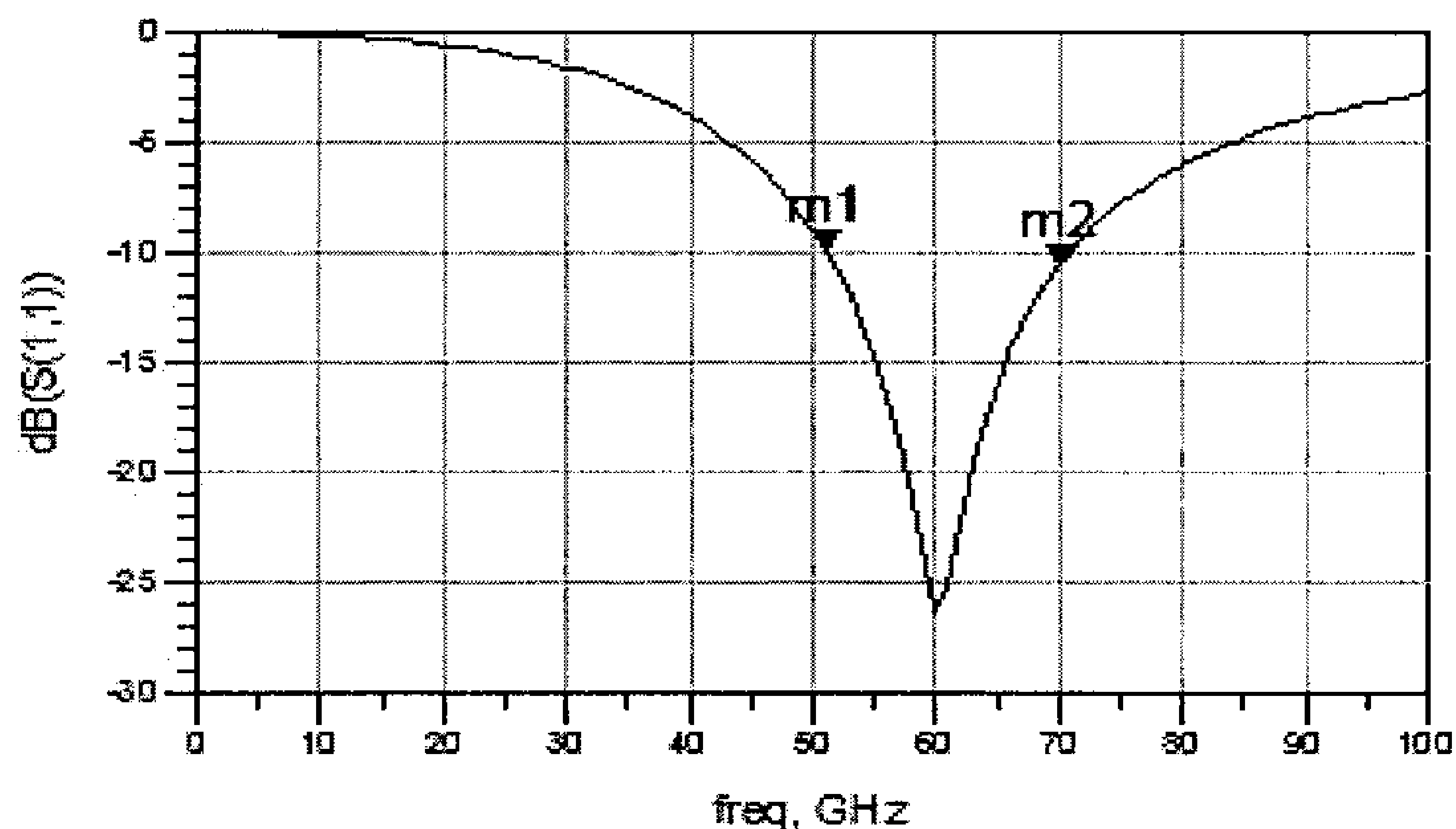
Απώλεια επιστροφών

Ένα μέτρο για να ελέγξουμε την αποδοτικότητα της φωτοδιόδου στη συχνότητα που επιθυμούμε να λειτουργεί (συχνότητα συντονισμού), είναι η παράμετρος της απώλειας επιστροφών, που είναι επί της ουσίας η S-παράμετρος S11, από την θεωρία των δίθυρων.

Στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, η απώλεια επιστροφών είναι η απώλεια της ισχύος του σήματος που προκύπτει από την ανάκλαση που προκαλείται σε μία ασυνέχεια μίας γραμμής μετάδοσης ή οπτικής ίνας. Αυτή η ασυνέχεια μπορεί να είναι μια αναντιστοιχία με το φορτίο τερματισμού ή μία συσκευή ή στοιχείο που παρεμβάλλεται στη γραμμή. Εκφράζεται ως αναλογία σε decibels (dB). Είναι ένα μέτρο του πόσο καλά οι συσκευές ή οι γραμμές είναι προσαρμοσμένες. Μία προσαρμογή είναι καλή, αν η απώλεια επιστροφής είναι χαμηλή, καθώς δεν έχουμε πολλές ανεπιθύμητες ανακλάσεις. Η απώλεια επιστροφών χρησιμοποιείται προτιμότερα από το SWR, επειδή έχει καλύτερη ανάλυση για μικρές τιμές του ανακλώμενου κύματος. Αφού σχεδιάσουμε το κύκλωμα της Εικόνας 7.6, μετά το πέρας της προσομοίωσης λαμβάνουμε το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 4.8).

m2
freq=70.00 GHz
dB(S(1,1))= -10.552

m1
freq=51.00 GHz
dB(S(1,1))= -9.890



Εικόνα 7.8: Διάγραμμα του S_{11} εκφρασμένο σε db συναρτήσει της συχνότητας.

Παρατηρούμε ότι η απώλεια επιστροφών είναι χαμηλή (-26.393 db) στη συχνότητα συντονισμού.

8. Διαμόρφωση Ορθογώνιας Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM)

Προκείμενου να αξιοποιήσουμε αποτελεσματικά τις επιθυμητές υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που μπορούμε να επιτεύξουμε στην ζώνη των 60 GHz με την χρήση των RoF δικτύων, χρειάζεται και η σωστή διαμόρφωση, με την οποία θα μεταδίδονται και θα λαμβάνονται τα δεδομένα επιτυχώς. Ακόμη, είναι φανερό ότι για να υπερκαλυφθούν οι απώλειες κατά τη μετάδοση του σήματος στο κανάλι, που όπως είπαμε ειδικά στην συχνότητα των 60 GHz είναι πολύ μεγάλες, χρειαζόμαστε σύστημα πολλαπλών φερόντων καθώς το απλό φέρον κρίνεται μη ικανοποιητικό. Επίσης, σε ένα ιδανικό ραδιοκανάλι, το λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από ένα μόνο σήμα άμεσης διαδρομής και το οποίο αποτελεί μια τέλεια ανασυγκρότηση του μεταδιδόμενου σήματος. Ωστόσο, ιδανικό κανάλι δεν υπάρχει σε πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος και έτσι, σε ένα πραγματικό κανάλι, το σήμα τροποποιείται κατά τη μετάδοση του στον χώρο. Το λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από έναν συνδυασμό των εξασθενημένων, ανακλώμενων, διαθλώμενων και περιθλώμενων αντίγραφων του μεταδιδόμενου σήματος.

Ακόμη, το κανάλι προσθέτει θόρυβο στο σήμα (πχ AWGN) και μπορεί να προκαλέσει μια μετατόπιση της συχνότητας του φέροντος, εάν ο πομπός ή ο δέκτης κινείται (φαινόμενο Doppler). Επομένως, η απόδοση ενός συστήματος ραδιοεπικοινωνίας εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά του ραδιοδιαύλου.

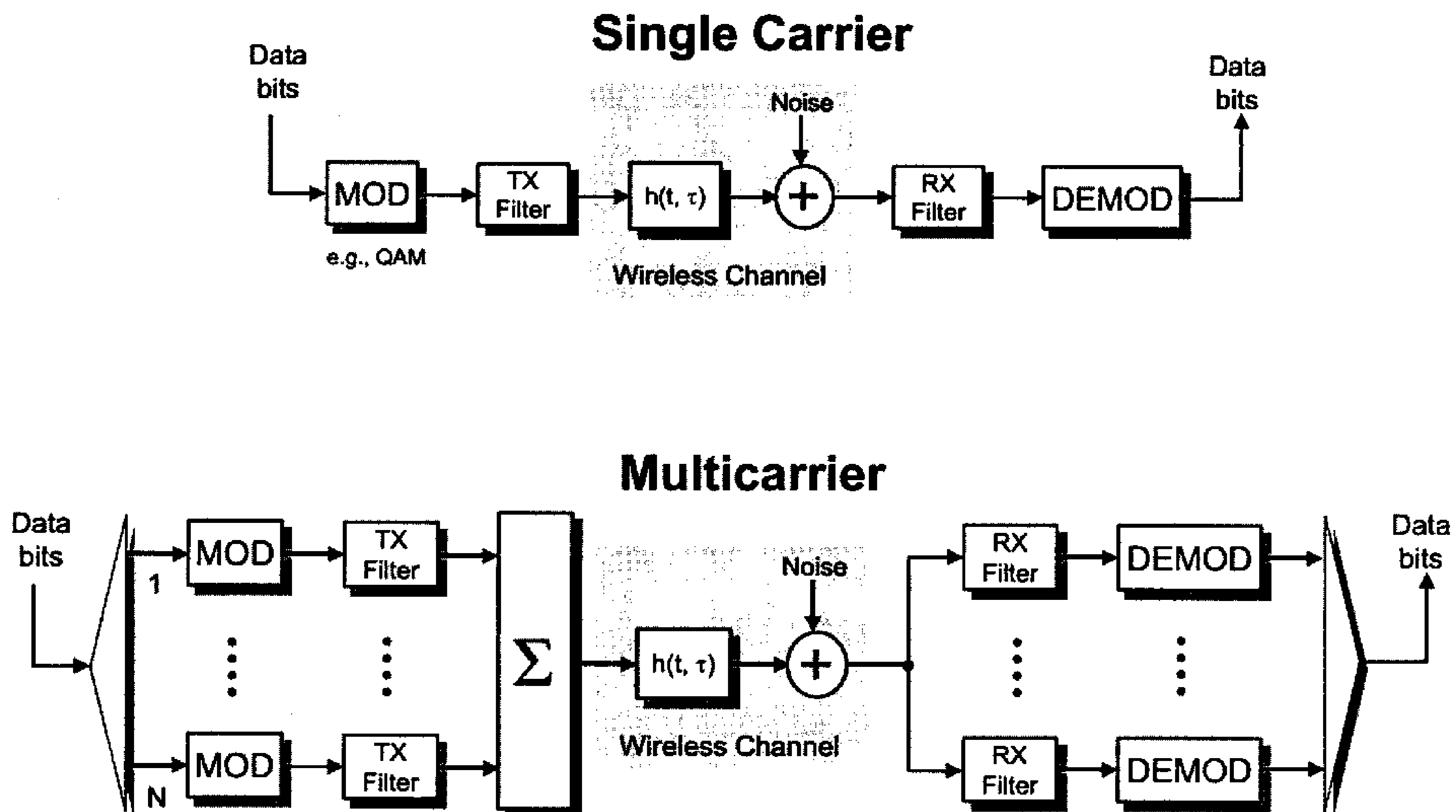
Οπότε, η μετάδοση της πληροφορίας μέσω πολλαπλών φερόντων γίνεται με τη χρησιμοποίηση της πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiplexing - FDM), και συγκεκριμένα μιας τεχνικής, που αποτελεί υποκατηγορία της FDM, την Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM), στην οποία κάθε φέρον είναι ορθογώνιο σε σχέση με όλα τα άλλα φέροντα. Η OFDM μπορεί να θεωρηθεί είτε ως τεχνική διαμόρφωσης είτε ως τεχνική πολυπλεξίας. Για να γίνει κατανοητή η αναγκαιότητα της χρήσης της OFDM, θα απαντήσουμε σε μερικά ερωτήματα, που πιθανόν να δημιουργήθηκαν με την ανάγνωση αυτής της παραγράφου.

- Γιατί χρησιμοποιούμε σύστημα πολλαπλών φερόντων?

Για ένα δεδομένο ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας, αυξάνοντας τον αριθμό φερόντων από ένα σε πολλά παράλληλα μεταδιδόμενα φέροντα, μειώνεται ο ρυθμός πληροφορίας που κάθε μεμονωμένο φέρον θα πρέπει να μεταφέρει, οπότε επιμηκύνεται η περίοδος συμβόλων. Αυτό σημαίνει ότι κάθε σύμβολο επηρεάζεται σε μικρότερο ποσοστό από τυχόν χρονική διασπορά, και έτσι και από την ενδοσυμβολική παρεμβολή (InterSymbol Interference-ISI), από ότι ένα σύστημα μονού φέροντος, του οποίου οι χρονικές αποκρίσεις των συμβόλων επικαλύπτονται και συνεπώς προκαλείται ενδοσυμβολική παρεμβολή.

Αυτό εξηγείται και από το γεγονός ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό της πληροφορίας μεταφέρεται από κάθε φέρον και με αυτή τη μείωση του ρυθμού δυαδικών ψηφίων ανά φέρον η επιρροή της ενδοσυμβολικής παρεμβολής μειώνεται σημαντικά. Σε ένα σύστημα μονού φέροντος, οι διαλείψεις ή παρεμβολές μπορούν να προκαλέσουν αποτυχία της σύνδεσης, αλλά σε ένα σύστημα πολλαπλών φερόντων, μόνο ένα μικρό ποσοστό των υποφορέων επηρεάζεται. Τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κωδικοποίηση διόρθωσης σφάλματος για την διόρθωση των εσφαλμένων

υποφορέων, και να έχουμε επιτυχή λήψη της πληροφορίας. Με αυτό τον τρόπο, όπως γίνεται φανερό, η μετάδοση πολλαπλών φερόντων μας επιτρέπει χαμηλότερη προσπάθεια εξισορρόπησης και υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, οι οποίοι μάλιστα μπορεί να αυξηθούν με την περαιτέρω αύξηση του αριθμού των φερόντων, δεδομένων, καθιστώντάς την ιδανική για την εφαρμογή μας.



Εικόνα 8.1: Συστήματα μονού και πολλαπλών φερόντων.

L.D. Kabulepa, *OFDM Basics for Wireless Communications*, VLSI_Comms WS03-04/Generalities, Darmstadt University of Technology, σελ.2.

- Γιατί χρησιμοποιούμε παράλληλη μετάδοση?

Στη σειριακή μετάδοση, τα σύμβολα διαβιβάζονται διαδοχικά, με το φάσμα συχνότητας κάθε συμβόλου πληροφορίας να επιτρέπεται να καταλαμβάνει ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Στην παράλληλη μετάδοση, η συνολική ζώνη συχνότητας των σημάτων διαιρείται σε μη επικαλυπτόμενα κανάλια. Κάθε κανάλι είναι διαμορφωμένο με ένα ξεχωριστό σύμβολο και έπειτα τα κανάλια πολυπλέκονται στη συχνότητα. Τα διάφορα σύμβολα διαβιβάζονται έτσι συγχρόνως, πράγμα το οποίο προσφέρει τη δυνατότητα αντιμετώπισης πολλών από τα προβλήματα που εμφανίζονται στη σειριακή μετάδοση. Η παράλληλη μετάδοση συνεπάγεται ότι η ροή δεδομένων εισόδου διαιρείται σε N υποφέροντα και η διάρκεια συμβόλου γίνεται N φορές μικρότερη, γεγονός που μειώνει επίσης τη σχετική καθυστέρηση πολλαπλών διαδρομών διάδοσης (multipath delay spread), σε σχέση με το χρόνο συμβόλου, επειδή η διάρκεια συμβόλου αυξάνεται για χαμηλότερου ρυθμού παράλληλα φέροντα.

- Τι είναι η FDM?

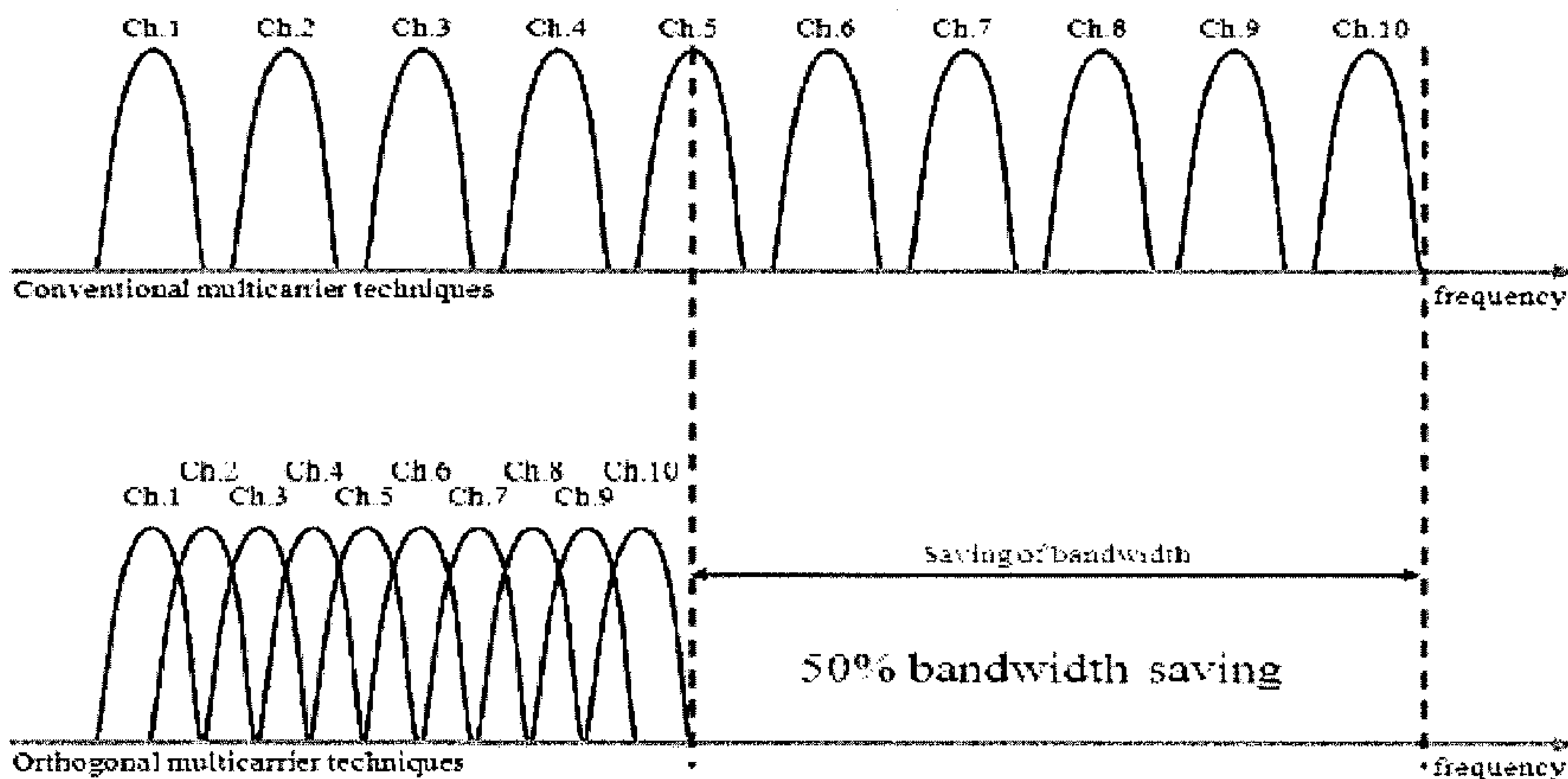
Είναι μία τεχνική παράλληλης μετάδοσης, όπου μία υψηλού ρυθμού σειριακή ροή πληροφορίας χωρίζεται σε ένα σύνολο χαμηλού ρυθμού ροών, που η καθεμία έχει διαμορφωθεί από ένα μοναδικό φέρον. Στην FDM, τα φέροντα χωρίζονται κατά διαστήματα, σε συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους, τέτοια ώστε τα σήματα να μπορούν να ληφθούν χρησιμοποιώντας συμβατικά φίλτρα και αποδιαμορφωτές. Σε αυτού του είδους την διαμόρφωση, εισάγονται προστατευτικές ζώνες μεταξύ των διαφορετικών φερόντων στο πεδίο των συχνοτήτων, προκειμένου να μην έχουμε επικαλύψεις, η οποία οδηγεί όμως σε μείωση της αποτελεσματικότητας του φάσματος.

- Τι είναι η OFDM?

Είναι μία τεχνική FDM, όπου το διάστημα μεταξύ των φερόντων επιλέγεται έτσι ώστε κάθε φέρον να είναι ορθογώνιο σε σχέση με τα άλλα φέροντα. Τα ορθογώνια, επικαλυπτόμενα, σήματα μπορούν να διαχωριστούν στο δέκτη από τεχνικές συσχετισμού και ως εκ τούτου μπορεί να καταπολεμηθεί η ενδοσυμβολική παρεμβολή μεταξύ των καναλιών. Ορθογωνιότητα μπορεί να επιτευχθεί με προσεκτική επιλογή των διαστημάτων μεταξύ των φερόντων, και φυσικά χρησιμοποιώντας τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier (Discrete Fourier Transform -DFT), όπως θα δούμε παρακάτω. Ένας από τους κύριους λόγους χρησιμοποίησης της OFDM είναι η αύξηση της ανθεκτικότητας ενάντια στην εξασθένηση συχνότητας ή στις παρεμβολές στενής ζώνης (narrowband interference).

- Γιατί χρησιμοποιούμε ορθογώνια φέροντα?

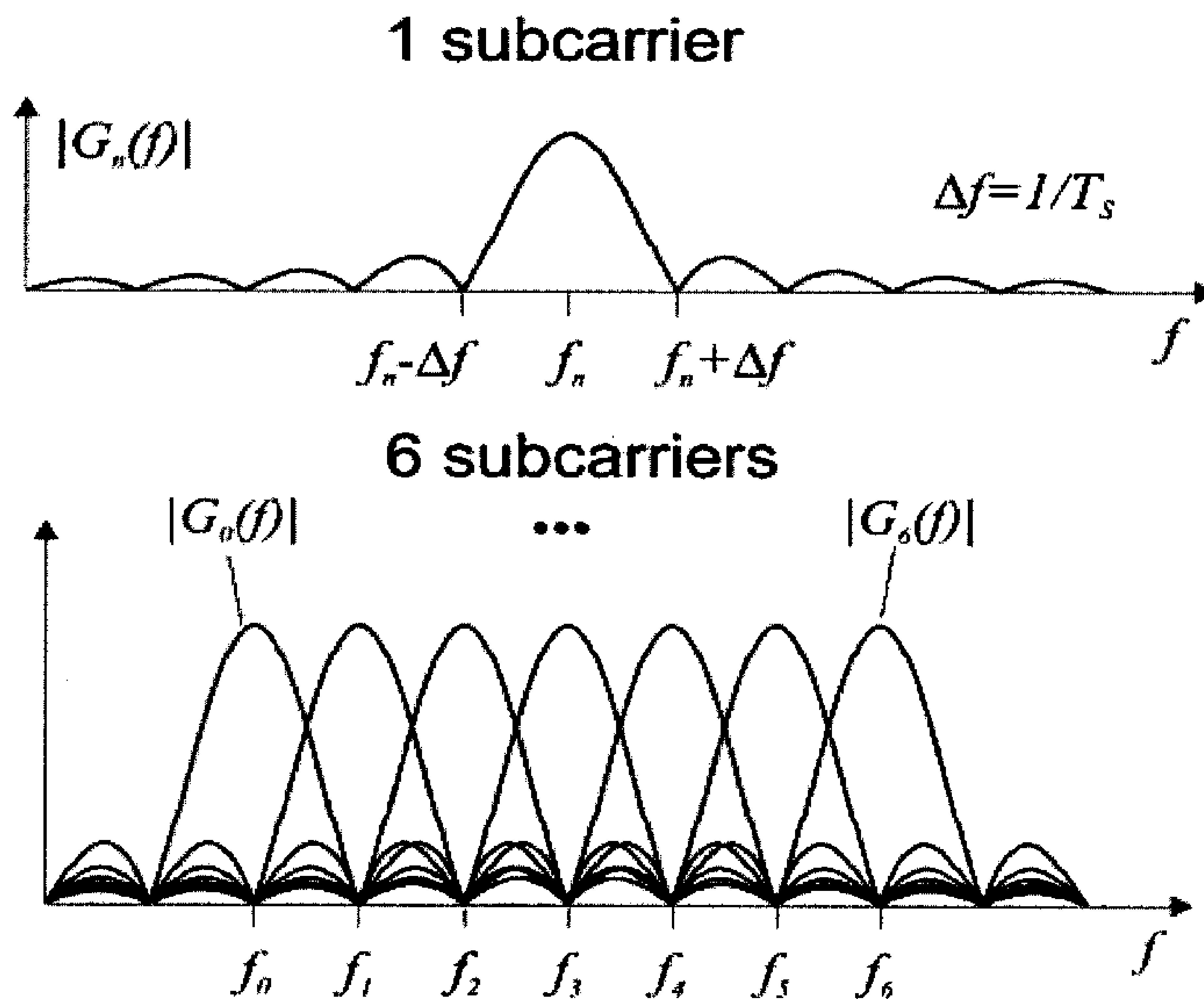
Τα φέροντα σε ένα σήμα OFDM ταξινομούνται έτσι ώστε οι πλευρικές ζώνες των μεμονωμένων φερόντων να επικαλύπτονται, αλλά παρόλο αυτά τα σήματα να λαμβάνονται χωρίς την παρενόχληση κάποιου από τα γειτονικά φέροντα. Για να αξιοποιήσουμε την επικαλυπτόμενη τεχνική διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων αποτελεσματικά, πρέπει να μειωθούν οι αλληλοπαρεμβολές μεταξύ των φερόντων (crosstalk), πράγμα που σημαίνει ότι θέλουμε ορθογωνιότητα μεταξύ των διαφόρων διαμορφωμένων φερόντων. Η λέξη ορθογωνιότητα υποδεικνύει ότι υπάρχει μια ακριβής μαθηματική σχέση μεταξύ των συχνοτήτων των φερόντων. Η εικόνα 8.2 απεικονίζει τη διαφορά μεταξύ της συμβατικής μη επικαλυπτόμενης τεχνικής (nonoverlapping) και της επικαλυπτόμενης τεχνικής διαμόρφωσης. Όπως φαίνεται, μπορεί να φαίνεται καλή η αποφυγή φασματικής επικάλυψης των καναλιών για την εξάλειψη των παρεμβολών καναλιού, αλλά αυτό οδηγεί σε μη αποδοτική χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Έτσι, χρησιμοποιώντας την τεχνική διαμόρφωσης της επικάλυψης πολλαπλών φερόντων, εξοικονομούμε σχεδόν το 50% του εύρους ζώνης.



Εικόνα 8.2: Σύγκριση εύρους ζώνης FDM και OFDM.

The principles of OFDM, <http://dc309.4shared.com/doc/z0pw-xx3/preview.html>.

Ο δέκτης αποδιαμορφώνει την πληροφορία, μεταφράζοντας κάθε φέρον. Το προκύπτον σήμα ‘ενσωματώνεται’ σε μία περίοδο ενός συμβόλου για την ανάκτηση των μη επεξεργασμένων δεδομένων (raw data). Εάν τα άλλα φέροντα “κτυπούν” σε συχνότητες που, στη χρονική περιοχή (time domain), έχουν ακέραιο αριθμό κύκλων στην περίοδο συμβόλου (τ), τα αποτελέσματα της διαδικασίας ολοκλήρωσης (ενσωμάτωσης) οδηγούν σε μηδενικό αποτέλεσμα για όλα αυτά τα φέροντα. Κατά συνέπεια τα φέροντα είναι γραμμικά ανεξάρτητα (δηλαδή ορθογώνια) εάν το διάστημα φερόντων είναι πολλαπλάσιο του $1/\tau$ ($\Delta f = k / \tau$, όπου k φυσικός αριθμός). Επομένως, αν χρησιμοποιήσουμε DFT στο δέκτη, όπως θα δούμε παρακάτω, και υπολογίσουμε τις τιμές συσχέτισης (correlation values) με το κέντρο της συχνότητας κάθε υποφέρουσας, ξαναβρίσκουμε τα μεταδιδόμενα δεδομένα χωρίς αλληλοπαρεμβολές. Όπως βλέπουμε άλλωστε και στην εικόνα 8.3, στο μέγιστο κάθε φερόντος, όλα τα άλλα φέροντα έχουν μηδενικά, έτσι, κάθε φέρον μπορεί να αποδιαμορφωθεί ανεξάρτητα από τα άλλα. Επιτυγχάνεται έτσι υψηλή φασματική απόδοση, καθώς τα φάσματα των υποφερόντων επικαλύπτονται, ενώ παράλληλα αποφεύγεται η μεταξύ των παρεμβολή (ενδοπαρεμβολή φερόντων).



Εικόνα 8.3: Όταν υπάρχει μέγιστο ενός φέροντος, αντιστοιχίζεται σε μηδενικά άλλων φερόντων, έτσι, κάθε φέρον μπορεί να αποδιαμορφωθεί ανεξάρτητα από τα άλλα.

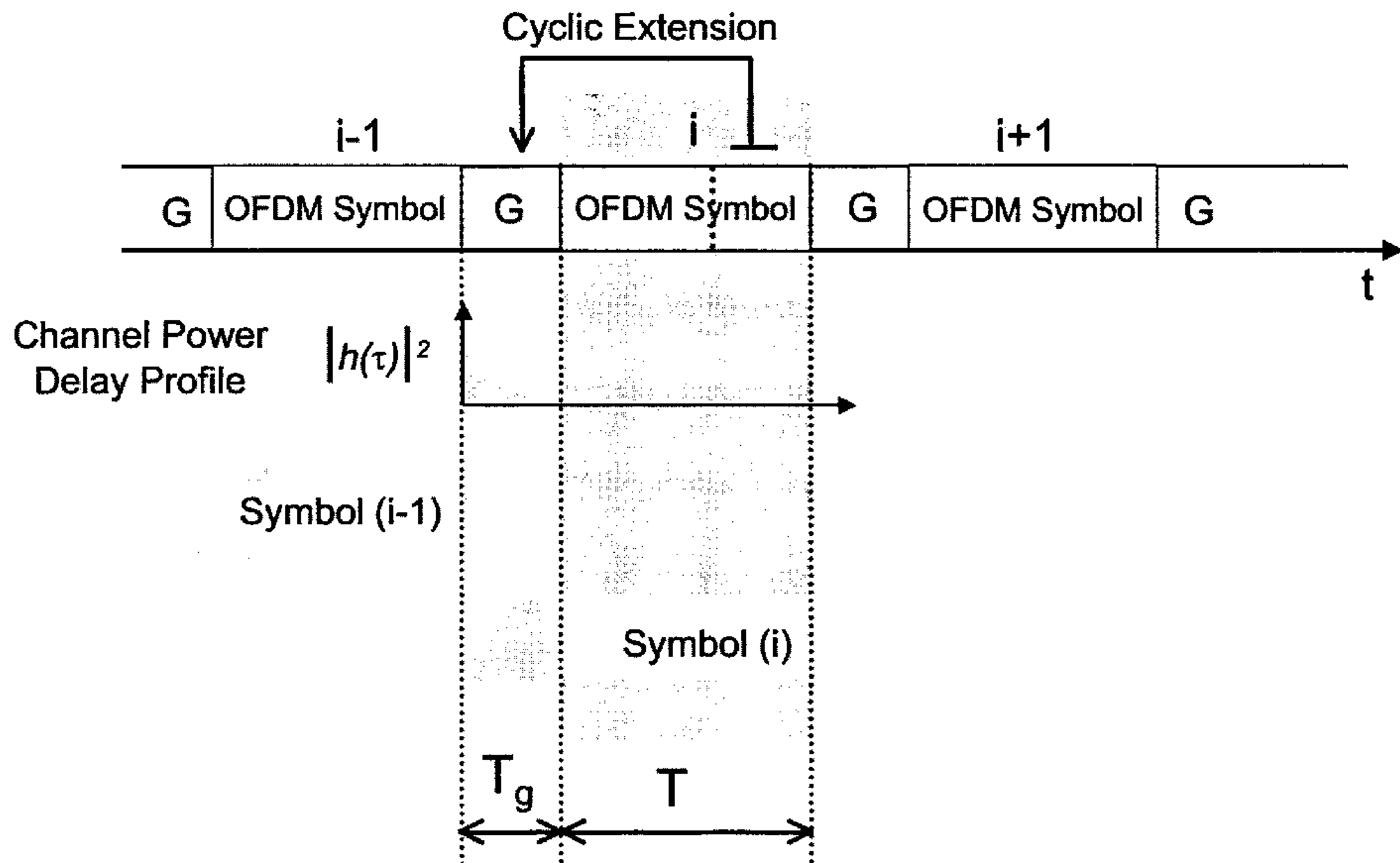
L.D. Kabulepa, *OFDM Basics for Wireless Communications*, VLSI Comms WS03-04/Generalities, Darmstadt University of Technology, σελ.9.

- Γιατί χρησιμοποιούμε διάστημα προστασίας?

Ένας τρόπος για να ελαχιστοποιήσουμε ακόμη περισσότερο την ενδοσυμβολική παρεμβολή λόγω της καθυστέρησης πολλαπλών διαδρομών διάδοσης είναι η δημιουργία ενός κυκλικού διαστήματος προστασίας (GI—Guard Interval), όπου κάθε σύμβολο OFDM προηγείται ή ακολουθείται κατ' περιοδική επέκταση από ένα κομμάτι του σήματος. Η συνολική διάρκεια συμβόλων είναι τώρα $T_{\text{total}} = T_g + T$, όπου το T_g είναι το διάστημα προστασίας και το T είναι η ωφέλιμη διάρκεια των συμβόλων. Όταν το διάστημα προστασίας είναι μεγαλύτερο από την καθυστέρηση πολλαπλών διαδρομών διάδοσης τ , η ενδοσυμβολική παρεμβολή μπορεί να εξουδετερωθεί (Εικόνα 8.4). Η διασυμβολική παρεμβολή, λοιπόν, έχει σχεδόν εξαλειφθεί με την εισαγωγή ενός χρόνου φύλαξης για κάθε σύμβολο OFDM. Ο χρόνος φύλαξης έχει επιλεγεί μεγαλύτερος από την αναμενόμενη καθυστέρηση διάδοσης τ (delay spread) έτσι ώστε οι πολύδρομες συνιστώσες από ένα σύμβολο να μην μπορούν να παρέμβουν στο επόμενο σύμβολο. Στη συνέχεια, το σύμβολο OFDM επεκτείνεται κυκλικά στο χρόνο φύλαξης. Επιπλέον, μειώνεται και η ευαισθησία του συστήματος στην καθυστέρηση.

Εισάγοντας κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix) το οποίο αποτελεί μια ειδική περίπτωση διαστήματος προστασίας, μπορεί να αποφευχθεί η ενδοσυμβολική παρεμβολή και να διατηρηθεί η ορθογωνιότητα των φερόντων σε ένα ασύρματο κανάλι, που παρουσιάζει διαλείψεις, καθώς τα

κανάλια μπορούν να χωριστούν εντελώς από το FFT στο δέκτη όταν δεν υπάρχει ενδοσυμβολική παρεμβολή (ISI) και η παρεμβολή μεταξύ των φερόντων (ICI) που εισάγεται λόγω της παραμόρφωσης από τα κανάλια μετάδοσης. Βέβαια, η εισαγωγή διαστήματος προστασίας γίνεται εις βάρος της ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, καθώς αυξάνουμε τον όγκο των δεδομένων και τον χρόνο κάθε συμβόλου.



Εικόνα 8.4: Παρεμβολές που εισάγονται από το κανάλι ακυρώνονται εισάγοντας μια κυκλική προέκταση με $T_g > \tau_{max}$.

L.D. Kabulepa, *OFDM Basics for Wireless Communications*, VLSI_Comms WS03-04/Generalities, Darmstadt University of Technology, σελ.11.

Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, τα αντίγραφα καθυστέρησης (delay replicas) του συμβόλου OFDM έχουν πάντα έναν ακέραιο αριθμό κύκλων εντός του διαστήματος FFT, εφ' όσον η καθυστέρηση είναι μικρότερη από το χρόνο φύλαξης. Σήματα πολλαπλής διαδρομής με καθυστερήσεις μικρότερες από το χρόνο φύλαξης δεν μπορούν να προκαλέσουν πρόβλημα των παρεμβολών φερόντων ICI. Εάν η καθυστέρηση των σημάτων πολλαπλών διαδρομών υπερβαίνει το χρόνο φύλαξης κατά ένα μικρό τμήμα του διαστήματος FFT (για παράδειγμα 3%), τα υποφέροντα δεν είναι ορθογώνια πια, αλλά η παρεμβολή είναι ακόμα αρκετά μικρή ώστε να ληφθεί ένα λογικό διάγραμμα αστερισμού στον δέκτη. Θεωρώντας ότι η καθυστέρηση υπερβαίνει τον χρόνο φύλαξης του σήματος πολλαπλών διαδρομών κατά 10% του διαστήματος FFT, ο αστερισμός επηρεάζεται σοβαρά και αποκτάται ένα μεγάλο ποσοστό σφάλματος.

- Γιατί χρησιμοποιούμε DFT?

Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform – DFT) και ο αντίστροφος του, IDFT (Inverse), αποτελούν μια παραλλαγή του μετασχηματισμού Fourier στον οποίο τα σήματα δειγματοληπτούνται και στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Χρησιμοποιούνται για την αποδιαμόρφωση και διαμόρφωση των αστερισμών πληροφορίας (data constellations) πάνω στα ορθογώνια υποφέροντα. Η διαδικασία μετατροπής τους σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνότητας γίνεται από τον ευθύ DFT, ενώ η αντίστροφη διαδικασία χρησιμοποιεί τον αντίστροφο μετασχηματισμό. Η OFDM εφαρμόζει τον DFT για να διαμορφωθούν και να αποδιαμορφωθούν τα παράλληλα στοιχεία, κάτι που συνεπάγεται εκμετάλλευση της ορθογωνιότητας. Μια απολύτως ψηφιακή εφαρμογή γίνεται να κατασκευαστεί, χρησιμοποιώντας μεγάλων ταχυτήτων εξειδικευμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα (chip) με δυνατότητα εκτέλεσης μεγάλου μεγέθους FFT. Τα οποία είναι μάλιστα χαμηλού κόστους, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία VLSI. Εκτελούν τον γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT), που είναι μια γρήγορη μαθηματική μέθοδος του DFT για εφαρμογές υπολογιστών. Χρησιμοποιώντας αυτήν την μέθοδο, ο πομπός και ο δέκτης μπορούν να κάνουν χρήση αποδοτικών τεχνικών FFT που μειώνουν τον αριθμό διαδικασιών από N^2 στον DFT, σε $N \log N$ στο FFT.

Στον πομπό βρίσκεται ο IFFT. Η είσοδος του IFFT είναι N ροές πληροφορίας (ήδη διαμορφωμένες από κάποια διαμόρφωση, πχ QAM). Η έξοδος του IFFT είναι N ροές πληροφορίας, όπου η πληροφορία είναι διανεμημένη σε N ορθογώνια φέροντα (διαμορφώνει). Τα φάσματα που προκύπτουν είναι συναρτήσεις τύπου sinc. Από την μεριά δέκτη, έχουμε τον FFT, ο οποίος εκτελεί την αντίστροφη φυσικά διαδικασία (αποδιαμορφώνει). Απαλλαγόμαστε έτσι από τους ταλαντωτές φερόντων και των συνελκτικών αποδιαμορφωτών που απαιτούνται από ένα συμβατικό σύστημα FDM, καθώς είναι δύσκολο να κατασκευαστεί φίλτρο όταν ο αριθμός φερόντων είναι μεγάλος.

Συνοπτικά, στην OFDM:

- Είναι ένας τύπος διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων.
- Η ενιαία ροή υψηλού ρυθμού μεταφοράς δεδομένων bit μετατρέπεται σε N παράλληλες ροές χαμηλού ρυθμού.
- Κάθε παράλληλη ροή δεδομένων διαμορφώνεται σε κάθε ένα από τα N υποφέροντα.
- Κάθε sub-carrier μπορεί να διαμορφωθεί διαφορετικά. Για παράδειγμα, BPSK, QPSK ή QAM.
- Για την επίτευξη υψηλής απόδοσης χρησιμοποίησης του διαθέσιμου εύρους ζώνης, το φάσμα των φερόντων είναι μικρής απόστασης και επικαλυπτόμενο.
- Τα σύμβολα του OFDM παράγονται με τη χρήση IFFT.
- Οι μηδενισμοί του καθενός από τα φέροντα βρίσκονται στο κέντρο (μέγιστο) των άλλων διπλανών φερόντων (ορθογωνιότητα)

Η χρησιμοποίηση του συστήματος μετάδοσης OFDM συνεπάγεται τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Προσφέρει υποστήριξη διάφορων συνδυασμών διαμορφώσεων και κωδικοποιήσεων για παραγωγή διάφορων ρυθμών δεδομένων.
- Ανθεκτικότητα στις επιπτώσεις της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών και της διασυμβολικής παρεμβολή σε ένα κανάλι.
- Η OFDM είναι φασματικά αποδοτική επειδή τα κανάλια είναι επικαλυπτόμενα και συνεχόμενα.
- Εξαλείφει ISI και IFI μέσω της χρήσης ενός κυκλικού προθέματος.
- Η εξισορρόπηση καναλιού γίνεται απλούστερη από ό, τι με τη χρήση προσαρμοστικών τεχνικών εξισορρόπησης στα συστήματα μονού φέροντος.
- Σε συνδυασμό με την εκάστοτε διαμόρφωση, δεν υπάρχει ανάγκη για την εφαρμογή ενός εκτιμητή καναλιού (channel estimator).
- Παρέχει καλή προστασία από παρεμβολές καναλιών και από παρορμητικό παρασιτικό θόρυβο (impulsive parasitic noise)
- Διαιρώντας το κανάλι σε υποκανάλια στενής ζώνης, η OFDM είναι πιο ανθεκτική στην επιλεκτική εξασθένιση συχνότητας (frequency selective fading) απ' ότι ένα σύστημα μονού φέροντος.
- Είναι λιγότερη ευαίσθητη σε μετατοπίσεις χρονικού δείγματος (sample timing offsets) από ότι ένα σύστημα μονού φέροντος .
- Πιο ανθεκτική στην επιβράδυνση της καθυστέρησης διάδοσης (delay spread):
 - Λόγω της χρήσης πολλών φερόντων, η διάρκεια συμβόλου στα φέροντα είναι αυξημένη, σε σχέση με την καθυστέρηση διάδοσης (delay spread) .
 - Η παρεμβολή συμβόλων (ISI) αποφεύγεται μέσω της χρήσης του διαστήματος προστασίας (guard interval).
 - Απλοποιημένη ή εξαλειμμένη ανάγκη εξισορρόπησης (equalisation), σε σύγκριση με διαμόρφωση μονού φέροντος
- Πιο ανθεκτική στις διαλείψεις. Το FEC (Forward Error Correction) χρησιμοποιείται για τη διόρθωση φερόντων που έχουν υποστεί παραμορφώσεις.

Οι σχεδιαστικές προκλήσεις που παρουσιάζονται στην εφαρμογή της διαμόρφωσης OFDM είναι οι εξής:

- Υψηλή ευαισθησία σε σφάλματα συγχρονισμού (Σφάλματα συγχρονισμού ☒ παρεμβολές, απώλεια ορθογωνιότητα)
- Ευαίσθητη στη μετατόπιση συχνότητας (frequency offset), χρειάζεται διόρθωση στη μετατόπιση συχνότητας στο δέκτη.
- Ευαίσθητη στο θόρυβο φάσης ταλαντωτή - απαιτείται "καθαρός" και σταθερός ταλαντωτής.
- Το σήμα OFDM διαθέτει θόρυβο με εύρος σε μεγάλη δυναμική περιοχή, ως εκ τούτου απαιτεί ενισχυτές ισχύος RF με υψηλή μέση ισχύ. Τυχόν μη γραμμική λειτουργία του ενισχυτή ισχύος του πομπού μπορεί να εισάγει αλληλοπαρεμβολές μεταξύ των φερόντων και έτσι να καταστραφεί η ορθογωνιότητα

- IFFT / FFT πολυπλοκότητα - σταθερό σημείο εφαρμογής για τη βελτιστοποίηση της καθυστέρησης και της απόδοσης.
- Διασυμβολική παρεμβολή (ISI) λόγω διαστήματος προστασίας (GI).
- Είναι πιο ευαίσθητη σε μετατόπιση συχνότητας φέροντος απ' ό, τι το σύστημα μονής φέρουσας λόγω του DFT.

9. Λειτουργία της OFDM

Στον πομπό, παράγονται και κωδικοποιούνται τα δυαδικά δεδομένα εισόδου. Μετά, οι δυαδικές τιμές μετατρέπονται σε τιμές QAM. Τέσσερις τιμές πιλοτικών (pilot values) προστίθενται ανά 48 τιμές δεδομένων, με αποτέλεσμα ένα σύνολο των 52 QAM τιμών ανά OFDM σύμβολο. Το σύμβολο διαμορφώνεται σε 52 υποφέροντα εφαρμόζοντας τον Αντίστροφο Γρήγορο Μετασχηματισμό Fourier (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT). Η έξοδος μετατρέπεται σε σειριακή και μια κυκλική επέκταση προστίθεται για να καταστήσει το σύστημα ανθεκτικό σε διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Η δημιουργία παραθύρων (Windowing) εφαρμόζεται μετά για να πάρουμε ένα στενότερο φάσμα εξόδου. Χρησιμοποιώντας έναν IQ διαμορφωτή, το σήμα μετατρέπεται σε αναλογικό, το οποίο έχει μετατραπεί (upconverted) στην ζώνη 60 GHz, ενισχύεται και μεταδίδεται μέσω της κεραίας.

Ο δέκτης εκτελεί την αντίστροφη λειτουργία του πομπού. Στο πρώτο στάδιο, ο δέκτης πρέπει να εκτιμήσει τη συχνότητα μετατόπισης (frequency offset) και χρονισμού συμβόλου (symbol timing). Μετά την απομάκρυνση της κυκλικής επέκτασης, μπορεί να εφαρμοστεί FFT στο σήμα για την ανάκτηση των 52 QAM τιμών για όλα τα φέροντα. Τα πιλοτικά φέροντα χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση της απόκρισης διαύλου καθώς και από την μετατόπιση φάσεως. Οι τιμές QAM στη συνέχεια αντιστοιχίζονται σε δυαδικές τιμές, και, τέλος, ένας αποκωδικοποιητής, αποκωδικοποιεί τα δυαδικά ψηφία πληροφορίας. Παρακάτω, ακολουθεί ένα απλό παράδειγμα εξομοίωσης της OFDM στο πρόγραμμα ADS. Το διάγραμμα της διαμόρφωσης OFDM, φαίνεται στο παρακάτω δομικό διάγραμμα. (Εικόνα 9.1.1).

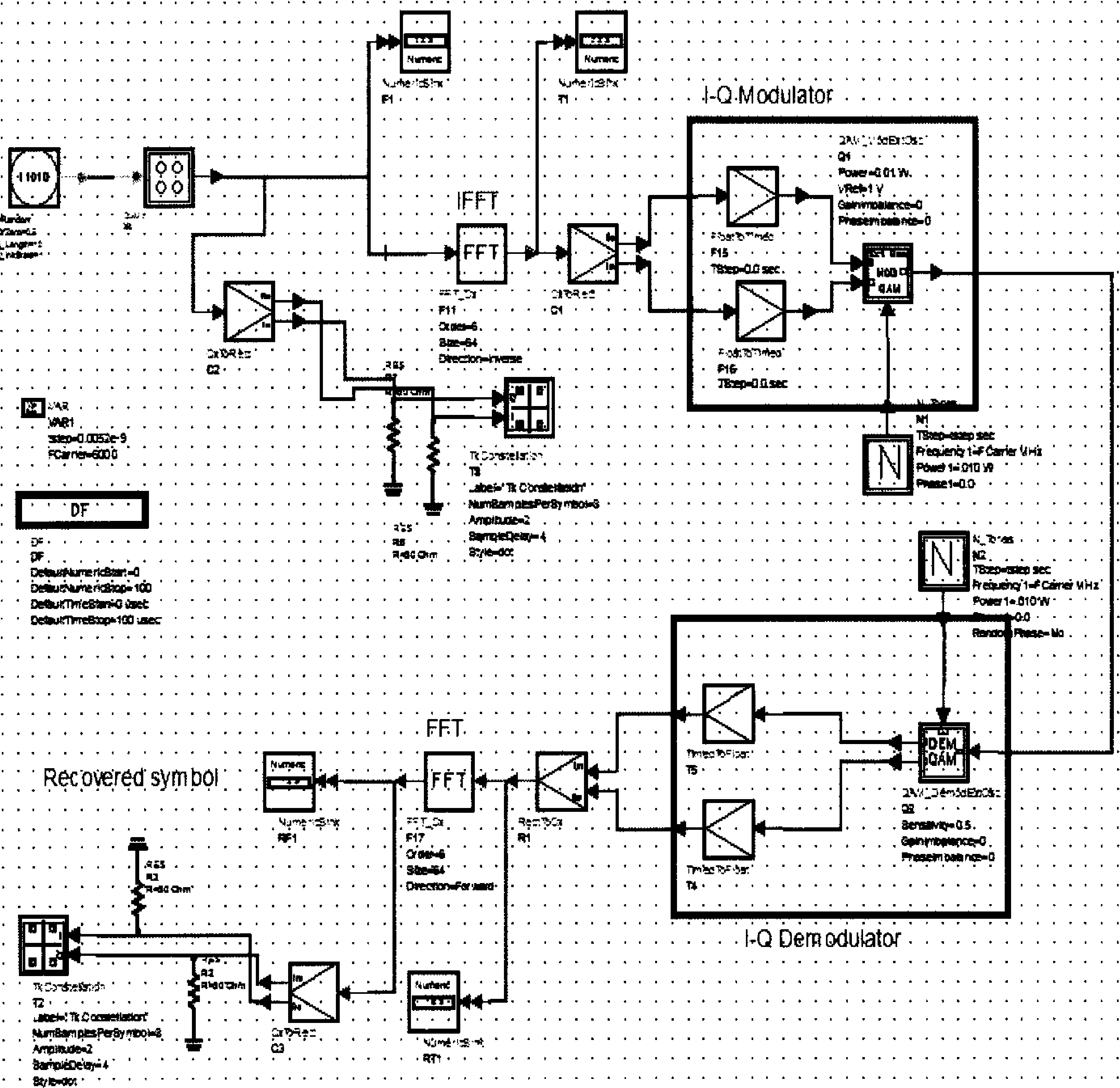
Πίνακας 4: Παράμετροι της OFDM για τα 60 GHz για Narrowband και Wideband μετάδοση.

Parameter	Narrowband mode	Wideband mode
Channel bandwidth	540 MHz	2160 MHz
FFT bandwidth	540 MHz	2160 MHz
FFT size	256	1024
Sub-carrier spacing	2.1 MHz	2.1 MHz
Guard interval	119 ns ($N_G = 64$)	119 ns
FFT period	474 ns	474 ns
OFDM symbol time	593 ns	593 ns
Data sub-carriers	192	768
Pilot/Zero sub-carriers	16/ 5	60/ 5
Nominal used bandwidth	449.3 MHz	1757.11 MHz

Chang-Soon Choi, Eckhard Grass, Maxim Piz, Marcus Ehrig, Miroslav Marinkovic, Rolf Kraemer and Christoph Scheytt, 2010, "60-GHz OFDM systems for multi-gigabit wireless LAN applications", *IEEE CCNC 2010 proceedings*, 978-1-4244-5176-0/10/ IEEE, Table 2.

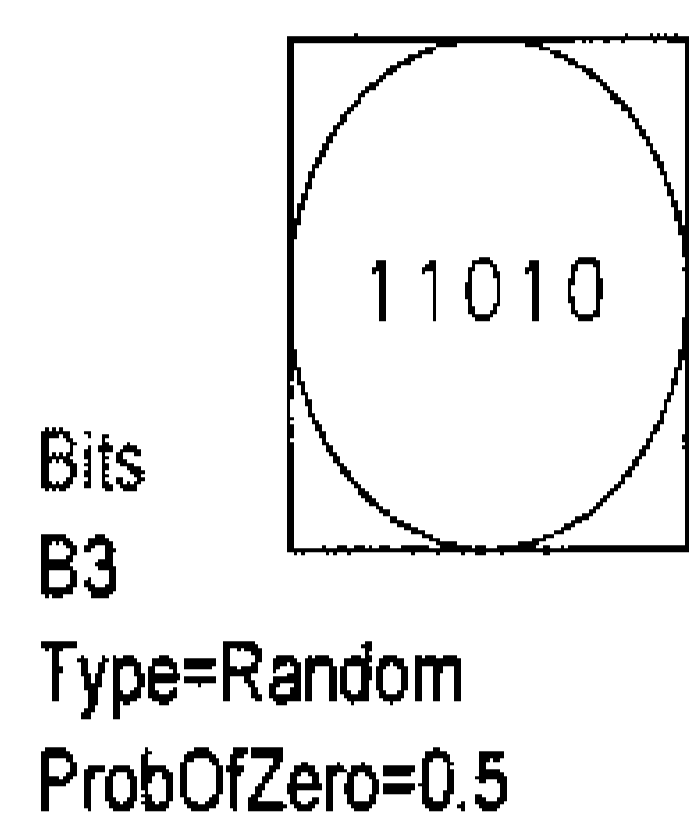
9.1 Απλή εξομοίωση της OFDM

Αρχικά θέτουμε $F_{Carrier}=60000$ (MHz), καθώς αυτή είναι η μεταβλητή της συχνότητας του φέροντος, το οποίο φυσικά θέλουμε να είναι 60 GHz. Ακόμη θέτουμε $t_{step}=0.48e6$, καθώς αυτό προκύπτει από την απόσταση μεταξύ των φερόντων (subcarrier spacing), το οποίο για wideband μετάδοση είναι 2.1 MHz. Οπότε $\frac{1}{2.1*10^6} = 0.48 * 10^{-6} s$.

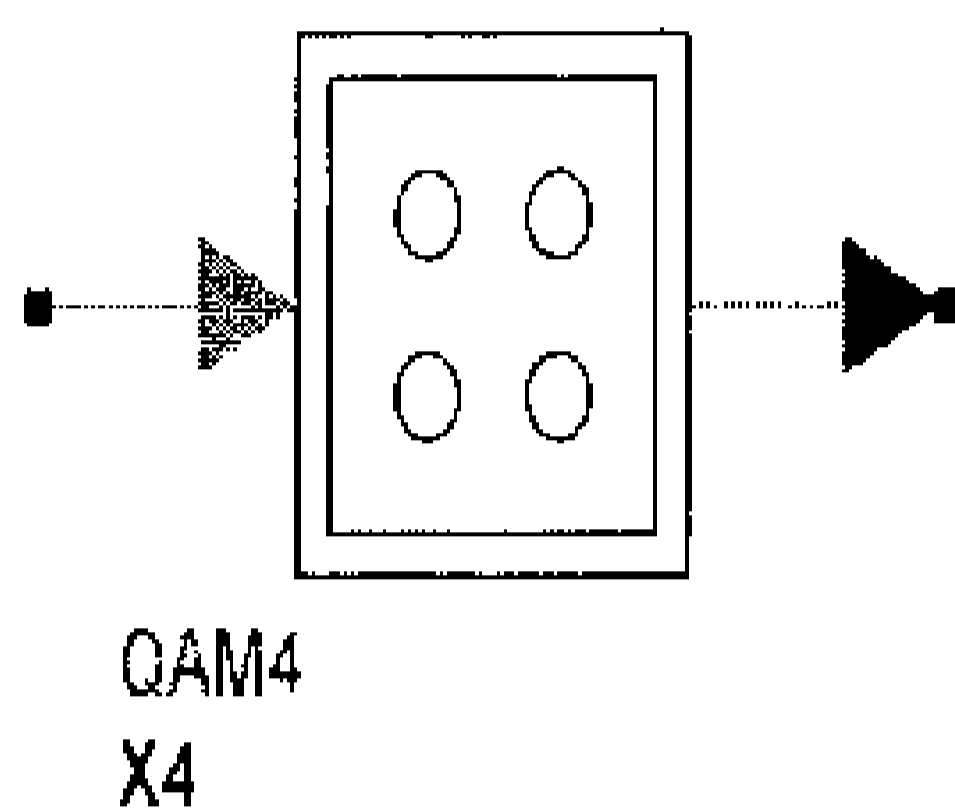


Εικόνα 9.1.1: Απλή εξομοίωση της OFDM, πομπός και δέκτης.

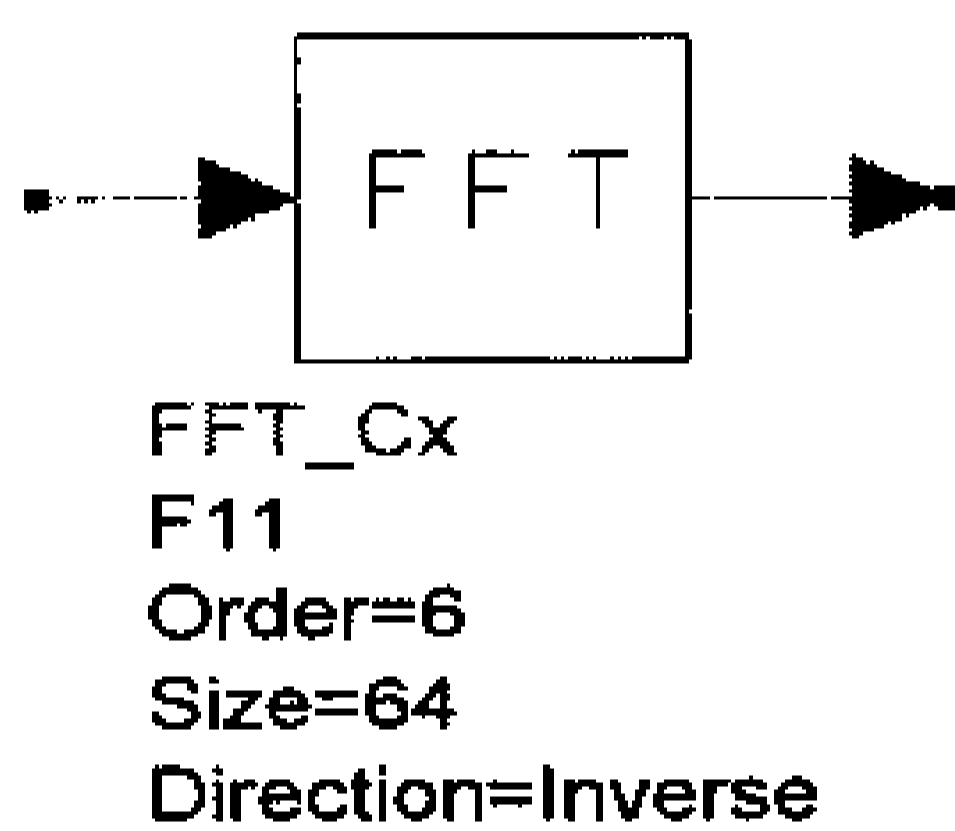
Στο σχήμα υπάρχουν τα εξής εξαρτήματα που επιτελούν ξεχωριστή λειτουργία στο design μας:



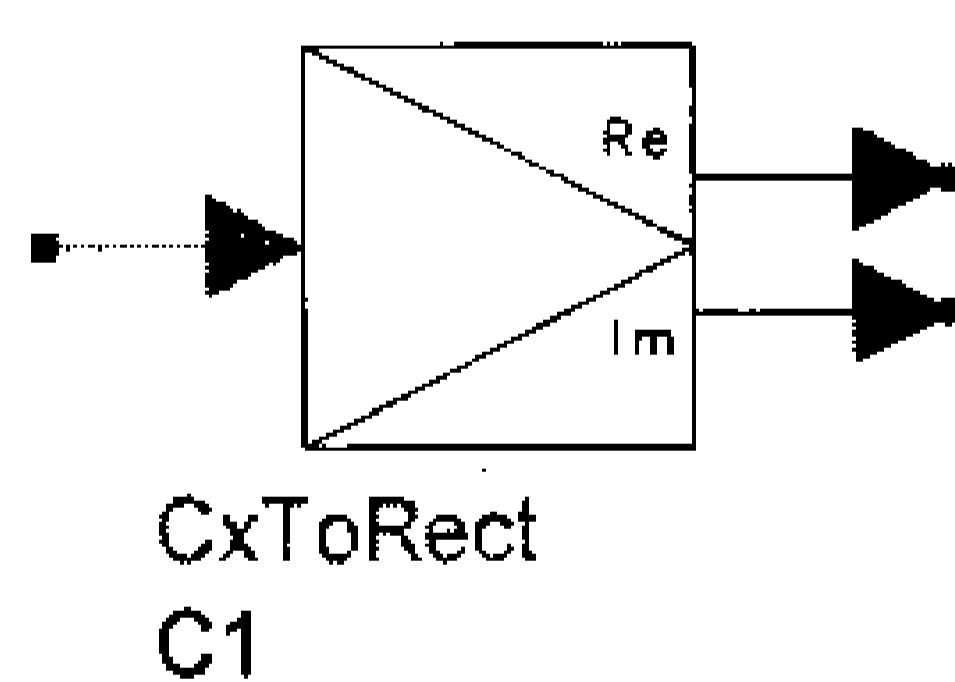
Αρχικά έχουμε μια γεννήτρια bit με τυχαίες τιμές από μηδέν και ένα. Η πιθανότητα των τιμών επιλέγεται να είναι ίδια (ισοπίθανα). Άρα ρυθμίζουμε στο block μας probOfZero=0.5.



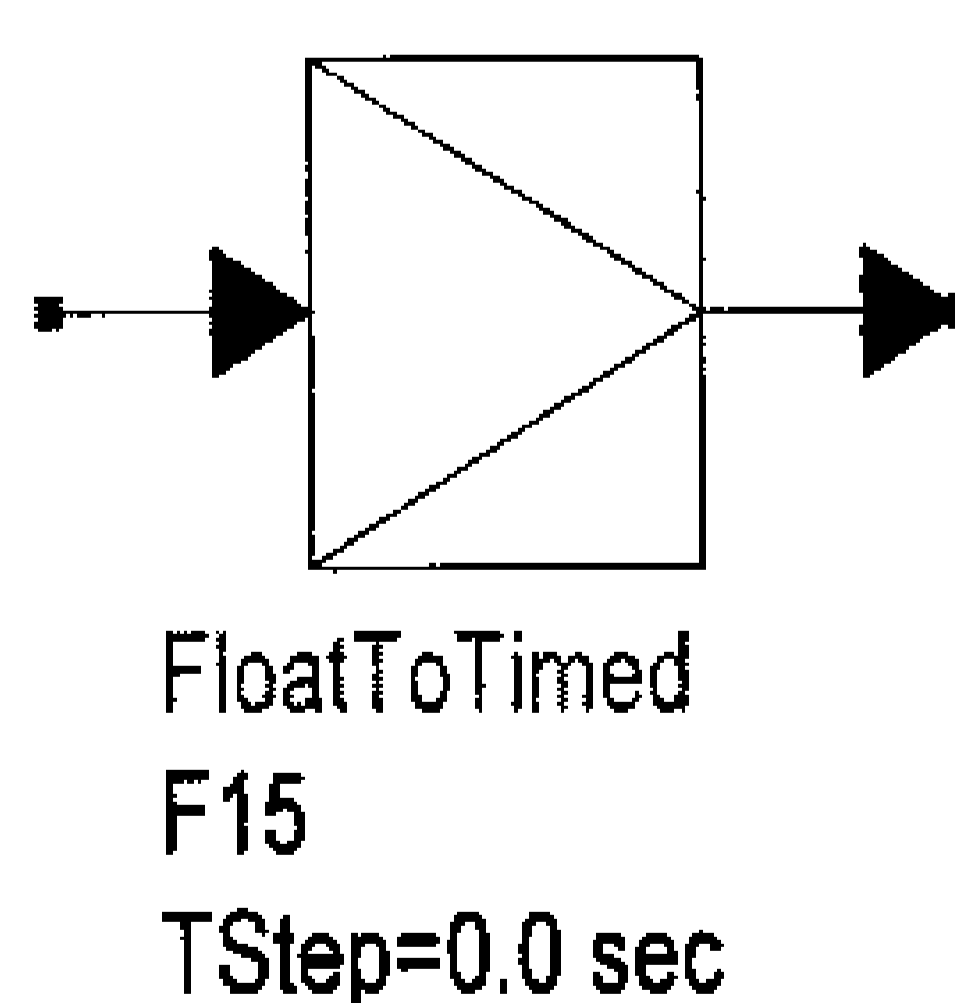
Έπειτα τοποθετούμε ένα τεσσάρων καταστάσεων διαμορφωτή τετραγωνισμού πλάτους. Το 4-QAM εκτελεί μία 4-σημείων διαμόρφωση τετραγωνισμού πλάτους στη ροή bit εισόδου, παράγοντας ένα σύνθετο σήμα εξόδου. Το στοιχείο καταναλώνει 2 bits από την είσοδο για κάθε σύνθετη αξία παραγωγής που παράγει. Χρησιμοποιεί κωδικοποίηση Gray διότι αντιστοιχεί 2 bits για τα 4 σημεία.



Αφού έχει παραχθεί σήμα από bits, κάνουμε σε αυτό IFFT ώστε να παραχθεί το χρονικό σήμα. Το FFT_Cx υπολογίζει τον DFT ενός σύνθετου εισόδου χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT). Ο FFT_Cx διαβάζει το μέγεθος των σύνθετων δειγμάτων με μηδενικό μπλοκ δεδομένων, εάν είναι απαραίτητο, και στη συνέχεια παίρνει ένα FFT μήκους 2^{ης} Τάξης. Όπως είδαμε και στον πίνακα με τις παραμέτρους της OFDM για τα 60 GHz, χρησιμοποιούμε μέγεθος (size) Fourier 1024, οπότε η τάξη (order) ορίζεται ως 10, καθώς η τάξη είναι η βάση του 2 του μεγέθους Fourier ($2^{10} = 1024$). Για να έχουμε IFFT ρυθμίζουμε στο μπλοκ Direction=Inverse, ενώ για να έχουμε FFT ρυθμίζουμε Direction=Forward.

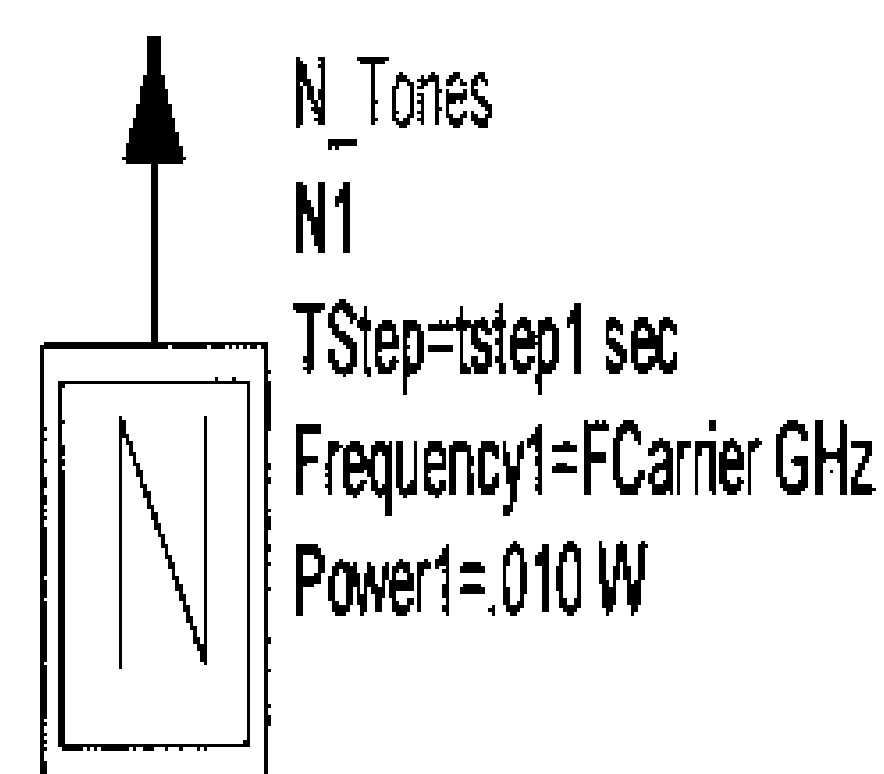
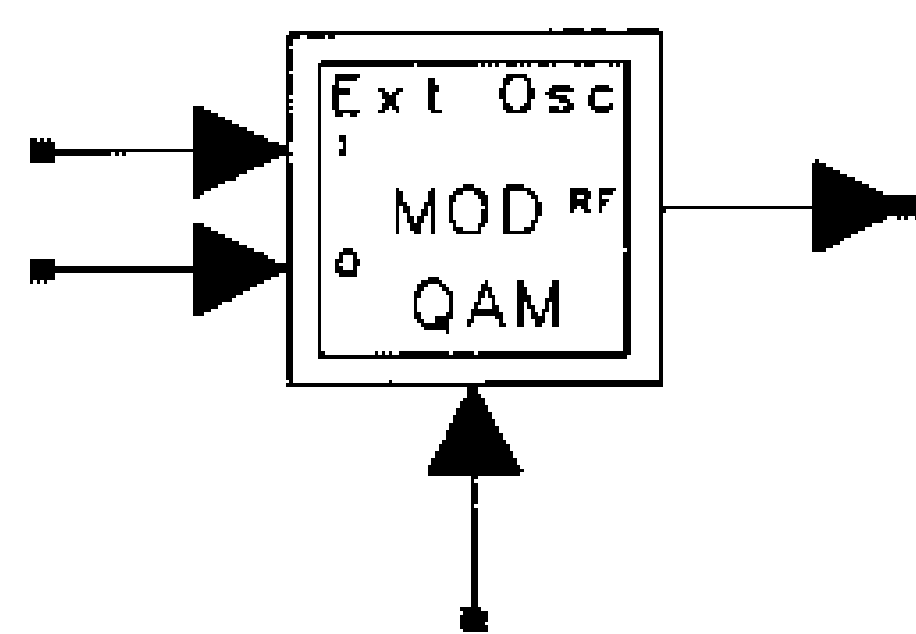


Αφού έχει παραχθεί το χρονικό σήμα τότε τοποθετούμε το CxToRect, το οποίο χωρίζει την είσοδο σύνθετου σήματος στο πραγματικό (Re) και στο φανταστικό (Im) μέρος του.



Σε κάθε έξοδο του προηγούμενου μπλοκ διαγράμματος τοποθετούμε το FloatToTimed μπλοκ. Το FloatToTimed μετατρέπει ένα floating-point (πραγματικό σήμα) σε ένα χρονικό σήμα. Δεδομένου ένας floating-point (πραγματικός) αριθμός $x[n]$ στην είσοδο, η έξοδος είναι ένα πραγματικό χρονικό σήμα βασικής ζώνης $y(t)$ με $y(nT) = x[n]$, όπου T είναι το σήμα εισόδου με χρονικό βήμα και $n = 1, 2, \dots$

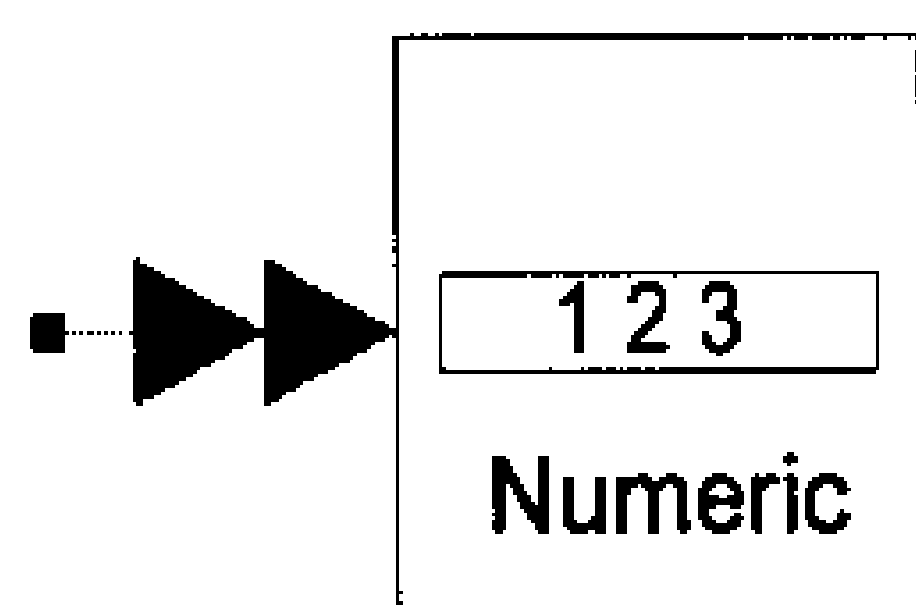
QAM_ModExtOsc
Q1
Power=0.01 W
VRef=1 V



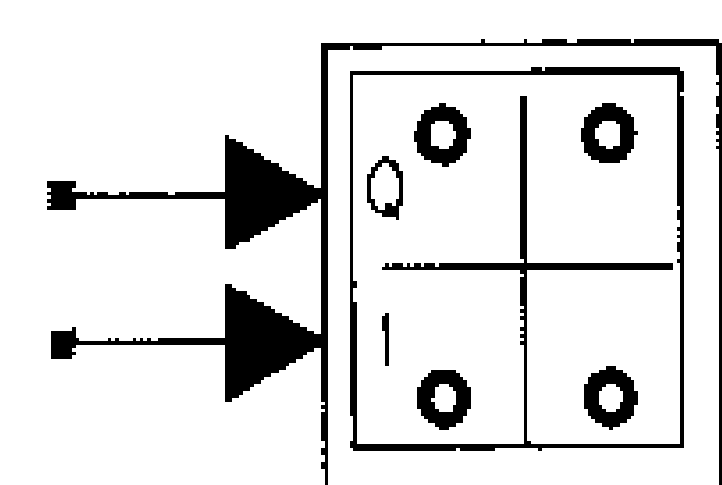
Το επόμενο βήμα είναι να τοποθετήσουμε στο design μας διαμορφωτή τετραγωνισμού πλάτους με εξωτερικό ταλαντωτή. Το QAM_ModExtOsc λαμβάνει ως εισόδους σήματα I και Q βασικής ζώνης και ένα σήμα ταλαντωτή RF και παράγει ένα QAM σήμα RF στην έξοδο του.

Χρησιμοποιούμε γεννήτρια RF στον διαμορφωτή τετραγωνισμού πλάτους. Το N_Tones παράγει ένα RF χρονικό σήμα εξόδου. Παράγει ένα N-tone RF σήμα, όπου κάθε τόνος καθορίζεται από τη συχνότητα του, τη δύναμη, και τη φάση. Η φάση μπορεί να καθοριστεί ως μια τυχαία συνάρτηση. Επιπλέον, σε κάθε τόνο μπορεί να προστεθεί και θόρυβος φάσης. Με την βοήθεια αυτού του μπλοκ δηλαδή, υψώνουμε στο φέρον μας (60 GHz) το baseband σήμα μας. Τοποθετούμε τις μεταβλητές για το subcarrier spacing και τη συχνότητα του φέροντος, που είδαμε παραπάνω. Αντίστοιχα και στον δέκτη, για να αποδιαμορφώσουμε γιατί ως γνωστό, η αποδιαμόρφωση με είναι η διαμόρφωση, με το ίδιο φέρον, της διαμόρφωσης.

Στον δέκτη θα χρησιμοποιήσουμε τα ίδια εξαρτήματα αλλά με την αντίστροφη σειρά. Για να εμφανίσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τα επόμενα εξαρτήματα.



NumericSink
F1



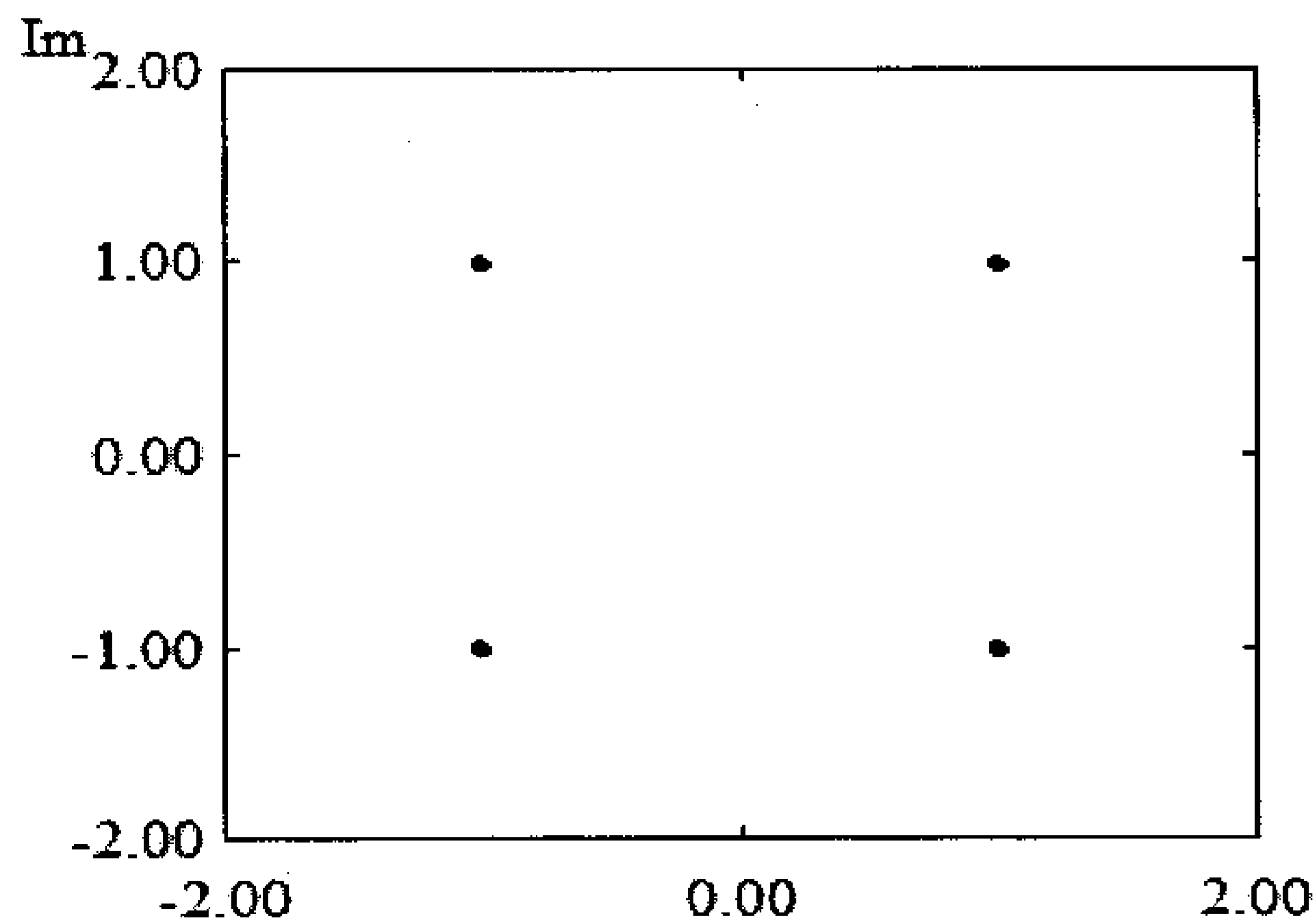
TkConstellation
T6
Label="Tk Constellation"
NumSamplesPerSymbol=8
Amplitude=3
Style=dot

Το NumericSink συλλέγει δεδομένα από την έξοδο της συνδεδεμένης συσκευής και αποθηκεύει το σύνολο των δεδομένων προσομοίωσης. Όταν η συνδεδεμένη συσκευή είναι αριθμητική, τα δεδομένα έχουν μορφή ακέραιων, πραγματικών ή μιγαδικών τιμών. Όταν η συνδεδεμένη συσκευή είναι χρονική, τα συλλεγόμενα δεδομένα έχουν μορφή μιγαδικών τιμών. Τα συλλεγόμενα δεδομένα δεν έχουν πληροφορίες για τη συχνότητα.

Το TkConstellation εμφανίζει ένα αστερισμό IQ των δεδομένων μας. Ρυθμίζουμε το NumSamplesPerSymbol (τον αριθμό των δειγμάτων ανά σύμβολο). Οι άξονες X και Y του γραφήματος προέρχεται από το (+πλάτος) μέχρι το (- πλάτος). Για να έχουμε δύο εισόδους πρέπει να έχουμε και δύο εξόδους, οπότε χρησιμοποιούμε ένα CxToRect το οποίο χωρίζει την είσοδο σύνθετου σήματος σε πραγματικό (Re) και το φανταστικό (Im) μέρος του. Στο διάγραμμα αστερισμού του πομπού ρυθμίζουμε πλάτος (Amplitude) =1, καθώς έχουμε 4-QAM, στην οποία το πλάτος κάθε σημείου ισούται με 1. Στο διάγραμμα αστερισμού του δέκτη ρυθμίζουμε πλάτος (Amplitude) =15, για την εμφάνιση των 4 συμβόλων ίδιου πλάτους, καθώς έχουμε ενίσχυση του πλάτους του σήματος.

Όταν 'τρέξουμε' το πρόγραμμα τότε εμφανίζονται τα διαγράμματα αστερισμού στον πομπό και στον δέκτη για διαμόρφωση 4-QAM (εικόνες 9.1.2-9.1.3). Παρατηρούμε ότι δεν έχουμε κάποια μεταβολή στα δύο διαγράμματα διότι δεν υπάρχει κάποιο κανάλι διάδοσης, το οποίο να εισάγει κάποιο είδος παραμόρφωσης ή καθυστέρησης.

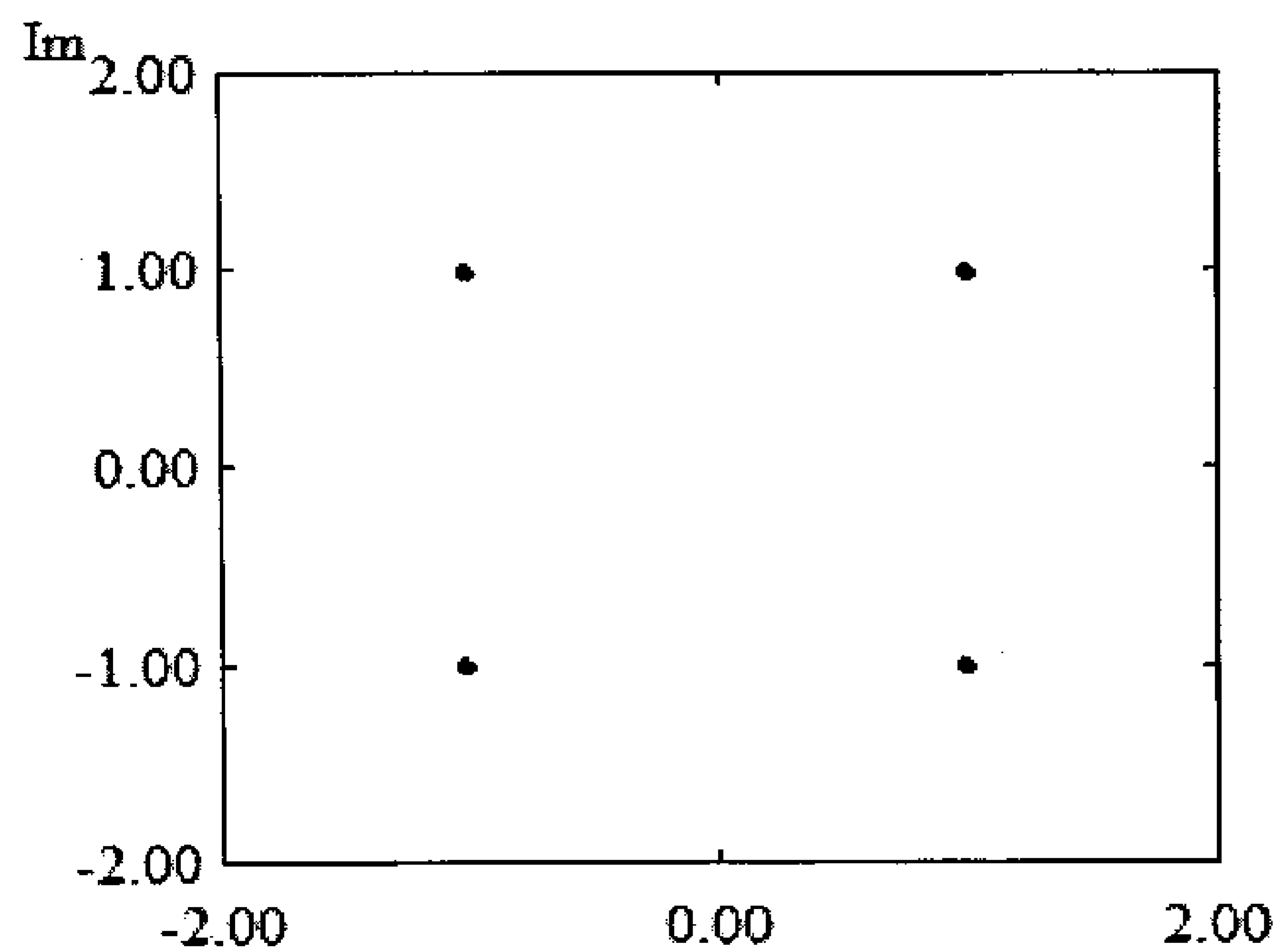
Tk Constellation



Re

Εικόνα 9.1.2: Διάγραμμα αστερισμού πομπού.

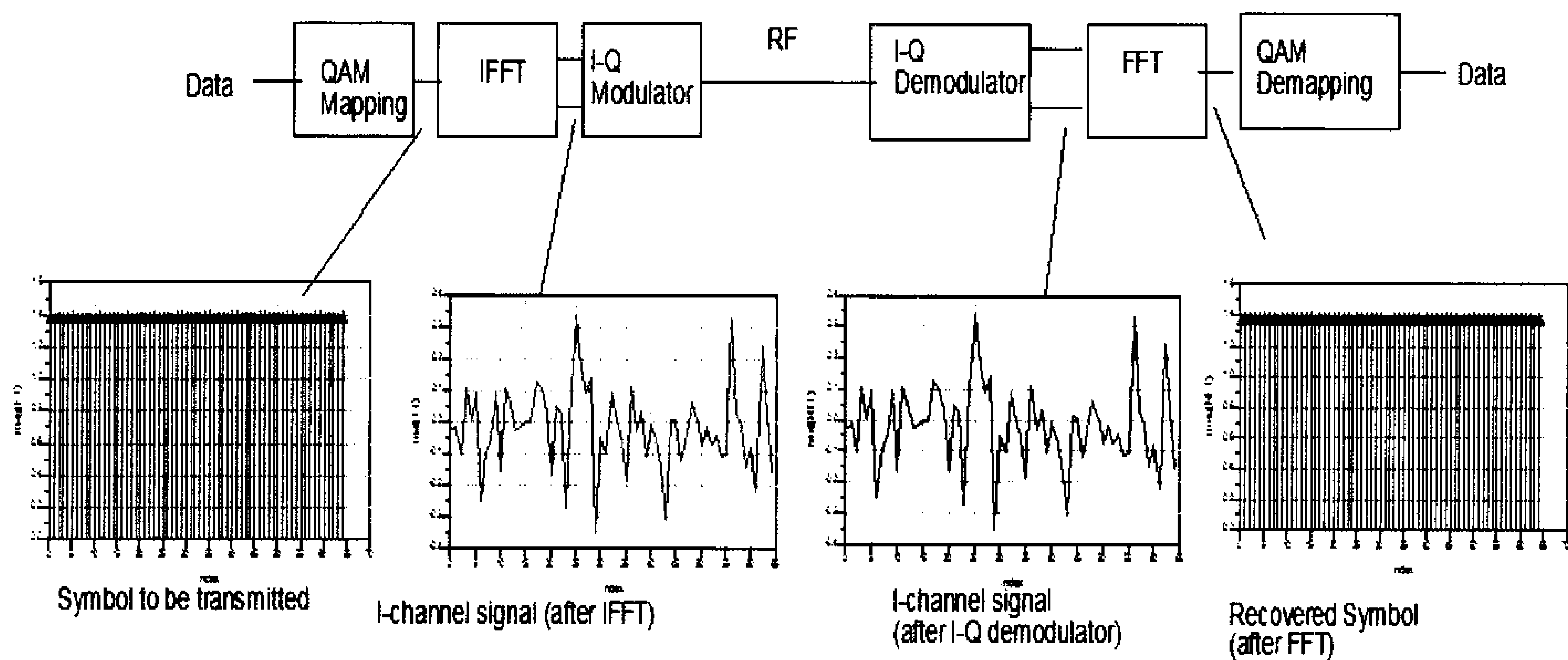
Tk Constellation



Re

Εικόνα 9.1.3: Διάγραμμα αστερισμού δέκτη.

Παρακάτω εμφανίζονται τα αποτελέσματα της εξομοίωσης τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Αρχικά στον πομπό παρατηρούμε τα σύμβολα που θα μεταδοθούν και το σήμα που προκύπτει μετά τον IFFT. Μετά ακολουθεί το κανάλι (RF), που στην περίπτωση μας έχουμε ιδανική μετάδοση, χωρίς απώλειες. Ύστερα από αυτό στον δέκτη λαμβάνουμε το ίδιο σήμα, το οποίο προέκυψε μετά τον IFFT. Κάνοντας FFT λαμβάνουμε τα ανακτώμενα σύμβολα.



Εικόνα 9.1.5: Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης στον πομπό και στον δέκτη.

9.2 Εξομοίωση της OFDM μαζί με την σχεδιασμένη patch κεραία

Προσθέτουμε τώρα στο μοντέλο της OFDM που κατασκευάσαμε πριν, την σχεδιασμένη στο HFSS patch antenna. Η ενσωμάτωση της στο design γίνεται με την εισαγωγή του αρχείου s2p, που περιγράφει στην ουσία την λειτουργία και τις παραμέτρους της κεραίας σε συγκεκριμένες συχνότητες.

Αρχείο S2P

Αποτελεί αρχείο με τις μετρούμενες S παραμέτρους. Οι γραμμές που ξεκινούν με θαυμαστικό στο αρχείο S2P είναι τα σχόλια. Επίσης, πρέπει να ακολουθείται μία συγκεκριμένη, σωστή μορφή κατά τη δημιουργία του S2P αρχείου. Η συνήθης μορφή που χρησιμοποιείται είναι:

Frequency-unit S MA R Reference-Impedance

Παράδειγμα:

GHz S MA R 50

- Το «S» στην παραπάνω δήλωση σημαίνει S-παραμέτρος,
- Το «MA» σημαίνει Πλάτος (Magnitude) και Γωνία (Angle), και
- Το «R» σημαίνει αντίσταση αναφοράς.

Τα δεδομένα πρέπει να καταχωρούνται με την ακόλουθη σειρά:

Συχνότητα mag (S11) Ang (S11) mag (S21) Ang (S21) mag (S12) Ang (S12) mag (S22) Ang (S22)

Τα δεδομένα θορύβου στο S2P είναι προαιρετικά. Δεν χρειάζεται να περιληφθούν στο S2P αρχείο, όταν ο στόχος είναι η σύγκριση των μετρούμενων σε σχέση με τις προσομοιωμένες S-παραμέτρους. Εάν θέλουμε να συμπεριλάβουμε και τα δεδομένα θορύβου, τότε θα πρέπει να ακολουθήσουν αμέσως μετά, στην επόμενη γραμμή ελέγχου του αρχείου S2P μετά τα δεδομένα S-παραμέτρων. Δηλαδή τα δεδομένα S-παραμέτρων και ο θόρυβος μπορεί να διαχωρίζονται από μία κενή γραμμή ή μία γραμμή σχόλιο.

Το δημιουργημένο S2P αρχείο της κεραίας μας είναι το παρακάτω:

#GHz S MA R 50.0000

50	0.823431515	136.3403433	3.201852518	0	0	0	0	0
50.1	0.828870997	131.7694166	3.156845636	0	0	0	0	0
50.2	0.832492143	127.3862906	3.126357594	0	0	0	0	0
50.3	0.834400759	123.142293	3.110113812	0	0	0	0	0
50.4	0.834490366	118.9958537	3.109348182	0	0	0	0	0
50.5	0.83222863	114.9155825	3.12859076	0	0	0	0	0
50.6	0.826419173	110.9125202	3.177247931	0	0	0	0	0
50.7	0.818261884	107.1156554	3.243778782	0	0	0	0	0
50.8	0.817508599	103.4865577	3.249820997	0	0	0	0	0

Μελέτη, σχεδίαση και έλεγχος ολοκληρωμένης κεραίας για εφαρμογές σε ασύρματα οπτικά δίκτυα

50.9	0.820525607	99.43670529	3.22551928	0	0	0	0	0
51	0.816402419	95.26856041	3.25866348	0	0	0	0	0
51.1	0.809446807	91.03440632	3.313454612	0	0	0	0	0
51.2	0.800253913	86.69121119	3.383810409	0	0	0	0	0
51.3	0.788764818	82.19910012	3.468644163	0	0	0	0	0
51.4	0.774667889	77.51556498	3.568371712	0	0	0	0	0
51.5	0.757450393	72.59195672	3.68418835	0	0	0	0	0
51.6	0.736348021	67.36956248	3.817982258	0	0	0	0	0
51.7	0.71013494	61.77405395	3.972950229	0	0	0	0	0
51.8	0.676181292	55.71990209	4.15730093	0	0	0	0	0
51.9	0.630698704	49.39720663	4.379023532	0	0	0	0	0
52	0.587669591	42.5419875	4.565651368	0	0	0	0	0
52.1	0.528735826	34.62742241	4.78959106	0	0	0	0	0
52.2	0.451729013	26.09981189	5.034315283	0	0	0	0	0
52.3	0.363548552	17.43866283	5.256757497	0	0	0	0	0
52.4	0.273621152	8.857746135	5.427523671	0	0	0	0	0
52.5	0.190985909	1.74748052	5.538999865	0	0	0	0	0
52.6	0.138297174	-2.993308047	5.588645825	0	0	0	0	0
52.7	0.114860316	-11.29648066	5.605522944	0	0	0	0	0
52.8	0.090550192	-30.00990361	5.619687903	0	0	0	0	0
52.9	0.057504892	-61.81987325	5.633531732	0	0	0	0	0
53	0.037527072	-111.4767184	5.63889464	0	0	0	0	0
53.1	0.048447797	-166.7469588	5.636243082	0	0	0	0	0
53.2	0.085656201	154.1766015	5.62213048	0	0	0	0	0
53.3	0.128069954	127.2030569	5.596401156	0	0	0	0	0
53.4	0.153532376	107.3505313	5.575965397	0	0	0	0	0
53.5	0.15885481	94.30641559	5.571216001	0	0	0	0	0
53.6	0.173341134	87.09942944	5.557446775	0	0	0	0	0
53.7	0.21765343	78.88006654	5.507587933	0	0	0	0	0
53.8	0.269266676	66.42875808	5.434453731	0	0	0	0	0
53.9	0.302563006	51.26397129	5.378384663	0	0	0	0	0
54	0.308619248	34.3048274	5.367416467	0	0	0	0	0
54.1	0.285965411	15.4628748	5.407222852	0	0	0	0	0
54.2	0.23855735	-5.46190893	5.479950807	0	0	0	0	0
54.3	0.181258593	-28.43887789	5.549397931	0	0	0	0	0
54.4	0.135202626	-53.99900414	5.591056418	0	0	0	0	0
54.5	0.111461928	-83.5431183	5.607707028	0	0	0	0	0
54.6	0.113114028	-115.844961	5.606653551	0	0	0	0	0
54.7	0.138939873	-147.4546557	5.588138201	0	0	0	0	0
54.8	0.18164388	-174.6155135	5.548996774	0	0	0	0	0
54.9	0.232911557	163.0932125	5.487678773	0	0	0	0	0
55	0.284471449	144.7735068	5.409731513	0	0	0	0	0
55.1	0.331584393	129.5300992	5.323627246	0	0	0	0	0
55.2	0.3744953	116.6162126	5.232231103	0	0	0	0	0
55.3	0.415453255	105.2297512	5.132836007	0	0	0	0	0
55.4	0.452561406	94.74154036	5.031934234	0	0	0	0	0
55.5	0.482491945	84.99238762	4.942591615	0	0	0	0	0
55.6	0.508124255	75.90806144	4.86011187	0	0	0	0	0
55.7	0.527440175	67.19171412	4.794137691	0	0	0	0	0
55.8	0.54103111	58.90919485	4.745667729	0	0	0	0	0
55.9	0.550597167	50.95611839	4.710504206	0	0	0	0	0
56	0.556863799	43.23820621	4.686988902	0	0	0	0	0
56.1	0.56024012	35.67895992	4.674159449	0	0	0	0	0
56.2	0.560912244	28.21286756	4.67159201	0	0	0	0	0
56.3	0.558766418	20.78170696	4.679773135	0	0	0	0	0
56.4	0.552969278	13.34843433	4.701648064	0	0	0	0	0
56.5	0.543100685	6.080366627	4.738134508	0	0	0	0	0
56.6	0.539656603	-1.299469105	4.750648448	0	0	0	0	0
56.7	0.529806405	-9.196469837	4.785822553	0	0	0	0	0
56.8	0.513528609	-17.32926055	4.841990909	0	0	0	0	0
56.9	0.490745282	-25.8211667	4.916649537	0	0	0	0	0
57	0.458670612	-34.8396203	5.01428967	0	0	0	0	0
57.1	0.411742102	-44.56942476	5.142349224	0	0	0	0	0
57.2	0.340114069	-54.97980139	5.306465168	0	0	0	0	0
57.3	0.237083624	-63.90264572	5.481986952	0	0	0	0	0
57.4	0.166922282	-64.66715596	5.563700273	0	0	0	0	0
57.5	0.11186963	-72.01644706	5.607448512	0	0	0	0	0
57.6	0.051438856	-46.0998137	5.635399077	0	0	0	0	0
57.7	0.151697253	-31.38024123	5.577564512	0	0	0	0	0
57.8	0.264256792	-45.11696172	5.442278703	0	0	0	0	0
57.9	0.308156633	-59.50423261	5.368262753	0	0	0	0	0
58	0.300903408	-71.45703415	5.3813485	0	0	0	0	0
58.1	0.273591478	-80.20057416	5.427571302	0	0	0	0	0
58.2	0.258921276	-86.84936247	5.450438695	0	0	0	0	0
58.3	0.250918234	-94.97135479	5.462344343	0	0	0	0	0
58.4	0.219882587	-104.080893	5.504767769	0	0	0	0	0
58.5	0.170736182	-110.252373	5.560013918	0	0	0	0	0
58.6	0.135672332	-110.7313393	5.590694104	0	0	0	0	0
58.7	0.128664378	-108.1837613	5.595966988	0	0	0	0	0
58.8	0.150696332	-107.4943964	5.578428413	0	0	0	0	0

Μελέτη, σχεδίαση και έλεγχος ολοκληρωμένης κεραίας για εφαρμογές σε ασύρματα οπτικά δίκτυα

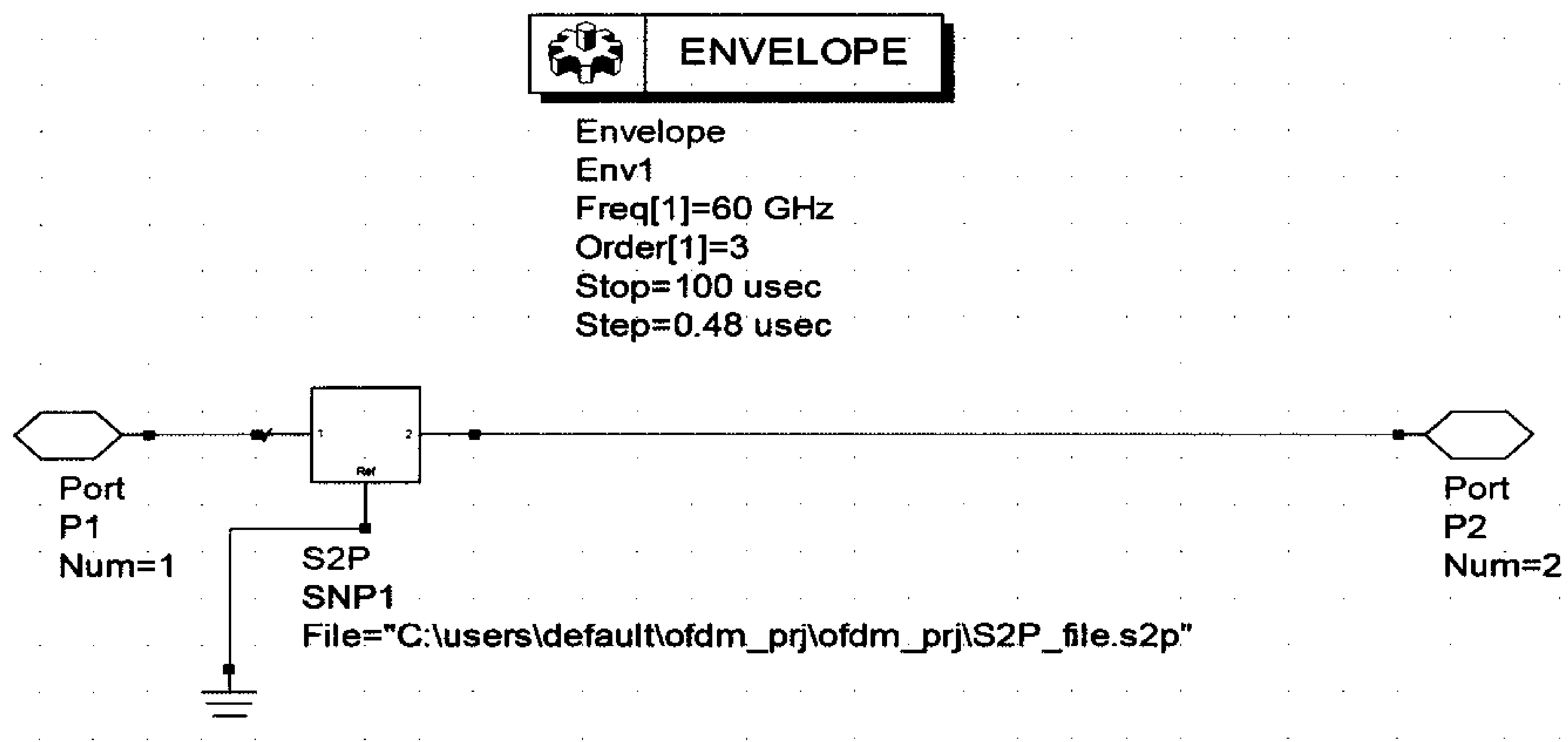
58.9	0.187212408	-112.5914027	5.543100414	0	0	0	0	0
59	0.214079681	-121.2746189	5.512046263	0	0	0	0	0
59.1	0.22418518	-131.0614678	5.499238998	0	0	0	0	0
59.2	0.220260126	-141.0275277	5.504287145	0	0	0	0	0
59.3	0.206417202	-150.9508087	5.521344979	0	0	0	0	0
59.4	0.185968328	-160.8312839	5.544433729	0	0	0	0	0
59.5	0.161400548	-170.7322829	5.568885652	0	0	0	0	0
59.6	0.134682095	179.2631296	5.591456442	0	0	0	0	0
59.7	0.107492702	169.0561646	5.610173915	0	0	0	0	0
59.8	0.081336954	158.5158349	5.624172673	0	0	0	0	0
59.9	0.057566653	147.4355648	5.633511647	0	0	0	0	0
60	0.037333692	135.4037963	5.638935514	0	0	0	0	0
60.1	0.021379557	121.4969734	5.641579629	0	0	0	0	0
60.2	0.010226737	103.5276866	5.642574323	0	0	0	0	0
60.3	0.003952674	74.3085243	5.642825332	0	0	0	0	0
60.4	0.002144097	20.011256	5.642856443	0	0	0	0	0
60.5	0.004019624	-29.18822631	5.642823826	0	0	0	0	0
60.6	0.008506591	-54.62453439	5.642665245	0	0	0	0	0
60.7	0.01410408	-70.51574367	5.642308131	0	0	0	0	0
60.8	0.019485341	-80.87526874	5.641798074	0	0	0	0	0
60.9	0.024681461	-88.80141492	5.641150406	0	0	0	0	0
61	0.029201386	-93.64163437	5.640463004	0	0	0	0	0
61.1	0.036334628	-99.1871633	5.639143311	0	0	0	0	0
61.2	0.03883283	-104.7326353	5.638613117	0	0	0	0	0
61.3	0.040014236	-107.0224433	5.638350094	0	0	0	0	0
61.4	0.042395766	-106.8567663	5.637795883	0	0	0	0	0
61.5	0.048282623	-105.1791722	5.636288214	0	0	0	0	0
61.6	0.060449079	-103.6375759	5.632550198	0	0	0	0	0
61.7	0.081520151	-103.9082992	5.624088215	0	0	0	0	0
61.8	0.113013118	-106.7900696	5.606718347	0	0	0	0	0
61.9	0.153898724	-112.3033373	5.575643807	0	0	0	0	0
62	0.196708835	-119.5081738	5.532618746	0	0	0	0	0
62.1	0.240601494	-127.4379547	5.477104399	0	0	0	0	0
62.2	0.277668382	-136.1917118	5.420974775	0	0	0	0	0
62.3	0.296373299	-144.9544779	5.389347589	0	0	0	0	0
62.4	0.291930173	-151.7474093	5.397063958	0	0	0	0	0
62.5	0.30248238	-154.6282306	5.378529065	0	0	0	0	0
62.6	0.36490698	-158.9876877	5.253759607	0	0	0	0	0
62.7	0.43223255	-166.8656411	5.088526204	0	0	0	0	0
62.8	0.480366013	-175.7499926	4.949180888	0	0	0	0	0
62.9	0.512583522	175.3198901	4.845178553	0	0	0	0	0
63	0.533993038	166.4751435	4.770983306	0	0	0	0	0
63.1	0.547647351	157.6620629	4.721441066	0	0	0	0	0
63.2	0.555120659	148.7962437	4.693568545	0	0	0	0	0
63.3	0.557013836	139.7912779	4.686421178	0	0	0	0	0
63.4	0.553048803	130.562168	4.701350216	0	0	0	0	0
63.5	0.541740929	121.030316	4.743088588	0	0	0	0	0
63.6	0.519523587	111.1612593	4.821584243	0	0	0	0	0
63.7	0.479753904	101.1547897	4.95107109	0	0	0	0	0
63.8	0.417975739	92.16621531	5.126310931	0	0	0	0	0
63.9	0.364408012	86.81470621	5.254862269	0	0	0	0	0
64	0.379092496	82.84899194	5.22167878	0	0	0	0	0
64.1	0.429021773	74.85017411	5.097170921	0	0	0	0	0
64.2	0.463400138	64.50053876	5.000423922	0	0	0	0	0
64.3	0.485820977	53.79889624	4.932197061	0	0	0	0	0
64.4	0.498837393	42.54148066	4.890650066	0	0	0	0	0
64.5	0.496884044	31.42001228	4.896977685	0	0	0	0	0
64.6	0.485509985	21.27641083	4.933172058	0	0	0	0	0
64.7	0.494835013	12.34055786	4.903579851	0	0	0	0	0
64.8	0.524427006	2.184264438	4.80465169	0	0	0	0	0
64.9	0.540974069	-8.710936534	4.745874782	0	0	0	0	0
65	0.546037409	-19.55084812	4.727374761	0	0	0	0	0
65.1	0.536174228	-30.60005115	4.763187476	0	0	0	0	0
65.2	0.498880549	-41.32336543	4.890509894	0	0	0	0	0
65.3	0.429350574	-51.02050974	5.09628929	0	0	0	0	0
65.4	0.332045773	-56.64191609	5.322711479	0	0	0	0	0
65.5	0.285573413	-53.44334518	5.407882479	0	0	0	0	0
65.6	0.361341344	-51.21269889	5.261601086	0	0	0	0	0
65.7	0.476134429	-56.68593364	4.962184222	0	0	0	0	0
65.8	0.564273221	-64.69369087	4.658685908	0	0	0	0	0
65.9	0.62344704	-72.75113615	4.411965378	0	0	0	0	0
66	0.663606779	-80.34710267	4.221326638	0	0	0	0	0
66.1	0.691910945	-87.45466764	4.074054976	0	0	0	0	0
66.2	0.712570181	-94.13437043	3.959041917	0	0	0	0	0
66.3	0.728189109	-100.4564829	3.867488749	0	0	0	0	0
66.4	0.740352999	-106.4953497	3.793240057	0	0	0	0	0
66.5	0.749590843	-112.3184696	3.735023614	0	0	0	0	0
66.6	0.755705638	-117.9554254	3.695579709	0	0	0	0	0
66.7	0.759951999	-123.3891888	3.667747742	0	0	0	0	0
66.8	0.765117911	-128.7219779	3.633388283	0	0	0	0	0

66.9	0.769906726	-134.093499	3.601033416	0	0	0	0	0
67	0.772653047	-139.536175	3.582254521	0	0	0	0	0
67.1	0.773243441	-145.0865095	3.578195869	0	0	0	0	0
67.2	0.771138701	-150.8261459	3.592629783	0	0	0	0	0
67.3	0.765324859	-156.8321484	3.632000187	0	0	0	0	0
67.4	0.754908584	-163.2070585	3.700763226	0	0	0	0	0
67.5	0.73857589	-170.0971035	3.804255221	0	0	0	0	0
67.6	0.714284668	-177.7054233	3.949191955	0	0	0	0	0
67.7	0.678888354	173.6875559	4.143228989	0	0	0	0	0
67.8	0.628326381	163.7371128	4.389869377	0	0	0	0	0
67.9	0.562634947	151.8457746	4.664990951	0	0	0	0	0
68	0.475200469	136.7323977	4.965034152	0	0	0	0	0
68.1	0.363636416	116.9190176	5.256563982	0	0	0	0	0
68.2	0.245944701	89.70780584	5.469542254	0	0	0	0	0
68.3	0.159491813	50.89462935	5.570636459	0	0	0	0	0
68.4	0.142624077	2.154011384	5.585181969	0	0	0	0	0
68.5	0.198316305	-40.10141348	5.530791156	0	0	0	0	0
68.6	0.293419149	-69.36039798	5.394492268	0	0	0	0	0
68.7	0.392919747	-89.84500778	5.189029037	0	0	0	0	0
68.8	0.478915091	-105.0606482	4.953656273	0	0	0	0	0
68.9	0.547004239	-116.9678997	4.723814349	0	0	0	0	0
69	0.59838581	-126.6920323	4.52111269	0	0	0	0	0
69.1	0.635401215	-134.9224364	4.357323119	0	0	0	0	0
69.2	0.659518088	-142.0990316	4.241681137	0	0	0	0	0
69.3	0.670155041	-148.4766433	4.188256971	0	0	0	0	0
69.4	0.664393977	-154.015008	4.217382007	0	0	0	0	0
69.5	0.650052058	-158.056261	4.28795822	0	0	0	0	0
69.6	0.664711629	-160.9952734	4.215787893	0	0	0	0	0
69.7	0.703569772	-164.8347592	4.009970769	0	0	0	0	0
69.8	0.731034735	-169.5022636	3.850356926	0	0	0	0	0
69.9	0.742922024	-174.260269	3.777212474	0	0	0	0	0
70	0.744235067	-178.9572519	3.768972831	0	0	0	0	0

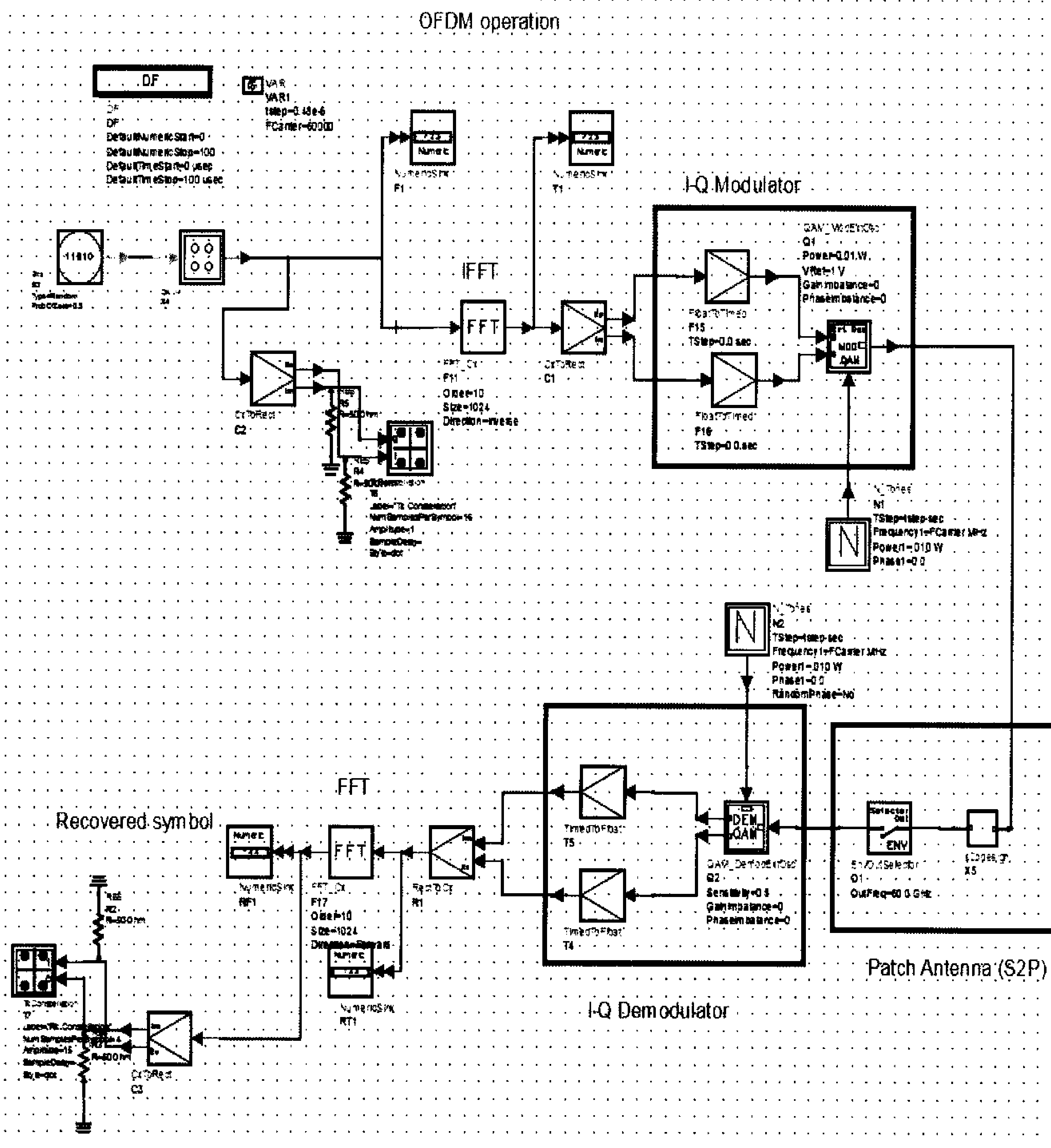
Η κεραία αντιμετωπίστηκε στην προσομοίωση με το HFSS σαν μονόθυρο στοιχείο. Για να εξεταστεί όμως στο ADS και να δούμε την ισχύ στην έξοδο, πρέπει να εξεταστεί ως δίθυρο στοιχείο. Έτσι εισάγουμε, όπως βλέπουμε και παραπάνω στο S2P αρχείο, την παράμετρο S_{21} , με το πλάτος της ($\text{mag}(S_{21})$), χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$|S_{21}| = \sqrt{G(1 - |S_{11}|^2)}, \text{ όπου } G \text{ το κέρδος της κεραίας} \quad (9.2.1)$$

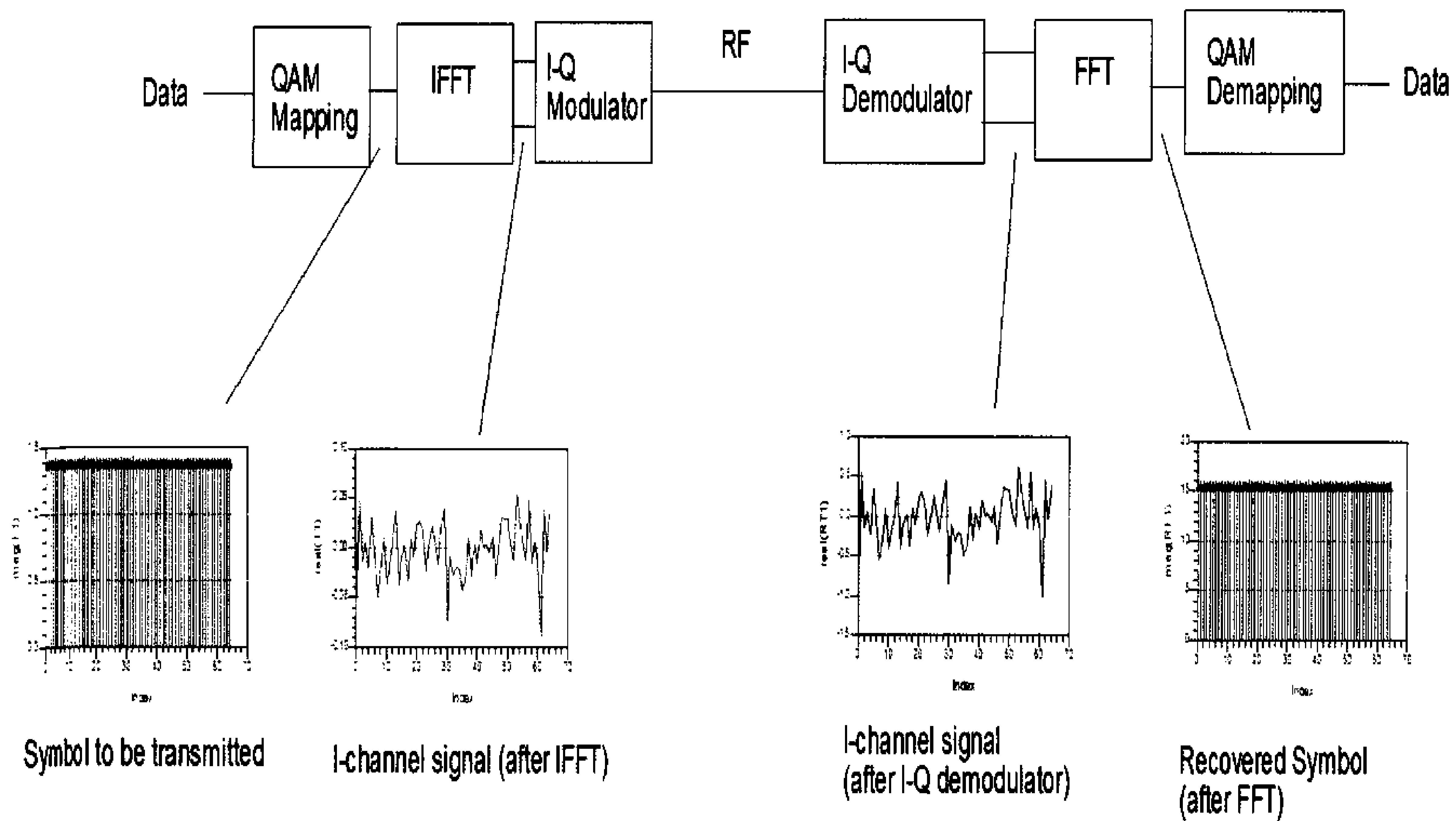
Το S2P αρχείο εισάγεται στο design μας, με την βοήθεια του block S2P, στο οποίο εισάγουμε το path του αρχείου S2P. Για την ομαλή ενσωμάτωση του, καθώς αποτελεί RF κυκλωματικό design, στο design μας, που αποτελεί signal processing design, χρησιμοποιούμε το block ENVELOPE. Αποθηκεύοντας έτσι το S2P σε άλλο design (Εικόνα 9.2.1), το ενσωματώνουμε στο design μας, χρησιμοποιώντας το ENVELOPE (Εικόνα 9.2.2). Στο ENVELOPE ρυθμίζουμε ως output frequency(OutFreq) τη συχνότητα λειτουργίας της κεραίας, η οποία είναι φυσικά τα 60 GHz και step time, ίδιο με αυτό που ορίσαμε στο κυρίως design μας (0.48 μsec), ώστε να εκτελείται σωστά η co-simulation μας. Θεωρούμε επίσης ότι η (Single Mode Fiber-SMF) μονότροπη οπτική ίνα είναι ιδανική και δεν παρουσιάζει απώλειες στις indoor εφαρμογές.



Εικόνα 9.2.1: Το S2P αρχείο εισάγεται στο design μας, με την βοήθεια του block S2P.



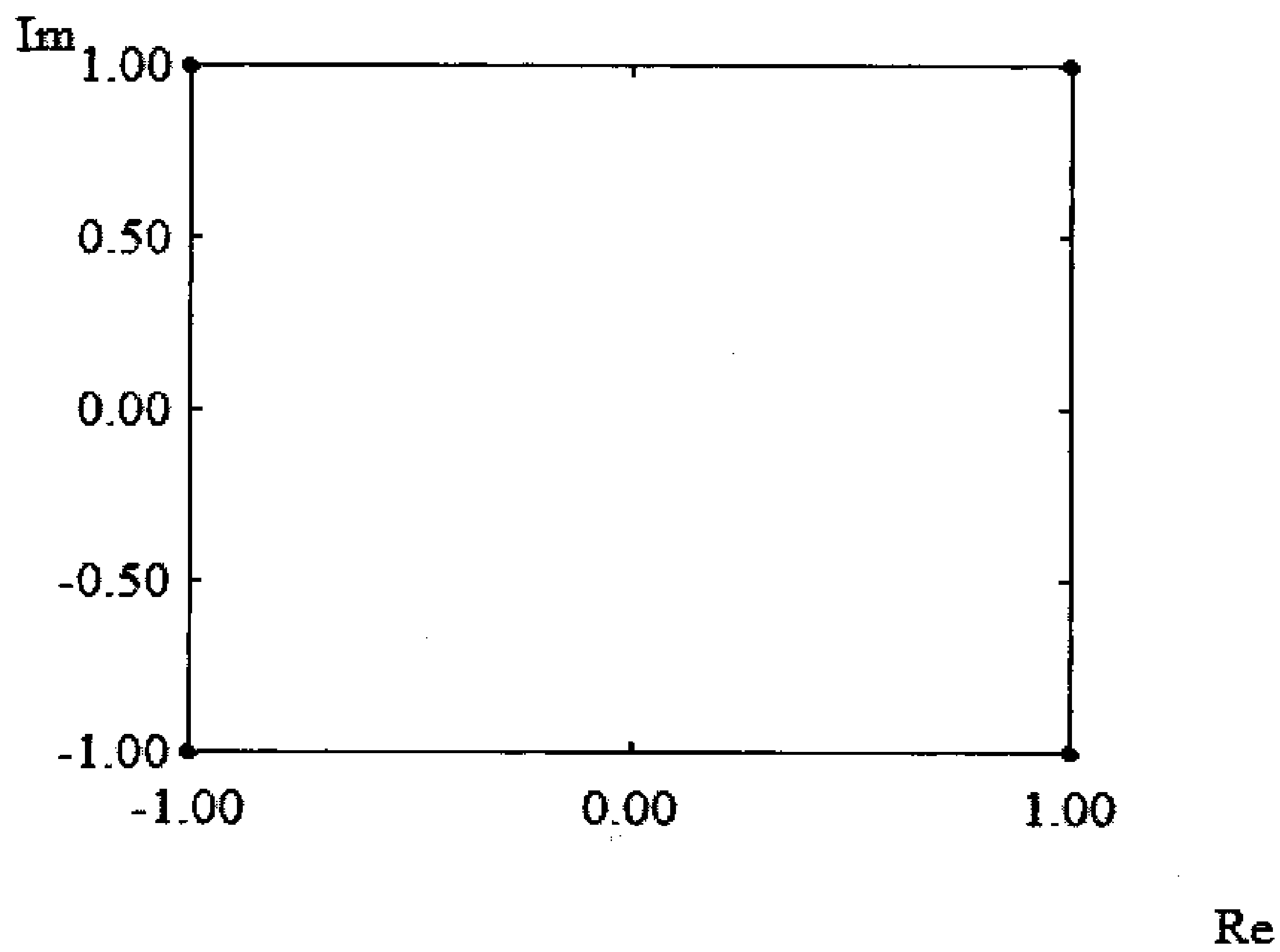
Εικόνα 9.2.2: Εξομοίωση της OFDM, πομπός και δέκτης μαζί με το block S2P.



Εικόνα 9.2.3: Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης στον πομπό και στον δέκτη.

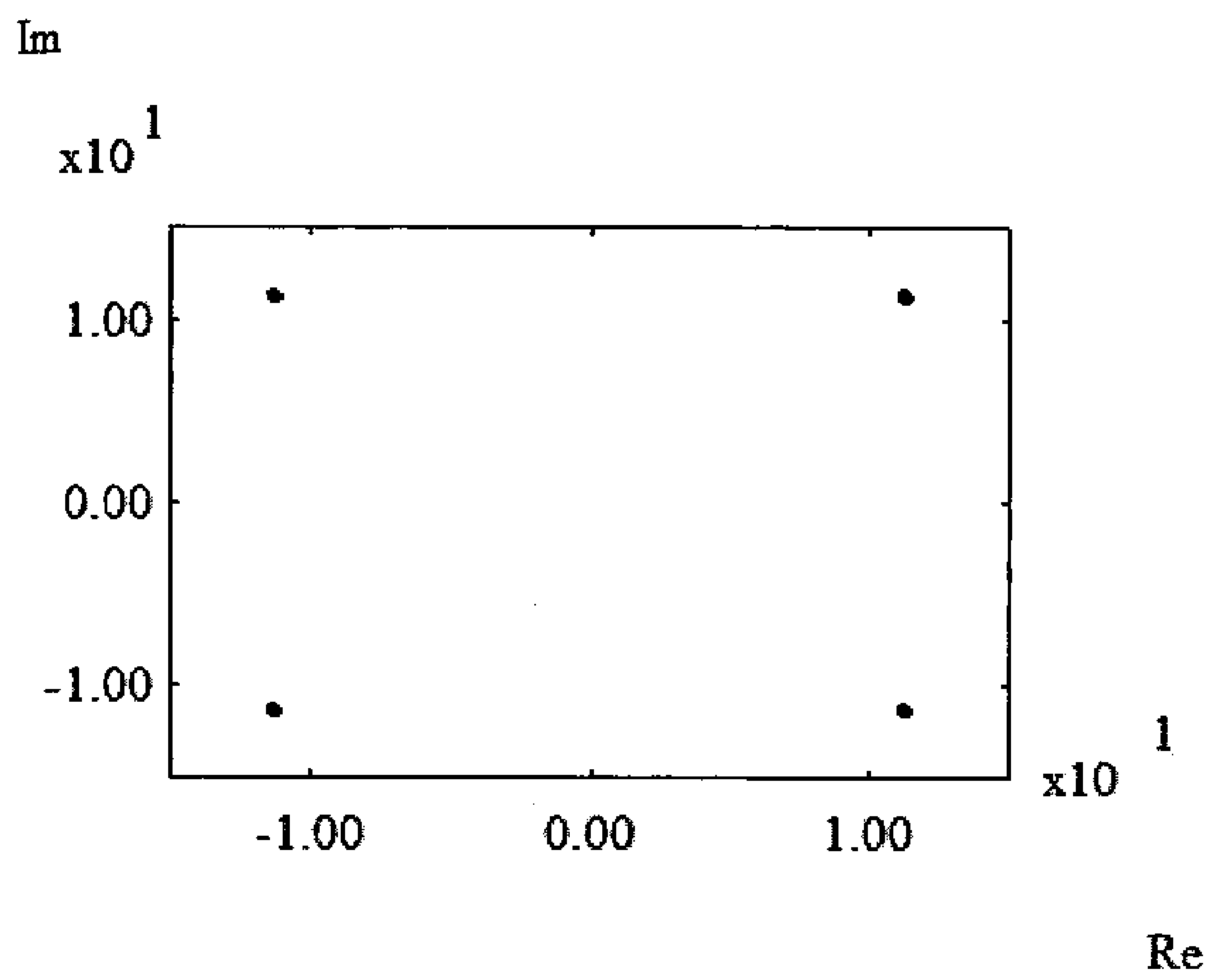
Παρατηρούμε την αύξηση του πλάτους, τόσο στα διαγράμματα αστερισμού, όσο και στο λαμβανόμενο φάσμα, πράγμα λογικό αφού η κεραία που εισάγαμε ενισχύει περαιτέρω το εκπεμπόμενο σήμα. Επίσης παρατηρούμε ότι δεν έχουμε κάποια διασπορά ή διακύμανση τιμών στο διάγραμμα αστερισμού του δέκτη (Εικόνα 9.2.3), διότι δεν υπάρχει κάποιο κανάλι διάδοσης, το οποίο να εισάγει κάποιο είδος παραμόρφωσης ή καθυστέρησης.

Tk Constellation

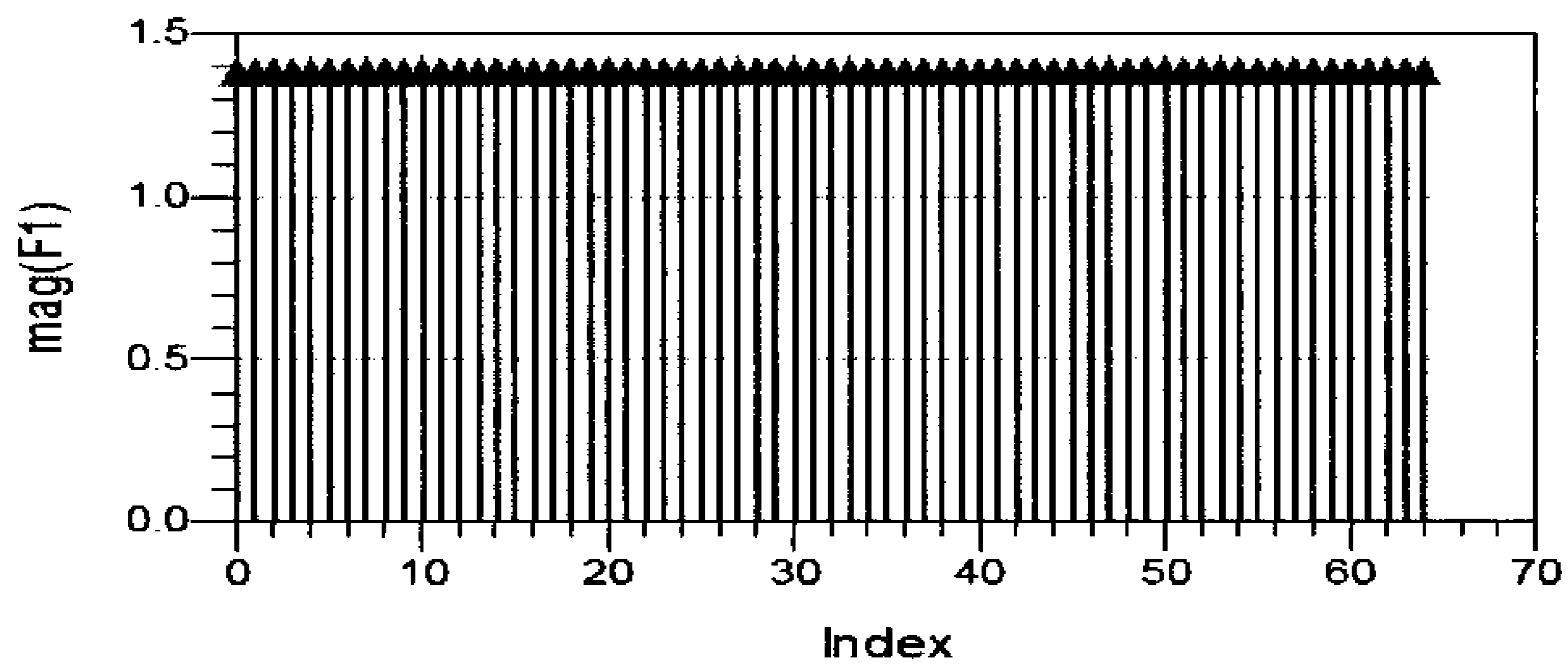


Εικόνα 9.2.4: Διάγραμμα αστερισμού πομπού.

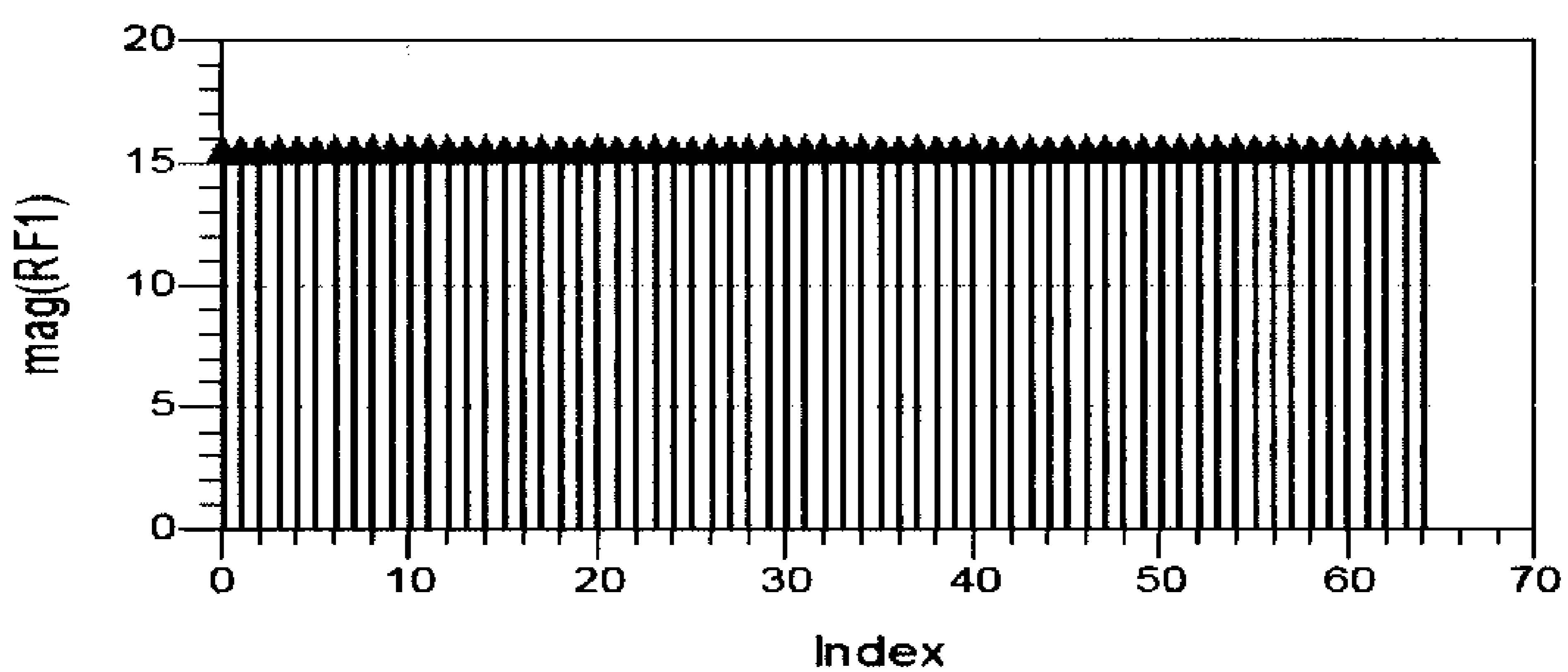
Rk Constellation



Εικόνα 9.2.5: Διάγραμμα αστερισμού δέκτη.



Symbol to be transmitted



Recovered Symbol (after FFT)

Εικόνα 9.2.6: Διαγράμματα πομπού και δέκτη ώστε να φαίνεται η διαφορά στο πλάτος.

ι) Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία προτάθηκε ένα οικονομικά αποδοτικό σύστημα για εσωτερικές κυρίως εφαρμογές, το οποίο χρησιμοποιεί την υβριδική τεχνολογία συνδυασμού ασύρματων και οπτικών δικτύων Radio over Fiber, προσφέροντας ευκολία στην χρήση, ευελιξία και μεγάλη κινητικότητα. μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων, χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένα κυκλώματα πολύ μικρών διαστάσεων, άρα και εύκολα τοποθετήσιμα σε κινητές συσκευές.

Το ηλεκτρικό ισοδύναμο της προτεινόμενης TWPD φωτοδιόδου με υλικό απορρόφησης το InGaAs σε υπόστρωμα κατασκευασμένο από InP, για συχνότητα λειτουργίας 60GHz αναλύθηκε στο Advanced Design System (ADS).

Η μικροταινιακή κεραία, η οποία ακολουθεί την φωτοδίοδο, σχεδιάστηκε και αναλύθηκε, με διαγράμματα ακτινοβολίας, στο πρόγραμμα High Frequency Structure Simulator (HFSS). Έχει κέρδος περίπου 15dB στη συχνότητα λειτουργίας των 60 GHz, για αυτό παρατηρήθηκε αύξηση κατά 15dB στο πλάτος των συμβόλων, όταν προστέθηκε και η κεραία στην προσομοίωση της OFDM.

Στη συνέχεια τόσο η λειτουργία της OFDM μεμονωμένα, η οποία είναι μια διαμόρφωση διαίρεσης συχνοτήτων πολλαπλών, επικαλυπτόμενων και ορθογωνίων μεταξύ τους φερόντων, όσο και ολόκληρου του συστήματος, με την κεραία σαν S-παραμέτρους, υλοποιήθηκε και εξετάστηκε μέσω προσομοιώσεων χρησιμοποιώντας το ADS, ώστε να επιβεβαιωθεί η καταλληλότητα της χρήσης της OFDM για μετάδοση δεδομένων στο σύστημα μας. Ενοείται, ότι την αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιούμε και για την ενσωμάτωση της φωτοδιόδου στο σύστημα μας, τοποθετώντας την σαν 'υποσχέδιο' (subdesign), η οποία αναμένεται να λειτουργήσει ομαλά, αφού την έχουμε σχεδιάσει να λειτουργεί στην επιθυμητή συχνότητα (60 GHz), να έχει το απαιτούμενο εύρος ζώνης (To BW μετρήθηκε ίσο με 19 GHz) και να είναι κατάλληλα κατασκευασμένη ώστε να ενσωματωθεί στο σύστημα (coplanar δομή). Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν, όπως είδαμε, για back to back συστήματα, δηλαδή χωρίς την παρεμβολή κάποιου καναλιού (μέσου μετάδοσης). Εάν παρεμβάλουμε κάποιο κανάλι, θα παρατηρούσαμε κάποια μικρή διασπορά των τιμών στα διαγράμματα αστερισμού του δέκτη, καθώς η OFDM είναι ικανή να υπερκαλύψει τις απώλειες κατά τη μετάδοση του σήματος στο κανάλι όπως είπαμε ειδικά στην συχνότητα των 60 GHz είναι πολύ μεγάλες.

Τέλος, η μετάδοση μέσω οπτικών ινών θεωρήθηκε ιδανική δεν λήφθηκε υπόψη, καθώς οι οπτικές ίνες προσφέρουν ένα τεράστιο εύρος ζώνης και ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων με ελάχιστες απώλειες. Ειδικά για indoor εφαρμογές, που οι αποστάσεις είναι πολύ μικρές, η μετάδοση προσεγγίζει και πρακτικά το ιδανικό.

Εν κατακλείδι, με αυτό το σύστημα μπορούμε να αξιοποιήσουμε αποδοτικά το φάσμα των 60 GHz, το οποίο μελετάται εντόνως τα τελευταία χρόνια και υπόσχεται να δημιουργήσει την επόμενη γενιά τοπικών ασύρματων δικτύων.

10. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Coplanar waveguides (CPW), <http://qucs.sourceforge.net/tech/node86.html>.
- [2] Bond wire, <http://qucs.sourceforge.net/tech/node84.html>.
- [3] The principles of OFDM, <http://dc309.4shared.com/doc/z0pw-xx3/preview.html>.
- [4] <http://www.ece.ucsb.edu/wcsl/mmwcsresearch/lib/exe/fetch.php?cache=&media=wm60ghzspectrumallocation.png>.
- [5] Calculation of the optical field distribution in travelling-wave photodetectors, <http://www.oe.uni-duisburg.de/Reports/jb95/mwp5.html>.
- [6] David A. Sobel BWRC Retreat, 2004, *Opportunities and Challenges in 60GHz Wideband Wireless System Design*.
- [7] Gayan de Alwis and Murray Delahoy, 2004, “60 GHz Band Millimetre Wave Technology”, *Australian Communications Authority*.
- [8] David A. Sobel, 2004, *Opportunities and Challenges in 60GHz Wideband Wireless System Design*.
- [9] Μαρκόπουλος Σ. Ιωάννης , Οκτ 2006, *Σχεδιασμός συστήματος OFDM για μικροκυματικές συχνότητες σε περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου*.
- [10] Gordana Klaric Felic and Efstratios Skafidas, 2011, *Integration of 60-GHz Microstrip Antennas with CMOS Chip*, InTech, Australia.
- [11] Andreas Stöhr, Sebastian Babel, Paul J. Cannard, Benoît Charbonnier, Frédéric van Dijk, Sascha Fedderwitz, Dave Moodie, Leon Pavlovic, Lalitha Ponnampalam, Cyril C. Renaud, Dave Rogers, Vitaly Rymanov, Alwyn Seeds, Andreas Gerhard Steffan, Andreas Umbach and Mario Weiß, Nov 2010, “Millimeter-Wave Photonic Components for Broadband Wireless Systems”, in *Proc IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 58, No. 11, pp. 3071-3082.
- [12] Frank Winkler, Erik Fischer, Eckhard Graß and Gunter Fischer, *A 60 GHz OFDM Indoor Localization System Based on DTDOA*.
- [13] L.D. Kabulepa, *OFDM Basics for Wireless Communications*, VLSI_Comms WS03-04/Generalities, Darmstadt University of Technology.
- [14] Gayan de Alwis, Murray Delahoy, December 2004, *60 GHz Band Millimetre Wave Technology*, Australian Communications Authority.

- [15] OSI Optoelectronics, *Photodiode Characteristics and Applications*, UDT Sensors Inc., California.
- [16] Agilent Technologies, 2001, *Simulation of OFDM Impairments using ADS WLAN 802.11a Design Library and Design Guide*, USA.
- [17] Mahmoud Nikoufard, 2008, *Integrated Wavelength Division Multiplexing Receivers*, Cip-Data Library Technische Universiteit Eindhoven, Netherlands.
- [18] Andreas Beling aus Bonn, Nov 2006, *Periodic Travelling Wave Photodetectors with Serial and Parallel Optical Feed Based on InP*, Berlin, Germany.
- [19] Agilent Technologies, 2004, *WLAN Design Guide*, USA.
- [20] Agilent Technologies, 2001, *Simulation of WLAN System*, USA.
- [21] Dingqing Lu and Jinbiao Xu, 2003, *A WLAN Test System using Test Equipment with EDA Software*, USA.
- [22] Annbal Luis Intini, December 2000, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Networks*, Electrical and Computer Engineering Department, Santa Barbara.
- [23] Chang-Soon Choi, Eckhard Grass, Maxim Piz, Marcus Ehrig, Miroslav Marinkovic, Rolf Kraemer and Christoph Scheytt, 2010, "60-GHz OFDM systems for multi-gigabit wireless LAN applications", *IEEE CCNC 2010 proceedings*, 978-1-4244-5176-0/10/ IEEE.
- [24] Francesco Fornetti, May 2003, *Wireless Optical Transceivers*, United Kingdom.
- [25] Sotiris Karabetsos, Spiros Mikroulis, Athanase Nassiopoulos, 2009, *Radio over Fiber for Broadband Communications*, British Library, New York.
- [26] Ivan Flammia, Christoph C. Leonhardt, Jorg Honecker, Andreas G. Steffan, Andreas Stohr, 2011, "Novel E-Band (71-76 GHz) Photodiode Module featuring a Hermetic Grounded-Coplanar-Waveguideto-Rectangular-Waveguide Transition", 978-1-61284-718-4/11/ IEEE, pp.405-408.
- [27] D.Trommer, A.Umbach, G.Unterborsch, 1998, "InGaAs Photodetector with Integrated Biasing Network for mm-Wave Applications", *10th Intem. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials*, 0-7803-4220-8/98 IEEE, pp. 276-279.
- [28] A. Umbach, D. Trommer, R. Streingüber, A. Seeger, W. Ebert and G. Unterborsch, 2001, "High-speed, high-power 1.55 μm photodetectors", *Optical and Quantum Electronics*, 33, pp.1101-1112.
- [29] RSA Raja Abdullah, D. Yoharaaj, and Alyani Ismail, 2006, "Bandwidth Enhancement Technique in Microstrip Antenna for Wireless Applications", *PIERS ONLINE*, VOL. 2, NO.6, pp.633-639.

- [31] J. E. Bowers, Y. G. Wey, *High-Speed Photo detectors*, Chapter 17, Department of Electrical and Computer Engineering, Santa Barbara, California.
- [32] Kazutoshi Kato, Yoshifumi Muramoto, 1998, Millimeter-wave opto-electronic devices based on waveguide photodiodes, *Optical and Quantum Electronics* 30, pp.957-967.
- [33] Kirk Steven Giboney, August 1995, *Travelling-Wave Photodetectors*, University of California, Santa Barbara, California.
- [34] Dr. Haim Matzner, Shimshon Levy and Dafna Ackerman, July 2008, *Getting Start with Agilent – ADS Software*.
- [35] Sasidar Vaja, 1999, *Agilent ADS Tutorial*.
- [36] Prof. S. Long, 2007, *A short tutorial on using Agilent ADS*, ADS tutorial basics.
- [37] Chris Sanabria, Sept 2002, *A Crash Course on Using Agilent Advanced Design System (ADS)*.
- [38] Agilent Technologies, Inc. 2009, *Quick Start for Signal Integrity Design Using Agilent ADS*, USA.
- [39] Ansoft Corporation, June 2005, *High Frequency Structure Simulator*, USA.
- [40] K. Li, C. H. Cheng, T. Matsui and M. Izutsu, “Simulation and Experimental Study on coplanar Patch Array Antennas”, *Communications Research Laboratory (CRL)*, MPT of Japan.
- [41] Teguh Prakoso, Razali Ngah, and Tharek Abdul Rahman, 2008, “Representation of Antenna in Two-Port Network S-Parameter”, *IEEE International RF and Microwave Conference Proceedings*, Kuala Lumpur, Malaysia.