

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

Sviluppo di modelli CST (Computer Simulation Technology) per l'analisi di campi elettromagnetici

Laureando:
Fabio SPINELLO

Relatore:
Prof. Giada GIORGI

Anno accademico 2009/2010

Sommario

L'evoluzione tecnologica dell'ultimo ventennio ha portato alla creazione di circuiti dalle dimensioni sempre più ridotte che implementano le funzionalità più varie. Analogamente si è anche assistito, nel campo dell'elettronica e delle telecomunicazioni, ad un aumento delle frequenze dei segnali utilizzati nelle varie applicazioni. Questo ha fatto sì che il comportamento elettrico di un qualsiasi dispositivo non potesse più venire descritto semplicemente con leggi dell'elettrotecnica che utilizzano il modello delle costanti concentrate. In questo infatti si considerano grandezze come: resistenze, induttanze e capacità concentrate in un unico punto del circuito e collegate agli altri elementi mediante conduttori pressoché ideali. Dal momento che i risultati ottenuti con tale metodo risultano essere o eccessivamente approssimati o del tutto errati si è provveduto a trovare un'altra via per l'analisi dei circuiti. Dal momento che le lunghezze d'onda delle armoniche formanti i segnali normalmente utilizzati hanno dimensioni comparabili con le lunghezze dei conduttori presenti nei circuiti si è dovuto utilizzare un altro modello descrittivo, comunemente chiamato a *costanti distribuite*. In questo i conduttori vengono divisi porzioni abbastanza piccole, rispetto alle lunghezze d'onda in gioco, ognuna delle quali viene descritta mediante le sue caratteristiche resistive, capacitive ed induttive. Questo tipo di approccio è oggi la base per la determinazione della modalità con cui i segnali si propagano nei circuiti e quindi per descrivere le disposizioni dei campi elettrici e magnetici in un intorno degli stessi. Il metodo sopra descritto presenta tuttavia un grande inconveniente ossia richiede di svolgere parecchi calcoli affinché i risultati ottenuti possano dirsi precisi; nonostante i procedimenti da adottare non siano eccessivamente complessi richiedono però una grande mole di calcolo che ne impedisce l'applicazione a descrizioni troppo dettagliate di qualsiasi modello. Come però



Figura 1: Logo del CST simulator.

spesso accade, insieme al problema si sviluppano anche i metodi e le tecniche necessari per affrontarlo e risolverlo. Il progresso tecnologico ha infatti portato alla creazione e allo sviluppo dei computer che opportunamente programmati con particolari software possono svolgere al posto dell'uomo enormi moli di calcolo in tempi ristretti. Con l'avvento dei calcolatori si sono quindi creati i primi programmi grazie ai quali era possibile caratterizzare e prevedere il comportamento dei campi elettromagnetici. La creazione di questi software trovava tuttavia parecchie difficoltà di sviluppo in quanto non era affatto semplice la scrittura di algoritmi che permettessero la sintesi, dal punto di vista elettrico, di un qualsiasi modello fisico. Fortunatamente negli ultimi anni la risoluzione di questo problema stata ha dato ottimi risultati consentendo di ottenere software di altissimo livello come il CST Simulator che consente di fatto la riproduzione e la simulazione di qualsiasi modello elettrico. Tali strumenti, oltre a soddisfare le necessità sopra esposte sono diventati anche indispensabili nella progettazione di circuiti complessi: dalle semplici schede elettroniche, ai connettori, alle antenne. Il loro utilizzo è inoltre significativo specialmente nella verifica del comportamento dei dispositivi nell'ambito della compatibilità elettromagnetica. Di seguito dopo una spiegazione del funzionamento del CST software ne viene presentata l'applicazione

nello studio del comportamento di alcuni semplici modelli, implementanti schede elettroniche con layout differenti. Grazie alle simulazioni sarà possibile notare analogie e differenze nel loro comportamento elettrico arrivando ad apprezzare dettagli che non si sarebbero potuti determinare con altri strumenti.

Il seguente elaborato espone le modalità e le procedure mediante le quali è possibile utilizzare il software CST per la creazione di modelli di circuiti elettronici e per la simulazione del loro comportamento dal punto di vista elettromagnetico. Dopo una breve introduzione necessaria alla comprensione del comportamento e della disposizione spaziale dei campi elettromagnetici, viene illustrato il funzionamento del software CST. In questa sezione ci si focalizza principalmente sugli strumenti messi a disposizione dal tool CAD per la costruzione dei modelli e sulle opzioni che consentono di regolare lo svolgimento della simulazione e l'accuratezza dei risultati finali.

Segue quindi la costruzione di otto modelli esemplificativi che riproducono varie configurazioni di schede elettroniche in cui gli elementi principali sono una pista e un dispositivo che funge da riferimento di massa separati da uno strato di materiale isolante. Simulando l'alimentazione dei dispositivi mediante una guida d'onda viene studiata la disposizione dei campi elettrico e magnetico, delle correnti di superficie e del profilo di irradiazione per ogni modello; i risultati vengono quindi confrontati fra loro.

Le procedure illustrate e gli esempi esposti rappresentano quindi un valido strumento per indagare il comportamento di una qualsiasi dispositivo elettronico ai fini della sua caratterizzazione per il sempre più importante ambito della compatibilità elettromagnetica.

Indice

Sommario	iii
1 Elettromagnetismo	1
1.1 Cenni storici	1
1.2 Campo elettrico e magnetico	2
1.3 Equazioni di Maxwell	4
1.4 Onde elettromagnetiche	5
1.5 Guide d'onda	8
1.6 Modi di propagazione	9
1.7 Parametri S	11
2 CST Simulator	13
2.1 Tools disponibili	13
2.2 Interfaccia CAD	14
2.3 Mesh	19
2.4 Sorgenti di eccitazione	23
2.5 Modalità di risoluzione	26
2.6 Principo della simulazione	28
2.7 Errori nella simulazione	29
3 Creazione di un semplice modello e relativa simulazione	31
3.1 Selezione del tool e costruzione del modello CAD	31
3.2 Configurazione della simulazione	34
3.3 Avvio della simulazione e visualizzazione dei risultati	36
3.4 Osservazioni varie	38
4 Microstrip angolare	41
4.1 Descrizione	41
4.2 Costruzione dei modelli CAD	42
4.3 Parametri di simulazione	44
4.4 Risultati della simulazione del primo modello	46
4.5 Risultati della simulazione del secondo modello	54
4.6 Osservazioni	57
5 Microstrip con piano di massa	61
5.1 Descrizione	61
5.2 Costruzione dei modelli CAD	61
5.3 Parametri di simulazione	65
5.4 Risultati della simulazione del primo modello	65
5.5 Risultati della simulazione del secondo modello	71
5.6 Osservazioni	80

6	Microstrip con griglia di massa	81
6.1	Descrizione	81
6.2	Costruzione dei modelli CAD	82
6.3	Parametri di simulazione	85
6.4	Risultati della simulazione del primo modello	86
6.5	Risultati della simulazione del secondo modello	92
6.6	Osservazioni	100
7	Microstrip con bordo di massa	103
7.1	Descrizione	103
7.2	Costruzione dei modelli CAD	104
7.3	Parametri di simulazione	106
7.4	Risultati della simulazione del primo modello	107
7.5	Risultati della simulazione del secondo modello	114
7.6	Osservazioni	120
	Conclusioni	123
	Bibliografia	125

Capitolo 1

Elettromagnetismo

L'elettromagnetismo è la disciplina che si occupa di studiare i fenomeni elettrici e magnetici. Questi, oltre ad essere alla base di moltissimi fenomeni naturali, che si possono osservare tutti i giorni, sono il fondamento dell'elettronica, delle telecomunicazioni e di una vasta gamma di tecnologie che accompagnano l'uomo nella vita quotidiana. Verranno di seguito spiegati gli aspetti più importanti dell'elettromagnetismo utili per comprendere ciò che successivamente verrà esposto.

1.1 Cenni storici

I fenomeni elettrici e magnetici sono sempre stati osservati dell'uomo nel corso della sua vita, tuttavia furono i greci nel 600 A.C. che cominciarono ad indagarli. *Talete di Mileto* infatti osservava che l'ambra, precedentemente strofinata su di un panno di lana, aveva la capacità di attrarre dei corpi leggeri. Analogamente si era anche osservato che la calamita, un minerale composto da protossido e sesquiossido di ferro, aveva la particolare proprietà di attrarre quest'ultimo. Le proprietà di questi materiali furono indagate anche da *Plinio il Vecchio*, ma è necessario attendere il 1600 affinché gli studi su questo campo possano proseguire. Proprio in quegli anni *William Gilbert* si rese conto, tramite vari esperimenti, come la forza esercitata dalla calamita fosse molto simile a quella dell'ambra strofinata; mentre *Otto von Guericke*, sempre nello stesso periodo, costruì il primo generatore elettrostatico basato sullo sfregamento di una sfera di zolfo. Da allora gli studi su elettricità e magnetismo proseguirono abbastanza indipendentemente, fino al XIX secolo. Durante questo lungo intervallo di tempo vennero costruiti molti dispositivi e individuate parecchie relazioni nel campo dell'elettricità e del magnetismo. Per fare qualche esempio si può citare la pila di *Alessandro Volta*, la legge di Ohm di *Georg Simon Ohm* e la lampadina di *Thomas Alva Edison*. Fu però lo scienziato *James Clerk Maxwell* a dare una spiegazione unitaria dei fenomeni elettrici e magnetici grazie alla sintesi di tutte le relazioni scoperte fino ad allora nelle celebri quattro equazioni che prendono il suo nome. Successivamente nel 1887 *Heinrich Hertz*, partendo dalle equazioni di Maxwell, teorizzò l'esistenza delle onde elettromagnetiche che furono successivamente prodotte e rilevate sperimentalmente da *Guglielmo Marconi*. I fenomeni legati all'elettromagnetismo sono oggi alla base di tutte le tecnologie per l'elettronica e le telecomunicazioni.

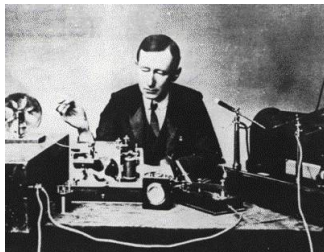


Figura 1.1: Guglielmo Marconi in una stazione radio.

1.2 Campo elettrico e magnetico

In natura si possono trovare sostanzialmente tre tipi di cariche. Queste sono state classificate come: positive, negative e neutre. Per fare un esempio pratico, la più piccola carica positiva è il protone, la più piccola negativa è l'elettrone e la più piccola neutra il neutrone. Da risultati sperimentali si può anche osservare che cariche dello stesso segno si respingono, mentre cariche di segno contrario si attraggono; questo naturalmente non vale per i neutroni che, come è intuibile dal loro nome, non esercitano nessuna influenza su qualsiasi altra carica. Ulteriori indagini hanno portato alla quantificazione sia della carica di protoni ed elettroni che della forza con cui si attraggono o respingono due cariche qualsiasi, per giungere quindi alla formulazione della legge di Coulomb. Considerando infatti due cariche, la direzione della forza attrattiva o repulsiva che le coinvolge giacerà lungo la retta passante per esse e il modulo sarà definito dalla legge di Coulomb $F = Kq_1q_2/r^2$ dove r è la distanza fra le due cariche. È chiaro dalla

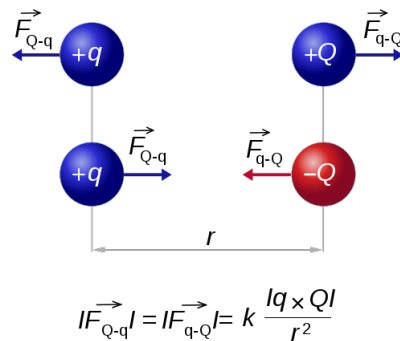


Figura 1.2: Applicazione della legge di Coulomb

formula che se le cariche sono dello stesso segno la forza sarà repulsiva, mentre se le cariche hanno segno opposto sarà attrattiva. Partendo da questa considerazione è quindi lecito affermare che le cariche statiche influenzano lo spazio circostante. Per capire meglio la cosa si può pensare ad un sistema molto semplice, composto da una sola carica, chiamata q_0 , posta nello spazio in un determinato punto. Se ora si considera una carica di prova q_1 e la si inserisce anche questa nello spazio sopra descritto, si potrà notare che risente dell'influenza di q_0 . Per quantificare questo effetto si definisce il vettore **campo elettrico**, la cui direzione è la stessa della forza Coulombiana e il cui modulo vale:

$$E = \frac{F}{q_1}$$

Dalla definizione appena scritta si possono quindi tracciare le linee di campo presenti nello spazio intorno ad una generica carica positiva o negativa; queste avranno direzione radiale rispetto alla carica e saranno orientate a seconda del suo segno come si può vedere dalla figura: Fra le altre cose è molto interessante

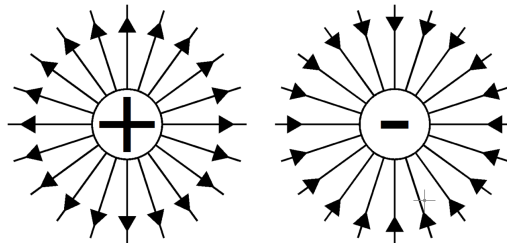


Figura 1.3: Linee di campo elettrico per una carica positiva e negativa.

osservare le linee di campo elettrico in un sistema di cariche che evidenziano le relazioni reciproche che si vengono a creare nello spazio. Il sistema più semplice da osservare è quello composto soltanto da due cariche, entrambe positive o entrambe negative, come si può vedere dalla figura. Entrambi gli schemi

sono abbastanza intuitivi se si pensa che comunque il vettore campo elettrico ha la stessa direzione della forza di Coulomb e che è fortemente legato ad essa.

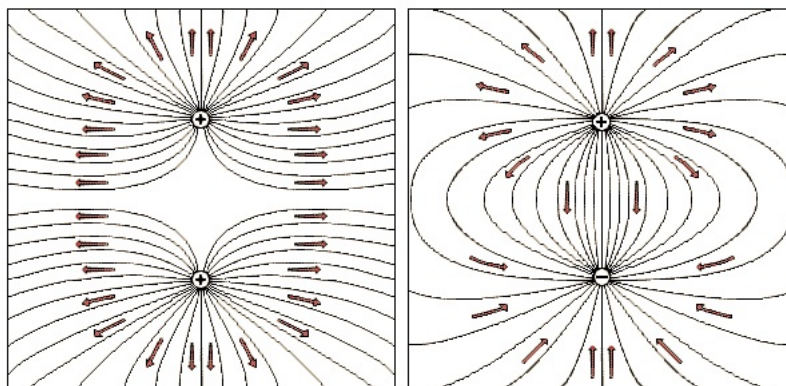


Figura 1.4: Linee di campo elettrico per due cariche di segno opposto e dello stesso segno.

Altri fenomeni interessanti, oltre a quelli che coinvolgono le cariche elettriche, sono quelli realizzati tramite le calamite. Questi oggetti sono caratterizzati dall'aver due estremità generalmente denominate *Nord* e *Sud*. Se si prendono due calamite e si considerano le relative estremità, si può osservare sperimentalmente come poli diversi si attraggono mentre poli uguali si respingono, segno inequivocabile della presenza di una forza che prende il nome di *forza magnetica*. È quindi logico supporre anche in questo caso l'esistenza di un campo, generato dalla calamita, che perturba lo spazio circostante; questo prende il nome di **campo magnetico**. Nonostante la calamita sia il mezzo più semplice, è anche possibile

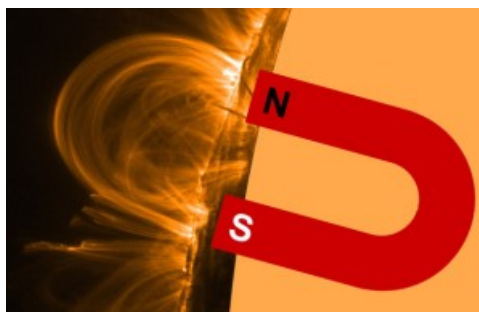


Figura 1.5: Una calamita in cui sono evidenziate le linee di campo magnetico.

riprodurre con altri mezzi un campo magnetico.

In natura si possono identificare sostanzialmente due tipologie di materiali, i conduttori e gli isolanti. Nei materiali *conduttori* eventuali cariche poste su di essi, sono libere di muoversi e generalmente si dispongono su tutta la superficie del materiale. Al contrario, nei materiali *isolanti*, eventuali cariche poste su di essi resteranno nella posizione di partenza. Da quanto visto prima il campo elettrico esercita una forza sulle cariche; pertanto se queste non sono in qualche modo vincolate allo spazio, per le leggi della dinamica, cominceranno a muoversi. Preso quindi un materiale conduttore avente delle cariche libere di muoversi al suo interno, condizione che normalmente si verifica nei metalli, e applicato alle estremità un campo elettrico, si avrà uno spostamento di carica che segue le linee di campo. Il flusso ordinato di cariche prende il nome di *corrente elettrica* e viene misurato in Ampere come $A = Q/t$ ossia come la quantità di carica che attraversa una determinata sezione del conduttore in un tempo definito. Ipotizzando adesso di far scorrere una corrente in un conduttore di forma filiforme e avvicinando una calamita ad esso, si nota che compare una forza attrattiva o repulsiva fra i due corpi, a seconda del verso in cui scorre la corrente nel conduttore. Da questa osservazione si può quindi dedurre che una corrente elettrica genera un campo magnetico simile a quello di una calamita. Analogamente a quanto accadeva con il campo elettrico, anche quello magnetico esercita un'influenza sulle cariche a patto però che queste

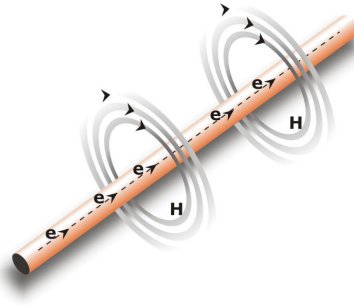


Figura 1.6: Campo magnetico prodotto da un filo percorso da una corrente.

siano in movimento. Se infatti si fa transitare una carica in una regione dello spazio in cui è presente un campo magnetico, si può notare che apparirà sulla carica una forza definita dalla legge di Lorentz:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

dove q è la carica considerata, \mathbf{v} la sua velocità e \mathbf{B} il campo magnetico. Grazie a questa forza si può osservare una variazione della traiettoria della carica che descriverà orbite circolari; questo per la definizione stessa di prodotto vettoriale; la forza sarà perpendicolare sia al campo magnetico che alla direzione di spostamento della carica.

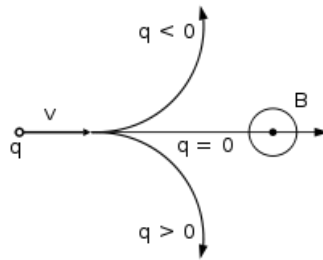


Figura 1.7: Traiettoria di una particella attraversante un campo magnetico a seconda che la carica sia positiva o negativa.

Va infine sottolineato che i modi sopra descritti non sono gli unici per creare un campo elettrico o magnetico. Da risultati sperimentali si può infatti vedere che facendo variare un campo magnetico si ottiene un campo elettrico. È celebre l'esperimento in cui si prende una spira di materiale conduttore e la si fa ruotare all'interno di una regione di spazio contenente un campo magnetico. Osservando la spira, ci si può accorgere, con l'ausilio di opportuni strumenti che all'interno di essa scorre una corrente, segno inequivocabile della presenza di un campo elettrico. Infatti la rotazione della spira, fa sì che il campo magnetico incidente su di essa vari a seconda dell'angolo di rotazione e che quindi risulti variabile. Il risultato di questo esperimento è riassunto con la legge di Faraday-Lenz che prende anche il nome di legge dell'induzione magnetica e che regola fenomeni analoghi a quello sopra descritto. Sempre da risultati sperimentali si può osservare anche il contrario, ossia che un campo elettrico variabile nel tempo genera una corrente anch'essa variabile e quindi un campo magnetico. La cosa si può osservare ad esempio durante la carica di un condensatore a facce piane parallele dove fra le armature transita quella che viene definita *corrente di spostamento*, di natura diversa dalla normale corrente elettrica.

1.3 Equazioni di Maxwell

Il comportamento dei campi elettrici e magnetici e la loro interazione può essere descritto interamente grazie alle quattro equazioni di Maxwell. Furono scritte nel 1873 ad opera del fisico tedesco James Clerk

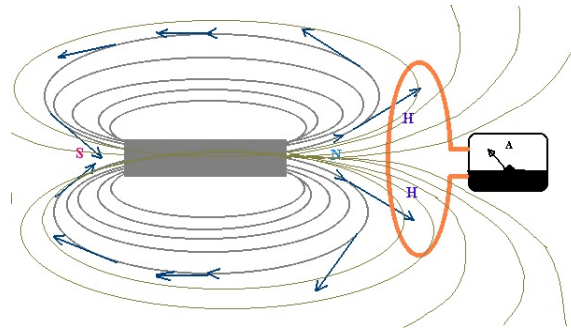


Figura 1.8: Fenomeno dell'induzione elettromagnetica.

Maxwell e riassumono tutte le scoperte fatte fino ad ora, combinandole insieme e rendendole coerenti fra loro. Nel dettaglio le quattro equazioni sono:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot E &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times E &= -\frac{dB}{dt} \\ \nabla \times B &= \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{dE}{dt}\end{aligned}$$

La prima, conosciuta anche come teorema del flusso di Gauss, mette in relazione il flusso del vettore campo elettrico attraverso una superficie chiusa con le cariche da cui è stato generato risiedenti all'interno della stessa superficie. La seconda invece afferma che il flusso di un campo magnetico sempre attraverso una superficie chiusa è nullo. Questo è dovuto al fatto che le linee di campo magnetico sono sempre chiuse e non si perdono all'infinito come invece può accadere per il campo elettrico. La terza equazione deriva dalla celebre legge di Faraday-Lenz e indica come ad un campo magnetico tempo variante sia sempre legato un campo elettrico. Infine la quarta equazione, conosciuta anche come teorema di Ampere, è la duale alla terza in quanto indica il legame fra un campo elettrico variante nel tempo ed un campo magnetico. Le ultime due equazioni, sono particolarmente importanti poiché sottolineano che la presenza di un campo elettrico variabile nel tempo genera a sua volta un campo magnetico sempre tempo variante e viceversa. Questa particolare proprietà suggerisce quindi che i campi elettrici e magnetici variabili nel tempo, possono propagarsi dal luogo in cui sono generati poiché ogni campo funge da generatore per il suo duale. Va infine sottolineato che tali relazioni sono direttamente dipendenti dal mezzo in cui sono presenti i campi elettromagnetici, infatti la costante dielettrica ϵ e la costante di permeabilità magnetica μ variano a seconda del materiale e spesso anche da regione a regione dello spazio considerato. Pertanto le equazioni di Maxwell possono venire utilizzate nella loro forma differenziale soltanto localmente; se le si vuole applicare a materiali con più regioni aventi proprietà diverse è opportuno esprimerle nella forma integrale utilizzando i teoremi del rotore e della divergenza noti dall'analisi matematica. Fatto questo si devono determinare chiaramente le *condizioni al contorno*, cioè definire con precisione i confini delle zone del materiale in questione in cui le sue proprietà variano bruscamente. A questo punto è quindi possibile integrare le equazioni di Maxwell lungo tutte le transizioni ed ottenere il risultato cercato. Questo metodo è ampiamente utilizzato specialmente nei software di simulazione dove, a maggior ragione, è necessario discretizzare e definire chiaramente le proprietà elettriche e magnetiche di ogni singola porzione di materiale.

1.4 Onde elettromagnetiche

Esaminando le equazioni di Maxwell è possibile dedurre dal punto di vista teorico l'esistenza delle onde elettromagnetiche. Un'onda, in generale, è una perturbazione che si propaga nello spazio ed evolve nel tempo. Viene generalmente espressa tramite una funzione chiamata appunto *funzione d'onda* ed indicata con $\psi(\mathbf{r}, t)$. Tale funzione indica il valore della perturbazione per ogni punto dello spazio e per

ogni istante del tempo. Un'onda è sempre caratterizzata da due proprietà fondamentali: la periodicità spaziale e temporale. In altre parole, fissato un determinato istante temporale, un'onda deve ripetere la sua forma periodicamente nello spazio. E analogamente, fissato un sistema di coordinate spaziali, l'onda dovrà ripetersi periodicamente al variare del tempo. Combinando opportunamente le relazioni matematiche sulla funzione d'onda che impongono la periodicità spaziale e temporale si giunge ad una relazione finale che le riassume chiamata equazione di Helmholtz:

$$\nabla^2 \psi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{v^2} \frac{d^2}{dt^2} \psi(\mathbf{r}, t)$$

dove v è la velocità di propagazione dell'onda. Grazie a questo risultato è quindi possibile affermare che ogni funzione ψ che soddisfa l'equazione di Helmholtz rappresenta e descrive un'onda. Oltre alla funzione ψ ci sono anche altri parametri per caratterizzare un'onda quali la lunghezza d'onda λ che indica la distanza spaziale alla quale si ripete la forma base dell'onda. Un altro parametro è T che indica il periodo di ripetizione temporale. L'inverso del periodo viene invece chiamato frequenza ed indicata con ν . Quest'ultima grandezza è legata alla lunghezza d'onda dalla relazione $v = \lambda\nu$.

Combinando ora opportunamente le equazioni di Maxwell è possibile, in alcuni passaggi, ricondurle alla funzione di Helmholtz provando in questo modo l'esistenza, almeno dal punto di vista teorico di onde composte da un campo elettrico e un campo magnetico variabili nel tempo.. In particolare si ottiene che:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{E}$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{B}$$

Dalle relazioni matematiche sopra citate, si scopre anche un'altra importante caratteristica, cioè che

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c$$

in altre parole la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche, nel vuoto, è uguale alla velocità della luce. Le equazioni sopra scritte, non danno però nessuna informazione sulla geometria delle onde elettromagnetiche, a parte il fatto che il campo elettrico e magnetico sono sempre ortogonali fra loro e rispetto alla direzione di propagazione dell'onda. La geometria che descrive al forma dei fronti d'onda può essere invece di vario tipo. Infatti qualsiasi funzione $E(\mathbf{r}, t)$ o $B(\mathbf{r}, t)$ che soddisfi l'equazione di Helmholtz descrive un'onda. Le geometrie più comuni che si possono trovare sono sostanzialmente tre: **piana**, **sferica** e **cilindrica**. Queste descrivono la forma dei fronti d'onda che si propagano nello spazio come si può vedere nelle figura 9. Solitamente la geometria più utilizzata è quella piana, poiché sebbene normalmente le onde vengano emesse con geometria sferica dalle sorgenti, a grande distanza da queste si possono considerare aventi geometria piana. Questo perchè un pezzo della superficie di una sfera avente raggio grandissimo può tranquillamente venire approssimata con un piano.

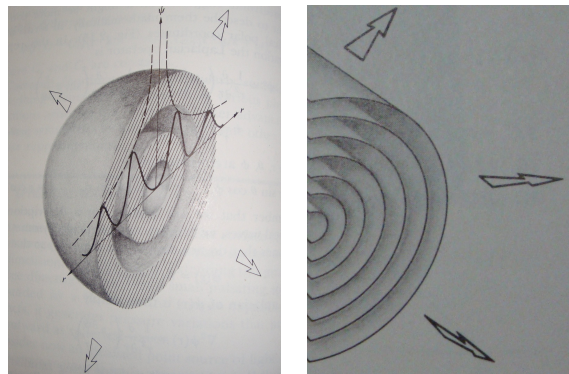


Figura 1.9: Esempi di geometrie che soddisfano l'equazione di Helmholtz, a sinistra un'onda sferica e a destra una cilindrica.

Come visto precedentemente, le onde elettromagnetiche possono essere caratterizzate anche da altri parametri quali la frequenza ν e la lunghezza d'onda λ . Normalmente, le onde vengono classificate in base alla frequenza in uno schema che prende il nome di spettro elettromagnetico. Le proprietà

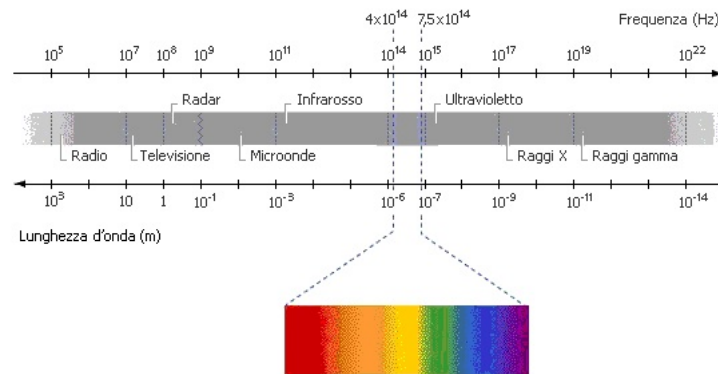


Figura 1.10: Classificazione dello spettro elettromagnetico; in evidenza la banda di frequenze di onde elettromagnetiche visibili dall'occhio ossia la luce.

delle onde variano tuttavia con la frequenza; per cominciare si può infatti considerare che onde con frequenze più alte trasportano più energia di onde a frequenze più basse. Inoltre al variare della frequenza variano le proprietà di propagazione e interazione con la materia delle onde elettromagnetiche. Ecco che quindi lo spettro sopra citato viene ulteriormente diviso in sottosezioni a seconda delle necessità tecniche o di studio. Un esempio immediato riguarda l'ambito delle radio comunicazioni: solitamente per questo campo si considera una porzione di spettro elettromagnetico che va dai 3 Hz ai 300 GHz. In questa sottosezione si procede poi con un'ulteriore classificazione come si può vedere dalla figura. A

Spettro delle onde radio										
ELF	SLF	ULF	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF
3 Hz	30 Hz	300 Hz	3 kHz	30 kHz	300 kHz	3 MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	30 GHz
30 Hz	300 Hz	3 kHz	30 kHz	300 kHz	3 MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	30 GHz	300 GHz

Figura 1.11: Classificazione delle onde elettromagnetiche utilizzate nelle comunicazioni radio.

seconda della frequenza le onde saranno impiegate in ambiti diversi; per fare qualche esempio le onde a bassissima frequenza, classificate come SLF, ULF, vengono utilizzate nelle comunicazioni fra i sottomarini dal momento che si propagano bene nell'acqua. Diversamente le onde VHF vengono utilizzate per le comunicazioni delle forze dell'ordine, per la trasmissione dei canali televisivi e per le radio commerciali. Un'ultima considerazione deve essere fatta circa le antenne degli apparati di ricezione e trasmissione. Dalla teoria della radiotecnica è noto che l'antenna non può assumere dimensioni qualsiasi ma queste devono sempre essere multiple della lunghezza d'onda trasmessa. Questo deriva dall'analisi delle reti di trasmissione dove si trovano particolari vincoli fra i vari componenti degli apparati che devono essere necessariamente rispettati per il corretto funzionamento del sistema di comunicazione. Per questo motivo dal momento che maggiore è la frequenza dell'onda e minore sarà la sua lunghezza d'onda all'aumentare della frequenza considerata si potranno costruire antenne sempre più compatte. Un buon compromesso fra frequenza e dimensione delle antenne è dato dalle microonde ossia da quella particolare porzione di spettro elettromagnetico compresa fra 300 MHz e 300 GHz. Le lunghezze d'onda varieranno invece da 1 metro a 1 millimetro. Di seguito si farà sempre riferimento a questo intervallo per gli argomenti successivamente trattati.

1.5 Guide d'onda

Generalmente le onde elettromagnetiche vengono create con particolari circuiti e successivamente irradiate nello spazio mediante le antenne. È necessario però guidare le onde dal circuito all'antenna e questo generalmente viene fatto con degli apparati che variano a seconda della frequenza in gioco. Normalmente, fin che le frequenze sono basse, si può utilizzare tranquillamente una *linea bifilare*, ma appena la frequenza cresce intorno a 1 MHz la cosa diventa impossibile poiché la linea stessa funge da antenna e irradia energia elettromagnetica nello spazio. Questo è dovuto al fatto che l'aumento della frequenza fa sì che i campi elettrico e magnetico generati attorno ai due conduttori si estendano nello spazio per distanze notevoli rispetto alla lunghezza d'onda in gioco. Per questo la distanza fra i due conduttori della linea non può più essere trascurata ed è necessario cambiare sistema. Si può quindi utilizzare un *cavo coassiale*, che mostra il vantaggio di non irradiare energia poiché i campi sono confinati all'interno di un cilindro conduttore. Se tuttavia ci si sposta verso frequenze più alte, per esempio attorno a 1 GHz, anche il cavo coassiale comincia ad avere dei problemi legati alla forte attenuazione che introduce. Questo è dovuto principalmente al fatto che l'isolante interposto fra i due conduttori coassiali dissipa parte della potenza dei campi. Questo problema si presentò per la prima volta con la costruzione dei radar che funzionano tutt'ora nel campo delle microonde, abbondantemente sopra il GHz. Per risolvere questo problema vennero inventati modi diversi di guidare le onde; si pensò di confinarle e farle passare in tubi di metallo nelle cui pareti le onde potessero riflettersi e quindi propagarsi; questi apparati prendono il nome di **guide d'onda**. È importante sottolineare come una guida d'onda non debba essere considerata come un conduttore di corrente, allo stesso modo di una linea bifilare o di un cavo coassiale; ma piuttosto come un contenitore che trasporta le onde nello spazio. Questi tubi normalmente hanno sezione rettangolare o

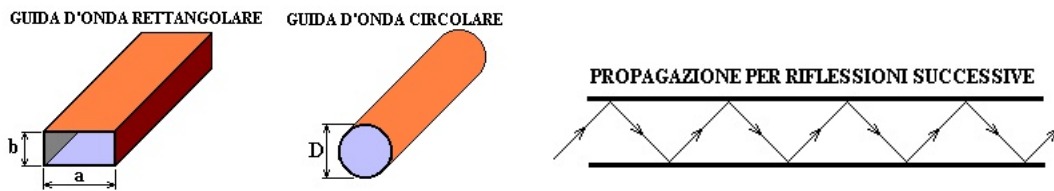


Figura 1.12: Guide d'onda: a sinistra un paio di modelli, a destra il principio di funzionamento tramite riflessione.

circolare e al loro interno sono lucidati e rivestiti da un sottile strato di argento; questo per facilitare la riflessione. Normalmente le guide d'onda vengono caratterizzate per le loro dimensioni grazie alle quali si possono quantificare in maniera precisa le loro interazioni con le onde. Dal punto di vista elettronico una guida d'onda si comporta come un filtro passa alto avente una frequenza di taglio normalmente intorno al GHz al contrario del cavo coassiale che si comporta invece come un filtro passabasso; il tutto si può vedere dal grafico in figura sull'attenuazione dei due mezzi.

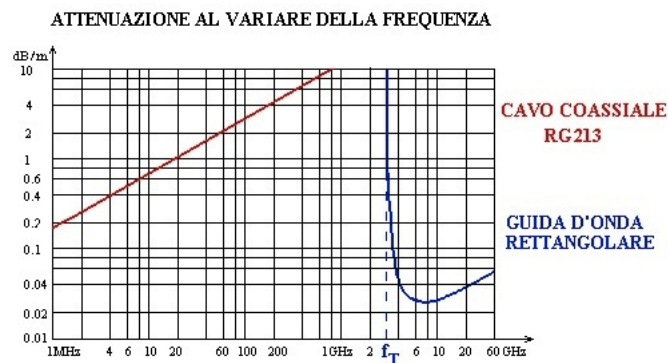


Figura 1.13: Attenuazione in funzione della frequenza delle guide d'onda e del cavo coassiale.

La frequenza di taglio di una guida d'onda è molto importante poiché dipende dalle dimensioni della guida stessa e dalla frequenza delle onde che deve trasportare, come si vedrà in seguito. Le onde all'interno delle guide vengono convogliate mediante degli *strobe* che fungono da antenna. Questi possono avere avarie forme, molto importante è però la loro posizione e il loro orientamento all'interno della guida.

1.6 Modi di propagazione

La trasmissione nelle guide d'onda delle onde elettromagnetiche non avviene in modo casuale come invece accade nell'etere ma deve seguire alcune regole ben precise. In particolare i campi elettrico e magnetico, che costituiscono le onde, devono disporsi in modo preciso rispetto alla guida; solo in questo modo infatti le onde riescono ad adattarsi alla geometria della guida stessa e ad essere condotte lungo tutta la sua lunghezza. Prima di proseguire è opportuno riassumere alcune proprietà fondamentali della propagazione delle onde nello spazio libero, in particolare:

- ad una certa distanza dalla sorgente, purché questa sia poco estesa, tutte le onde si possono considerare aventi geometria piana;
- i campi elettrico e magnetico sono sempre ortogonali fra loro e rispetto alla direzione di propagazione dell'onda. Questa è quindi un fenomeno completamente trasversale;
- la velocità di propagazione di un'onda elettromagnetica in un mezzo è sempre uguale alla velocità della luce in quello stesso mezzo qualsiasi sia la frequenza;
- quando un'onda elettromagnetica incide su una superficie completamente conduttrice, viene riflessa con le stesse leggi che valgono per l'ottica. Questo perché nella superficie conduttrice l'onda incidente induce una corrente che genera l'onda riflessa. Oltre a questo si verificano particolari condizioni considerando il campo elettrico e magnetico totali dati dalla sovrapposizione dei campi delle onde incidente e riflessa. Infatti la componente del campo elettrico totale tangente alla superficie riflettente e quella del campo magnetico totale ortogonale sempre alla stessa superficie, sono nulle.

Da quanto visto, e in particolare dall'ultimo punto, si può quindi capire perché la disposizione dei campi all'interno della guida d'onda non può essere casuale, se si vogliono rispettare le condizioni affinché avvenga la riflessione. In particolare le linee di campo elettrico dovranno essere perpendicolari alle pareti della guida mentre quelle del magnetico dovranno essere tangenziali. Queste condizioni, pur vincolando le posizioni dei campi, possono essere soddisfatte da un'infinità di configurazioni, più o meno complicate, che prendono il nome di **modi di propagazione**. Tutti i modi possono però venire classificati in due principali categorie che prendono il nome di:

- **modo trasversale magnetico: TM**
- **modo trasversale elettrico: TE**

Il modo trasversale *magnetico* è caratterizzato dal fatto che il campo magnetico è trasversale alla direzione di propagazione che quindi coincide con quella del campo elettrico. Nel modo trasversale *elettrico* è invece il campo elettrico ad essere trasversale, mentre quello magnetico coincide con la direzione di propagazione. Il modo di trasmissione non si limita però soltanto alla sigla, viene anche accompagnato a pendice da due numeri che servono per operare ulteriori distinzioni della configurazione.

I modi di propagazione TE e TM possono anche combinarsi e dare origine al modo TEM tipico delle guide d'onda circolari in cui sia il campo elettrico che il campo magnetico sono trasversali.

La guida d'onda può trasportare più di una frequenza; l'insieme delle frequenze viene determinato in base a calcoli basati sulle dimensioni; tuttavia solitamente si preferisce far lavorare la guida alla frequenza più bassa, prediligendo un modo di propagazione TE. Questo può anche essere giustificato dal punto di vista pratico con il fatto che scelta una frequenza, la guida più piccola che può essere costruita per il suo trasporto è quella avente quella frequenza come frequenza di taglio nella sua caratteristica di passa alto. Viste le cose esposte in precedenza si può quindi approfondire la propagazione in una guida d'onda rettangolare con modalità TE. Come si può vedere, anche dalla figura, il campo elettrico risulta essere ortogonale al lato maggiore della sezione della guida. La sua intensità è massima al centro e decresce man

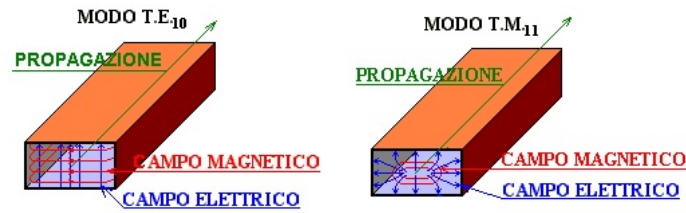


Figura 1.14: Esempio dei modi di propagazione TE e TM in una guida d'onda a sezione rettangolare.

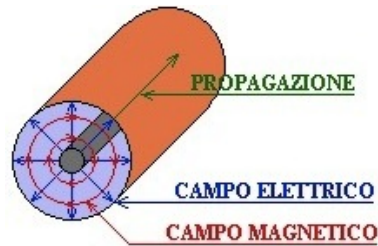


Figura 1.15: Esempio di modo di propagazione TEM in una guida d'onda a sezione circolare.

mano che ci si sposta verso le estremità con legge approssimativamente sinusoidale. Il campo elettrico non potrebbe essere presente anche parallelamente alle superfici della guida altrimenti darebbe origine a delle correnti parassite. Il campo magnetico invece si sviluppa sotto forma di *loops* concentrici, questa volta paralleli al lato maggiore della sezione della guida. I *loops* si ripetono per tutta la lunghezza della guida ad una distanza che dipende dalla frequenza trasmessa. Nella guida rettangolare la dimensione

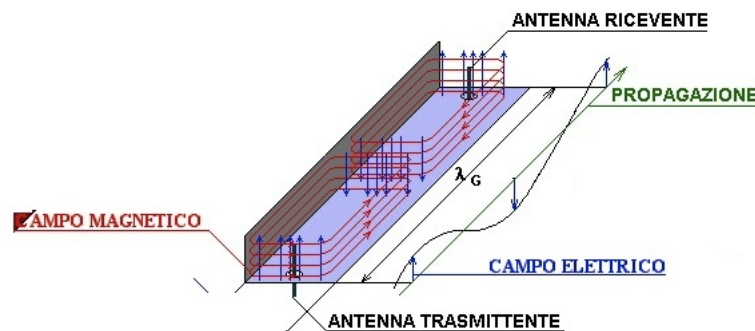


Figura 1.16: Propagazione dettagliata del modo TE in una guida a sezione rettangolare.

significativa è quella indicata in figura con a , in quanto affinché la propagazione possa avvenire secondo il modo TE è necessario che a sia inferiore a mezza lunghezza d'onda $\lambda/2$ in modo che nella guida ci sia spazio a sufficienza per mezz'onda. La frequenza per la quale

$$\lambda/2 = a$$

viene anche chiamata anche frequenza critica e corrisponde anche alla frequenza di taglio della guida. Le dimensioni di a possono però anche essere molto maggiori di λ , in questo caso si avrebbe che la disposizione dei campi elettromagnetici non si ripeterebbe nella guida con uno schema prefissato e sarebbe quindi diversa fra l'ingresso e l'uscita. Queste situazioni prendono il nome di *sovramodi* e tendono normalmente ad essere evitate in quanto costituirebbero un serio problema per il posizionamento delle antenne riceventi e trasmettenti poste all'inizio e alla fine della guida d'onda. Va infine sottolineato che nonostante le alte prestazioni che si possono ottenere con le guide d'onda, queste non sono oggetti ideali

e per tale motivo provocano comunque una perdita di energia dei campi elettromagnetici almeno per le seguenti cause:

- dissipazioni dovute al dielettrico che contengono, tipicamente l'aria;
- dissipazioni dovute al materiale in cui sono realizzate che non è un conduttore perfetto;
- dissipazioni dovute discontinuità della guida.

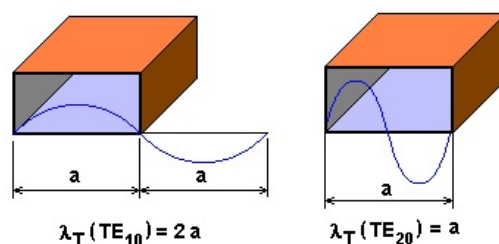


Figura 1.17: Condizione per la propagazione secondo il modo TE in una guida a sezione rettangolare.

1.7 Parametri S

Nel corso del tempo l'elettronica ha creato varie modalità per descrivere il comportamento delle reti di trasmissione; queste si differenziano sostanzialmente in base alla frequenza dei segnali che attraversano la rete considerata. Normalmente una rete viene schematizzata mediante una black box, poiché non è strettamente importante la sua configurazione interna; vengono però evidenziati i terminali con cui è connessa ad altri dispositivi che prendono anche il nome di porte, come si può vedere anche dall'immagine. Fintanto che le frequenze in gioco sono basse si possono utilizzare le descrizioni, ben note dall'elettro-

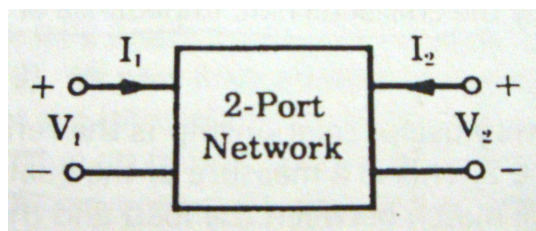


Figura 1.18: Schema di una rete a due porte.

tecnica, chiamate a **parametri-H**, **parametri-Y** e **parametri-Z**. Queste mettono in relazione fra loro le tensioni e le correnti fra i terminali delle porte secondo la configurazione che può sembrare più utile nella situazione in esame.

Parametri-H:

$$\begin{aligned} V_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}V_2 \\ I_2 &= h_{21}I_1 + h_{22}V_2 \end{aligned}$$

Parametri-Y:

$$\begin{aligned} I_1 &= y_{11}V_1 + y_{12}V_2 \\ I_2 &= y_{21}V_1 + y_{22}V_2 \end{aligned}$$

Parametri-Z

$$\begin{aligned} V_1 &= z_{11}I_1 + z_{12}I_2 \\ V_2 &= z_{21}I_1 + z_{22}I_2 \end{aligned}$$

Oltre a questo bisogna sottolineare la facilità con cui i parametri si possono misurare; prendendo come esempio il set di parametri H e volendo misurare h_{11} è infatti sufficiente, come si può vedere dal sistema, annullare V_2 con un corto circuito e misurare tensione e corrente alla porta 1; infine una semplice divisione fornirà il risultato cercato. Analogamente a questo esempio si può procedere per determinare tutti gli altri parametri considerando che in un'equazione, se al posto di una tensione si vuole eliminare una corrente basta semplicemente porre in corto circuito la porta corrispondente. Se tuttavia i segnali trasportati dalla rete hanno frequenze significative, allora le notazioni appena utilizzate non sono più utilizzabili almeno per le seguenti ragioni:

- le onde che viaggiano sulla rete hanno λ paragonabile alla stessa lunghezza della rete. Per questo motivo sulla rete viaggeranno più lunghezze d'onda;
- una volta che le onde partite dal generatore, attraversano la rete e giungono sul carico, possono da questo venire in parte assorbite e in parte riflesse a seconda dell'impedenza di carico e di quella della rete. In questo nuovo approccio alle reti le impedenze giocano un ruolo fondamentale poiché influenzano fortemente la propagazione delle onde;
- la misura degli stessi parametri risulta ardua in quanto i concetti stessi di corto circuito e circuito aperto vengono ridefiniti dalle nuove regole per le reti a costanti distribuite;
- i concetti di tensione e corrente ai terminali della rete non sono più parametri significativi viste le loro rapide variazioni

Per le motivazioni sopra esposte è quindi necessario trovare una nuova modalità di descrivere le reti che tenga conto delle onde che viaggiano su di essa. In particolare, presi i terminali di una porta sono significative l'onda che viaggia verso la rete e l'onda che proviene dalla rete che prendono il nome di onda *incidente* e di onda *riflessa*, come si può vedere dalla figura. Fissato un preciso istante di tempo,

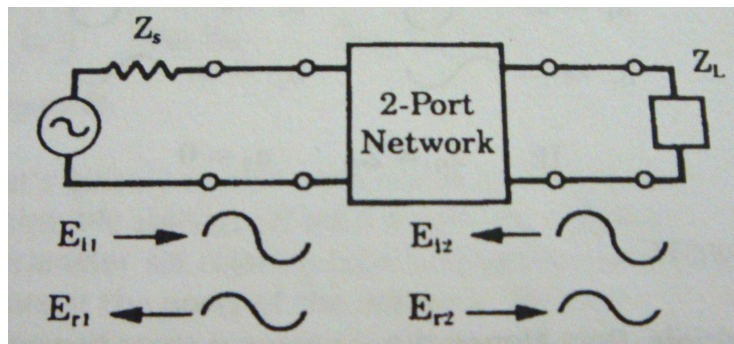


Figura 1.19: Schema di una rete a due porte in cui sono evidenziate le onde incidenti e riflesse.

i parametri S mettono in relazione l'intensità delle onde incidente e riflessa per tutte le porte della rete, contribuendo quindi a darne una rappresentazione del comportamento molto più significativa. Infatti da questo si può capire la più o meno facilità o difficoltà della rete a trasportare i segnali voluti.

Parametri-S con riferimento alla rete in figura:

$$E_{r1} = S_{11}E_{i1} + S_{12}E_{i2}$$

$$E_{r2} = S_{21}E_{i1} + S_{22}E_{i2}$$

Pertanto, quando si utilizzano segnali dalla frequenza elevata i parametri S diventano strumenti indispensabili per la descrizione e la caratterizzazione delle reti elettriche che li trasportano.

Capitolo 2

CST Simulator

Come si è visto nel capitolo precedente, quando si considerano onde elettromagnetiche ad alta frequenza, come le microonde, risulta abbastanza complicato predirne il comportamento, specialmente per quanto riguarda la propagazione. In particolare la disposizione e l'evoluzione dei campi elettrico e magnetico risulta complicata da descrivere e determinare. Dall'esempio precedentemente visto delle guide d'onda si è inoltre potuto notare come i dettagli più piccoli dell'ambiente di propagazione, spesso giocano un ruolo fondamentale. È quindi particolarmente necessario, specialmente nella progettazione di dispositivi che interagiscono con le microonde, tenere conto di tutte le possibili variabili del sistema che si sta studiando. Questo compito risulta tuttavia assai arduo, sia per la grande quantità di variabili da considerare ma soprattutto per l'enorme mole di calcolo che richiede. Per affrontare quindi queste situazioni si sono sviluppati vari software di simulazione; uno di questi è il *CST Simulator*, particolarmente apprezzato per la precisione dei risultati che con esso si possono ottenere.

2.1 Tools disponibili

Il CST (Computer Simulation Technology) Simulator software è un ambiente che offre la possibilità di simulare moltissimi modelli e situazioni in cui siano coinvolti campi elettromagnetici. Il software è suddiviso sostanzialmente in sei sezioni che implementano altrettanti tools, ognuno specializzato in un determinato campo. Questi sono:

1. CST Microwave studio
2. CST EM studio
3. CST Particle studio
4. CST Design studio
5. CST PCB studio
6. CST Cable studio

Il primo è un ambiente dedicato alla simulazione di sistemi che interagiscono con campi elettromagnetici ad alta frequenza, mentre il secondo con campi a bassa frequenza. Il terzo è specializzato in sistemi che interagiscono con singole particelle; viene infatti utilizzato per esempio per simulare il comportamento degli *electron gun*. Il quarto è stato ottimizzato per la creazione e simulazione di sistemi complessi formati da più sotto sezioni distinte fra loro. Il quinto viene invece utilizzato per la simulazione di segnali, flussi di potenza e interferenze elettromagnetiche esterne su schede PCB (Printed Circuit Board). Infine il sesto viene utilizzato per la simulazione di campi elettromagnetici nei cavi di qualsiasi forma e dimensione. Verrà di seguito approfondita la descrizione del CST Microwave studio, poiché è il tool che verrà utilizzato per le successive simulazioni riguardanti il campo delle microonde. Esso è composto essenzialmente da un'interfaccia CAD (Computer Aided Design) grazie alla quale è possibile modellizzare o progettare qualsiasi oggetto. In aggiunta a questo sono presenti vari comandi per definire l'ambiente circostante al modello creato, la modalità e i segnali con cui stimolarlo e le grandezze da misurare.



Figura 2.1: Loghi dei tools disponibili nel software CST

La descrizione del software che seguirà è tuttavia da considerarsi come una linea guida per l'utilizzo del programma e la comprensione del suo funzionamento. Dal momento che una descrizione dettagliata consisterebbe in una riscrittura della guida già presente, si è scelto di esporre soltanto gli aspetti più importanti ed interessanti. Per eventuali approfondimenti si consiglia di consultare la guida o il manuale d'uso.

2.2 Interfaccia CAD

Il software è provvisto di un'interfaccia CAD per la creazione dei modelli su cui si vogliono eseguire le simulazioni. Questa è del tutto simile ad altri programmi, comunemente usati, come ad esempio il ben noto AutoCAD. Supporta inoltre l'importazione e l'esportazione di modelli creati con altri software, tuttavia per maggiori informazioni riguardanti la compatibilità dei file si rimanda alla lettura della guida.

Sistema di coordinate e visualizzazione del modello

Nell'interfaccia è possibile visualizzare uno spazio tridimensionale all'interno del quale è definito un sistema di coordinate cartesiane, che prende il nome di *sistema globale*. Generalmente in basso a destra viene visualizzato un piccolo schema contenente i tre assi cartesiani che ne rappresenta la disposizione spaziale. Questo risulta particolarmente utile in quanto le varie forme possono essere create inserendo le coordinate dei punti estremi della loro estensione spaziale. In aggiunta al sistema di coordinate principale è anche possibile aggiungerne uno secondario, che prende il nome di *sistema locale*, la cui origine può essere posizionata arbitrariamente all'interno del sistema globale. Anche se la cosa può sembrare superflua è in realtà particolarmente utile. Spesso infatti la costruzione di figure tridimensionali complesse procede mediante una composizione per parti; nel definire le relazioni fra queste a volte può risultare molto conveniente definire un secondo sistema di coordinate. Per posizionare il sistema locale e definirne anche la disposizione spaziale rispetto al globale si possono utilizzare i comandi che si trovano nella barra principale che consentono di effettuare traslazioni e rotazioni. Il sistema di coordinate può inoltre essere

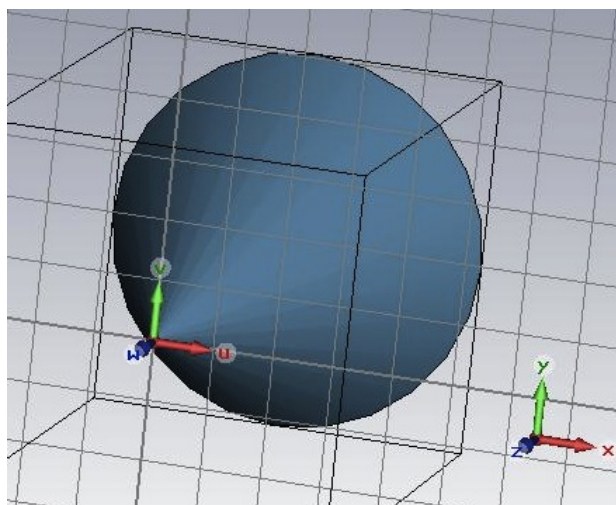


Figura 2.2: Interfaccia CAD in cui è stato costruito un cono; in evidenza il sistema primario di coordinate in basso a destra e il sistema secondario posizionato sulla punta del cono.

opportunamente modificato, sempre rispetto alla finestra di visualizzazione, per consentire una migliore visione del progetto a seconda delle esigenze dell'utente. È fondamentale sottolineare che con le operazioni che verranno successivamente descritte non si modificano le relazioni fra le dimensioni dell'oggetto e il sistema di coordinate; viene semplicemente modificata la vista che si ha del modello. In pratica è possibile utilizzare i seguenti comandi localizzabili sulla barra principale del programma:

- **rotate** per eseguire una rotazione del modello rispetto a due assi delle coordinate;
- **rotate view plane** per eseguire una rotazione del modello rispetto al piano perpendicolare all'osservatore;
- **pan** per eseguire una traslazione del modello all'interno del campo di visualizzazione;
- **zoom** per ingrandire il modello ed evidenziarne i dettagli minuti.





					
Rotate	Rotate View Plane	Pan	Dynamic Zoom	Zoom	Reset View

Figura 2.3: Icone dei principali comandi per la modifica della visualizzazione.

Va infine sottolineato che quando si crea un modello e se ne inseriscono le dimensioni, queste non sono mai provviste di unità di misura. Quest'ultima informazione deve infatti essere opportunamente specificata in un apposito menù. Grazie a questa caratteristica è quindi possibile scalare il modello a seconda delle esigenze che si possono incontrare durante la progettazione.

Creazione e modifica di forme

L'interfaccia CAD è provvista di alcuni comandi che consentono di creare forme tridimensionali elementari. Queste sono: parallelepipedo, sfera, cilindro, toro e cono. I comandi si possono trovare nel menù *Object - Basic Shapes*; una volta selezionata la forma desiderata è possibile disegnarla nello spazio tridimensionale grazie ad alcuni click e al movimento del mouse; oppure premendo il tasto *Tab*, è possibile far comparire un menù in cui inserire manualmente le coordinate dell'oggetto desiderato. Data la diversità della geometria dei solidi elencati, ogni menù richiederà dei parametri specifici e caratterizzanti per quella forma. Oltre a questo, ogni forma o solido creato può essere modificato in qualsiasi momento.

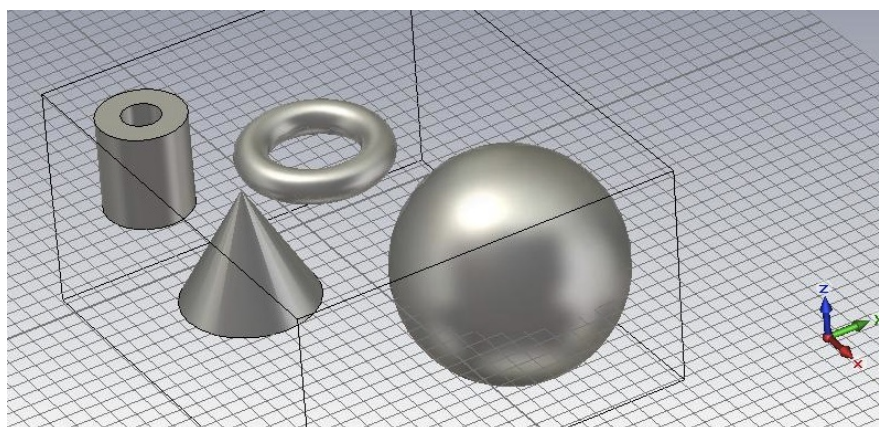


Figura 2.4: Esempio di costruzione di alcuni solidi elementari.

Nella destra della finestra del programma si trova un albero di directory contenente tutte le informazioni sul modello a cui si sta lavorando. Fra le molteplici voci ne esiste anche una che contiene l'elenco di tutte le forme che si sono create. Una volta trovata quest'ultima e aperta è possibile fare click con il tasto destro del mouse sul relativo nome per ed accedere ad una serie di opzioni e di azioni che su essa si possono modificare o eseguire. Le operazioni più comuni possono essere la modifica delle dimensioni, la replicazione dell'oggetto, la rotazione o la traslazione nello spazio.

Oltre a ciò l'interfaccia CAD prevede anche la possibilità di selezionare alcune parti delle figure, in particolare facce, spigoli e vertici, questo perchè oltre alla creazione di strutture tridimensionali è possibile operare anche con quelle bidimensionali. La selezione avviene prima stabilendo cosa si vuole selezionare e successivamente facendo doppio click sull'area interessata. Quest'operazione è fondamentale in quanto

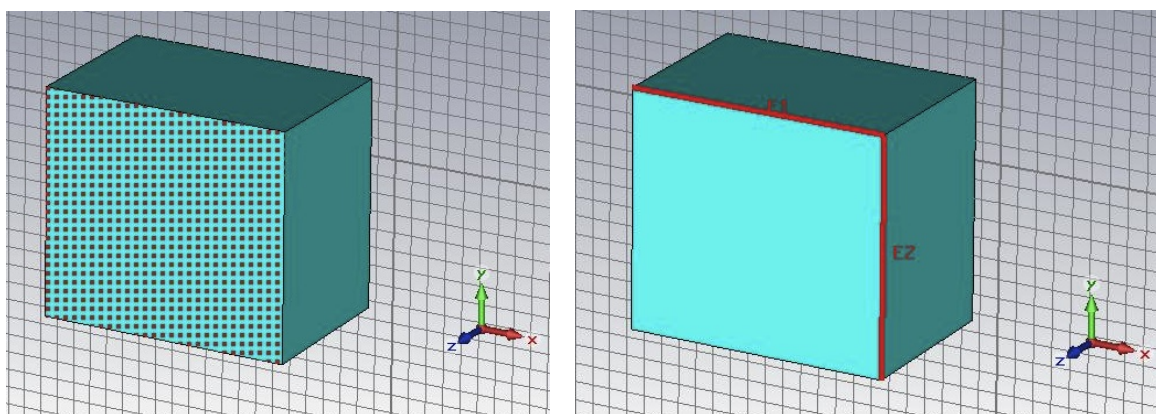


Figura 2.5: Esempi di selezione: a sinistra la selezione di una faccia, a destra quella di due vertici.

utile non solo per la costruzione del modello ma anche per la successiva definizione dell'ambiente e dei segnali di sollecitazione necessari alla simulazione. Oltre a ciò con la selezione di punti o spigoli si possono infatti tracciare nuove linee o modificare le curve esistenti, il tutto grazie ad una serie di comandi che si possono trovare sul menù *Curves*. Le curve bidimensionali possono inoltre essere adoperate come punto di partenza per la creazione di figura tridimensionali non preseti nel menù sopra citato, aumentando quindi la versatilità dello strumento.

Fra le molteplici opzioni e possibilità offerta dall'interfaccia CAD è infine doveroso segnalare due comandi che generalmente sono molto utili nella costruzione dei modelli: le **operazioni booleane** e l'**estrusione**. Le operazioni booleane sono delle azioni che si possono eseguire generalmente su due o più solidi al fine

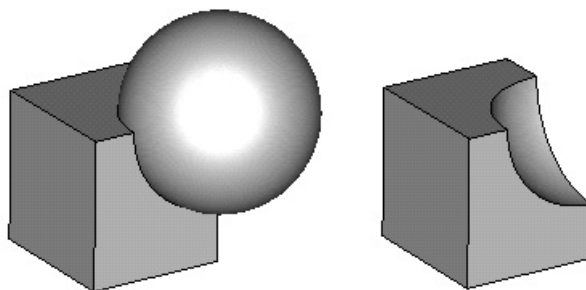


Figura 2.6: Esempio di operazioni booleane quali somma e sottrazione fra un cubo ed una sfera.

di crearne un terzo avente le caratteristiche desiderate. Esse sono:

- **Add**: selezionati due o più solidi e applicata loro questa proprietà, si viene a creare un nuovo solido che è la somma di quelli precedentemente selezionati;

- **Subtract:** selezionato un primo solido, invocata l'operazione e selezionato un secondo solido si terrà anche in questo caso un terzo solido la cui forma è il risultato della sottrazione della forma del secondo solido dal primo;
- **Intersect:** selezionati uno o più solidi e invocata questa operazione si otterrà come risultato un altro solido la cui forma sarà l'intersezione di tutte le forme precedentemente selezionate;
- **Insert:** selezionato un primo solido, invocata l'operazione e selezionato un secondo solido, si otterrà un terzo solido tale per cui la forma del secondo è stata inserita nel primo;

Un esempio delle cinque operazioni booleane può essere visto applicato ad un cubo e ad una sfera nell'immagine sottostante.

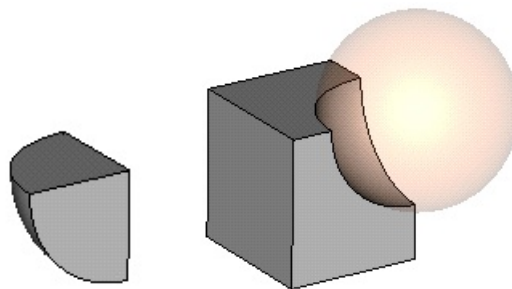


Figura 2.7: Esempio di operazioni booleane quali intersezione e inserimento fra un cubo ed una sfera.

Un'altra operazione importante è l'**estrusione** che si può applicare, nel caso più generico, ad un insieme di punti che descrivono una spezzata chiusa. Questo significa che tale opzione può essere tranquillamente applicata alle facce dei solidi, come viene comunemente fatto. Una volta selezionato l'insieme di punti l'operazione permette di creare un'estrusione nel verso selezionato dall'utente. Per fare un esempio, preso un tronco di cono e selezionata la faccia della sezione superiore si può applicare l'opzione estrusione per scavare un cilindro all'interno del solido o semplicemente per prolungarlo. L'estrusione può tuttavia

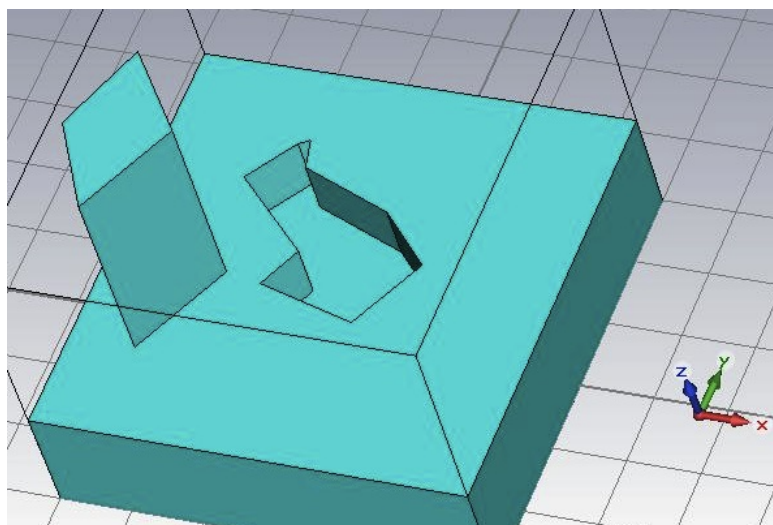


Figura 2.8: Esempio di utilizzo della funzione estrusione per la il prolungamento o l'incavo di un solido.

anche non mantenere la stesa sezione selezionata inizialmente; grazie alla modifica di alcuni parametri si può far sì che la sezione venga espansa o ruotata durante l'operazione, come si può vedere dalla figura.

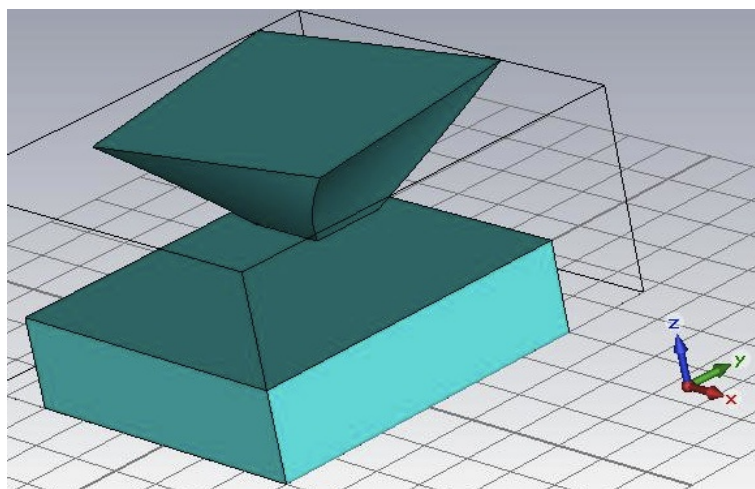


Figura 2.9: Esempio di utilizzo della funzione estrusione attivando l'opzione che consente di ingrandire e ruotare il solido estrutto.

Parametrizzazione

Un'altra caratteristica interessante dell'interfaccia CAD è la possibilità di costruire modelli parametrizzati; in cui cioè le grandezze possono essere modificate a piacere dall'utente. Grazie a questa possibilità è quindi possibile diminuire notevolmente la mole di lavoro in quanto la creazione di un nuovo modello può anche avvenire con la semplice modifica dei parametri del precedente.

Per fare questo si devono prima di tutto individuare le grandezze essenziali per la costruzione del modello in questione. Considerando un parallelepipedo come esempio, le grandezze da parametrizzare saranno le due dimensioni della base e l'altezza del solido. Queste andranno trascritte nell'apposito menù che posizionato in basso nell'interfaccia grafica del software. Per ogni parametro si deve specificare il nome, il valore, se ne può dare una descrizione ed infine si deve selezionare il tipo di parametro, ossia si deve comunicare al software cosa rappresenta. Dal momento che i parametri possono essere utilizzati per qualsiasi campo del software che richiede un valore numerico è importante specificare se si riferiscono ad una lunghezza piuttosto che ad un'intervallo di tempo o ad una frequenza. Una volta definiti i parametri

Name	Value	Description	Type
bound	100	boundary space	Length
f_max	17	maximun frequency	Frequency
f_min	6	minimum frequency	Frequency
strip_h	0.118	stripline heigh	Length
strip_w	12.5	stripline weigh	Length
sub_h	25	substract heigh	Length
sub_w	150	substract width	Length

Global

Figura 2.10: Il menù dove inserire i parametri collocato in basso nella finestra principale del software.

è possibile creare le figure che compongono il modello inserendo, nei menù dove vengono richieste le coordinate, al posto di valori numerici i nomi dei parametri. Per modificare i parametri è sufficiente modificarne i valori nel menù sopra citato e successivamente premere il tasto $F7$ per applicare le modifiche effettuate. L'applicazione delle modifiche è istantanea e immediatamente visualizzabile nella grafica 3D. La modifica dei parametri in modo sconsiderato può però comportare l'inserimento di valori che descrivono uno scenario impossibile; basti pensare per esempio all'inserimento di una lunghezza negativa. In questo caso il software segnala l'errore e non visualizza più il modello costruito; tuttavia ne conserva il progetto. Infatti inserendo dei nuovi parametri, questa volta coerenti, si riottiene la visualizzazione.

Definizione dei materiali

Oltre a quanto visto precedentemente è possibile assegnare ad ogni solido o forma geometrica che si costruisce, un materiale. Il procedimento è molto semplice ed in genere la scelta viene fatta in fase di costruzione, agendo su un'opportuna voce del menù che riepiloga le proprietà dell'oggetto che si sa creando. È anche possibile modificare il tipo di materiale, dopo la creazione dell'oggetto; la cosa può essere fatta in pochi passi andando ad agire sulle proprietà della forma in questione.

Per facilitare il compito il CST Simulator possiede una vasta libreria di materiali che può essere consultata e utilizzata in pochissimi passi. Può però accadere a volte che il materiale da utilizzare non sia già presente nella libreria; in tal caso è possibile creare un nuovo tipo di materiale ed eventualmente aggiungerlo alla raccolta già presente. La caratterizzazione di un materiale è di norma un'operazione

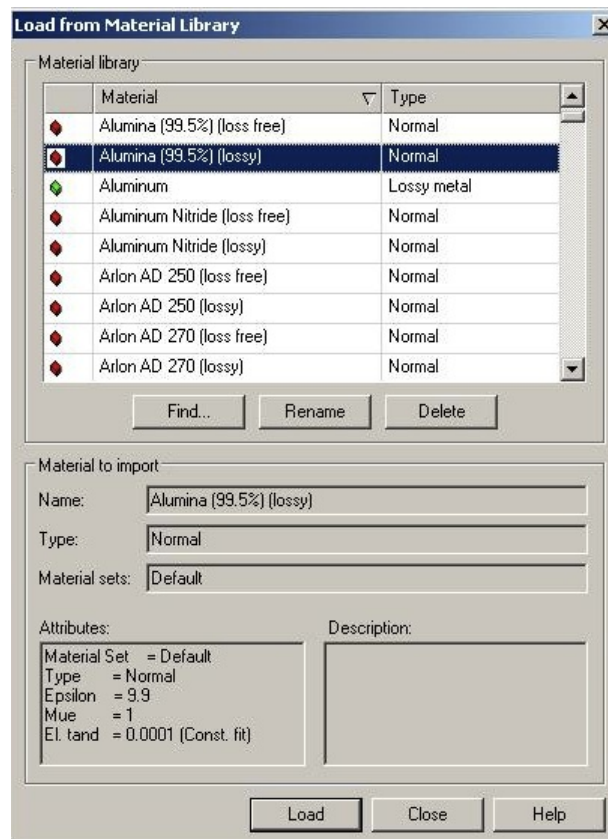


Figura 2.11: Il menù di interfaccia con la vasta libreria di materiali già inclusa nel software, si noti in basso a sinistra la finestra con il riepilogo delle caratteristiche del materiale.

complessa, ma dal momento che il software viene utilizzato per descrivere la propagazione dei campi elettromagnetici, è sufficiente specificare le proprietà elettriche e magnetiche del materiale inserendo la costante di permeabilità elettrica ϵ e quella magnetica μ . È infine possibile assegnare un colore ad ogni materiale; questo aiuterà la distinzione delle varie parti del modello in fase di progettazione e riepilogo.

2.3 Mesh

Come si è visto nella sezione precedente, il modello che si intende simulare può essere creato abbastanza facilmente, grazie agli strumenti messi a disposizione dall'interfaccia CAD. Questo tuttavia non è sufficiente poiché al software deve essere fornita una descrizione del modello utilizzabile per compiere la simulazione; cosa che il solo disegno CAD non è in grado di fornire. Per questo motivo, una volta terminata la fase CAD il CST Simulator procede con la discretizzazione del modello tramite la creazione di griglie ortogonali fra loro che prendono il nome di **mesh**. Il risultato consisterà in una descrizione delle

figure solide precedentemente create mediante piccoli parallelepipedi composti appunto dalle caselle delle griglie. Il concetto fondamentale è che verrà calcolata la propagazione dei campi elettrico e magnetico su ogni parallelepipedo; unendo successivamente i risultati si otterrà l'evoluzione della propagazione dei campi sull'intero modello. La mesh può essere visualizzata dall'utente agendo sul menù *Mesh - View* e utilizzando gli strumenti per la modifica della vista quali rotazione, traslazione e zoom, visti precedentemente della sezione CAD. Dal momento però che i parallelepipedi sono formati da tre griglie ortogonali fra loro è possibile selezionare quale delle tre si intende visualizzare, sempre agendo sul menù *Mesh*. Qui è possibile selezionare uno dei tre assi cartesiani per visualizzare così la griglia che gli è perpendicolare.

Tipi di mesh

Generalmente la mesh più utilizzata è formata da parallelepipedi e prende il nome di **mesh esaedrica**. Nel CST è possibile utilizzare anche un altro tipo di mesh che prende il nome di **mesh tetraedrica**; il modello in questo secondo caso sarà descritto da tetraedri invece che da parallelepipedi. In figura è possibile notare con più facilità la differenza fra due celle con tipo differente di mesh. La scelta di un tipo

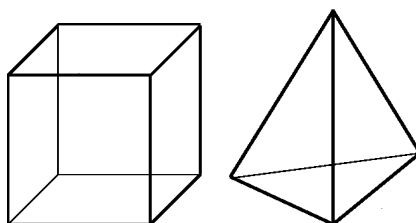


Figura 2.12: Esempio di celle della mesh con diversa geometria: esaedrica e tetraedrica.

di mesh rispetto ad un altro veniva fatta in origine considerando la geometria del modello, in quanto si cercava di approssimarne i bordi nel miglior modo possibile. Storicamente, durante l'evoluzione dei software di simulazione, si sono utilizzati vari tipi di mesh, come si può vedere anche dalla figura. Nonostante questo però spesso la descrizione ottimale del modello comportava un'eccessiva complessità della mesh dovuto ad un suo eccessivo infittimento, che come conseguenza determinava la necessità di un'enorme potenza di calcolo. La difficoltà maggiore per la descrizione del modello consiste nell'approssimarne i

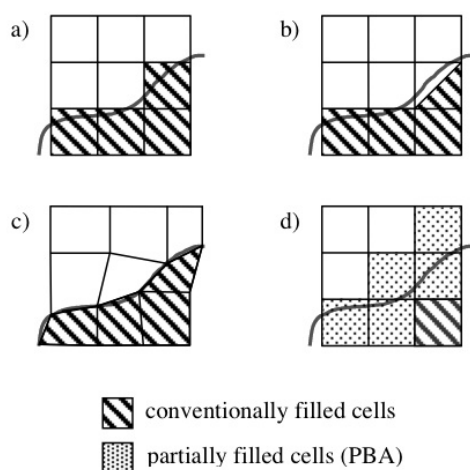


Figura 2.13: Vari metodi di costruzione della mesh: in a) con caselle ortogonali, in b) con caselle triangolari, in c) con caselle non ortogonali e in d) con l'algoritmo PBA.

bordi e le zone di transizione in maniera adeguata. Per fare questo alcuni ricercatori hanno sviluppato un algoritmo che si chiama PBA, (Perfect Boundary Approximation), che consente la creazione di una

mesh esaedrica che descrive perfettamente le superfici del modello. Normalmente infatti i problemi sorgono quando i bordi sono curvilinei o spigolosi e quindi difficilmente approssimabili da qualsiasi tipo di mesh. Grazie all'algoritmo PBA invece il software registra delle informazioni aggiuntive sulla geometria del bordo che attraversa le caselle della mesh esaedrica e le utilizza in fase di simulazione. Grazie a questa tecnica si è determinato il successo dell'utilizzo della mesh esaedrica in quanto si riescono ad avere risultati accurati salvaguardando i tempi e le risorse di calcolo necessarie.

Modalità di generazione della mesh

Come si è visto precedentemente la definizione della mesh è fondamentale per la simulazione in quanto ne influenza direttamente l'accuratezza e il tempo. Il CST Simulator prevede tre possibilità di creare la mesh:

- **automatica**
- **manuale**
- **adattiva**

Con la modalità *automatica* la mesh viene interamente generata dal software. Questo tiene conto di alcuni parametri fondamentali inseriti dall'utente che sono in primis il range di frequenze su cui verrà eseguita la simulazione ed inoltre le dimensioni del modello. Il range di frequenze indica infatti la minima e la massima lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche che potrebbero interferire con il modello; mentre dimensioni del modello sono anch'esse importanti poiché si può capire da esse quali sono le parti più piccole e quindi anche più critiche in quanto necessitano di una descrizione più accurata. Tutto questo contribuisce a determinare la minima e la massima distanza fra le celle della mesh, oltre che la sua disposizione spaziale. Nella generazione automatica il software combina le informazioni riguardanti la geometria del modello e le frequenze in gioco, cercando di contenere il più possibile i tempi di simulazione, senza però far sì che i risultati ottenuti siano imprecisi. Normalmente la mesh generata automaticamente è un ottimo punto di partenza per le simulazioni; generalmente però si preferisce modificarla rendendola più fitta specialmente nei punti di transizione dei materiali, per ottenere risultati molto più accurati.

Un'altra modalità per creare la mesh è quella *manuale*, in cui cioè è lasciata piena libertà all'utente di decidere densità e geometria delle celle e disposizione spaziale. Questa metodologia, di fatto, non viene più utilizzata poiché comporterebbe risultati di gran lunga inferiori rispetto quelli che si otterrebbero con la più semplice generazione automatica. La modalità manuale trova attualmente impiego soltanto nella modifica di piccolissime regioni di spazio della mesh generata automaticamente; questo normalmente non si rende necessario a meno che il modello non assuma forme particolari che richiedano un intervento straordinario. Infine l'ultima modalità è quella *adattiva* in cui la mesh viene adattata finché non si

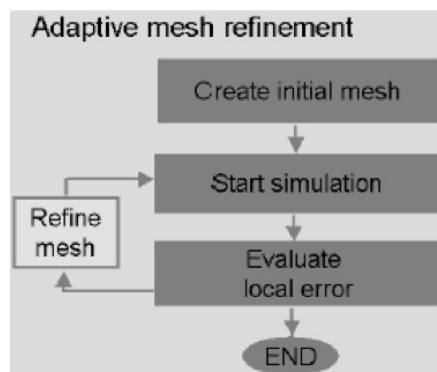


Figura 2.14: Procedimento di simulazione impiegante l'opzione di mesh adattiva.

raggiunge la precisione voluta nei risultati. In questa modalità l'utente specifica il massimo gradiente ammissibile per l'intensità dei campi elettrico e magnetico. Il software inizia definendo la mesh in modalità automatica ed eseguendo una prima simulazione. Successivamente individua quelle zone del

modello in cui i gradienti superano quelli definiti dall'utente; procede quindi con un infitimento della mesh in quelle zone e con la ripetizione della simulazione. Il procedimento viene iterato varie volte fintantoché non sono soddisfatte le condizioni imposte dall'utente. Va comunque sottolineato come questo procedimento sia estremamente dispendioso se si considerano i tempi di simulazione richiesti; tuttavia rappresenta un ottimo strumento per migliorare sempre più la precisione dei risultati cercati.

Parametri di controllo

Durante la creazione automatica della mesh, il software individua sul modello due insiemi di punti che prendono il nome di **punti fissi** e **punti di accumulo**. I punti fissi, sono particolari posizioni del modello in cui dovranno necessariamente passare le linee di costruzione della mesh. Visualizzandola questi sono marcati in rosso e generalmente corrispondono a zone di transizione fra i materiali, spigoli, angoli o punti di particolare interesse per la geometria. È intuitivo il motivo per cui vengono posizionati lì, in quanto l'evoluzione dei campi elettromagnetici sarà più complicata da descrivere in zone con geometria particolare, pertanto è richiesto necessariamente il passaggio delle linee di mesh per quella zona. L'altro insieme di punti, evidenziati in giallo durante la visualizzazione, rappresenta invece delle zone comunque particolari del modello ma in cui non è propriamente necessario il passaggio delle linee di mesh, basta anche soltanto che si trovino nei dintorni.

Dopo la generazione automatica della mesh non è possibile cambiare i punti fissi o i punti di accumulo a piacimento, è però possibile influenzare le distanze fra le linee della mesh agendo sull'apposito menù che si ottiene dal percorso: *Mesh - Mesh Properties*. In questa finestra, riportata Fig. 2.15: oltre a

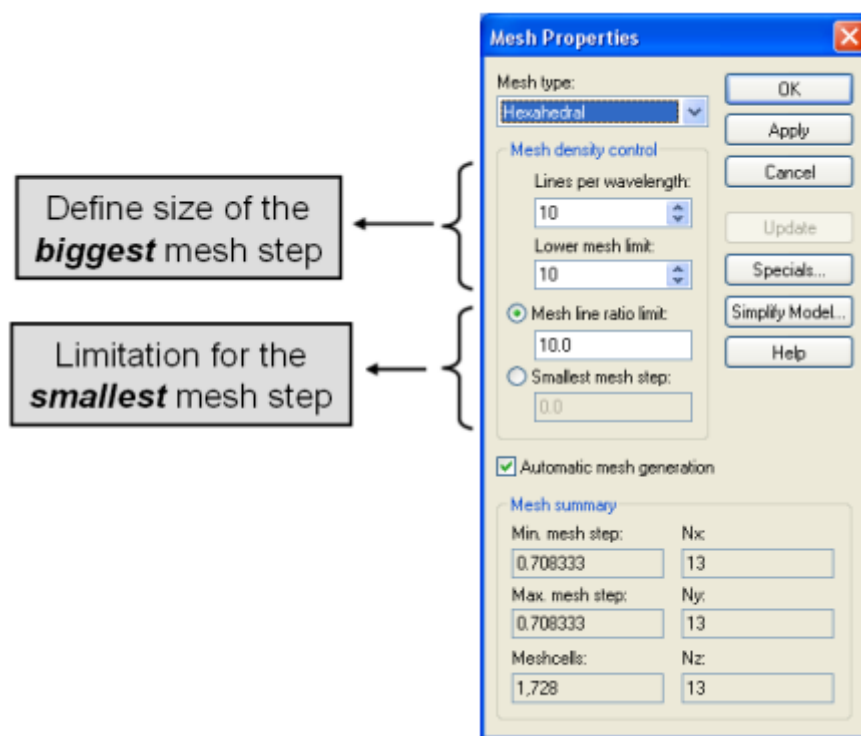


Figura 2.15: Menù nel quale è possibile modificare i principali parametri che regolano la mesh.

poter selezionare il tipo di mesh, vi sono quattro parametri con cui poterla controllare, due dei quali influenzano la distanza più grande fra due linee della mesh, mentre gli altri due influenzano la distanza più piccola. I parametri sono:

- **lines per wavelength**: questo parametro si è direttamente legato alla lunghezza d'onda della massima frequenza impostata e rappresenta il massimo numero di linee della mesh contenute in una distanza uguale alla lunghezza d'onda sopra citata;

- **lower mesh limit:** questo parametro stabilisce qual'è la distanza minima fra due linee consecutive della mesh, dopo aver tenuto conto dell'impostazione del parametro precedente;
- **mesh line ratio limit:** questo parametro controlla il rapporto fra la distanza massima fra due linee della mesh e la distanza minima; dal momento che alcune linee della mesh sono vincolate ai punti fissi, con questo parametro solitamente si impostano le dimensioni delle celle più piccole
- **smallest mesh step:** questo parametro, analogo al precedente, imposta la distanza più piccola fra due linee della mesh

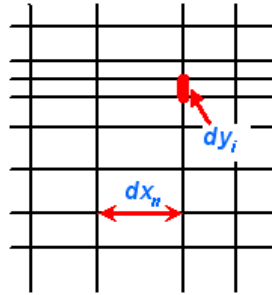


Figura 2.16: Individuazione del passo più piccolo e più grande all'interno di una mesh.

È comunque importante sottolineare come i quattro parametri sopra citati non siano totalmente indipendenti fra loro. Infatti il software, al cambiamento di un parametro, deve tener conto anche del valore degli altri prima di effettuare una qualsiasi modifica nella mesh. Spesso accade che i valori dei parametri descrivano una situazione tale per cui il cambiamento di uno di essi non possa comunque portare a un cambiamento della mesh. Al di sotto dei quattro parametri vi sono tre indicatori della grandezza della mesh, in particolare del numero di caselle delle griglie in riferimento ad un determinato asse e il numero totale di celle della mesh. Questi parametri servono per dare all'utente un'idea riguardo alla densità della mesh; ricordando che questa influenza pesantemente i tempi di simulazione è quindi intuitivo supporre che una mesh troppo densa richiederà una grande potenza di calcolo per il modello con un conseguente aumento dei tempi di simulazione.

Fino ad adesso si è discusso di come modificare la mesh con riferimento all'intero modello; esiste, oltre a ciò, un'altra interessante opzione che consente di modificare la mesh facendo riferimento alle singole forme o strutture che compongono il modello. Facendo click con il tasto destro del mouse sul nome della figura si può scegliere l'opzione *Local Mesh Properties* grazie alla quale è possibile avere un controllo pressoché totale sulla porzione di mesh che descrive quell'oggetto. In ogni caso, dato che con questa opzione è possibile stravolgere totalmente la mesh, ad esempio ri-definendone i punti fissi o le dimensioni e le distanze, si consiglia di farne un uso attento e consapevole soltanto dopo aver approfondito l'argomento con l'uso della guida.

Esiste infine un'ultima opzione applicabile alla mesh che si chiama **subgridding**; ci si può accedere dal menù principale della mesh, facendo click sul tasto per accedere alle impostazioni avanzate. Grazie a questa opzione il simulatore opererà un infittimento automatico della mesh nelle zone in cui il modello è più minuto.

2.4 Sorgenti di eccitazione

Dopo aver definito il modello per la simulazione voluta, bisogna necessariamente decidere la modalità con cui stimolarlo tramite i campi elettromagnetici caratterizzati dalle frequenze precedentemente impostate. Il CST Simulator fornisce sostanzialmente tre modalità differenti di eccitare il modello che devono essere impiegate coerentemente a seconda del modello che si sta per simulare. Queste tre modalità sono:

- **porte discrete;**
- **sorgenti di campo;**

- porte in guida d'onda.

Le *porte discrete* vengono utilizzate per simulare l'alimentazione del modello mediante un generatore di segnale di tensione o di corrente. Esse vengono comunemente rappresentate mediante un pezzo di filo al cui centro vi è una freccia. Le estremità del filo, rappresentante un conduttore perfetto, vanno collegate ai punti in cui si vuole alimentare il modello; la freccia centrale invece rappresenta il generatore di corrente o di tensione.

Le *sorgenti di campo* invece vengono utilizzate per simulare l'alimentazione del modello generalmente

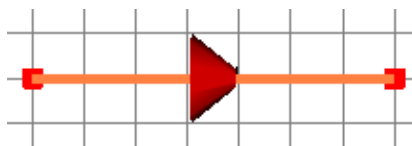


Figura 2.17: Una porta discreta.

attraverso onde piane, oppure mediante una sorgente precedentemente definita di campo elettromagnetico. La prima modalità ossia l'alimentazione attraverso onde elettromagnetiche piane, viene utilizzata per studiare l'interazione del modello con le onde; grazie a questa modalità di alimentazione è possibile osservare la formazione e l'evoluzione di fenomeni riguardanti il campo ondulatorio come ad esempio la diffrazione e l'interferenza. La seconda modalità, viene invece utilizzata prevalentemente per studiare gli effetti sul modello di una sorgente vicina di campo elettromagnetico. Spesso infatti una simulazione viene utilizzata per conoscerne il profilo di irraggiamento di un modello, ossia la sua capacità di irradiare onde elettromagnetiche nello spazio circostante. Ottenuto questo, lo si può utilizzare pensandolo come una sorgente di disturbo per capire l'effetto che avrebbe su di un altro modello. Questo approccio è particolarmente utilizzato nell'indagine dei problemi di compatibilità elettromagnetica.

Vi sono infine le *porte in guida d'onda* che vengono utilizzate per simulare l'alimentazione del modello

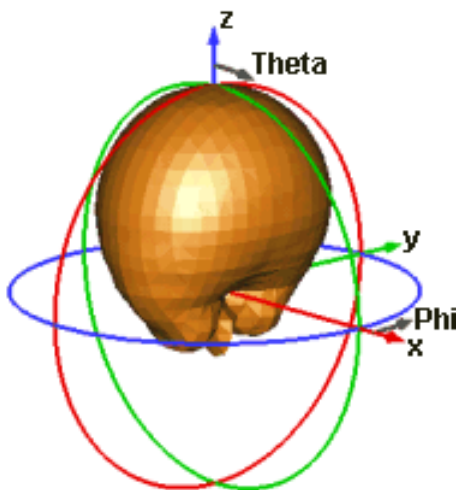


Figura 2.18: Esempio di sorgente di un campo elettromagnetico.

mediante campi elettromagnetici condotti per l'appunto in una guida d'onda, la quale si suppone, in simulazione, essere di lunghezza pressoché infinita. Queste porte, a seconda delle necessità, vengono generalmente attaccate ai lati del modello e lo stimolano mediante un campo elettromagnetico che nella guida si può propagare secondo le modalità viste nel primo capitolo ossia TE e TM. Queste porte vengono rappresentate mediante la sezione della guida d'onda e appaiono sul modello come due rettangoli, generalmente di colore rosso. Il loro posizionamento varia a seconda del modello che si sta simulando, come del resto le dimensioni che devono rispettare precisi vincoli, come si potrà vedere in seguito nell'analisi di casi specifici. Come le guide d'onda esistenti nella realtà, anche le porte del simulatore possono trasportare più di un modo di propagazione dei campi elettromagnetici, oltre a quello fondamentale.

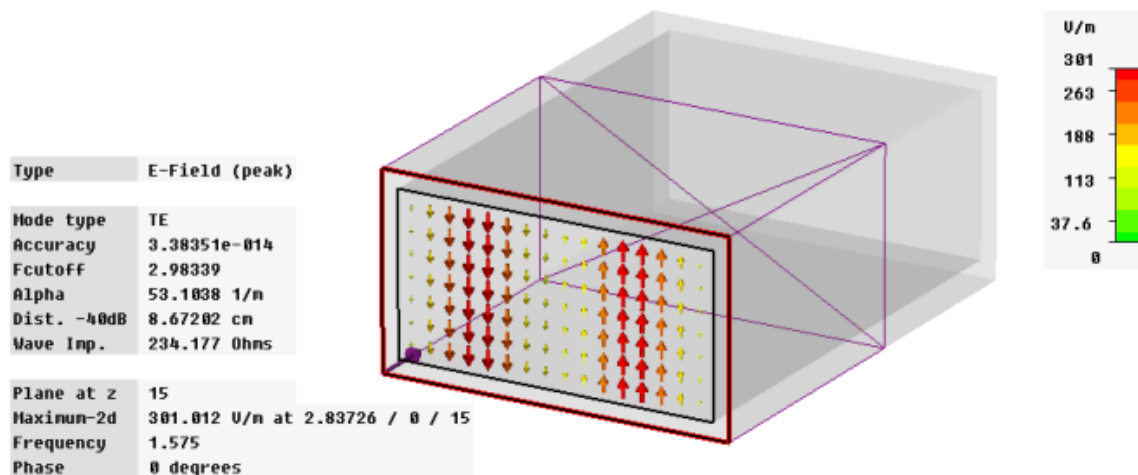


Figura 2.19: Una guida d'onda in cui si può notare il campo elettrico che si propaga in modalità TE.

Generalmente si tendono però ad evitare simili situazioni che comporterebbero parecchia confusione nell'interpretazione della propagazione dei campi. Per fare attenzione a questo è quindi molto importante controllare attentamente le dimensioni della guida in relazione a quelle del modello e verificare nei risultati che i campi si propagano soltanto con i modi voluti; quest'ultima operazione deve necessariamente essere effettuata dall'utente in seguito ad una breve ricerca sul funzionamento delle guide d'onda. Infine un'ultima regola molto importante è che le porte non devono mai sovrapporsi, altrimenti il simulatore rileverà un'interferenza fra i campi con una conseguente degradazione dei risultati che non saranno più verosimili alla realtà.

A volte ci si può trovare nella situazione che il modello da simulare necessita della presenza di due porte in guida d'onda molto vicine fra loro, a volte troppo per non sovrapporsi o incrociarsi o comunque generare interferenza. Questo perchè per esempio vi è la necessità di alimentare due terminali del modello molto vicini tra loro. In queste situazioni si possono pertanto usare delle varietà particolari di porte in guida d'onda chiamate **multipin**. Queste vengono rappresentate dal programma sempre mediante un rettangolo di colore rosso da applicare sul lato interessato del modello. Presentano tuttavia una configurazione particolare che consente loro di definire degli insiemi di pin da collegare ai terminali del modello, come si può vedere nell'immagine raffigurante un cavo. In questo modo è come se ogni terminale fosse alimentato da una micro porta, che per la sua configurazione non rischia di interferire in modo negativo con le altre. Questa tipologia di porte consente di definire vari insiemi di pin da applicare ai terminali; ogni insieme

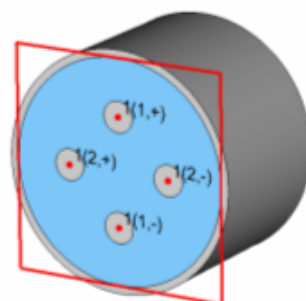


Figura 2.20: Una porta multipin utilizzata per la simulazione del comportamento dei conduttori all'interno di un cavo.

è identificato con un numero naturale a partire da 1. Ad ogni pin, di un determinato insieme, può essere assegnato un potenziale che può essere positivo o negativo. Grazie a queste opzioni si possono definire un'infinità di insiemi, i cui pin hanno le combinazioni più differenti per quanto riguarda i potenziali.

La cosa importante però è che all'interno di una porta multipin i potenziali, fra tutti i vari insiemi che possono essere definiti, non siano tutti positivi o tutti negativi; questo poiché la situazione configurata non potrebbe essere simulabile in quanto senza una differenza di potenziale non può esserci un campo elettrico o magnetico e tantomeno la loro propagazione. Anche per le dimensioni delle porte multipin vanno seguite delle regole che variano a seconda delle geometria del modello in questione.

2.5 Modalità di risoluzione

Dopo aver definito il modello e le modalità con cui eccitarlo tramite i campi elettromagnetici si può compiere un'ulteriore scelta che riguarda la modalità con cui effettuare la simulazione. A seconda infatti della situazione in cui ci si trova vi sono modalità da preferire ad altre. In totale il CST Simulator ne prevede quattro che sono:

- **transient solver;**
- **frequency domain solver;**
- **eigenmode solver;**
- **integral equation solver.**



Figura 2.21: Icone delle varie modalità di simulazione del modello.

Il primo è specializzato per la simulazione dell'evoluzione dei campi elettrico e magnetico nel dominio del tempo ed è la modalità che verrà approfondita ed utilizzata per le simulazioni successive. Il *frequency domain solver* è una modalità di simulazione che calcola il comportamento del modello per ogni frequenza, definita dall'utente, del segnale con cui viene eccitato; invece l'*eigenmode solver* è una modalità specializzata quando si devono risolvere modelli in cui si ha la certezza che saranno presenti fenomeni di risonanza che coinvolgeranno i campi elettrico e magnetico. Infine la modalità *integral equation solver* è una modalità specializzata per la risoluzione delle equazioni che regolano i campi elettromagnetici applicata ai modelli dimensionalmente molto estesi.

Transient Solver

Verrà ora brevemente approfondita la modalità transient solver essendo quella utilizzata in seguito per completare le simulazioni proposte. Questa modalità è particolarmente utile per predire il comportamento di un modello, di dimensioni non modeste, sollecitato da campi elettromagnetici composti da un vasto range di frequenze; la forza del Transient Solver consiste in particolare nel riuscire ad eseguire la simulazione per tutte le frequenze in un unico ciclo di calcolo. normalmente il simulatore utilizza un segnale di potenza per sollecitare il modello poiché in questo modo è più semplice tenere conto della conservazione dell'energia. Di default il simulatore utilizzerà come segnale di stimolo un impulso di potenza Gaussiano contenente il range di frequenze precedentemente impostato dall'utente. Questo perché un segnale di forma Gaussiana nel tempo avrà trasformata di Fourier ancora di forma Gaussiana; la cosa è vantaggiosa almeno per i seguenti motivi:

- un segnale Gaussiano ha banda limitata e questo assicura una corretta interazione con la mesh per tutte le frequenze volute;
- non attraversando mai lo zero è possibile predire il comportamento del modello per tutte le frequenze, non essendoci la possibilità che insorgano difficoltà di calcolo;

Prima di effettuare la sollecitazione con il segnale, ogni modello viene rappresentato come una rete a n porte, a seconda di quante waveguides ports siano state applicate. A sua volta la struttura viene descritta dai parametri S . Questi sono un insieme di valori che mettono in relazioni i segnali di ingresso di ogni

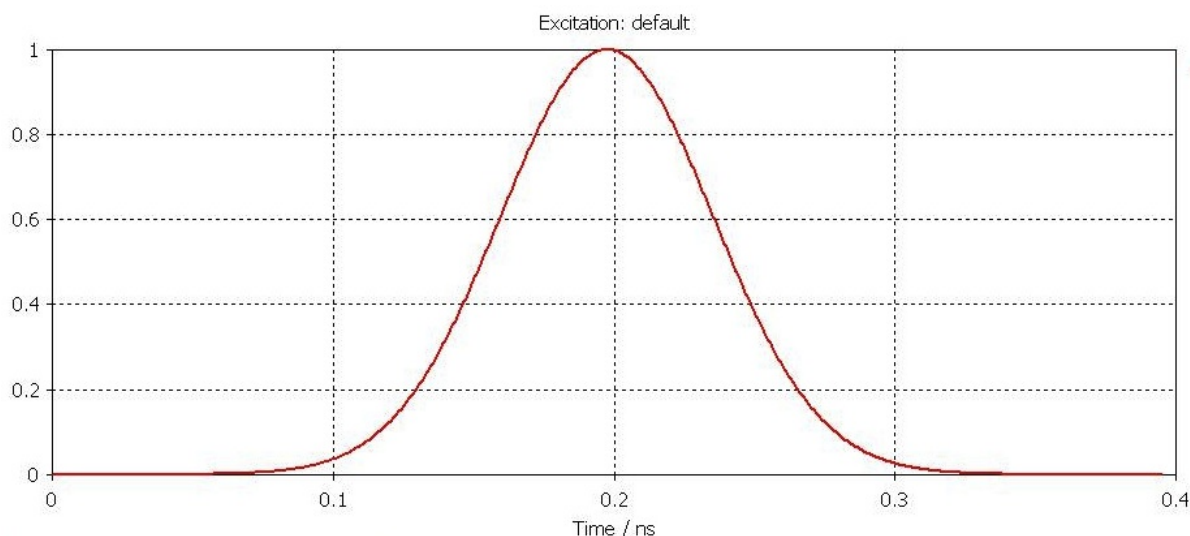


Figura 2.22: Segnale per l'eccitazione del modello contenente tutte le frequenze da 0 a 9 GHz.

porta con i segnali di uscita e che in generale descrivono il totale funzionamento elettrico del modello. Questi parametri, su cui si basa la simulazione del software, hanno una caratteristica importante, ossia variano a seconda della frequenza con cui viene eccitato il modello. Dal momento però che spesso l'utente definisce un range di frequenza per la simulazione, il software, nella transient solver, esegue il calcolo dei parametri S soltanto per la frequenza di centro banda e li utilizza comunque anche per le altre. Nonostante questo modo di procedere, i risultati che si ottengono sono comunque molto accurati.

All'interno del menù del transient solver, a cui si accede tramite il percorso *Solve - Transient Solver*, oltre a poter avviare la simulazione vi è anche la possibilità di modificare alcuni parametri interessanti. La prima voce è denominata *Accuracy* ed è espressa in decibel. Questo parametro indica l'accuratezza con la quale viene discretizzato il dominio delle frequenze nel quale viene calcolato mediante FFT il segnale Gaussiano di stimolo. La cosa è molto importante poiché spesso si vuole monitorare il comportamento del modello a specifiche frequenze. Dal momento che l'interazione del segnale con il modello determina la qualità della simulazione, è intuitivo che migliore sarà l'approssimazione del segnale e migliori saranno anche i risultati ottenuti. Il secondo parametro che si può prendere in considerazione si chiama *Source Type* ed indica da cosa verrà sollecitato il modello. Generalmente questo può essere fatto dai vari tipi di porte esistenti; nei casi che verranno visti si utilizzeranno le porte in guida d'onda sopra descritte. È necessario comunque impostare quale delle porte farà da sorgente del segnale e quali invece assorbiranno la potenza proveniente dal modello; fra le altre cose è anche possibile impostare la simulazione in modo che a turno ogni porta funga da sorgente, in modo da avere una valutazione complessiva più esauriente. Un altro parametro importante si chiama *Inhomogeneous port accuracy enhancement* e anche questo si riferisce alle porte in guida d'onda. Normalmente infatti le porte applicate ai modelli non sono sempre adiacenti a regioni di spazialmente uniformi; la cosa può causare dei problemi per quanto riguarda la propagazione e classificazione dei modi di propagazione dei campi elettromagnetici, in quanto oltre ai modi fondamentali ce ne potrebbero essere altri di ibridi. Attivando l'opzione appena citata si può invece far sì che il simulatore rilevi e tenti di filtrare i modi ibridi che, contaminando i risultati, li renderebbero di difficile lettura. Un'altra opzione interessante è anche quella denominata *Calculate modes only*; se attivata fa sì che il simulatore calcoli la propagazione e la disposizione dei campi elettromagnetici soltanto sulle porte che stimolano il modello e non su di esso. Esiste infine un ultimo parametro che può tornare particolarmente utile per ridurre i tempi di simulazione; questo si chiama *S-Parameter symmetries*. Grazie ad esso si può impostare nel simulatore la simmetria geometrica del modello, contribuendo a ridurre la mole di calcolo e a fargli riutilizzare risultati precedentemente determinati. In altre parole è come dire al simulatore che il modello ha lo stesso comportamento elettrico qualsiasi sia la porta che viene considerata come origine del segnale di stimolo.

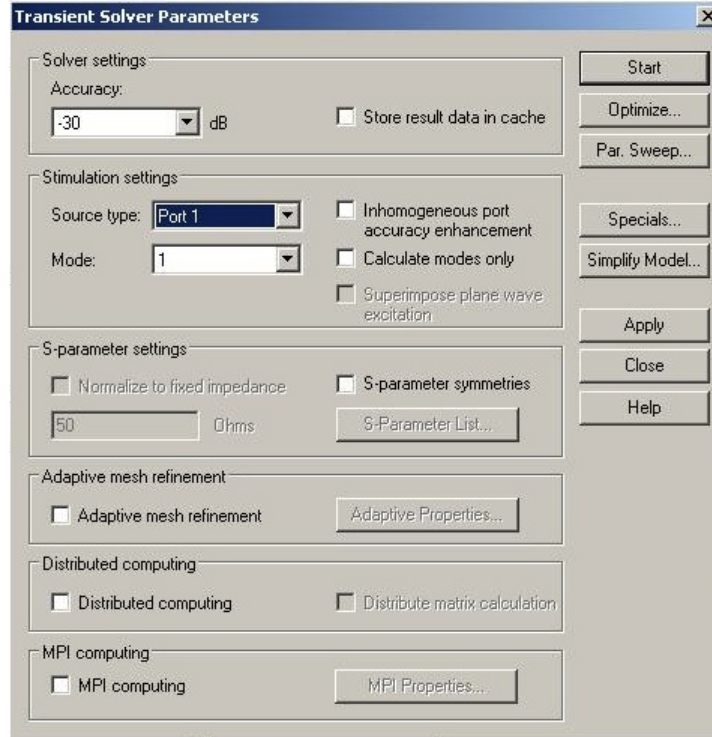


Figura 2.23: Menù per l'impostazione dei parametri e l'avvio della simulazione in modalità transient solver.

2.6 Principo della simulazione

Per eseguire le simulazioni il software CST si basa su un algoritmo chiamato FIT ossia Finite Integral Equations, proposto per la prima volta nel 1976 da Weiland. Questo algoritmo esegue la risoluzione delle equazioni di Maxwell in forma integrale applicate su una versione discretizzata del modello.

$$\begin{aligned} \iint_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} dS &= \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_V \rho dV \\ \iint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS &= 0 \\ \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} &= -\frac{d}{dt} \iint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS \\ \oint_l \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} &= \mu I + \mu\epsilon \frac{d}{dt} \iint_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} dS \end{aligned}$$

La discretizzazione avviene mediante la creazione della mesh che è possibile osservare agendo sul menù *Mesh - Mesh view*; per semplicità da ora in poi si farà riferimento ad una mesh esaedrica. In realtà, oltre alla mesh che si può vedere nel modo sopra citato, il software ne crea un'altra, duale alla prima, le cui celle sono ad essa ortogonali. La prima mesh viene usata per risolvere le equazioni riguardanti il campo elettrico, mentre la seconda quelle riguardanti il campo magnetico. Come si può vedere nel dettaglio dalla figura, la prima mesh denominata G viene utilizzata per relazionare il campo elettrico e con il flusso del magnetico b , mentre la seconda mesh detta \tilde{G} viene utilizzata per relazionare il campo magnetico con il flusso del campo elettrico. Questa associazione, come si può intuire, rispecchia le equazioni di Maxwell e più in particolare la legge di Faraday sull'induzione magnetica e la legge di Ampere. Le equazioni di Maxwell vengono applicate a tutte le facce delle celle della mesh, arrivando quindi ad avere una descrizione del comportamento elettromagnetico dell'intero modello. Il software tuttavia non si basa sul calcolo differenziale ma sulla più semplice, dal punto di vista implementativo, algebra lineare. Sfruttando la linearità di integrali e derivate le relazioni ottenute vengono scritte in

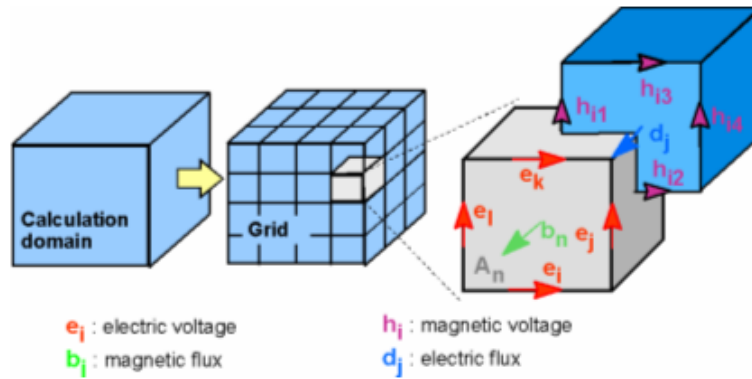


Figura 2.24: Discretizzazione del modello mediante due mesh.

forma matriciale come si può vedere in figura, per il campo elettrico e il flusso del campo magnetico. Una volta completata la descrizione applicando il procedimento sopra citato a tutte le facce delle mesh

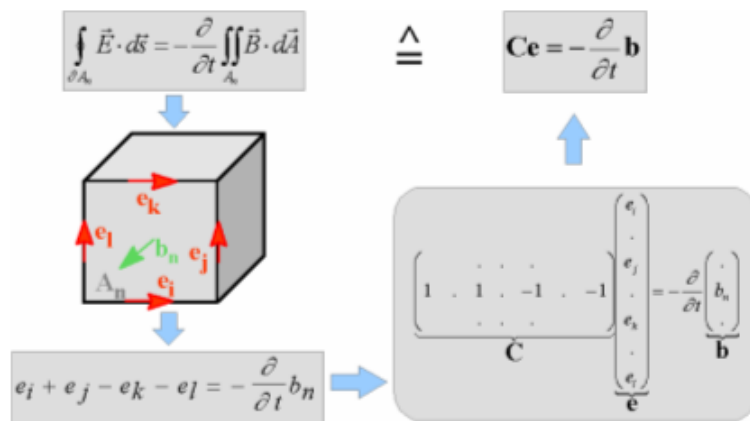


Figura 2.25: Applicazione delle equazioni di Maxwell alle celle delle mesh.

e con tutte le equazioni di Maxwell si può procedere con il calcolo. Normalmente procedimenti simili a questo tendono a soffrire di una certa instabilità delle equazioni, che può condurre alla produzione di risultati completamente errati. Fortunatamente l'algoritmo FIT è immune a questo grazie alla sua struttura che riesce a tenere conto della conservazione della carica e dell'energia nel modello, eliminando quindi possibili instabilità. Va infine sottolineato che di fatto l'algoritmo FIT può essere applicato a mesh con qualsiasi tipo di geometria, anche irregolare, potendo comunque godere delle proprietà di semplicità e stabilità sopra citate.

2.7 Errori nella simulazione

Per quanto precisa possa essere, ogni simulazione è affetta da un certo grado di errore; questo è principalmente dovuto al fatto che il modello discretizzato dal software non corrisponderà mai totalmente a quello reale. Nonostante nella maggior parte dei casi gli errori siano trascurabili è comunque bene farne una breve panoramica. Gli errori possono essere di vario genere; alcuni per esempio possono essere dati da incongruenze fra il modello riprodotto e quello reale come per esempio errori di:

- **dimensioni geometriche:** a volte durante la riproduzione del modello si possono compiere errori nel riportare correttamente le dimensioni o le proporzioni fra le sue parti; è bene quindi prima di cominciare la simulazione accertarsi di aver riprodotto fedelmente il modello;

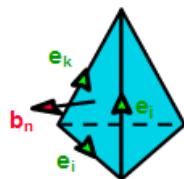


Figura 2.26: Esempio di applicazione dell'algoritmo FIT anche a mesh non esaedriche.

- **descrizione dei materiali:** è necessario assicurarsi di avere immesso correttamente nel software i parametri relativi ai materiali del modello, tenendo conto che spesso questi variano anche a seconda delle frequenze in gioco o della temperatura;
- **sorgenti di eccitazione:** particolare attenzione deve essere fatta nella scelta della sorgente di eccitazione più appropriata per il modello che si sta simulando. Oltre a questo occorre porre attenzione anche nell'impostazione dei parametri delle sorgenti che devono essere coerenti con la tipologia e la geometria del modello. Questo al fine di evitare per esempio disadattamenti di impedenza o propagazioni anomale del segnale di stimolo;
- **ambiente circostante:** particolare attenzione deve essere posta anche alla corretta definizione dell'ambiente circostante il modello, in quanto vi potrebbe essere la presenza di elementi che potrebbero influenzarne il comportamento.

Oltre a questo vi possono essere altre fonti di errore causate principalmente da inaccuratezza durante i procedimenti di simulazione e discretizzazione; si possono quindi avere errori di:

- **discretizzazione:** spesso le linee della mesh non sono abbastanza fitte e questo influisce negativamente sulla precisione con cui viene effettuata la discretizzazione dei campi elettrico e magnetico, con un conseguente degrado dei risultati;
- **troncamento:** a volte può accadere che si verifichino delle anomalie che fanno sì che la simulazione venga troncata prima che il modello sia stato sollecitato con tutto il segnale di stimolo. Compare comunque un messaggio di avvertimento sull'apposita finestra;
- **geometria:** a volte può capitare che la discretizzazione della mesh si discosti dalla geometria del modello CAD creato dall'utente, è quindi opportuno, prima di iniziare la simulazione effettuare un controllo su questo aspetto. Bisogna tuttavia sottolineare la bassa probabilità che accada un errore del genere quando si utilizza la mesh esaedrica in combinazione con l'algoritmo PBA;
- **condizioni al contorno:** è fondamentale per il modello conoscere cosa c'è intorno ad esso. Per esempio per il calcolo del profilo di irradiazione si deve collocare un minimo di spazio vuoto attorno al modello. È quindi importante sapere dimensionare correttamente parametri come quello appena citato affinché il simulatore possa trovarsi nelle condizioni migliori per portare a termine i calcoli;
- **interpolazione:** tali errori si possono presentare quando il software cerca di calcolare i valori dei campi in punti intermedi fra le linee della mesh cercando di eseguire un'interpolazione;
- **numerici:** si possono presentare a causa della rappresentazione finita dei numeri da parte del software.

Capitolo 3

Creazione di un semplice modello e relativa simulazione

Verrà di seguito presentata la costruzione di un semplice modello, consistente in una basetta di materiale isolante contenente una *microstrip*. Si procederà successivamente all'impostazione del software per sollecitare la *microstrip* con un segnale contenente le frequenze da 6 a 17 GHz. Questo per esaminare la disposizione di campi elettrici, magnetici e delle correnti superficiali sul modello. Il seguente esempio, tratto da un tutorial, viene qui esposto e commentato per illustrare come utilizzare le risorse del simulatore viste nel capitolo precedente.

3.1 Selezione del tool e costruzione del modello CAD

Il software CST può essere utilizzato per simulare parecchi parametri nel campo dell'elettromagnetismo, la prima cosa da specificare quindi è che si intende creare un progetto per una simulazione nel campo delle microonde. Questo può essere fatto agevolmente dall'interfaccia iniziale del software scegliendo l'icona **CST MICROWAVE STUDIO**. Una volta scelto l'ambito della simulazione è necessario operare un'ulteriore distinzione fra i vari modelli specifici appartenenti a quell'ambito. Nel caso in esame, il campo delle microonde contiene modelli quali: antenne, connettori, filtri, risonatori, dispositivi RFID (Radio Frequency IDentification), guide d'onda e altro. Per il modello in questione è opportuno scegliere l'opzione **Palnar Filter** come si può vedere dall'immagine del menù. Una volta effettuata la scelta apparirà

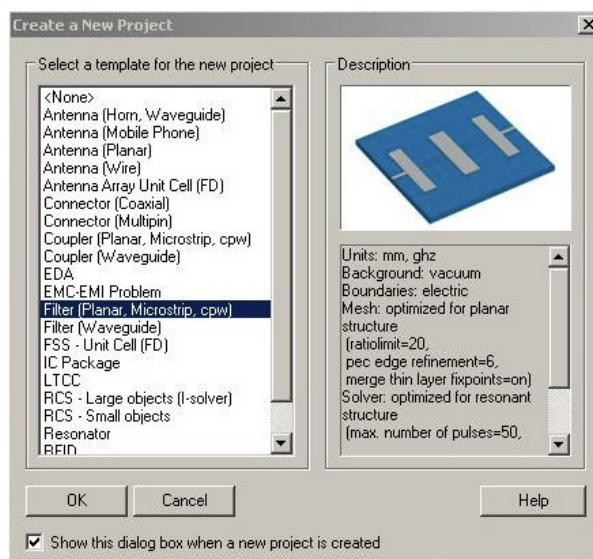


Figura 3.1: Menù per la scelta del tipo di progetto.

una schermata dove in evidenza sarà posto un sistema CAD. Al suo interno si possono collocare oggetti geometrici facendo riferimento alle coordinate spaziali evidenziate nella finestra. La prima operazione da compiere è specificare le unità di misura con le quali si sta andando a lavorare. Queste vanno impostate nell'apposito menù che compare selezionando *Solve - Units* dalla barra principale dei menù. Dopo aver selezionato i *mil*, ossia millesimi di pollice, come unità di lunghezza e il GigaHertz come unità di di frequenza è possibile iniziare a creare le forme necessarie per riprodurre il modello voluto. Per la costruzione del modello vengono utilizzati i *mil* anziché i millimetri poiché questa unità di misura è altamente diffusa nella progettazione delle schede stampate; dal momento però che non viene usata quotidianamente è necessario prendervi un po' di familiarità per poter avere un tornaconto intuitivo sulle effettive dimensioni dei modelli. Per creare le forme si possono utilizzare i numerosi comandi del CAD visti precedentemente. Per il modello in esame, formato da uno strato di isolante di forma quadrata con sopra una *microstrip*, è opportuno scegliere il comando per il prisma per costruire la base. Questa è inoltre composta di un materiale isolante che dovrà essere specificato durante la costruzione, nel caso in questione il materiale è l'ossido di alluminio Al_2O_3 . Il comando desiderato lo si può trovare con il seguente percorso: *Objects - Basic Shapes - Brick*. A questo punto per completare la costruzione, si possono seguire due strade. Con la prima si può abbozzare la figura con il mouse nello spazio 3D, dare un doppio click ogni volta che si vuole confermare altezza, larghezza e profondità ed infine dare un ultimo doppio clic di conferma; apparirà quindi a questo punto un menù di riepilogo delle coordinate spaziali del solido disegnato con il quale si possono apportare modifiche alla figura oppure semplicemente confermarla.

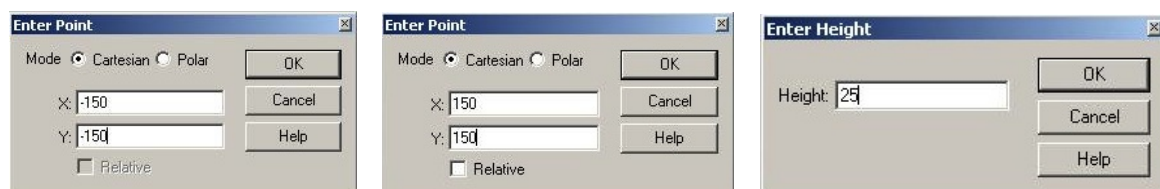


Figura 3.2: Menù parziali per l'inserimento delle coordinate dei punti estremi lungo i tre assi della figura che si vuole costruire.

In alternativa, dopo aver selezionato il tipo di solido desiderato, si può premere il tasto *Tab*; ed inserire le coordinate delle estremità della figura nei sotto menù che appaiono. L'operazione deve essere ripetuta tre volte, per specificare tutte e tre le dimensioni della figura. Al termine dell'inserimento delle coordinate parziali apparirà anche in questo caso il menù di riepilogo a cui si deve dare conferma. Nel caso in

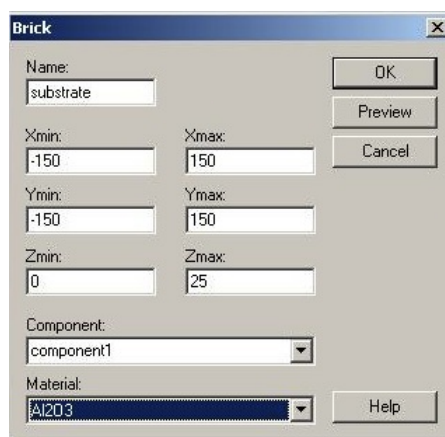


Figura 3.3: Menù per il riepilogo delle coordinate spaziali di un qualsiasi oggetto che si vuole creare.

esame si vuole creare un substrato a base quadrata largo 300 mil e alto 25, che corrispondono a 3.81 e 0.635 millimetri; si possono quindi vedere i parametri inseriti nella figura soprastante. In aggiunta alle operazioni sopra descritte è opportuno assegnare anche un nome all'oggetto appena creato, in questo caso si attribuisce il nome *substrate*. Questo consente di distinguerlo meglio i vari componenti del

modello nel caso in cui questo sia composto da più parti. Infine l'ultima operazione che si deve fare sul menù di riepilogo è quella di scegliere il materiale di cui deve essere composto l'oggetto appena creato. Cliccando sull'apposita sezione si apparirà un ulteriore menù che contiene una vasta libreria di materiali. Sfortunatamente il materiale con il quale si vuole realizzare l'oggetto, nel nostro caso *ossido di alluminio*, non è presente all'interno del catalogo. Si deve pertanto aggiungerlo manualmente ricorrendo all'apposita opzione che fa comparire un menù come quello in figura. Ogni volta che si aggiunge un nuovo materiale

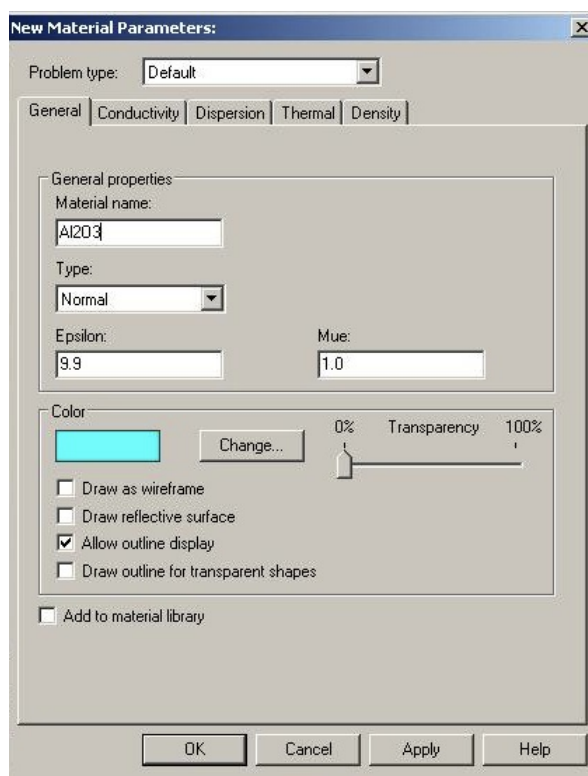


Figura 3.4: Menù per la scelta o l'aggiunta di un nuovo materiale.

se ne devono sempre specificare le caratteristiche, in particolare ai fini del modello che si deve costruire è fondamentale inserire la costante dielettrica ϵ e la costante di permeabilità magnetica μ . Il software consente inoltre di specificare altre proprietà come conduttività, dispersione, densità e proprietà termiche; queste tuttavia non sono determinanti per l'esempio in questione. Infine è opportuno assegnare il nome al nuovo materiale e scegliere un colore per rappresentarlo, questo consentirà di riconoscerlo meglio nel disegno 3D. Oltre a questo si può anche decidere se aggiungere il materiale alla libreria per averlo a disposizione anche nella costruzione di altri modelli.

A questo punto sullo schermo comparirà l'immagine dell'oggetto appena disegnato che dovrebbe essere simile a quello in figura. Il passo successivo consiste nell'aggiungere la pista di metallo. Per farlo si può ripetere lo stesso procedimento di prima, come per esempio selezionare l'opzione per il parallelepipedo ed inserire direttamente le coordinate geometriche. Dal momento che la pista sarà posizionata a metà della base di isolante e si estenderà per tutta la sua lunghezza, risulta alquanto semplice calcolare le coordinate da inserire nel menù. Sempre in questa fase, si deve anche scegliere lo spessore della pista che sarà di 0.118 mil, corrispondenti a 0.003 millimetri. Infine anche qui va scelto il materiale che fortunatamente è già contenuto nella libreria. Questo si chiama PEC, ossia Perfect Electric Conductor, ed è un materiale che non esiste in natura, ma godendo di tutte le proprietà di un conduttore perfetto è adatto a per questa simulazione di esempio.

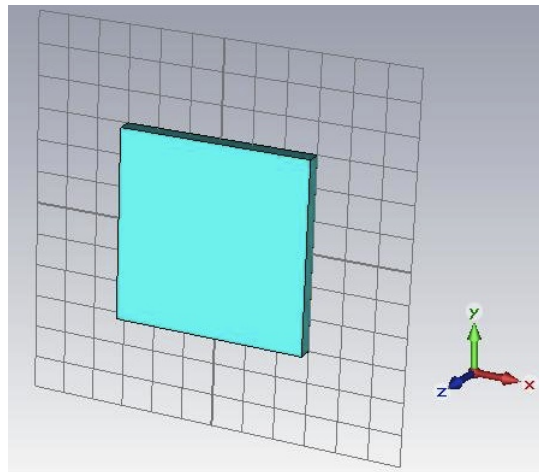


Figura 3.5: Risultato della creazione della base in materiale isolante.

3.2 Configurazione della simulazione

A questo punto il modello CAD disegnato è completo, non resta che configurare il software per la simulazione. Nel caso in esame si vuole conoscere la disposizione della corrente e del campo magnetico nella pista metallica una volta che questa sia stata eccitata con un apposito segnale di testing. Per fare questo bisogna prima di tutto aggiungere al modello delle porte; visto il tipo di simulazione queste saranno porte in guida d'onda. Nel software si trovano nel menù: *Solve - Waveguide Ports* nel quale si possono impostare tutti i parametri. Graficamente sono rappresentate da dei rettangoli che verranno collocati sul lato del modello che si intende sollecitare. Andando sul menù sopra citato si può quindi visualizzare sulla grafica il piano che rappresenta la guida; lo si può anche modificare per adattarlo al lato voluto del materiale isolante in modo che sia ortogonale alla pista di metallo come si può vedere in figura. Resta tuttavia la definire la grandezza della porta, in particolare la sua estensione e collocazione

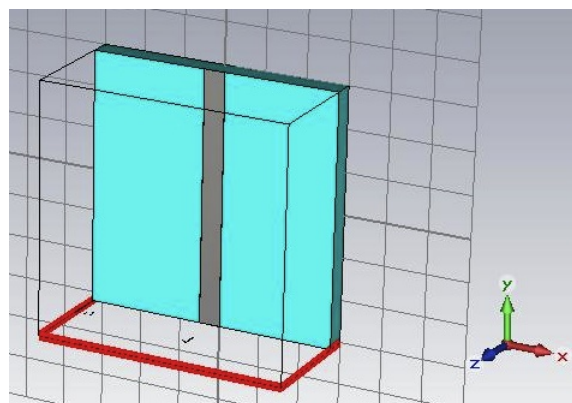


Figura 3.6: Aggiunta di una porta al modello.

spaziale. Questa varia a seconda del tipo di modello da simulare, è comunque buona regola che la porta sia dieci volte più larga rispetto alla larghezza della *microstrip* e cinque volte più alta rispetto all'altezza del substrato. Il menù consente di configurare liberamente le coordinate spaziali. L'orientamento della porta e la sua collocazione possono essere impostati in pochissimi passaggi grazie al menù che consente di scegliere l'asse di riferimento rispetto al quale rendere parallelo il piano della porta. Questo parametro si chiama *Normal* ed è visualizzato in alto nel menù. Un'altro parametro importante è l'orientazione che consente di scegliere da che parte del modello collocare la porta, questo parametro prende il nome di *Orientation*. Una volta creata la prima porta è necessario crearne un'altra da collocare sul lato opposto

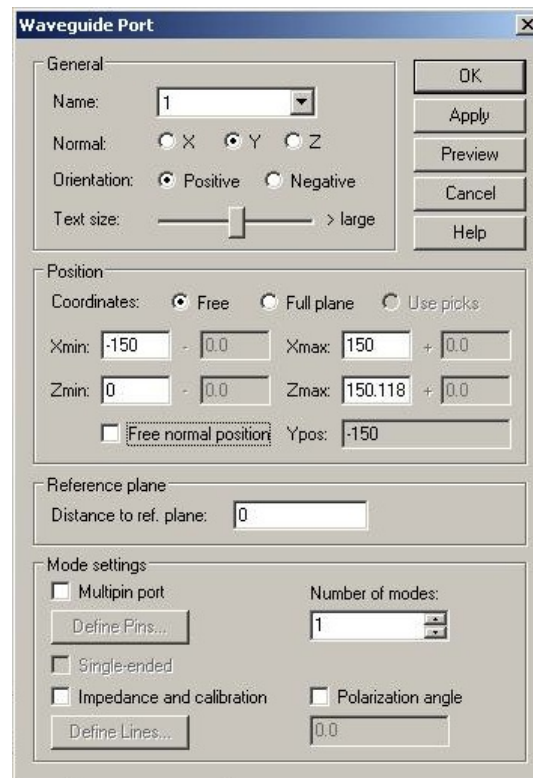


Figura 3.7: Menù per l'aggiunta delle porte; nella parte alta si possono notare i riferimenti geometrici.

del modello. Questo perchè una porta sarà quella che fornisce il segnale di eccitazione; l'altra porta sarà invece quella che lo assorbe e che virtualmente continua e completa la guida d'onda di lunghezza infinita che attraversa il modello. La creazione della seconda porta è molto semplice in quanto il software tiene in memoria tutti i parametri utilizzati per la creazione della prima; l'unica cosa da modificare è l'orientamento. A questo punto la grafica visualizzerà un modello come quello in figura. Restano ora da

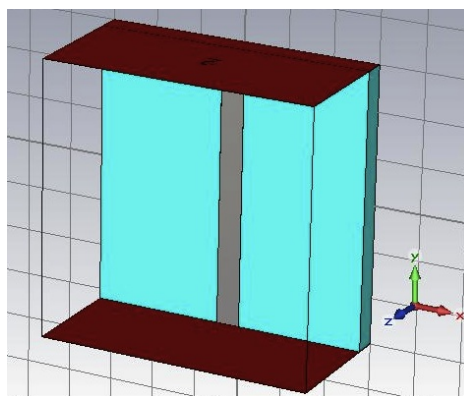


Figura 3.8: Modello completo.

impostare gli ultimi due parametri ossia le *condizioni al contorno* e il *range di frequenze* del segnale che verrà utilizzato per eccitare il modello. Fino a questo punto infatti si è descritto soltanto il modello ma non si è detto praticamente nulla riguardo all'ambiente circostante che può avere le caratteristiche più strane. Nel caso in questione il modello è sospeso nel vuoto. Per specificare questo si devono impostare le condizioni al contorno: tramite l'apposito comando *Solve - Boundary Conditions* si apre il menù dove

si deve impostare nei vari campi il parametro *open*.

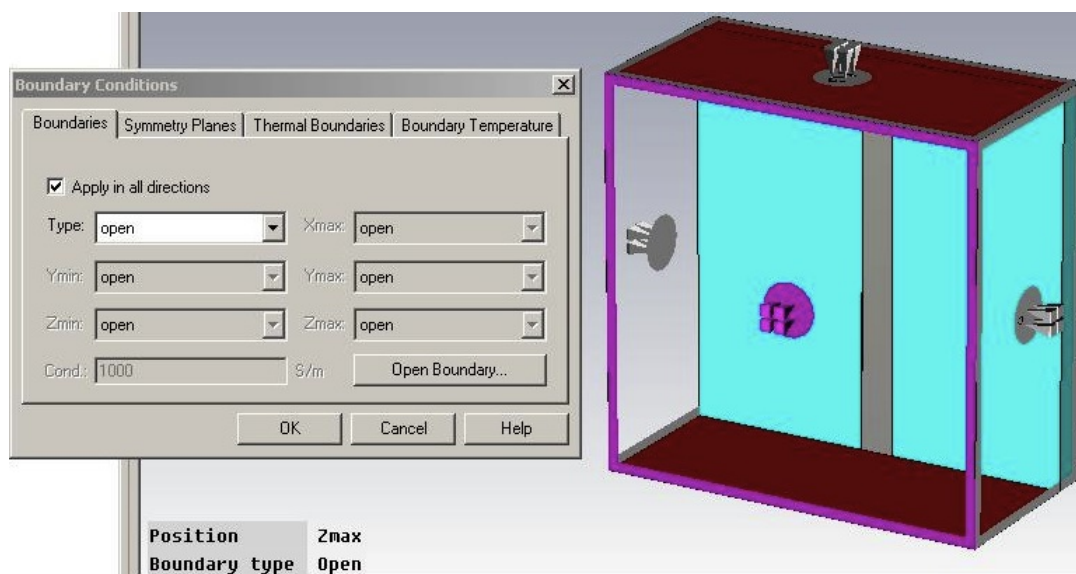


Figura 3.9: Impostazione delle condizioni al contorno.

Resta adesso da specificare il range di frequenze che deve contenere il segnale di testing. Questo può essere fatto tramite il comando *Solve - Frequency* che fa apparire un'apposito menù dove inserire la frequenza minima e quella massima. Con l'impostazione del range di frequenze, è terminata l'immissione

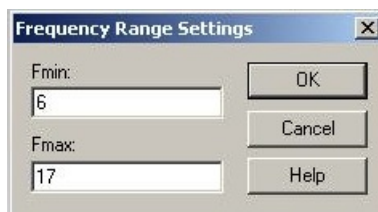


Figura 3.10: Scelta del range di frequenze per la simulazione.

delle proprietà del modello e dell'ambiente circostante. Rimane soltanto da precisare quali parametri deve salvare il software durante la simulazione che prende il nome di **Transient Solver**. Questa infatti consente una simulazione del comportamento del modello nel dominio del tempo grazie al calcolo della disposizione dei campi elettrici e magnetici in intervalli di tempo predefiniti. Non resta quindi che utilizzare il comando *Solve - Field Monitors* il quale farà apparire un menù come quello riportato in figura 3.11. Nel menù è presente una casella in alto a destra in cui è possibile scegliere la frequenza per la quale fare il salvataggio dei parametri che invece si possono scegliere nel menù di sinistra. Sono presenti, fra i tanti parametri disponibili: il campo elettrico, il campo magnetico, il flusso di potenza, la densità di corrente e il profilo di irradiazione. Per il modello in questione si sceglierà di monitorare la corrente che attraversa la pista e il campo magnetico in una frequenza in in centro banda.

3.3 Avvio della simulazione e visualizzazione dei risultati

Effettuata quest'ultima operazione è quindi possibile far partire la simulazione agendo sul comando *Solve - Transient Solver* che farà apparire un'ultimo menù contenente in alto a destra un tasto denominato *Start*. Prima di premerlo è però necessario selezionare quale delle due porte fungerà da sorgente per il segnale di testing; vista la simmetria del modello è in questo caso indifferente scegliere la porta 1 piuttosto che la 2. Gli altri parametri si lasciano pressoché invariati, ad eccezione dell'impostazione della simmetria dei

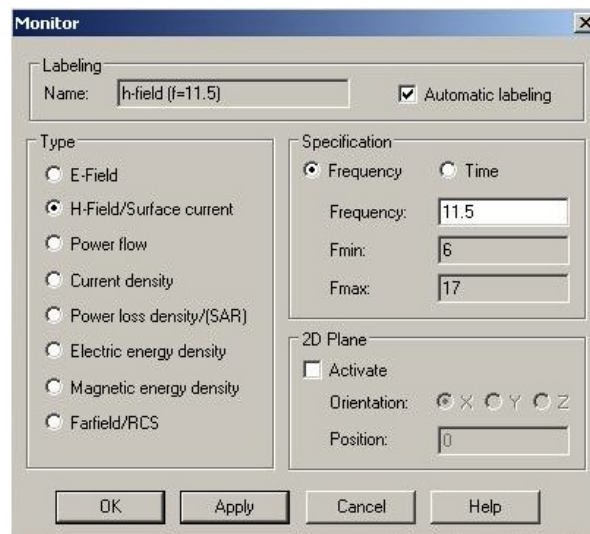


Figura 3.11: Menù per la scelta delle grandezze da memorizzare durante la simulazione.

parametri S. Infatti è sempre buona regola, per ogni simulazione, cercare di ottenere la massima precisione e risoluzione nei risultati con il minimo impiego di risorse computazionali. Terminata la simulazione, i cui progressi sono visibili in tempo reale su una progress bar presente in basso sulla schermata principale, è possibile visualizzare i risultati. Nella schermata principale, sul lato sinistro, è infatti presente un menù,



Figura 3.12: Progress bar indicante lo stato dei vari passi della simulazione.

dalla struttura ad albero, contenente tutte le impostazioni e i risultati precedentemente selezionati per il modello. Grazie a questo menù si possono anche modificare molti altri parametri, come ad esempio la geometria degli oggetti creati, oppure i materiali di cui sono composti. Fra le tante voci ne esiste una denominata *2D/3D Results*, selezionandola si può navigare nelle voci che dipendono da essa fino ad arrivare ai grafici che illustrano i risultati voluti. Dalle immagini riportate si può quindi osservare

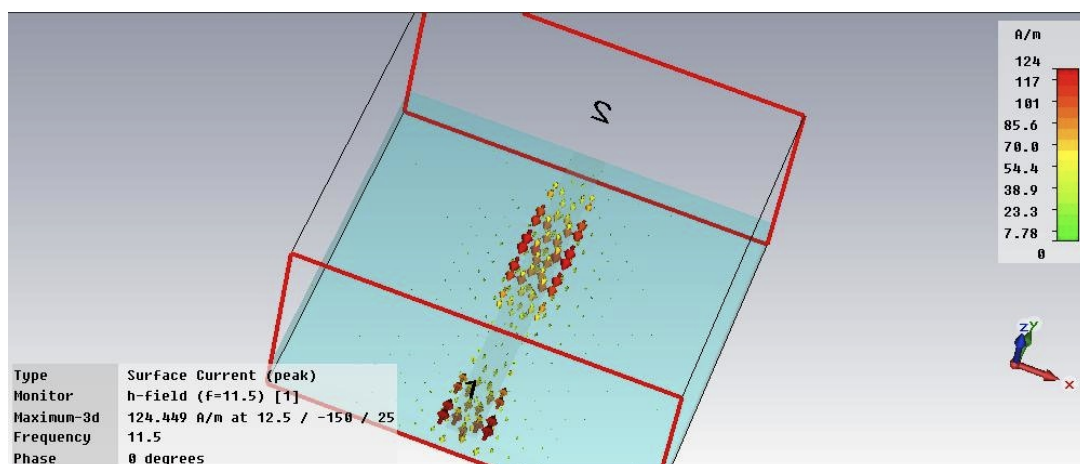


Figura 3.13: Risultato della simulazione sulle correnti che scorrono sulla microstrip.

come la corrente indotta dal segnale di testing si disponga in prevalenza sulla *microstrip* metallica; come

del resto era ovvio supporre. È anche possibile apprezzare i dettagli delle frecce che indicano che la corrente non scorre sempre nello stesso verso all'interno della *microstrip*. Questo poiché dal momento che la sollecitazione è eseguita da campi elettromagnetici variabili nel tempo, a seconda del verso dei campi varia il verso della corrente.

Nella seconda immagine è invece possibile apprezzare l'intensità del campo magnetico originato dalla corrente che scorre nella *microstrip* ed irradiato nello spazio circostante. Nel grafico in particolare si può notare l'intensità del campo a seconda del punto considerato del substrato. Ogni grafico è inoltre sempre accompagnato da una legenda che contribuisce a fornire un'indicazione anche quantitativa dell'intensità delle grandezze considerate.

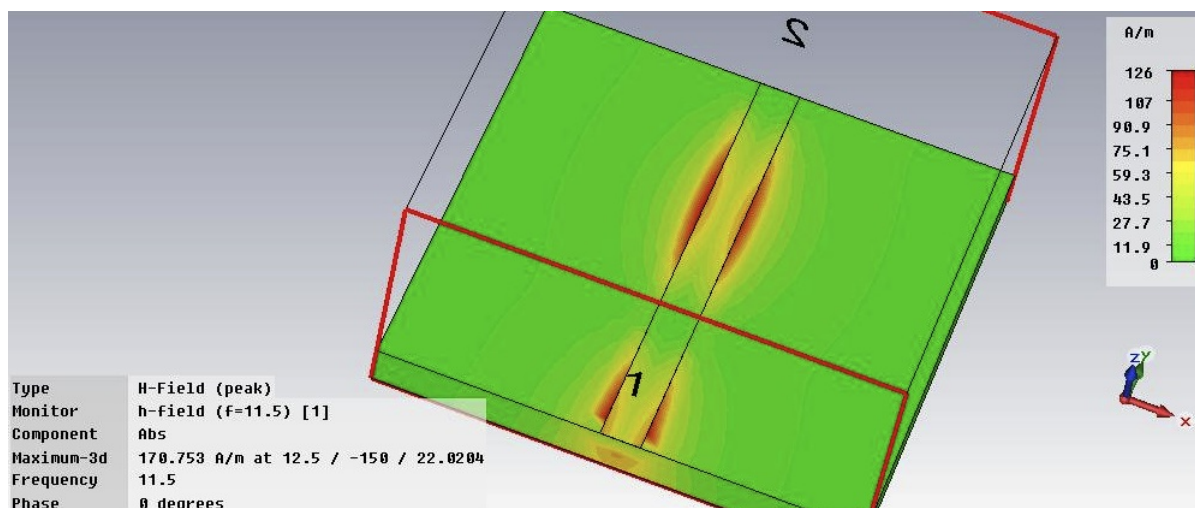


Figura 3.14: Risultato della simulazione sull'intensità del campo magnetico.

3.4 Osservazioni varie

Nell'esempio visto nella sezione precedente, il modello CAD è stato costruito utilizzando alcuni comandi che richiedevano l'inserimento di coordinate spaziali. La cosa è stata affrontata scrivendo manualmente i valori delle coordinate nei menù; questo metodo, seppure corretto, presenta uno svantaggio non indifferente. Infatti nel caso le coordinate necessitassero di essere riviste, si dovrebbe modificare singolarmente ogni oggetto creato. Esiste tuttavia una strada alternativa a quella usata che consiste nella definizione e nell'espressione di coordinate geometriche mediante **parametri**. Oltre a consentire la costruzione di un modello facilmente scalabile i parametri sono utili anche per un'altra ragione. Dal modello appena costruito si è infatti appreso che è buona regola che le dimensioni delle porte siano vincolate alle dimensioni di *microstrip* e substrato, in particolare la larghezza della porta deve essere 10 volte quella *microstrip*, mentre l'altezza 5 volte quella del substrato; grazie ai parametri inserire queste condizioni diventa facile e veloce, senza contare il fatto che anche i parametri della simulazione diventano automaticamente scalabili. Un'altro accorgimento interessante riguarda invece il contesto in cui si trova il modello che si

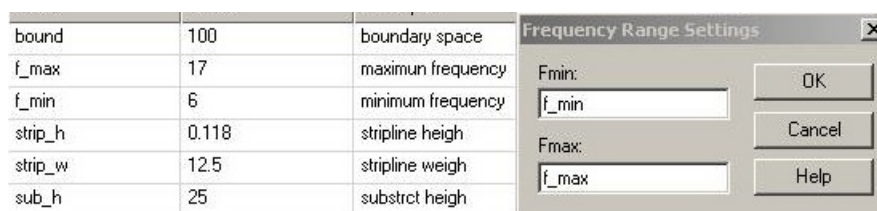


Figura 3.15: Esempio di utilizzo dei parametri nei menù.

crea. Infatti nell'esempio precedente, nello spazio CAD esisteva soltanto il modello e quest'ultimo non era circondato da nulla. Questa condizione può influire oppure no, a seconda dei parametri che si devono simulare. La cosa era del tutto ininfluenza nella simulazione precedente poiché al programma bastavano le informazioni che erano state inserite. Nel caso però si volessero simulare altri parametri, ad esempio il profilo di irradiazione, bisognerebbe apportare delle modifiche alla struttura, in quanto è necessario aggiungere dello spazio vuoto attorno al modello. È intuibile il fatto che il software necessita di uno spazio dove simulare la propagazione delle onde elettromagnetiche, non può certo farlo se questo non c'è. Per aggiungere spazio intorno al modello si può quindi utilizzare l'apposito comando *insert command* che apre il menù che si può osservare in figura. Solitamente si preferisce aggiungere la stessa quantità di

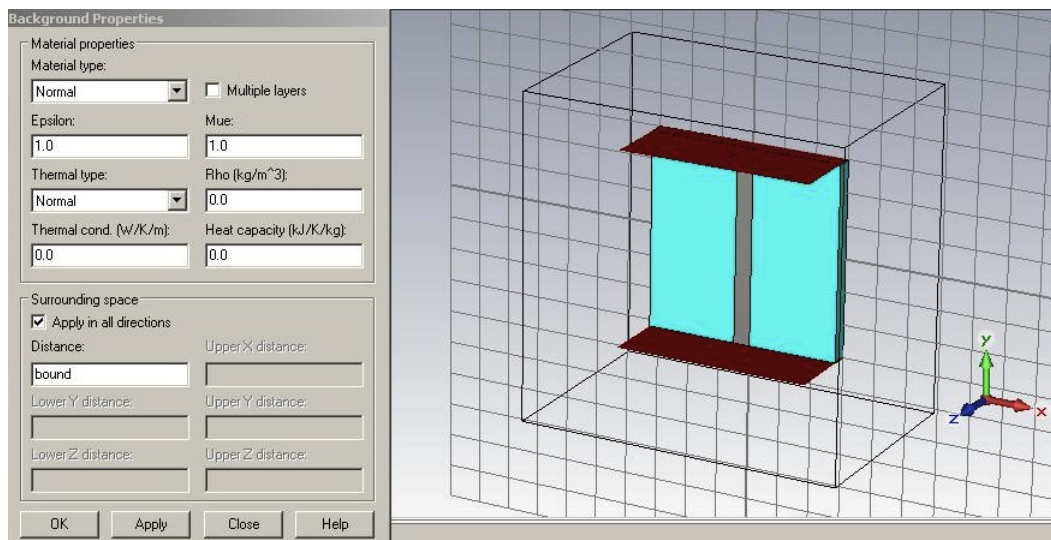


Figura 3.16: Menù per l'aggiunta di spazio intorno al modello.

spazio in tutte le direzioni, facendo attenzione che il valore inserito sia commensurabile alle grandezze in gioco per il modello.

Con l'accorgimento appena visto può però essere necessario riposizionare le porte. Infatti normalmente esse vengono collocate alle estremità dello spazio che contiene il modello; nella maggior parte dei casi si vuole invece che esse siano adiacenti alle strutture create. Nel caso visto precedentemente le porte devono essere adiacenti alle *microstrip*. Per fare questo si può utilizzare un apposito comando che si chiama *Pick Face*, che consente di selezionare una o più facce del modello come visto precedentemente. A questo

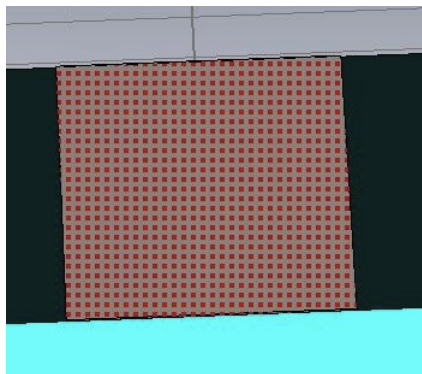


Figura 3.17: Esempio di selezione di una faccia della microstrip.

punto basta ripetere le opzioni descritte nella sezione precedente per la creazione di una porta, facendo

però attenzione a selezionare nel relativo menù l'opzione *Use Picks*; grazie a questa si avrà la garanzia che la porta rimarrà sempre adiacente al modello anche se verranno apportate ulteriori modifiche.

Capitolo 4

Microstrip angolare

4.1 Descrizione

Verranno ora costruiti due modelli per simulare la disposizione dei campi elettromagnetici di una pista quando questa incontra una deviazione di 90 gradi nel suo percorso. Tale deviazione infatti può avvenire in maniera brusca, facendo sì che il bordo della pista formi un angolo retto, come si può vedere dall'immagine del primo modello. In alternativa la deviazione può avvenire in modo più dolce facendo curvare due volte la *microstrip* ad angoli di approssimativamente 45 gradi; anche questo secondo modello è riportato in figura. Ogni pista è costruita sopra ad uno spesso strato di isolante, all'interno del quale è inserito un sottilissimo strato di metallo che ha la funzione di piano di massa. Grazie alle simulazioni sarà possibile confrontare le disposizioni dei campi elettromagnetici, determinando quindi la migliore configurazione per avere un minore irraggiamento di energia elettromagnetica.

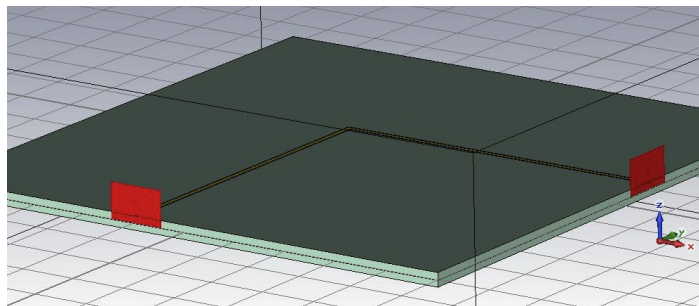


Figura 4.1: Pista senza smussatura.

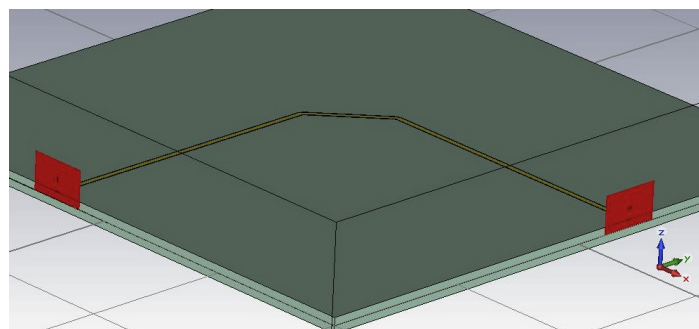


Figura 4.2: Pista con smussatura.

4.2 Costruzione dei modelli CAD

La costruzione di un modello CAD, vista la grande versatilità del programma, può essere fatta mediante varie procedure, alcune più semplici, altre più complesse. Analogamente anche la scelta del sistema di coordinate, del posizionamento del modello in esso e della scelta dei parametri fondamentali per rappresentarlo, non possono essere fatti in modo univoco. Nonostante questo, si è sempre cercato di percorrere la strada più semplice per rappresentare i modelli in modo da poter bilanciare correttamente tutti i fattori considerati.

Primo modello: pista con deviazione ad angolo retto

Alla costruzione è preceduta una fase di studio nella quale si sono individuati i parametri fondamentali tramite i quali rappresentare l'intero modello. Sono riportate, fra parentesi, le misure in (*mil*) e (*mm*):

- (25) (0.64) **sub_h**: rappresenta lo spessore del substrato su cui è adagiata la pista;
- (1000) (25.40) **sub_w**: rappresenta la lunghezza di metà del lato del substrato al quale per semplicità costruttiva si è deciso di dare forma quadrata;
- (20) (0.51) **strip_l**: rappresenta la larghezza della pista;
- (1.4) (0.036) **strip_h**: rappresenta lo spessore della pista;
- (1200) (30.48) **strip_w**: rappresenta la distanza fra il bordo destro della pista e il lato estremo del substrato a destra di essa.

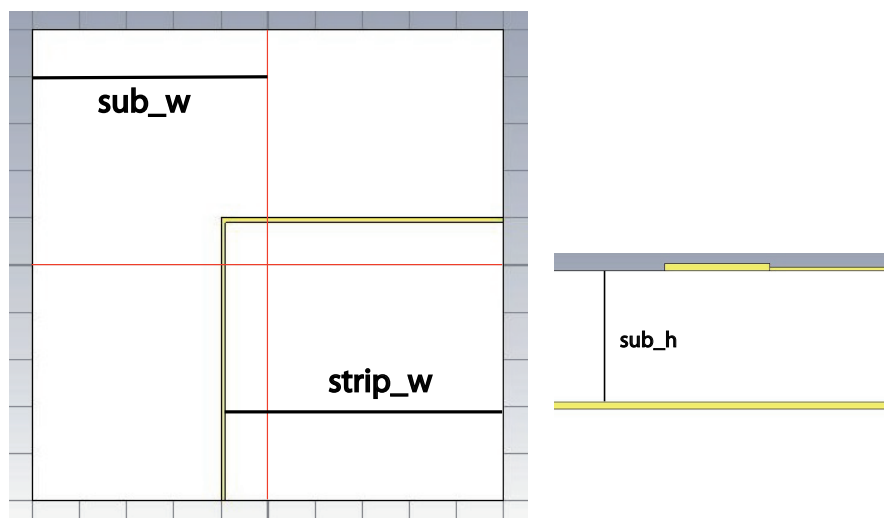


Figura 4.3: Schema del primo modello con evidenziazione dei parametri.

I nomi evidenziati mediante un diverso carattere indicano l'abbreviazione attribuita nel menù dei parametri del simulatore. Oltre a quelli sopra elencati è presente un ulteriore parametro **bound** che rappresenta la dimensione del margine di spazio vuoto che volendo può essere aggiunto su ogni lato del modello; la cosa può tornare utile per il calcolo del profilo di irradiazione.

Per la costruzione del modello si è utilizzato più volte il comando *Object - Basic Shapes - Brick*. Come prima cosa si è creato il substrato costruendo un parallelepipedo, simmetrico rispetto al punto di origine (0, 0, 0), che si estende nelle direzioni x e y di una lunghezza pari a **sub_w**. L'estensione lungo l'asse z ha invece permesso di impostarne l'altezza, pari a **sub_h**. Questa attribuzione delle coordinate è stata successivamente utilizzata per la creazione di qualsiasi forma in modo che l'asse z fosse riservato sempre per l'altezza, mentre il piano xy per l'estensione delle varie forme.

Successivamente si è proceduto con la creazione della *microstrip* angolare. Questa è stata fatta creando

due piste indipendenti ed ortogonali fra loro che partendo dalla metà delle estremità di due lati del substrato si estendono fino alla sua metà. Le relazioni appena citate sono state impostate sfruttando come parametro la lunghezza di metà del lato del substrato e il parametro `strip_w`. Grazie a quest'ultimo si è infatti inserita la possibilità di traslare le due piste rispetto allo spigolo inferiore destro del substrato. Per la larghezza delle piste e per lo spessore si sono invece usati i parametri `strip_l` e `strip_h` sempre opportunamente inseriti all'interno dei menù per la creazione di forme a parallelepipedo. Terminata la costruzione delle due piste si è proceduto con la loro unione mediante l'operazione booleana di somma. Si è poi proseguito con la costruzione di un piano di massa sotto il substrato contenete la pista; questa operazione è del tutto analoga alla costruzione del substrato eccetto che per lo spessore impostato uguale a quello della pista. Infine la costruzione del modello è stata conclusa aggiungendo sotto il piano di massa un'ulteriore substrato di materiale isolante.

Durante la costruzione delle varie forme è stato attribuito ad ognuna di esse un materiale; nel dettaglio per la pista angolare ed il piano di massa è stato scelto il rame, mentre per il substrato si è optato per l'FR4; un materiale simile alla vetronite. La scelta dei materiali, come del resto delle dimensioni delle varie parti del modello, non è stata casuale; infatti si è cercato di rispettare parametri che normalmente vengono utilizzati per la creazione di schede elettroniche reali.

Secondo modello: pista con angolo retto smussato

La costruzione del secondo modello è stata effettuata in modo analogo a quella del primo; sono state tuttavia introdotte alcune modifiche nei parametri necessarie per la nuova configurazione. Sono riportate, fra parentesi, le misure in (*mil*) e (*mm*):

- (25) (0.64) `sub_h`: rappresenta lo spessore del substrato su cui è adagiata la pista;
- (1000) (25.40) `sub_w`: rappresenta la lunghezza di metà del lato del substrato al quale per semplicità costruttiva si è deciso di dare forma quadrata;
- (20) (0.51) `strip_l`: rappresenta la larghezza della pista;
- (1.4) (0.036) `strip_h`: rappresenta lo spessore della pista;
- (200) (5.08) `ref`: rappresenta la distanza fra l'asse della pista e l'asse che divide in due il substrato del modello evidenziato in rosso nell'immagine;
- (1700) (43.18) `ext`: rappresenta l'estensione della pista dal bordo del substrato.

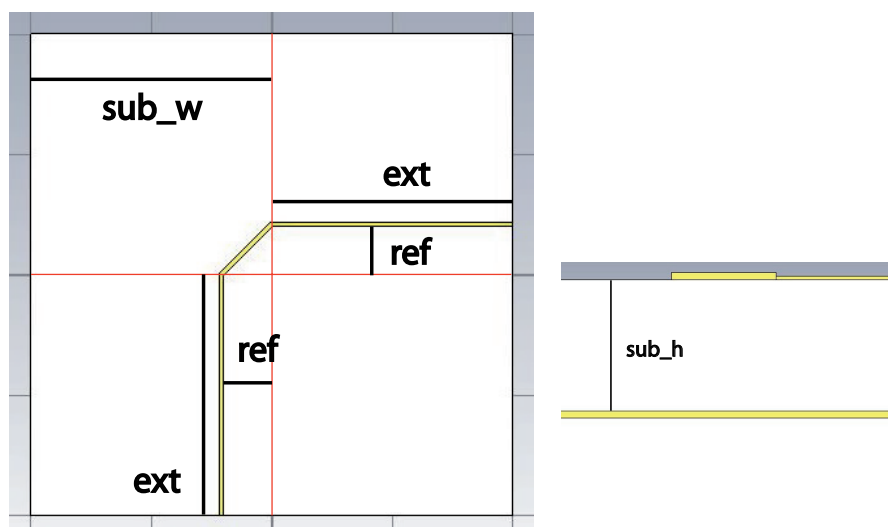


Figura 4.4: Schema del secondo modello con evidenziazione dei parametri.

dove è stato aggiunto il parametro `ext` in modo da poter regolare a che altezza far cominciare la smussatura dell'angolo retto. Il parametro `strip_w` è anche qui usato per modificare la posizione della pista in modo da ingrandire o rimpicciolire l'estensione totale di essa; in questo caso però varia l'asse di riferimento, come è possibile osservare anche dalla figura.

Nonostante il processo costruttivo sia simile a quello del modello precedente, si sono dovuti aggiungere alcuni accorgimenti nella definizione della pista affinché questa mantenesse in ogni tratto la larghezza prestabilita. Per fare questo si sono dapprima create due piste con origine su due lati ortogonali del substrato e lunghezza circa un quarto del lato di quest'ultimo. Sull'estremo interno delle due piste si è proceduto con la costruzione di due triangoli equilateri; questo per far sì che la smussatura avesse comunque la stessa larghezza della pista. La costruzione è poi proseguita con la creazione di un'ultimo pezzo di pista che congiungeva i lati adiacenti dei due triangoli. Infine si è conclusa l'operazione invo-

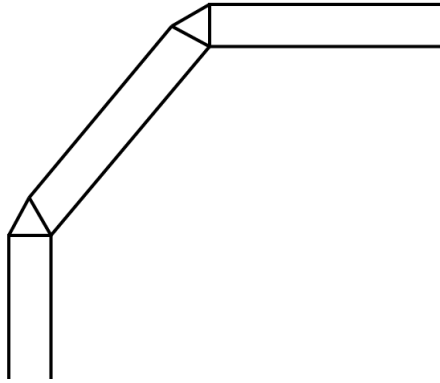


Figura 4.5: Componenti create per la costruzione della pista con angolo smussato.

cando su tutti gli elementi che formano la pista la funzione booleana di addizione; questo ha permesso di ottenere un corpo unico e compatto. Per questa costruzione si sono utilizzati principalmente due comandi CAD: *Objec - Basic Shapes - Brick* per la creazione dei parallelepipedi rappresentanti i primi pezzi della pista e *Object - Extrude* per la creazione dei due triangoli equilateri e del pezzo di congiunzione. Il tutto è stato eseguito inserendo manualmente le coordinate cartesiane dei vari solidi precedentemente espresse mediante i parametri. Dal momento che questa operazione non è stata semplice o intuitiva per le prime forme, è tornata particolarmente utile la possibilità, messa a disposizione dal software, di avere un'anteprima delle figure che si sta disegnando, prima di completarne la costruzione. Infine anche in questo modello, sotto al substrato e alla pista è stato aggiunto un piano di massa e un ulteriore strato di substrato.

Anche in questo caso la scelta delle dimensioni e dei materiali è stata eseguita seguendo le stesse direttive utilizzate per il modello precedente; pertanto si è nuovamente scelto il rame come materiale per la pista e il piano di massa e l'FR4 per i vari substrati.

4.3 Parametri di simulazione

La scelta dei parametri di simulazione è stata pressoché la stessa per entrambi i modelli precedentemente descritti; grazie a questo sarà anche possibile eseguire un confronto dei risultati ottenuti. Come prima operazione si è provveduto all'installazione delle porte in guida d'onda necessarie per la sollecitazione dei modelli; prima di proseguire si è tuttavia consultata la guida del CST per capire sostanzialmente le dimensioni da dare alle porte e successivamente anche la loro collocazione rispetto alla geometria del modello. Dal momento che quest'ultimo contiene una sola pista, la larghezza delle porte dovrà essere in funzione di essa. Nel dettaglio la larghezza totale di una porta deve essere compresa fra 6 e 10 volte la larghezza della pista, mentre l'altezza deve essere necessariamente pari a 5 volte l'altezza del substrato su cui è adagiata la pista. Il rispetto di queste proporzioni è fondamentale per consentire la propagazione del modo quasi-TEM nella guida d'onda attraversata dal modello e rappresentata dalle porte. Queste andranno quindi posizionate ortogonalmente alle piste, come si può vedere dalla figura inoltre, dal momento che il modello è provvisto di un piano di massa, le porte dovranno necessariamente

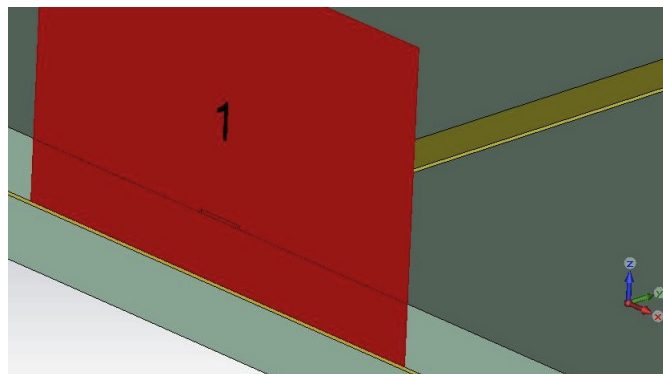


Figura 4.6: Esempio di posizionamento di una porta nei modelli: ortogonale alla pista e tangente il piano di massa.

toccarlo con il loro lato inferiore. Questo infatti è essenziale affinché la pista venga messa in contatto con il piano e ci possa quindi essere una via tramite la quale le correnti possano richiudersi. Se ciò non dovesse avvenire il modello non simulerebbe più la pista di un circuito stampato, ma un'antenna, stravolgendo totalmente l'obiettivo iniziale. La cosa verrebbe anche segnalata dal simulatore tramite degli avvertimenti chiamati *warnings* che comunicherebbero all'utente delle anomalie dovute principalmente alla mancata chiusura delle correnti. Un evento analogo accadrebbe anche se le porte non si limitassero a toccare il piano di massa, ma lo inglobassero, come accade con la pista. Anche in questo caso si avrebbe un'anomalia nella circolazione delle correnti e il modello si trasformerebbe in un'antenna a dipolo.

Completata la creazione e il posizionamento delle porte, si è proceduto con la definizione delle condizioni al contorno. Fra le varie opzioni disponibili si è scelta *Open (Add Space)* che, per prima cosa aggiunge dello spazio intorno al modello, e successivamente specifica l'assenza di ostacoli fisici o di altre sorgenti di campo elettromagnetico. La quantità di spazio aggiunto intorno al modello viene scelta dal simulatore, che tiene conto sostanzialmente delle dimensioni in gioco e del range di frequenze scelto per la simulazione. Per confermare la validità di questa scelta si è anche provato ad utilizzare semplicemente l'opzione *Open*, ad aggiungere dello spazio manualmente grazie al parametro *bound*, scegliendone opportunamente la quantità, e ad eseguire delle simulazioni di parametri prestabiliti. Si è quindi notato come i risultati delle due simulazioni siano pressoché equivalenti ma che il tempo impiegato dal simulatore è minore quando si utilizza l'opzione *Open (Add Space)*. Facendo quindi un bilancio fra l'accuratezza dei risultati e il tempo di simulazione si è deciso di utilizzare l'opzione *Open (Add Space)* in tutte le simulazioni.

Si è quindi definito il range di frequenze per la simulazione che va da 0 a 4 GHz. Anche se le frequenze di interesse sono soltanto 2.4 e 4 GHz, si è preferito far partire il range da 0 in quanto in questo modo il software riesce a diminuire la mole di calcolo necessaria alla simulazione. Tramite il menù *Solve - Field Monitors* si sono stabilite le grandezze da monitorare durante la simulazione; in particolare:

- **campo elettrico e magnetico** a 2.4 e 4 GHz;
- **corrente di superficie** a 2.4 e 4 GHz;
- **profilo di irradiazione** a 2.4 e 4 GHz.

La scelta delle frequenze in cui monitorare le variabili è stata effettuata tenendo conto che i dispositivi riprodotti vengono generalmente utilizzati nel campo delle microonde. Si è quindi ipotizzato di volerne conoscere il funzionamento se, in particolare, avessero dovuto essere impiegati in dispositivi riguardanti le telecomunicazioni terrestri e satellitari. Per questo motivo si è condotta una breve indagine sulle frequenze maggiormente utilizzate per tale scopo che sono risultate essere:

- **uplink - downlink:** 0.9 - 3 GHz

all'interno delle bande **S** e **L** delle microonde per le comunicazioni terrestri

- **uplink:** 5.925 - 6.425 GHz
- **downlink:** 3.7 - 4.2 GHz

all'interno della banda **C** delle microonde per le comunicazioni satellitari.

Si è scelto quindi di indagare il comportamento dei modelli per frequenze pari a 2.4 e 4 GHz, tipicamente utilizzate nelle applicazioni sopra citate. Non si sono simulate frequenze più alte a causa del grande aumento dei tempi di simulazione che ciò avrebbe richiesto.

Terminata l'impostazione delle frequenze si è passati al controllo della mesh, per verificare che questa descrivesse in maniera accurata il modello. Anche in questo caso si è consultata la guida e si sono stabiliti i vincoli ai quali deve sottostare la mesh affinché i risultati della simulazione possano dirsi accurati. Nel dettaglio, si sono individuate due regole fondamentali:

- l'altezza del substrato deve essere attraversata da almeno 2 - 3 linee della mesh;
- la larghezza della *microstrip* deve essere attraversata da almeno 1 - 2 linee della mesh;

come si può anche vedere dagli schemi proposti. Per soddisfare quindi le condizioni sopra citate si è

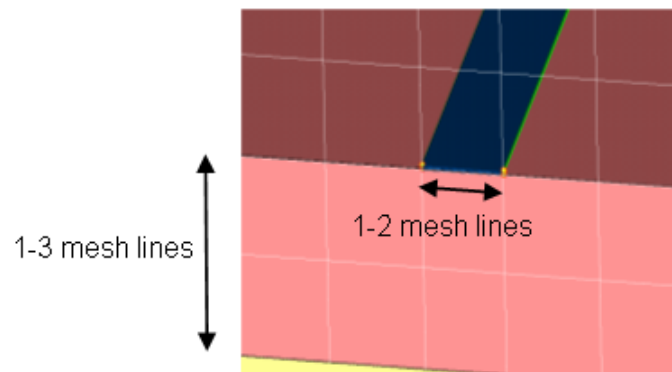


Figura 4.7: Vincoli richiesti nel calcolo della mesh per ottenere risultati accurati.

prima di tutto messa in evidenza la mesh con il comando *Mesh - View* e si è selezionato il piano di visione di interesse, perpendicolare all'asse y tramite il comando *Mesh - View y*. Presa visione che la mesh era troppo poco densa, si è aperto il menù *Mesh - Properties* e agendo sui campi illustrati sui capitoli precedenti, si è provveduto a modificarla. Sono state provate varie configurazioni dei parametri caratteristici in modo da cercare di trovarne una che soddisfasse le richieste volute descrivendo però il modello con il minor numero di celle possibili; questo naturalmente per contenere i tempi di simulazione. La configurazione scelta, dopo varie prove, consiste nella sola modifica del parametro *Lines per wavelength* che deve essere impostato a 25. In aggiunta a questo si è aperto un ulteriore menù, facendo click sul pulsante *Specials*, nel quale si è attivata l'opzione *Mesh Subgridding*. Tale opzione infatti fa sì che il simulatore infittisca automaticamente quelle regioni del modello che ritiene più critiche per il calcolo dei campi elettromagnetici.

Infine prima di avviare la simulazione si è attivata l'opzione *S-parameter Symmetry* impostando la simmetria fra i parametri S_{11} e S_{22} ; questo è stato possibile per la geometria dei due modelli che possono essere considerati come una rete a due porte simmetrica. L'attivazione di questa opzione ha consentito un'ulteriore riduzione dei tempi per la simulazione.

4.4 Risultati della simulazione del primo modello

Terminata una simulazione, per prima cosa, è necessario controllare se è avvenuta in modo corretto oppure errato. Questo può essere verificato osservando se la sollecitazione del modello da parte delle porte in guida d'onda è avvenuta secondo le modalità che sono riportate nella guida. In particolare si deve verificare se le porte abbiano trasmesso un campo elettromagnetico in una modalità quasi TEM. Osservando i risultati si ha la conferma della correttezza della simulazione.

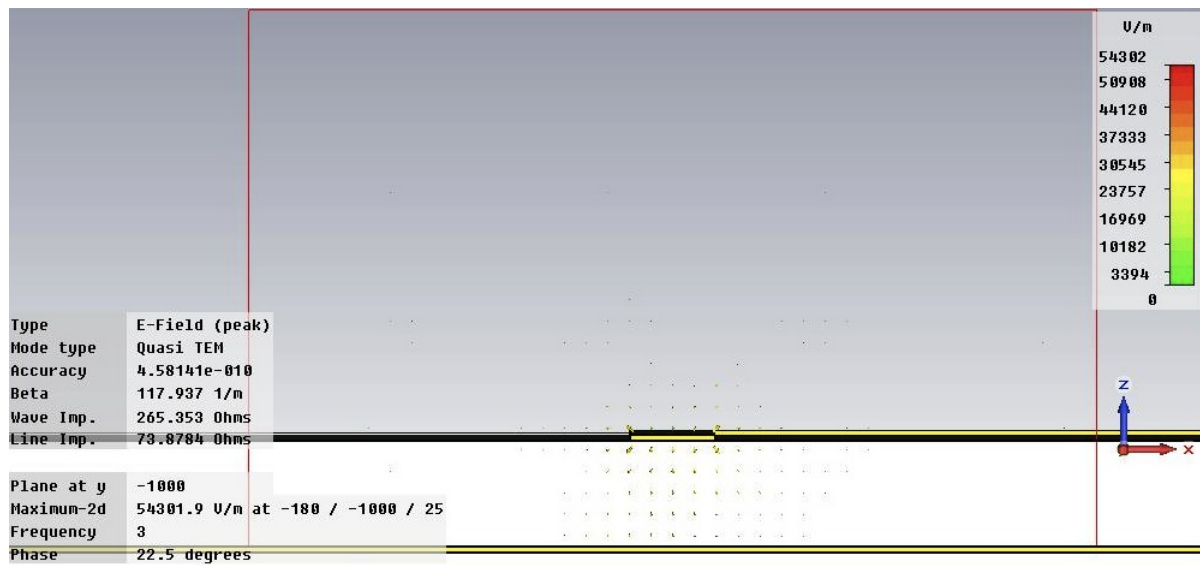


Figura 4.8: Disposizione del campo elettrico nella porta in guida d'onda secondo la modalità quasi TEM.

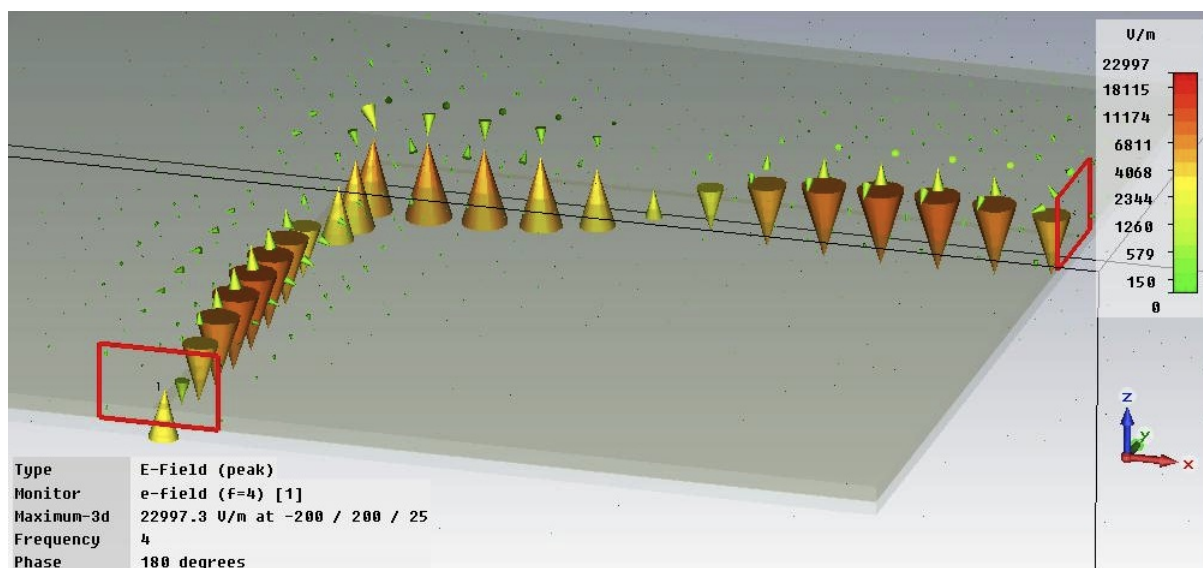


Figura 4.9: Disposizione del campo elettrico a 4 GHz.

Campo elettrico e magnetico

Si può quindi passare ad esaminare la disposizione dei campi elettrico e magnetico nel modello. Dal momento che le porte in guida d'onda sollecitano la pista con un segnale di potenza, è intuitivo che si verrà a creare una differenza di potenziale fra questa e il sottostante piano di massa. La cosa è evidenziata particolarmente bene dalla disposizione dei coni che indicano mediante la loro posizione la direzione del campo elettrico e mediante il colore l'intensità di quest'ultimo. Come si può vedere la differenza di potenziale maggiore, illustrata con coni più grandi, è fra la pista e la porzione di piano di massa immediatamente sotto di essa. La cosa è perfettamente in linea con i risultati previsti poiché è come se la pista e quella parte del piano di massa formassero una specie di condensatore a facce piane parallele dove però una faccia è molto più estesa dell'altra. Si può anche notare come le linee di campo che partono dal bordo della pista tendano a non richiudersi in linea retta con il piano di massa sottostante, ma descrivano una traiettoria più simile ad una specie di circonferenza. È anche possibile apprezzare, seppur in modo qualitativo, il fatto che il campo elettrico diminuisca la sua intensità, all'aumentare della distanza a cui ci si pone dalla pista, secondo il quadrato di quest'ultima. Infine, dal momento che i valori del campo elettrico sono stati registrati per una determinata frequenza che compone il segnale di stimolo, è possibile notarne la lunghezza d'onda associata. Questo perché nel grafico di fig.4.9 sono presenti punti consecutivi in cui cambia il verso del campo, tutti spazati da una distanza pari alla lunghezza d'onda sopra citata. L'immagine riportata è riferita ad una frequenza pari a 4 GHz; risultato del tutto analogo si ottiene con frequenza pari a 2.4 GHz. Dal momento quindi che il modello è attraversato da un

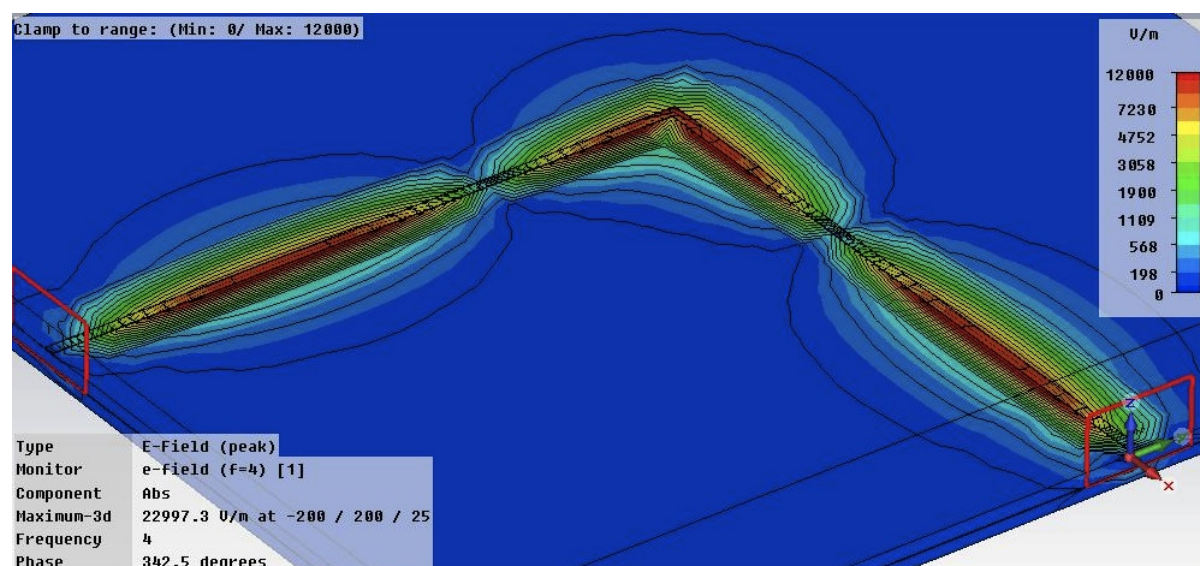


Figura 4.10: Disposizione del campo elettrico a 4 GHz con evidenziazione delle linee isopotenziali. Per rendere più evidente la disposizione è stata ridimensionata la scala dei valori illustrati.

campo elettrico tempo variante, ci si deve per forza aspettare la presenza anche di un campo magnetico, sempre tempo variante, disposto perpendicolarmente a quello elettrico. L'immagine 4.11 conferma questa previsione; dalla disposizione dei coni è anche possibile intuire le linee di campo sempre chiuse tipiche nei campi magnetici. Se osservato nel dettaglio si può notare, seppure in modo qualitativo, come il campo magnetico obbedisca alla legge di Ampere per quanto riguarda l'intensità. Inoltre si può anche ritrovare, nella sua disposizione, la regola della mano destra, applicata in riferimento alla corrente che scorre sulla pista. Anche in questo caso è possibile apprezzare la lunghezza d'onda alla cui frequenza corrispondente è stata registrata la disposizione del campo magnetico.

Corrente di superficie

Dall'immagine 4.12 è possibile apprezzare la disposizione della corrente indotta nel modello grazie alla sollecitazione delle porte. Da una prima analisi un po' grossolana si può notare come la corrente viaggi

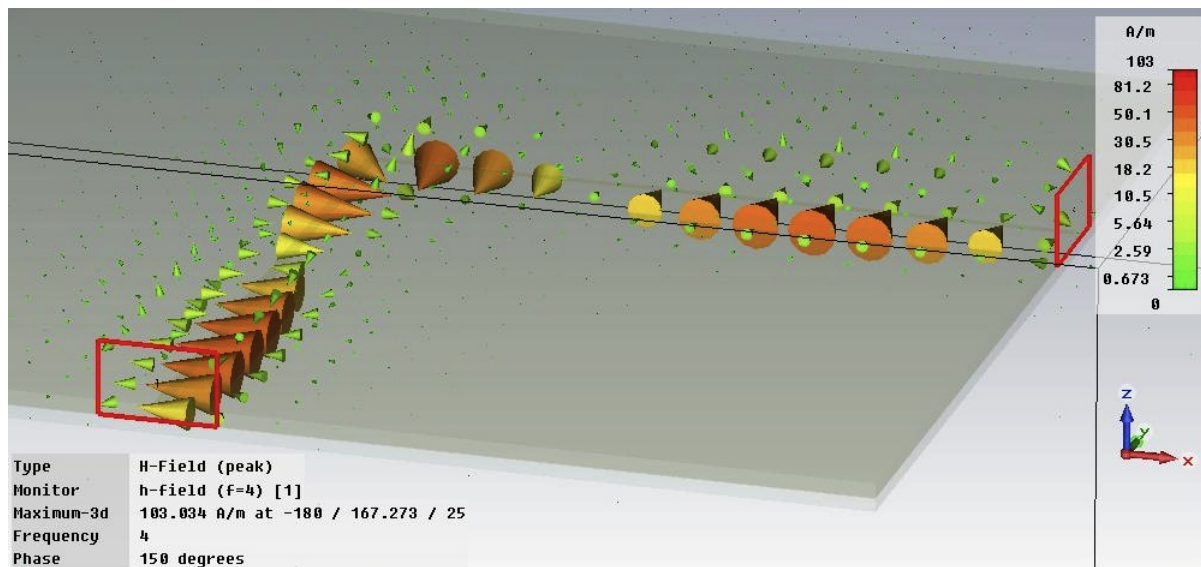


Figura 4.11: Disposizione del campo magnetico a 4 GHz. Se si tracciassero le linee isopotenziali, la disposizione sarebbe identica a quella del campo elettrico; la cosa è del tutto prevedibile dalle equazioni di maxwell.

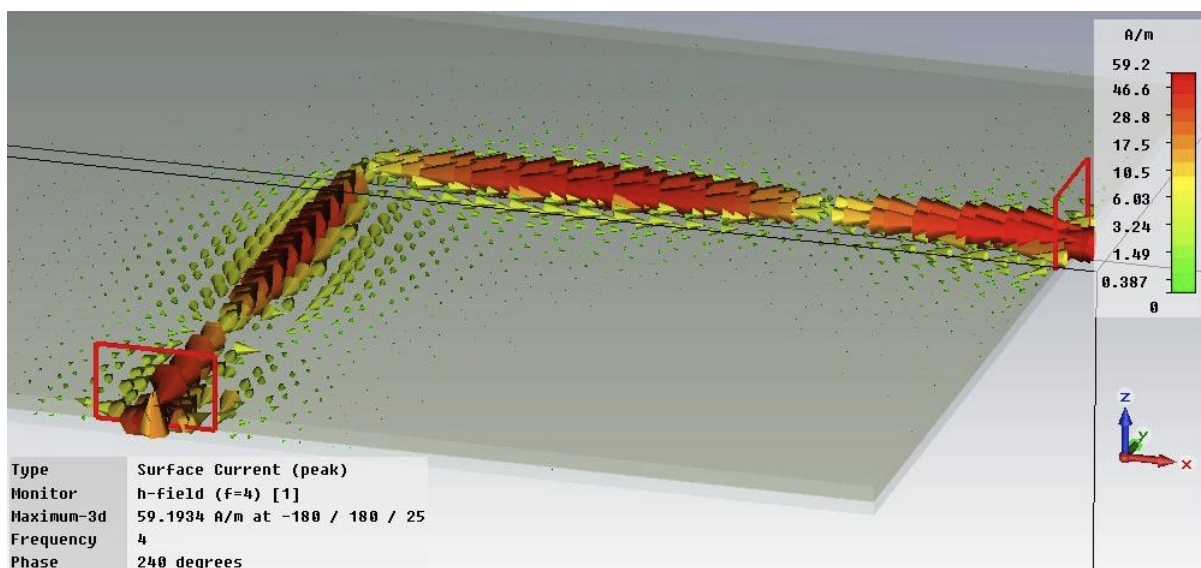


Figura 4.12: Disposizione accurata delle correnti nel modello a 4 GHz.

in andata per la pista e ritorni per il piano di massa seguendo un percorso che ricalca la proiezione ortogonale della pista sul piano. Se però si esegue un'analisi più dettagliata si può meglio apprezzare la disposizione della corrente sul piano di massa. In particolare si può notare che una parte considerevole della corrente ritorna tramite il piano per il percorso sopra citato, ma che vi è anche una dispersione, non del tutto trascurabile, nell'intorno del percorso principale. Proprio quest'ultimo fatto contribuisce a confermare anche i risultati sopra visti riguardanti i campi elettrico e magnetico; sottolineando ancora una volta come tutto sia correlato e governato dalle equazioni di Maxwell.

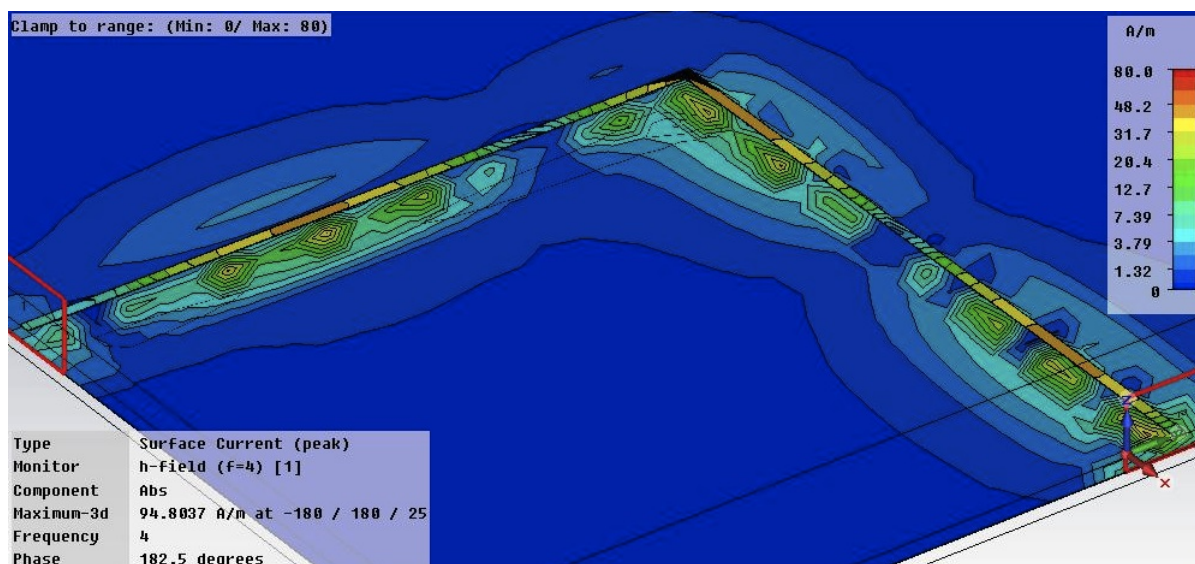


Figura 4.13: Disposizione delle correnti nel modello a 4 GHz; la ridefinizione del massimo valore della scala è stata necessaria per meglio evidenziare la disposizione.

Profilo di irradiazione

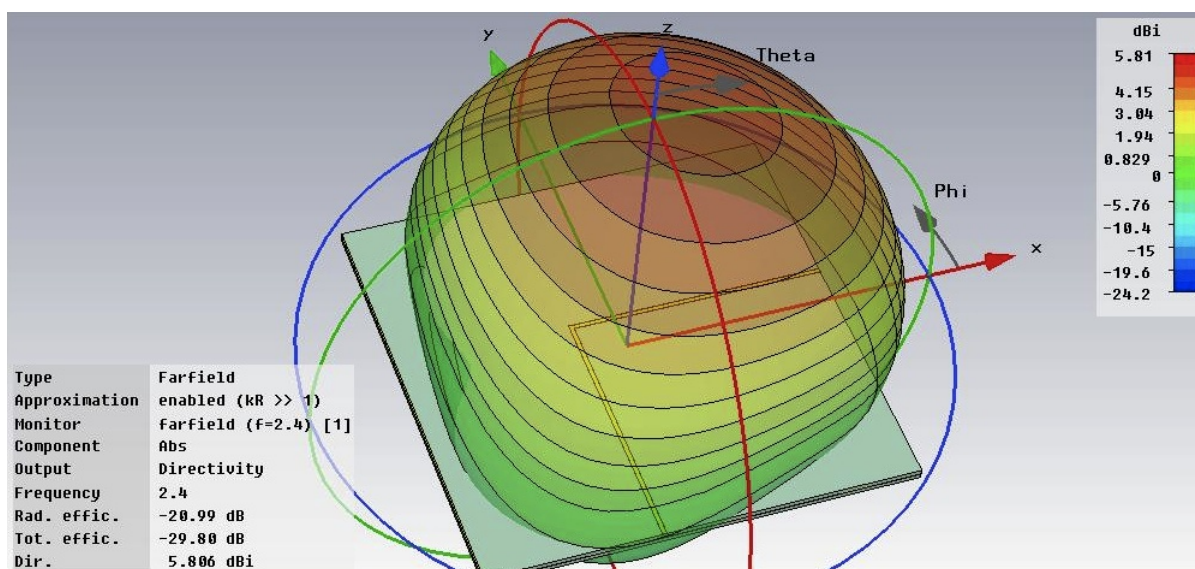


Figura 4.14: Profilo di irradiazione a 2.4 GHz.

Un ultimo elemento molto importante è il profilo di irradiazione che indica per ogni direzione l'intensità con cui vengono irradiate nello spazio le onde elettromagnetiche generate dai campi visti in precedenza. Al contrario di quello che avviene per i campi e le correnti, il profilo di irradiazione è decisamente molto più sensibile sia alla geometria del modello che alle frequenze del segnale con cui viene sollecitato quest'ultimo. In particolare il profilo di irradiazione ad una frequenza pari a 2.4 GHz risulta avere una forma pressoché sferica. Come si può vedere dalla figura l'irraggiamento maggiore si ha nella

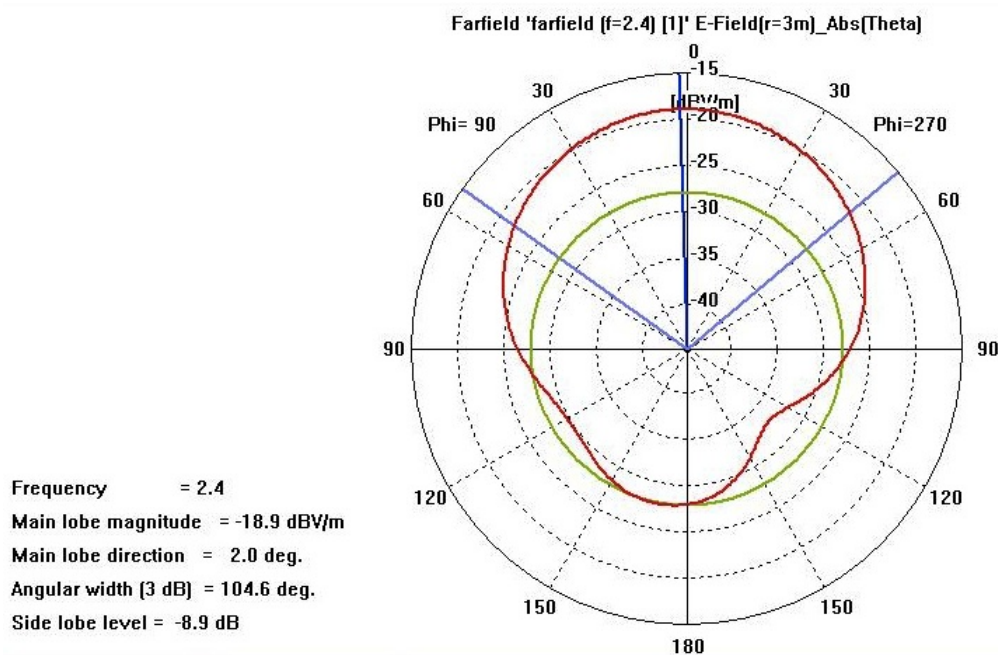


Figura 4.15: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Theta.

parte superiore, quasi perpendicolarmente all'angolo della pista. Il profilo è formato da un singolo lobo decisamente molto più sviluppato nella parte superiore che in quella inferiore. Questo effetto si deve all'azione del piano di massa che contribuisce a fornire una schermatura; infatti a causa della dispersione delle correnti nel piano i campi irradiati risultano molto meno intensi rispetto a quelli originati dalle cariche presenti sulla pista che, vista la sua geometria, si ritrovano ad essere molto più intense. Come si può vedere nell'immagine 3D, oltre al sistema di coordinate cartesiane è anche presente un sistema di coordinate polari che può essere utilizzato per scomporre il profilo secondo le due direzioni *Theta* e *Phi*. È possibile rappresentare il contorno del profilo grazie alle proiezioni di questo lungo le due direzioni. Con questo sistema risulta inoltre molto più facile determinare i lobi di cui è composto il profilo e trovare quello attraverso il quale viene irradiata maggiore energia nello spazio circostante. Nelle immagini seguenti, oltre a poter veder la proiezione del profilo è anche possibile rilevare l'angolo sotteso dal lobo più grande, evidenziato da due semirette di colore azzurro. È inoltre marcata la direzione di maggiore intensità di irraggiamento grazie ad una semiretta di colore blu; nelle didascalie viene riportato, oltre agli angoli precisi, anche l'intensità del lobo principale. Uno schema analogo si può anche ritrovare nel profilo di irraggiamento calcolato sui 4 GHz. Tuttavia anche se la forma può risultare simile, c'è una differenza non trascurabile nella direzione in cui avviene il massimo irraggiamento di energia; si può anche notare come in questo profilo il lobo principale sia un po' più pronunciato. Infine anche il bordo inferiore in cui il profilo incontra il piano contenente la pista è caratterizzato dall'aver bordi decisamente più ondulati. Anche in questo caso la parte rilevante del profilo è quella superiore sempre a causa dell'azione schermante del piano di massa.

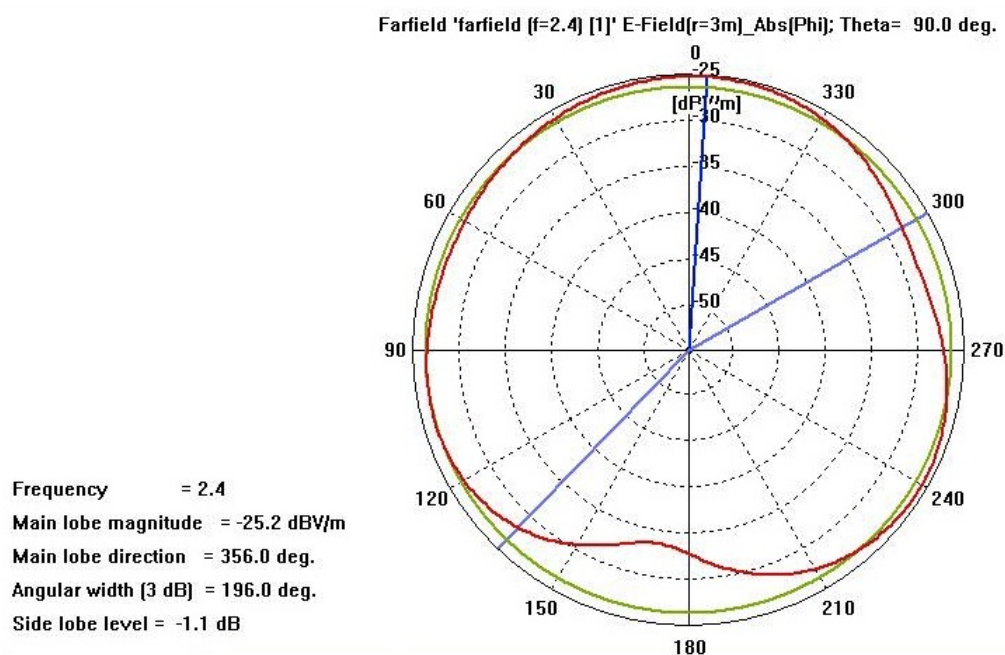


Figura 4.16: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Phi.

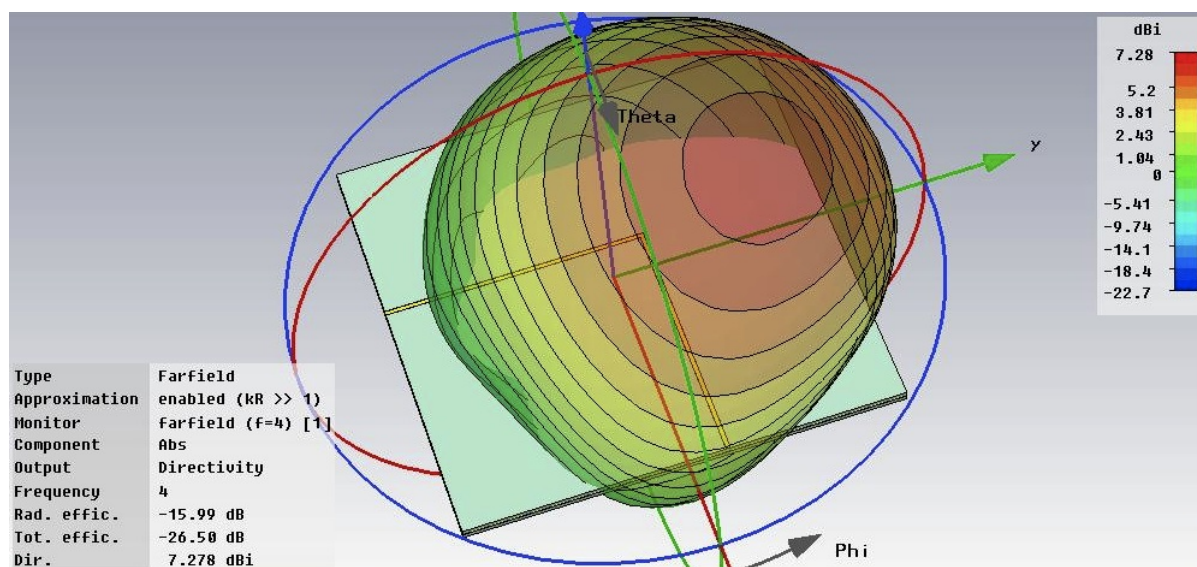


Figura 4.17: Profilo di irradiazione a 4 GHz.

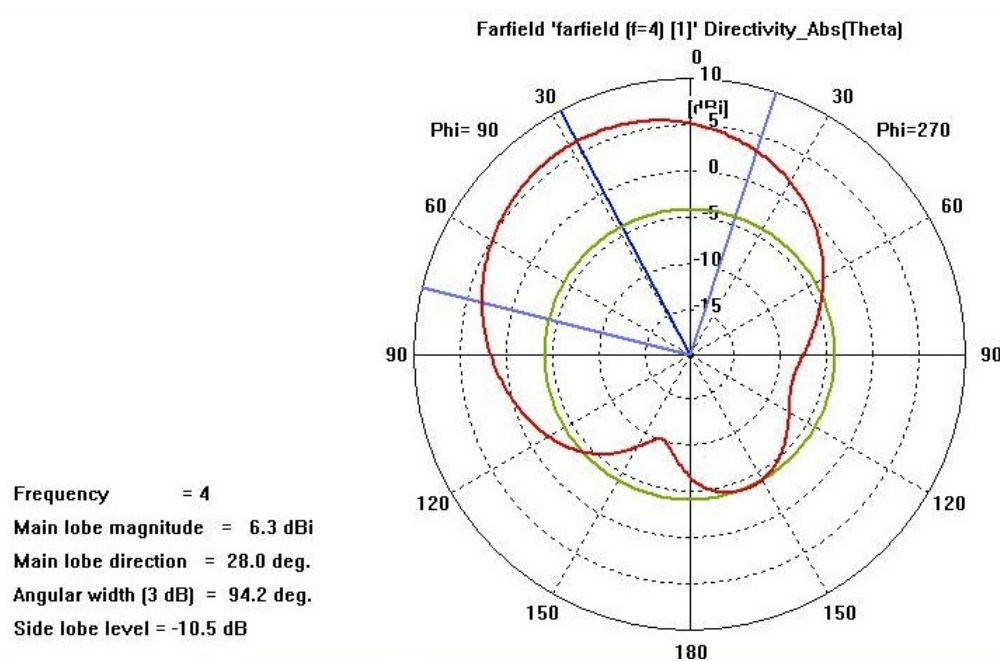


Figura 4.18: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Theta.

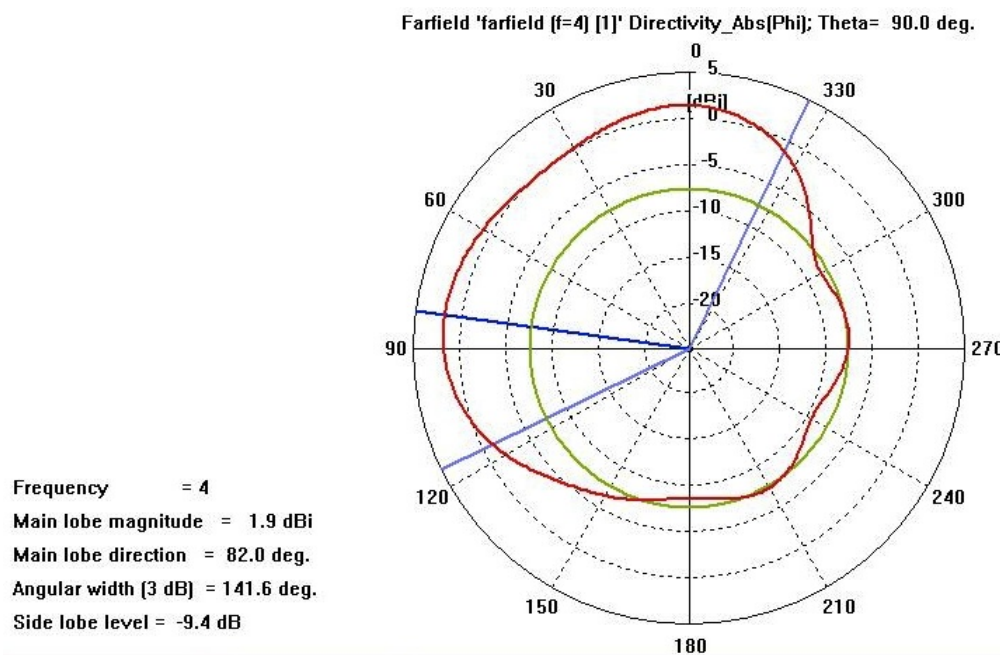


Figura 4.19: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Phi.

4.5 Risultati della simulazione del secondo modello

Anche per la seconda simulazione, come prima operazione, si è verificata l'attendibilità dei risultati ottenuti. È stata quindi controllata la disposizione del campo elettrico nelle porte in guida d'onda e successivamente anche di quello magnetico che è risultata corretta.

Campo elettrico e magnetico

All'interno del modello la disposizione dei campi ricalca quella vista nella sezione precedente, ad eccezione del tratto in cui è presente la smussatura dell'angolo retto. Si possono ritenere valide le medesime considerazioni riguardanti la differenza di potenziale e la geometria delle linee dei due campi.

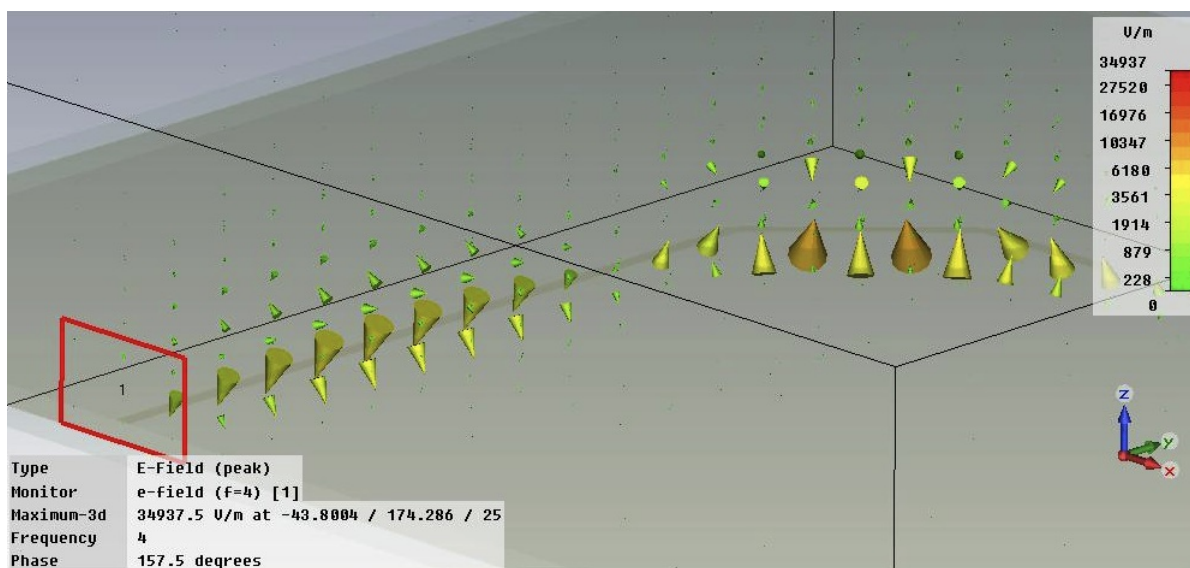


Figura 4.20: Disposizione del campo elettrico a 4 GHz.

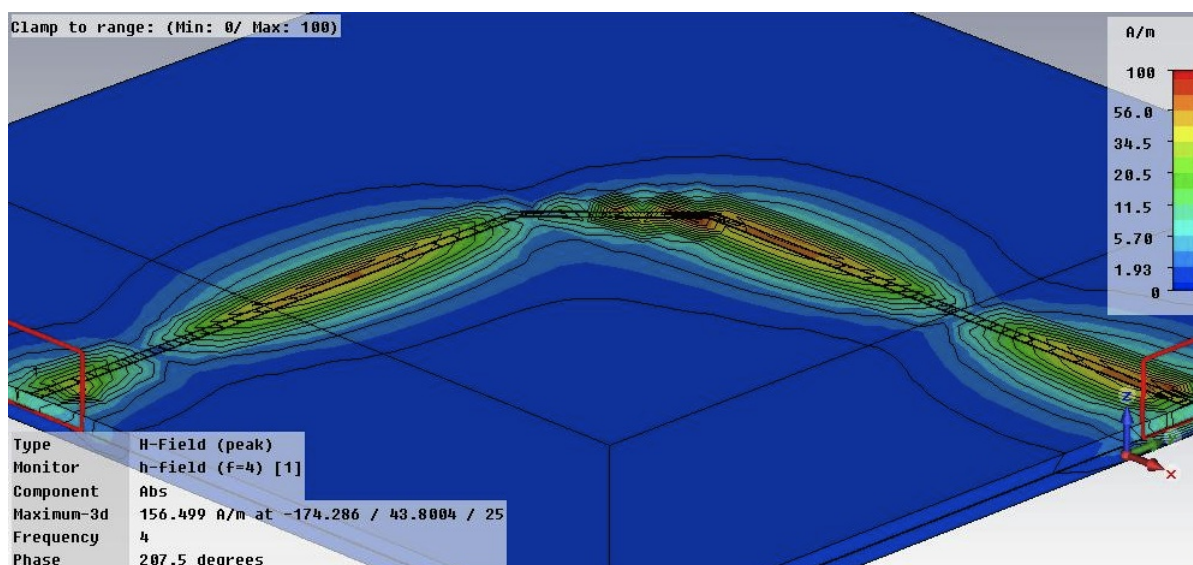


Figura 4.21: Disposizione dell'intensità del campo magnetico a 4 GHz.

Corrente di superficie

Anche per la corrente di superficie valgono le medesime considerazioni fatte per il modello precedente. Si può inoltre notare nell'immagine come la dispersione, nell'intorno della smussatura, sia più pronunciata nella parte interna. Infatti la corrente tende sempre ad effettuare il percorso più breve per richiudersi. Nel caso in questione la corrente cerca di percorrere un percorso diagonale e si spinge tanto più in la dal lato della smussatura, quanto gli è consentito dalle differenze locali di potenziale.

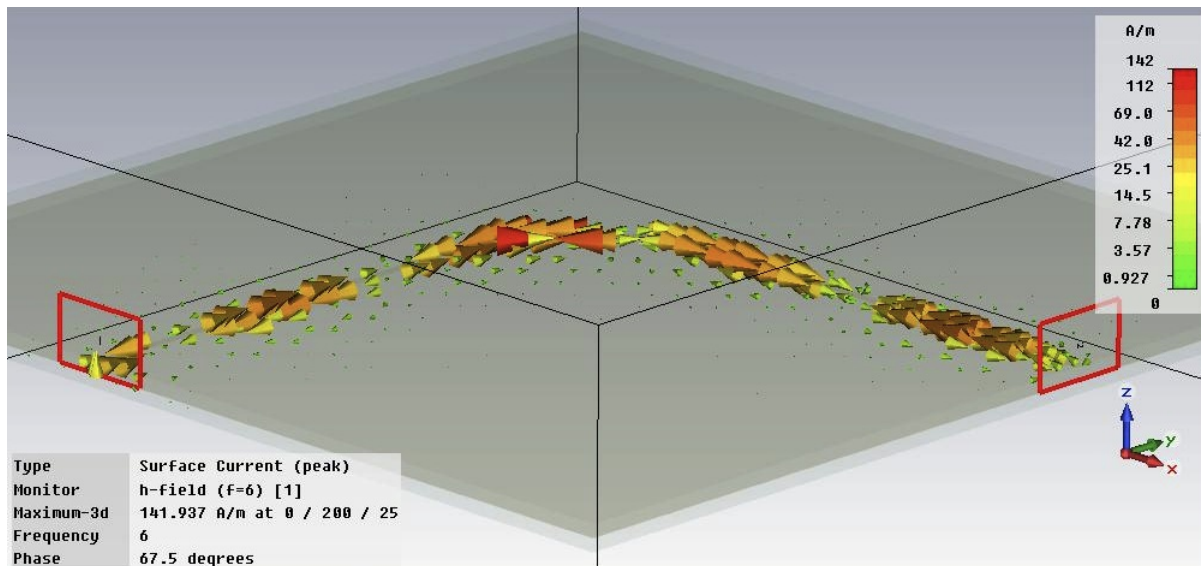


Figura 4.22: Disposizione della corrente di superficie a 4 GHz.

Profilo di irradiazione

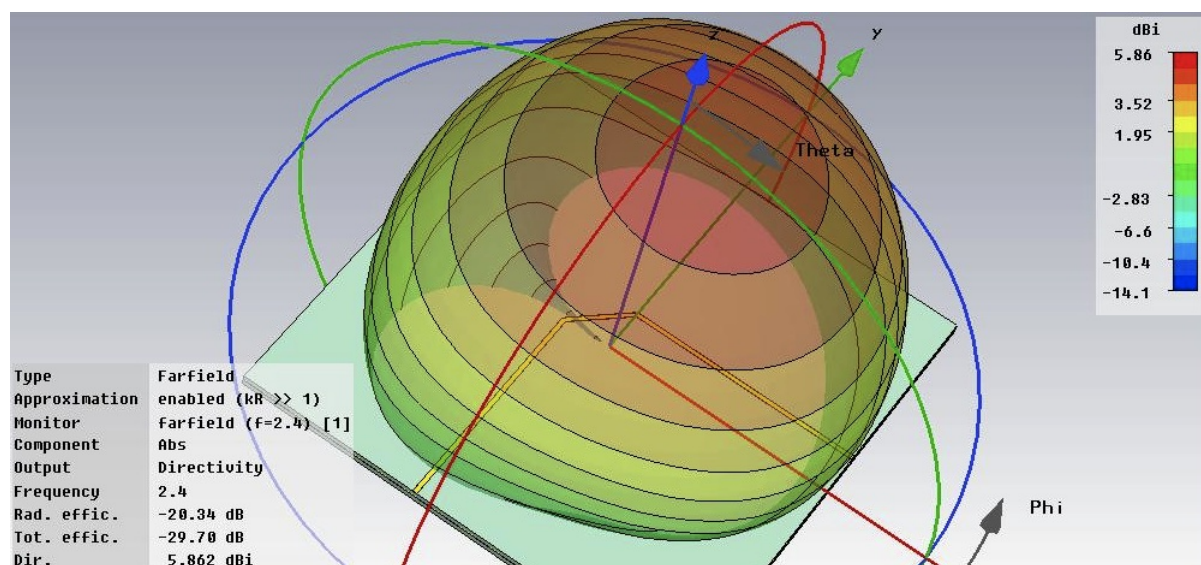


Figura 4.23: Profilo di irradiazione a 2.4 GHz.

Simulato a 2.4 GHz, il profilo di irradiazione risulta avere una forma abbastanza sferoidale. La zona di maggior irradiazione è localizzata nella parte superiore e appare tutto sommato abbastanza circoscritta.

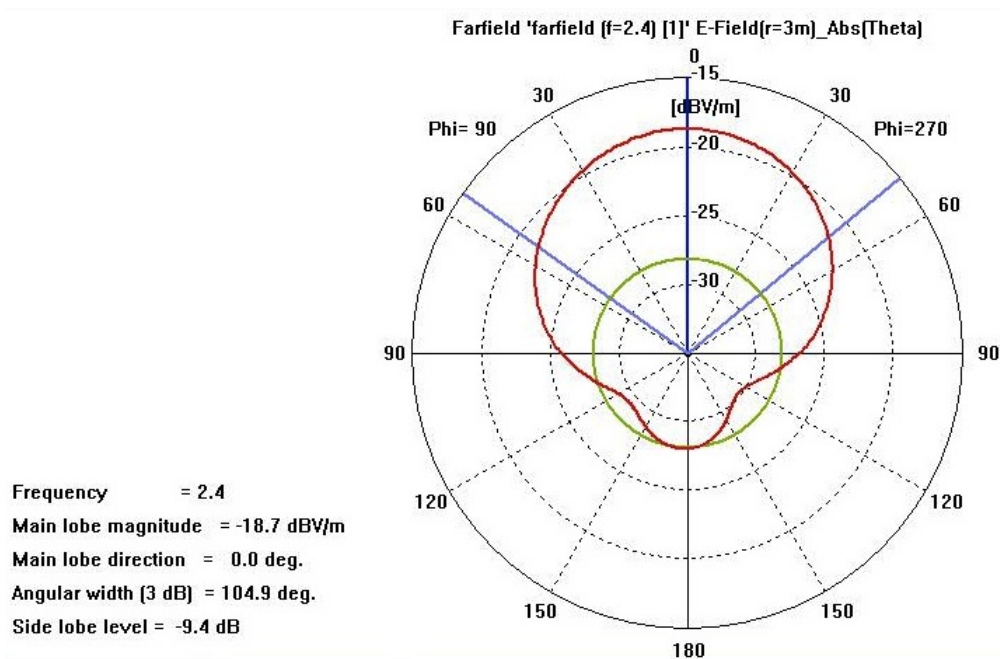


Figura 4.24: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Theta.

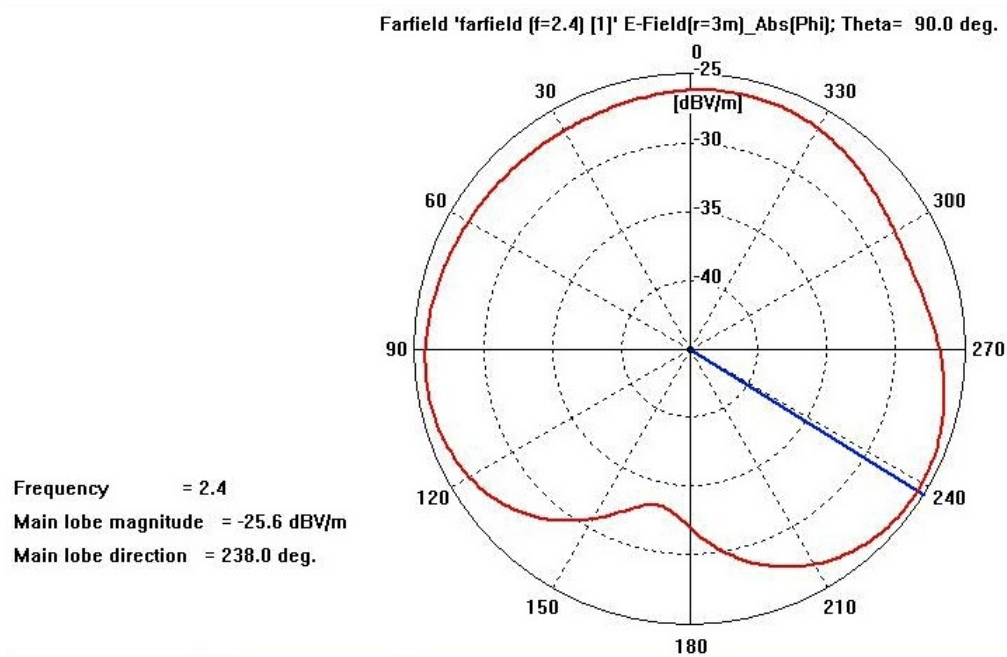


Figura 4.25: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Phi.

La forma del profilo inferiore, adagiato sul piano della pista ha invece una particolare forma a cardioide con una rientranza proprio in prossimità della smussatura dell'angolo. Anche in questo caso il profilo è prevalentemente sviluppato nella parte superiore del modello sempre a causa dell'azione schermante del piano di massa. Infine le misurazioni presenti sui diagrammi del profilo espressi in coordinate polari, confermano le osservazioni fatte sul modello 3D. Differente risulta invece essere il profilo di irradiazione

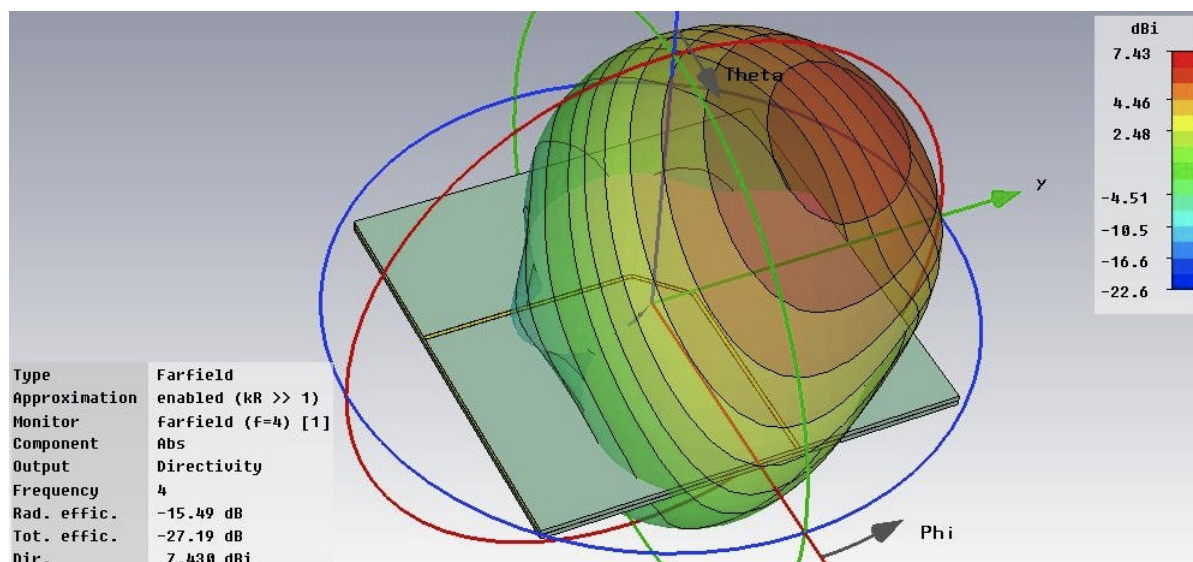


Figura 4.26: Profilo di irradiazione a 4 GHz.

calcolato a 4 GHz. In questo caso infatti si può notare come nel suo profilo più basso, sia formato da almeno tre lobi i quali descrivono una forma approssimativamente triangolare. In aggiunta a questo anche la zona in cui si può localizzare la maggiore irradiazione è inclinata verso l'angolo superiore destro del substrato.

4.6 Osservazioni

I due modelli utilizzati nelle simulazioni sono quasi del tutto simili fra loro; hanno infatti le stesse dimensioni e sono formati dagli stessi componenti, disposti nel medesimo modo. L'unica variazione significativa riguarda il modo con cui la pista cambia la sua direzione iniziale. Nel primo caso infatti forma un angolo retto con la conseguente presenza di uno spigolo acuminato. Nel secondo caso invece la smussatura tramite il pezzo di pista diagonale, fa sì che non vi sia la presenza di nessuno angolo retto e quindi di nessuno spigolo. La cosa può sembrare non determinante, ed in effetti non si riscontrano particolari cambiamenti nella disposizione dei campi o nel percorso della corrente. Quest'ultima infatti segue sempre e comunque la *microstrip* e cosa analoga avviene per il percorso descritto dalle linee di campo. Pertanto per quanto riguarda la conduzione di un segnale elettrico, si può dedurre che una configurazione vale l'altra, dal momento che la geometria dei due modelli non introduce particolari effetti di degradazione o alterazione. Risulta tuttavia interessante osservare con più attenzione i diagrammi del campo elettrico ed in particolare rilevare la posizione del punto in cui questo assume il suo massimo valore. Nel primo modello infatti il valore massimo è sempre presente sullo spigolo formato dalla pista per la svolta di 90 gradi; cosa che invece non accade negli spigoli della pista del secondo modello. Essendo infatti questi meno acuminati, risentono in modo molto più lieve dell'aumento locale delle cariche. Il fenomeno è infatti dovuto all'effetto punta che specifica che in un conduttore l'intensità maggiore del campo elettrico sarà presente in quelle regioni aventi un minore raggio di curvatura. Grazie a questo è anche possibile spiegare la differenza dei profili di irradiazione per i due modelli. Anche se la forma generalmente assomiglia ad una sfera, non bisogna infatti tralasciare il contributo di irraggiamento fornito dalle componenti rettilinee delle piste, vi sono alcune differenze nei profili più bassi radenti al substrato. Nel secondo modello infatti si nota una maggiore irregolarità nella forma, con la presenza di rientranze e

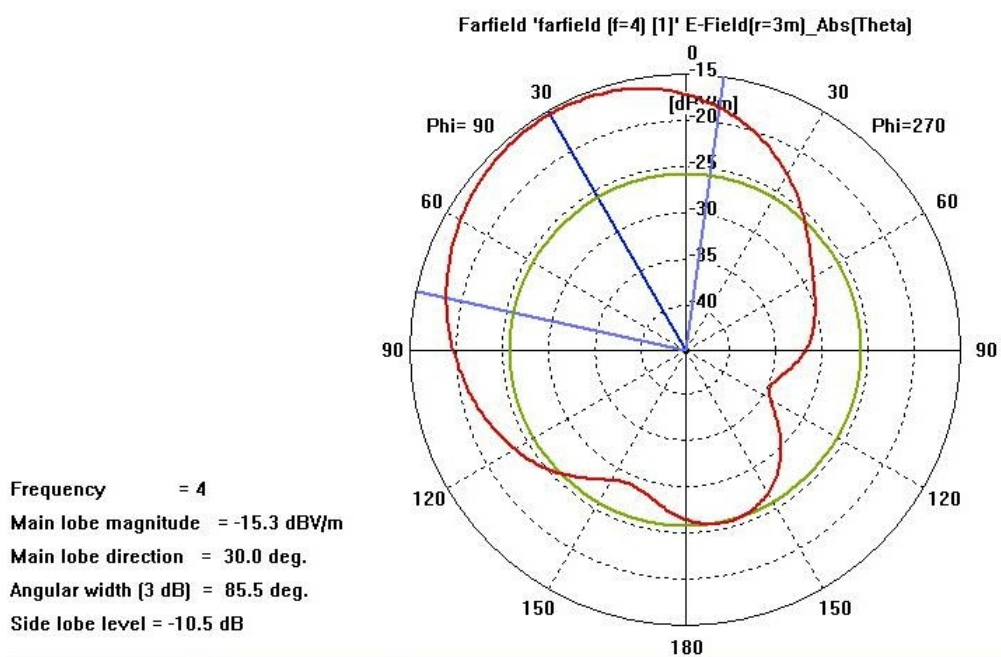


Figura 4.27: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Theta.

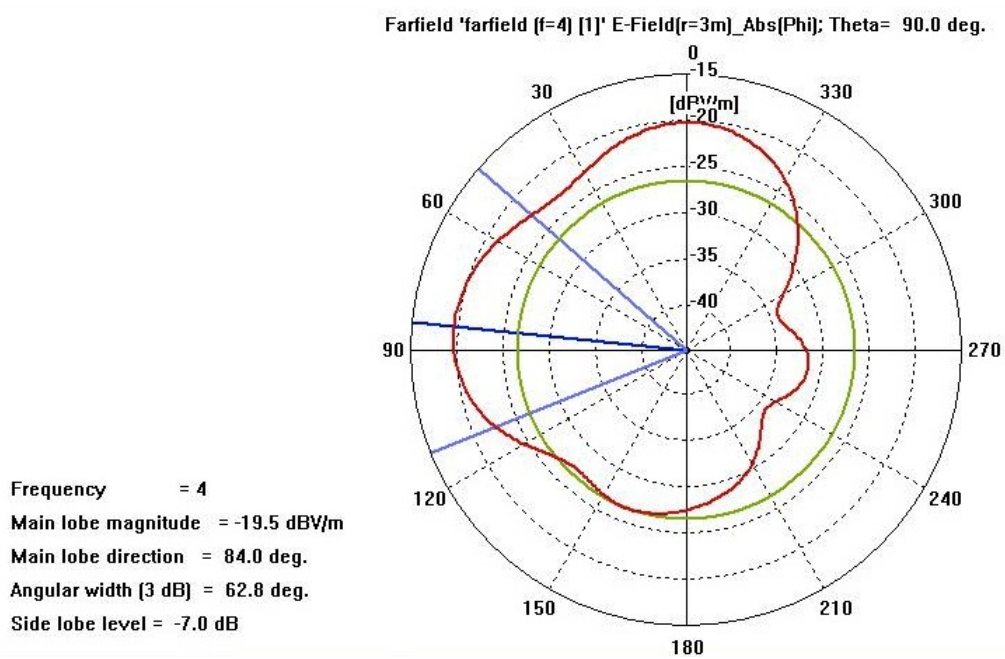


Figura 4.28: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Phi.

irregolarità considerevoli; questo è dovuto ad un calo della quantità di energia elettromagnetica irradiata dalla pista nella zona di svolta, provocata dalla mancanza dell'angolo retto. Al contrario la direzione di massimo irraggiamento, considerate le frequenze omologhe, rimane sempre in un intorno della medesima regione poiché a parte per l'angolo la geometria dei modelli è quasi identica.

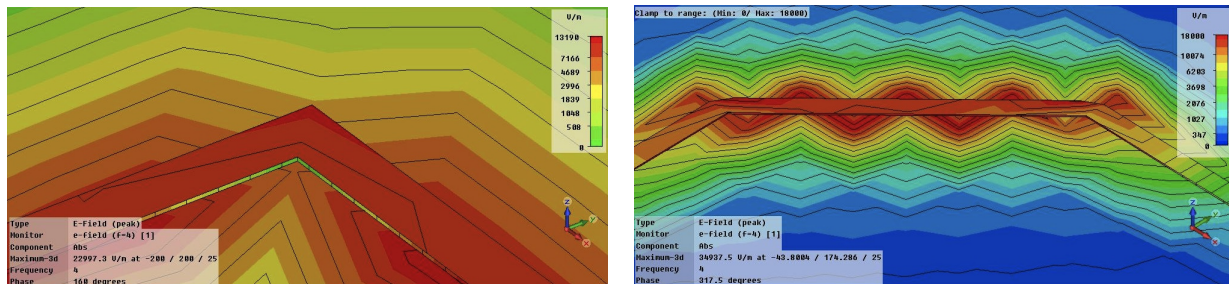


Figura 4.29: Differenze nella disposizione del campo elettrico nell'angolo della pista. Si noti come nella pista d'angolo retto l'intensità maggiore si abbia sulla punta, mentre sull'altra pista vi siano vari punti in cui il campo raggiunge picchi di intensità, probabilmente dovuti a fenomeni di risonanza. I grafici hanno la stessa scala e sono stati ottenuti nelle stesse condizioni.

Capitolo 5

Microstrip con piano di massa

5.1 Descrizione

Verranno ora esaminati due modelli simili, formati da una *microstrip* e da un piano di massa separati da strati di materiale isolante. I due modelli vogliono simulare una scheda elettronica multilayer, nella quale cioè sono presenti vari livelli nei quali possono essere generalmente collocati i componenti. La differenza sostanziale nei due modelli riguarda il piano di massa. Nel primo infatti questo componente è costituito da una semplice lastra metallica, mentre nel secondo è costituito sempre da una lastra metallica nella quale però si sono effettuati dei fori. L'intento è quello di voler simulare un piano di massa danneggiato; condizione che si verifica facilmente e dovuta alla necessità di dover effettuare tutte le dovute interconnessioni fra i vari componenti all'interno di una scheda. Nonostante i fori non seguano una geometria precisa ma siano in posizioni che variano da progetto a progetto si è deciso di collocarli nel modello in uno schema a griglia. Questo per poter riprodurre l'effetto che hanno sulla scheda non potendo tuttavia rappresentare tutte le possibili configurazioni.

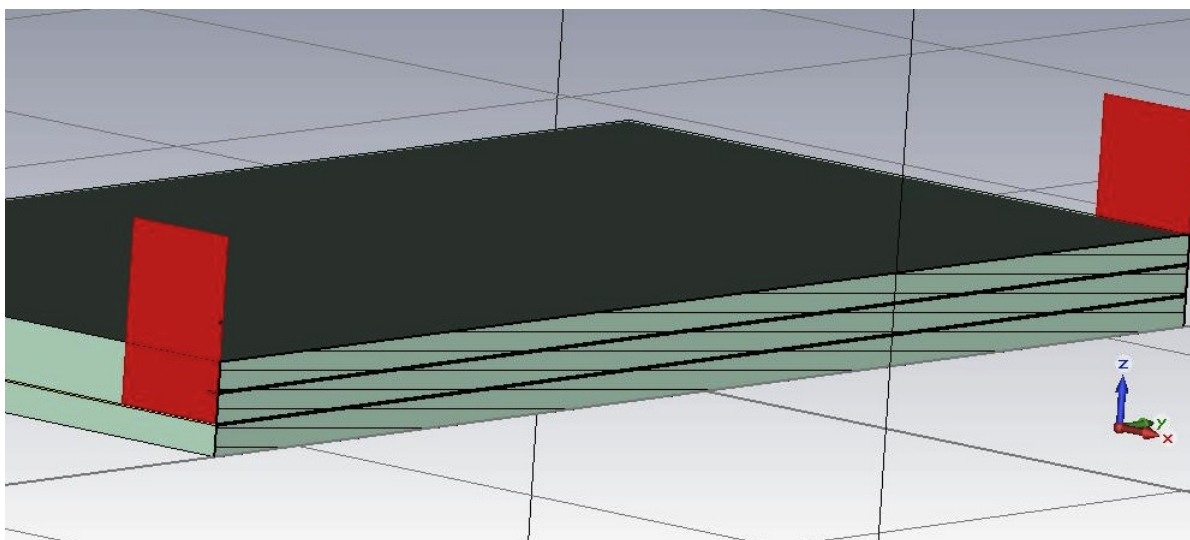


Figura 5.1: Sezione del disegno CAD dei modelli utilizzati per le simulazioni. In evidenza l'alternanza di isolante con il piano di massa e la pista.

5.2 Costruzione dei modelli CAD

Si illustrano di seguito i passaggi fondamentali e le scelte effettuate per la costruzione dei modelli CAD, con particolare attenzione per il procedimento costruttivo e la parametrizzazione del piano di mas-

sa danneggiato. Le scelte effettuate hanno consentito di ottenere una grande versatilità dei modelli semplicemente grazie al controllo dei parametri, senza delegare all'utente un'insieme di considerazioni geometriche da farsi per ogni modifica che si vuole apportare.

Le dimensioni del lato dei modelli sono state inoltre ridotte rispetto a quelle adottate nel capitolo precedente. Questo perché la discretizzazione del piano di massa danneggiato comporta la creazione di moltissime celle della mesh con un conseguente aumento, non sostenibile, dei tempi di simulazione. Per questo si è scelto, alla fine, di ridimensionare entrambi i modelli per poter comunque eseguire il confronto fra i risultati ottenuti.

Piano di massa integro

Come di consueto, prima di procedere con il disegno CAD si sono determinati i parametri fondamentali per il controllo del modello. Sono riportate, fra parentesi, le misure in (*mil*) e (*mm*):

- (1.4) (0.036) **plane_h**: rappresenta lo spessore del piano di massa;
- (1.4) (0.036) **strip_h**: rappresenta lo spessore della pista;
- (10) (0.25) **strip_w**: rappresenta metà della larghezza della pista; questa scelta è stata effettuata per motivi di simmetria;
- (25) (0.64) **sub_h**: rappresenta lo spessore del substrato;
- (1000) (25.40) **sub_w**: rappresenta metà della larghezza del substrato al quale, per semplicità costruttiva, si è deciso di dare forma quadrata.

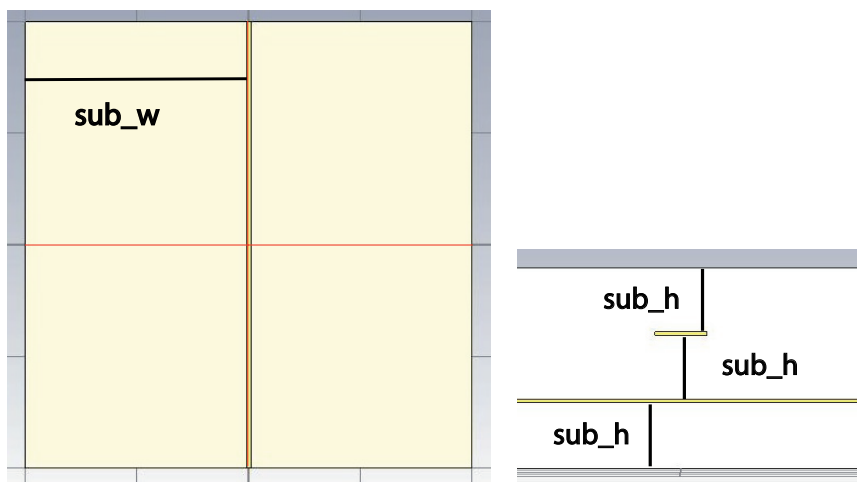


Figura 5.2: Schema del primo modello con evidenziazione dei parametri.

I nomi evidenziati mediante un diverso carattere indicano l'abbreviazione attribuita nel menù dei parametri del simulatore. Oltre a quelli sopra elencati è presente un ulteriore parametro chiamato **bound** che rappresenta la dimensione del margine di spazio vuoto che volendo può essere aggiunto su ogni lato del modello; la cosa può tornare utile per il calcolo del profilo di irradiazione.

Il modello è stato inizialmente suddiviso in più livelli che sono stati successivamente costruiti uno sopra l'altro. Per prima cosa si è disegnato lo strato base di materiale isolante, invocando il comando *Object - Basic Shapes - Brick* con il quale è stato definito un parallelepipedo la cui estensione si sviluppa in larghezza e lunghezza sul piano xy e la sua altezza sull'asse z , prendendo come livello base il piano per cui $z = 0$. Con un procedimento del tutto analogo è stato aggiunto dapprima il piano di massa, specificandone però il diverso spessore, e successivamente un'altro strato di materiale isolante. A questo punto è stata aggiunta la pista di metallo che attraversa l'intero modello; la costruzione anche in questo caso, è avvenuta disegnando il solido simmetrico rispetto all'origine del sistema di coordinate e con il medesimo comando sopra citato. Infine è stato collocato un'ultimo strato di substrato sopra al

precedente. La pista è stata creata in modo da compenetrare per metà della sua altezza il substrato sottostante e per l'altra metà quello sovrastante. Il software CAD consente infatti la coesistenza spaziale degli oggetti; in altre parole possono esistere contemporaneamente due solidi nello stesso spazio. Dal momento però che questo non può avvenire nella realtà bisogna modificare opportunamente il modello per renderlo utilizzabile per la simulazione. Pertanto per prima cosa, si è invocata l'operazione di addizione booleana sugli ultimi due strati di substrato, rendendoli così un corpo unico. Come seconda azione, si è invece eseguita un'operazione di sottrazione booleana fra il nuovo substrato e la pista. In questo modo è stato scavato all'interno del substrato lo spazio necessario per il contenimento di quest'ultima, terminando quindi la costruzione del modello. Nei menù della definizione di tutte le forme sono sempre stati impiegati i parametri, rendendo così il modello perfettamente scalabile dall'utente. È stata infine effettuata la scelta dei materiali; anche in questo caso alla pista e al piano di massa è stato assegnato il rame, mentre ai vari substrati l'FR4. Per quanto riguarda le dimensioni, sono state adottate le stesse dei modelli del capitolo precedente, ad eccezione del lato del substrato.

Piano di massa danneggiato

Nella costruzione di questo modello si sono eseguite sostanzialmente le stesse operazioni compiute per il modello precedente; sono stati tuttavia aggiunti dei parametri per la caratterizzazione del piano di massa. Sono riportate, fra parentesi, le misure in (*mil*) e (*mm*):

- (100) (2.54) **dist**: rappresenta la distanza fra i centri dei fori desiderata dall'utente; se tuttavia non è multipla della larghezza del substrato non rappresenta la distanza reale;
- **n**: rappresenta il numero di volte che la distanza *dist* è contenuta in un lato del piano di massa; è ottenuta mediante una divisione del cui risultato viene sempre presa la parte intera;
- **dist1**: è la vera distanza presente nel modello fra i centri dei fori, viene calcolata con una divisione fra la larghezza del piano di massa e il numero di fori *n* ed è sempre un multiplo della larghezza del piano;
- (1.4) (0.036) **plane_h**: rappresenta lo spessore del piano di massa;
- (15) (0.38) **radius**: rappresenta il raggio dei fori;
- (1.4) (0.036) **strip_h**: rappresenta lo spessore della pista;
- (10) (0.25) **strip_w**: rappresenta metà della larghezza della pista; questa scelta è stata effettuata per motivi di simmetria;
- (25) (0.64) **sub_h**: rappresenta lo spessore del substrato;
- (600) (15.24) **sub_w**: rappresenta metà della larghezza del substrato al quale, per semplicità costruttiva, si è deciso di dare forma quadrata.

I nomi evidenziati mediante un diverso carattere indicano l'abbreviazione attribuita nel menù dei parametri del simulatore. Oltre a quelli sopra elencati è presente, anche in questo caso, il parametro **bound** per l'aggiunta di spazio vuoto ai lati del modello.

Per la creazione del piano di massa danneggiato si è pensato di costruirne dapprima uno di integro e successivamente di effettuarvi dei fori disposti secondo righe e colonne ortogonali fra loro, ricoprendo l'intera area. Dal momento però che esiste la possibilità che l'utente inserisca nel parametro *dist* una distanza fra i fori non multipla della larghezza del piano di massa, si è reso necessario verificare di volta in volta questa condizione. Nel caso non venga rispettata, si è provveduto a far sì che il programma, automaticamente, approssimi la distanza inserita con il multiplo più vicino della larghezza del substrato. Per implementare questo si sono dovuti aggiungere alcuni parametri in modo da poter eseguire il procedimento riportato di seguito. Per prima cosa si deve calcolare il numero dei fori che può contenere sia una riga che una colonna, dal momento che il piano di massa è anch'esso, come il substrato, di forma quadrata. Per questo viene definito il parametro *n* come $n = 2 \cdot \text{strip_w} / \text{dist}$ in modo da poter calcolare il numero di distanze fra i centri dei fori che il lato del substrato può contenere. Di questo valore naturalmente viene presa la parte intera e con essa si esegue una nuova operazione per determinare una nuova distanza che, per sua natura, sarà per forza un multiplo del lato del piano di massa. Questa distanza

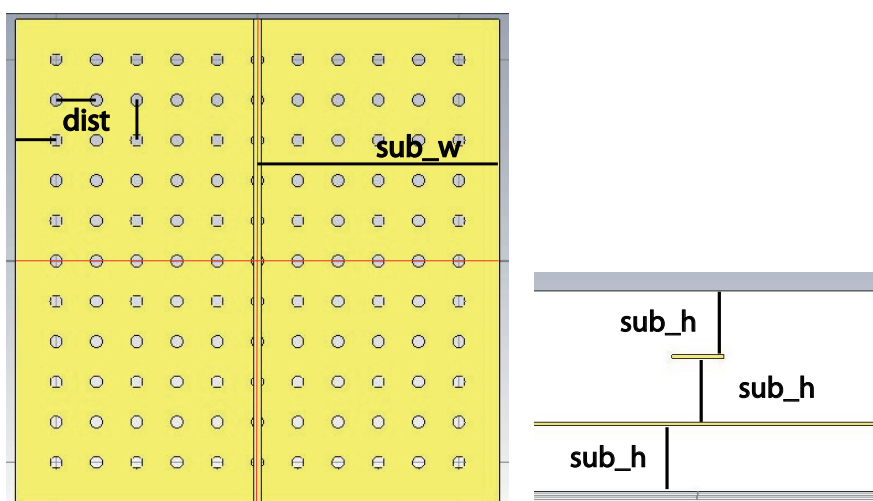


Figura 5.3: Schema del secondo modello con evidenziazione dei parametri.

viene salvata nel parametro $dist_1$ e calcolata come: $dist_1 = 2 \cdot strip_w / n$. Dopo questa parametrizzazione si può procedere con la creazione dei fori. Per prima cosa si deve creare un cilindro tramite il comando *Object - Basic Shapes - Cilinder* e nel menù richiedente le sue coordinate si deve inserire il parametro *radius* nella casella del raggio. Successivamente utilizzando i parametri sub_w e $dist_1$ si deve far sì che il centro del cilindro venga posizionato nell'angolo in alto a sinistra del piano di massa ad una distanza pari a $dist_1$ dai due bordi. A questo punto è necessario assegnare come materiale il vuoto alla forma appena creata e replicarla in orizzontale per $n - 1$ volte; il motivo si può facilmente intuire da come è stato definito n . A questo punto è necessario selezionare l'intera serie di cilindri che compongono la riga appena creata e ripeterli per tutta l'altezza del piano di massa sempre per $n - 1$ volte. Una volta completata la creazione di tutti i fori, non resta che sottrarli al piano di massa mediante l'opportuna operazione booleana usata anche nella costruzione del modello precedente. Per facilitare il compito, dal momento che il numero dei cilindri può essere elevato, si è pensato di raggrupparli separatamente alle altre forme in modo da facilitare all'utente l'operazione di selezione. È inoltre importante sottolineare come il raggio dei cilindri non debba mai superare la distanza $dist$ fra i centri di questi; in caso contrario il software CAD si troverebbe in una situazione priva di senso con la conseguente creazione di un modello degenerare.

Sempre a causa della parametrizzazione fatta può capitare a volte che variando il parametro $dist$ il CAD debba creare nuovi cilindri o eliminarne di vecchi. La creazione avviene automaticamente e senza problemi, al contrario dell'eliminazione che provoca il lancio di un messaggio di avvertimento. Il software infatti, per descrivere il modello, conserva una lista con le operazioni fatte e le forme create. Quando generalmente si esegue una modifica del modello che comporta l'eliminazione di alcune forme, il software ricerca se nella lista vi era già presente una simile configurazione; nel caso non ci sia la crea ex novo. Nel caso invece ci sia, sposta il cursore che identifica l'ultima azione svolta nel punto immediatamente successivo alla serie di azioni che descrive la configurazione voluta. In questo modo la ripristina eliminando però tutte quelle azioni svolte sul modello dopo la posizione del cursore. Inoltre la posizione del cursore non è più in corrispondenza dell'ultima azione elencata e per questo motivo ci possono essere dei malfunzionamenti. Trovandosi in questa situazione è quindi opportuno aprire il menù di controllo della lista ed eliminare tutte le operazioni registrate dopo la posizione corrente del cursore. In questo modo il software tornerà a rispondere pienamente a tutti i comandi impartiti dall'utente.

Infine anche in questo caso la scelta dei materiali ha ricalcato quella fatta per il modello precedente; come del resto la scelta delle dimensioni. Il diametro dei fori è stato scelto essere $3/2$ della larghezza della pista e la distanza fra due fori è stata scelta essere invece cinque volte la larghezza della pista. Queste decisioni sono state prese dopo aver osservato i layout che normalmente vengono creati e cercando di mediare le caratteristiche apprezzate nelle varie casistiche esaminate.

5.3 Parametri di simulazione

Terminata la costruzione dei modelli si è proceduto, anche in questo caso, alla configurazione dei parametri della simulazione. Come prima cosa si sono installate le porte in guida d'onda seguendo le stesse modalità utilizzate nel capitolo precedente. Le porte sono state collocate perpendicolarmente alla pista ed in modo che il loro lato inferiore sia appoggiato al piano di massa, come si può vedere dalla figura. Per quanto invece riguarda le dimensioni, la larghezza è stata impostata uguale a 10 volte la larghezza della pista mentre l'altezza è stata scelta uguale a 6 volte lo spessore del substrato presente fra il piano di massa e la pista. Questa diversità rispetto alle dimensioni impostate nel capitolo precedente è dovuta al fatto che sopra la pista è presente un ulteriore strato di substrato, motivo per il quale è necessario aumentare l'altezza della porta. In questo modo infatti vengono rispettate le proporzioni che si possono trovare negli esempi presenti all'interno della guida. Se la porta fosse più piccola, per esempio delle stesse dimensioni scelte nel capitolo precedente, si potrebbe incontrare instabilità durante la simulazione con la conseguente degradazione dei risultati.

Terminata l'installazione delle porte si è proceduto alla definizione delle condizioni al contorno, specifi-

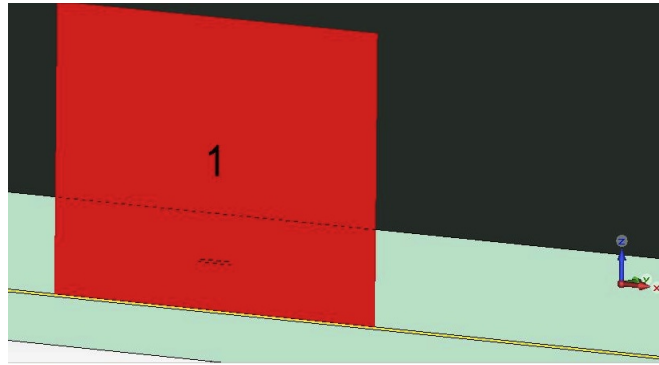


Figura 5.4: Posizionamento delle porte sui bordi dei modelli in corrispondenza degli estremi delle piste.

cando anche in questa occasione l'opzione *Open (Add Space)* per le stesse motivazioni viste in precedenza. Anche la definizione della mesh ha portato a riconfermare degli stessi parametri precedentemente impostati. Infatti, nonostante siano cambiate le dimensioni del lato del modello, sono rimaste pressoché invariate sia la larghezza della pista che lo spessore degli strati di substrato. Dal momento che è su queste grandezze che si deve configurare la densità della mesh non è necessario variare alcun parametro. Le grandezze che verranno monitorate sono:

- **campo elettrico e magnetico** a 2.4 e 4 GHz;
- **corrente di superficie** a 2.4 e 4 GHz;
- **profilo di irradiazione** a 2.4 e 4 GHz;

la loro scelta è fatta ipotizzando anche in questo caso un utilizzo del modello con segnali nel range delle microonde.

Prima di avviare la simulazione è stata infine impostata la simmetria dei parametri-S fra S_{11} e S_{22} per indicare che il comportamento del modello è lo stesso sia se esaminato in un verso che nell'altro.

5.4 Risultati della simulazione del primo modello

Le verifiche del modo di propagazione del campo elettrico e magnetico nelle porte in guida d'onda confermano la veridicità dei risultati della simulazione; dalle immagini esaminate si può infatti chiaramente identificare il modo di propagazione quasi TEM.

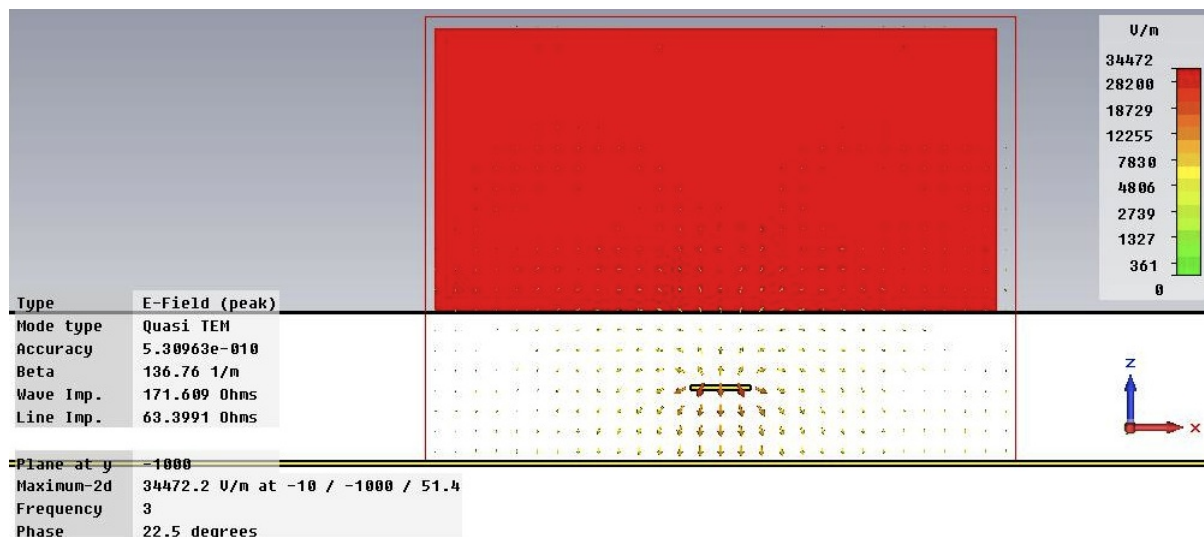


Figura 5.5: Disposizione del campo elettrico nella porta in guida d'onda secondo la modalità quasi TEM.

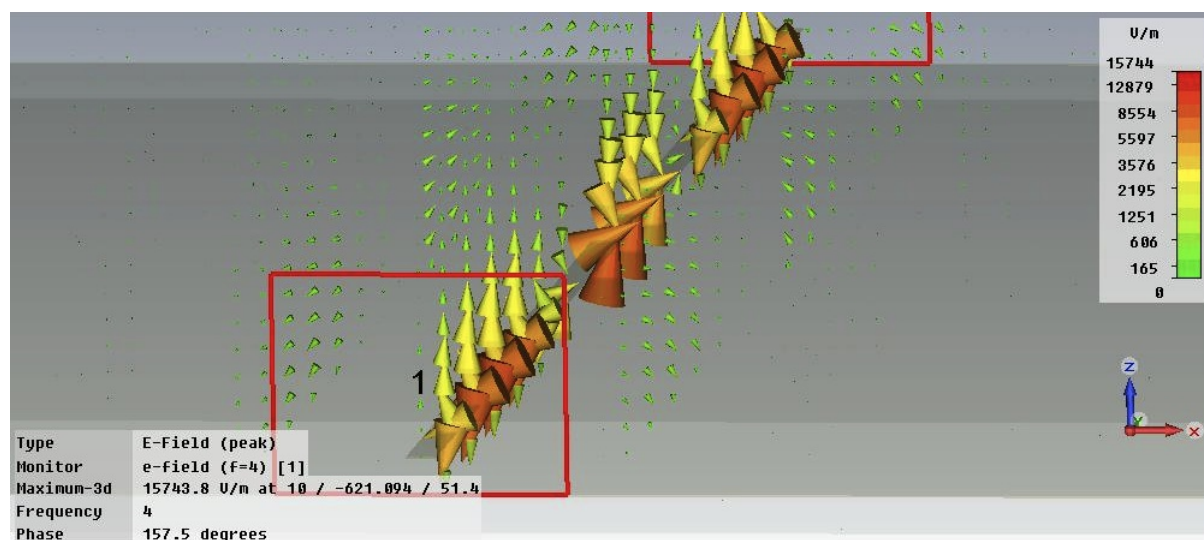


Figura 5.6: Disposizione del campo elettrico nel modello a 4 GHz.

Campo elettrico e magnetico

Come si può vedere dall'immagine il campo elettrico è disposto perpendicolarmente fra la pista e il piano di massa. Il massimo di intensità si raggiunge proprio in quella regione compresa fra la pista e il piano dove è anche possibile notare che le linee di campo sono perpendicolari alle due superfici sopra citate. Al contrario, man mano che ci si avvicina al bordo della pista le linee tendono ad incurvarsi, in analogia a quanto accade anche nei bordi di un condensatore a facce piane parallele. Il campo elettrico non è tuttavia confinato soltanto nella zona appena descritta ma si estende in tutto l'intorno della pista, diminuendo però la sua intensità in modo proporzionale all'inverso del quadrato della distanza considerata. La cosa è ben visibile nell'immagine che descrive il campo mediante le linee isopotenziali. In queste immagini infatti viene considerato solo il modulo dell'intensità dei campi o delle correnti e grazie al contributo delle linee si possono immediatamente visualizzare quelle zone del modello in cui le intensità di campi o correnti sono in modulo uguali. Oltre a ciò in queste immagini è stata anche impiegata per le intensità una scala logaritmica. Proprio quest'ultima ha permesso di comprimere le linee di campo a potenziale più forte e di espandere invece quelle a potenziale più debole; questo grazie alle ben note proprietà matematiche del logaritmo. Grazie a tutto ciò è quindi possibile apprezzare la massima estensione del campo, anche se evidenziata dalle zone in cui è più debole. È interessante notare come il campo si estenda per almeno i tre quarti della larghezza del modello, nonostante le dimensioni abbastanza ridotte della larghezza della pista centrale. Un fenomeno interessante si può inoltre riscontrare in prossimità delle porte in guida d'onda; in queste zone infatti le linee di campo tendono ad addensarsi davanti alle porte. Il motivo è dovuto principalmente al fatto che in tali regioni la corrente passa dalla pista al piano di massa o viceversa, cambiando quindi la sua direzione di scorrimento, che si ripercuote sulla posizione delle cariche che così influenzando il campo elettrico.

Quanto visto per il campo elettrico può essere tranquillamente esteso anche per il magnetico, tenendo conto però che la sua direzione di propagazione è sempre perpendicolare rispetto a quella dell'elettrico. Il legame fra i due campi può essere inoltre particolarmente apprezzato nelle immagini che li raffigurano tramite linee isopotenziali, nelle quali, se non fosse presente la didascalia e la scala, risulterebbe abbastanza complicato operare una distinzione fra elettrico e magnetico. È infine possibile, anche in queste immagini apprezzare la lunghezza d'onda abbinata alla frequenza con la quale viene sollecitato il modello. Dal momento che le immagini riportate sono state ottenute tutte ad una frequenza di 4 GHz e che i materiali utilizzati non sono cambiati, è anche possibile notare la riduzione delle dimensioni del lato del modello in quanto è minore il numero di lunghezze d'onda che si possono trovare al suo interno.

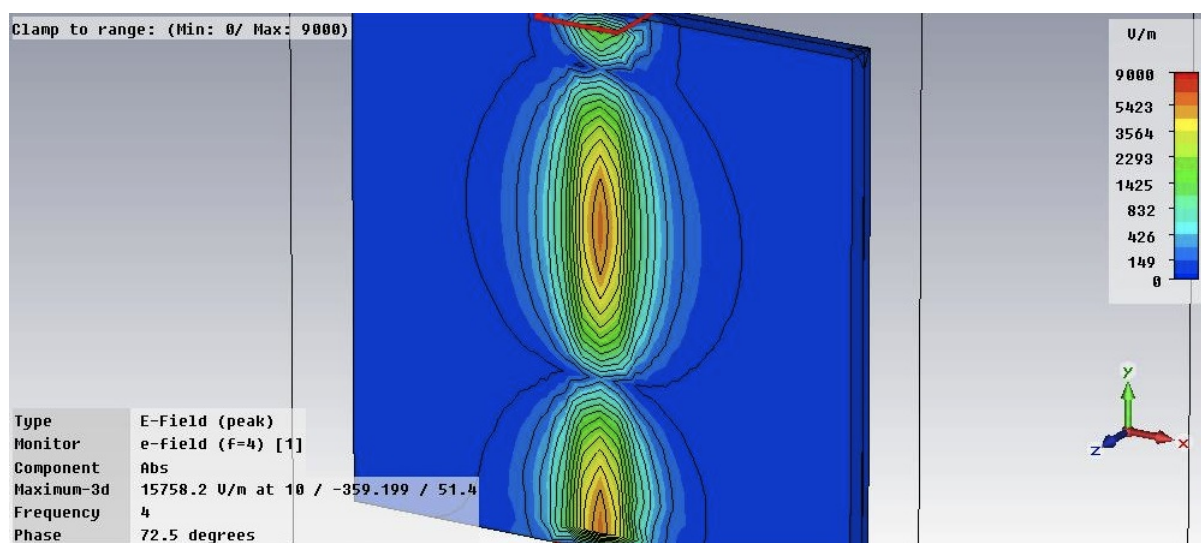


Figura 5.7: Disposizione del campo elettrico nel modello a 4 GHz; in evidenza le linee delimitanti le zone dove il campo assume lo stesso valore.

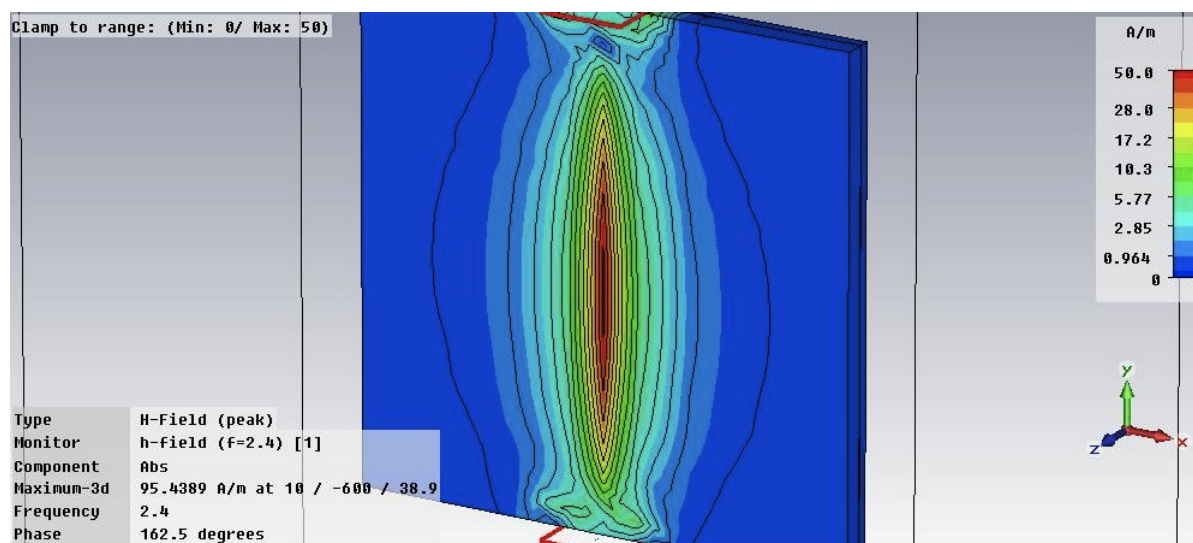


Figura 5.8: Disposizione del campo magnetico nel modello a 2.4 GHz; in evidenza le linee delimitante le zone dove il campo assume lo stesso valore.

Corrente di superficie

Nella pista la corrente di superficie è confinata al suo interno e scorre fra le due porte seguendo le sollecitazioni che vengono date dai campi trasmessi nella guida d'onda. Nel piano di massa invece si ha un comportamento lievemente diverso: la corrente infatti non scorre soltanto in una zona ben delimitata. Come si può vedere dalle immagini la maggior parte della corrente che si richiude tramite il piano di massa scorre in quella zona del piano che geometricamente costituisce la proiezione ortogonale della pista su di esso. È presente tuttavia un fenomeno di dispersione che fa sì che non tutta la corrente si richiuda tramite il percorso più breve. Ciò nonostante la direzione di propagazione della corrente rimane sempre parallela alla pista e nell'intorno destro e sinistro di quest'ultima. La cosa è particolarmente evidente nell'immagine che prende in considerazione il modulo della corrente; nella quale si può trovare anche una stretta analogia con l'immagine raffigurante la disposizione del campo magnetico. È infatti ben nota la relazione fra queste due grandezze legate dalla legge di Ampere. Infine si può ritrovare anche in questi grafici una particolare disposizione delle correnti nell'intorno delle porte ossia in quelle zone in cui il piano di massa e la pista sono comunicanti e avviene la chiusura del circuito. Se infatti normalmente le correnti si dispongono orizzontalmente rispetto al piano e alla pista, è possibile notare come in queste zone siano invece disposte verticalmente proprio perché passano da un elemento ad un altro, creando quindi quelle lievi alterazioni rispetto alle normali disposizioni dei campi precedentemente osservate.

Profilo di irradiazione

Il profilo di irradiazione a 2.4 GHz è caratterizzato da una forma pressoché sferoidale in cui è presente un lobo principale di irradiazione orientato verso l'alto. Al suo interno è stato visualizzato il modello, mettendone in evidenza, in particolare, il percorso della pista per avere un preciso riferimento spaziale. La zona di maggior irraggiamento si trova nella parte più alta del profilo, leggermente spostata sulla destra rispetto all'asse delle coordinate cartesiane avente origine nel punto (0, 0, 0). Il bordo inferiore del profilo, all'altezza del substrato, ha forma irregolare con una rientranza abbastanza pronunciata in corrispondenza di circa metà della lunghezza della pista; per il resto, tralasciando qualche lieve irregolarità, anche la rimanente parte del bordo ha forma quasi circolare. Al di sotto del substrato il profilo non si estende per molto e da un confronto con la scala dei valori, si può osservare come la quantità di energia elettromagnetica irradiata sia pressoché trascurabile. L'effetto è dovuto, ancora una volta, all'azione parzialmente schermante del piano di massa. In definitiva si può quindi concludere che il modello rappresenterà una fonte di disturbo elettromagnetico per tutto quello che si troverà al di sopra di esso. Il profilo di irradiazione a 4 GHz è anch'esso caratterizzato da una forma quasi sferoidale dei suoi bordi

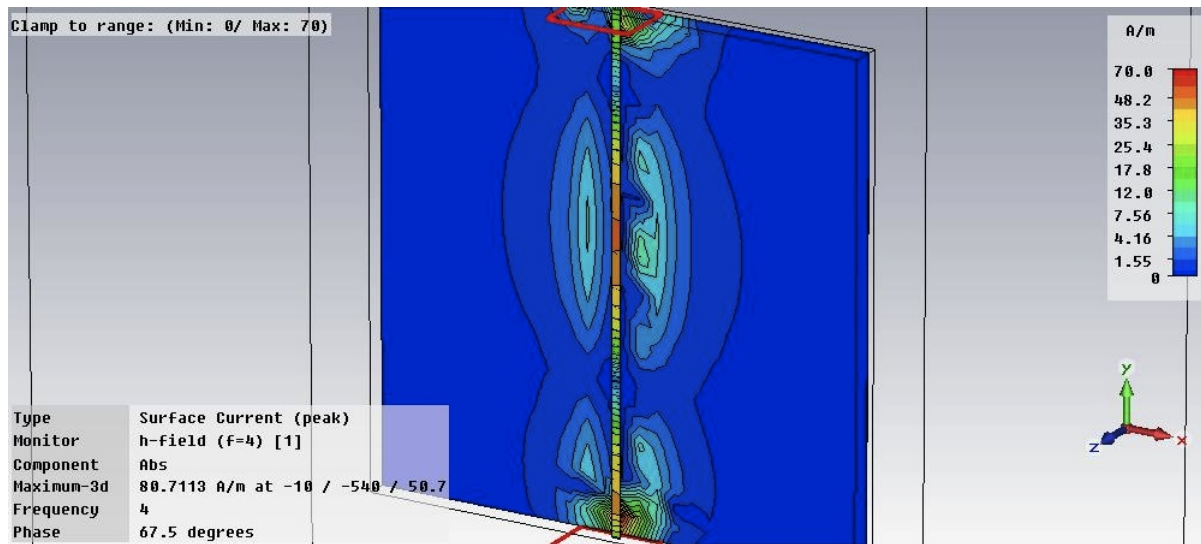


Figura 5.9: Disposizione a 4 GHz delle correnti. Queste si possono localizzare principalmente nella pista e nell'intorno della sua proiezione nel piano di massa.

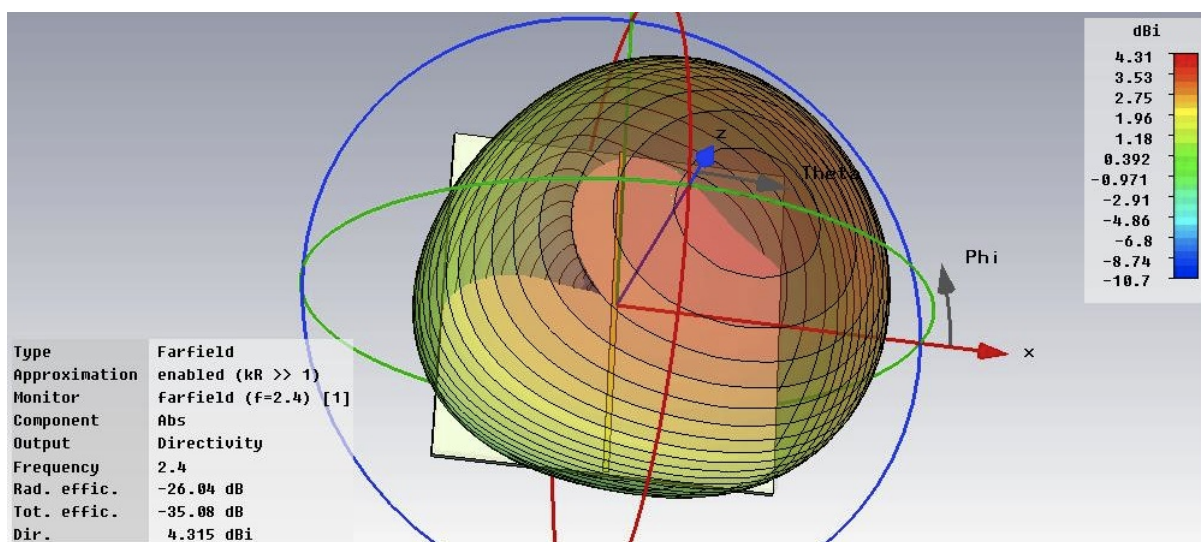


Figura 5.10: Profilo di irradiazione a 2.4 GHz.

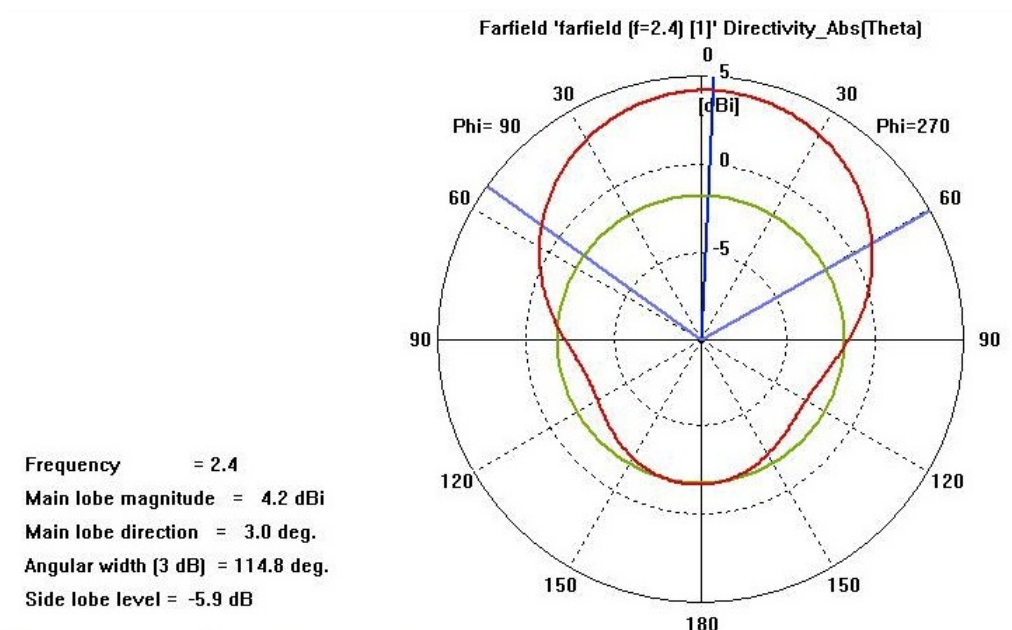


Figura 5.11: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Theta.

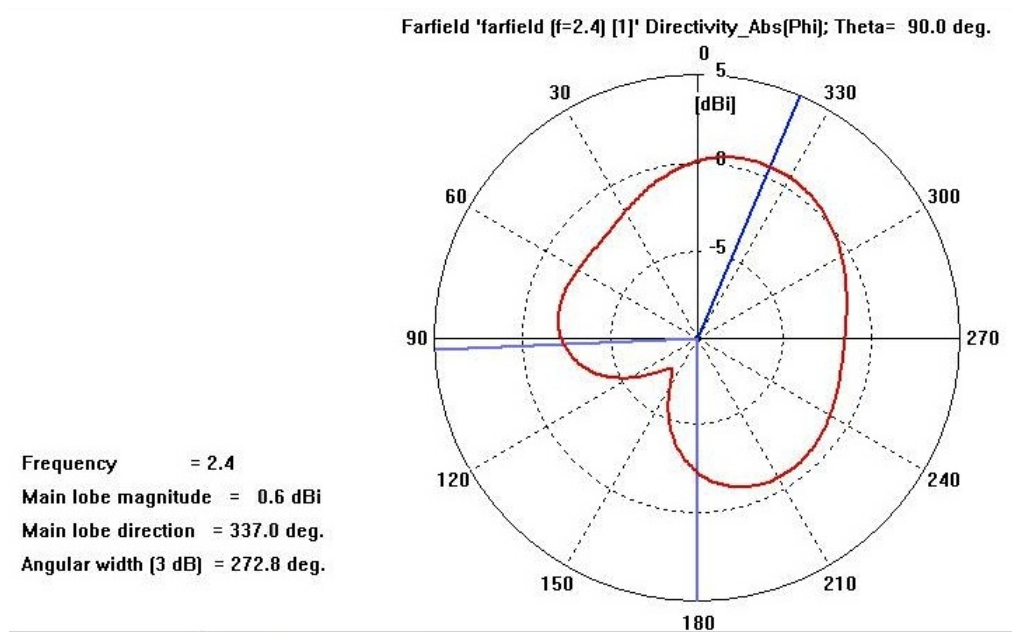


Figura 5.12: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Phi.

ma presenta comunque alcune differenze rilevanti rispetto al profilo appena descritto. Infatti in questo secondo caso la regione dove avviene il massimo irraggiamento di energia, pur essendo collocata sempre nella parte alta del profilo, è leggermente spostata in avanti e verso destra rispetto all'asse del modello evidenziato in blu. Inoltre il bordo inferiore del profilo è molto più irregolare evidenziando la presenza di due lobi principali contrassegnati da due notevoli rientranze dei bordi. La forma assomiglia all'unione di due ovali parzialmente deformati e sembra essere simmetrica rispetto alla diagonali del modello. Anche in questo caso il profilo è alquanto debole al di sotto del piano di massa ma è tuttavia presente una particolarità nella forma i cui bordi ricalcano il profilo sopra descritto. Si può infatti notare, al centro del modello, una piccola regione circolare nella quale non avviene irradiazione di energia. La zona è localizzabile all'incirca nel punto di incontro delle diagonali che evidenziano anche nella parte sottostante del profilo un certo grado di simmetria. Si può quindi concludere dopo aver esaminato l'intero profilo che, ai fini della compatibilità elettromagnetica, la regione più interessante è quella superiore dove cioè vengono irradiati disturbi con maggiore intensità.

In entrambi i profili le considerazioni fatte vengono ulteriormente confermate dall'osservazione delle loro proiezioni sui piani Theta e Phi in coordinate polari dove è anche possibile apprezzare il riconoscimento e l'analisi delle zone di maggior irradiazione.

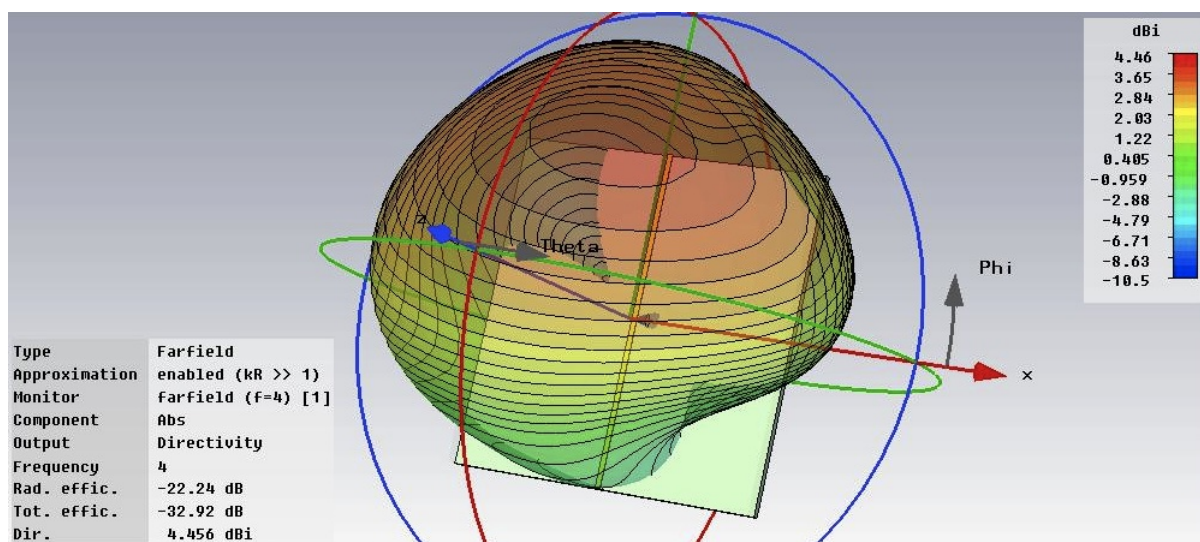


Figura 5.13: Profilo di irradiazione a 4 GHz.

5.5 Risultati della simulazione del secondo modello

Terminata la simulazione del secondo modello si è proceduto, come di consueto, con la verifica della sua buona riuscita e della correttezza dei risultati ottenuti. Si sono quindi esaminati i modi di propagazione presenti nelle porte in guida d'onda, verificando anche questa volta la propagazione dei campi elettrico e magnetico secondo la modalità quasi TEM.

Campo elettrico e magnetico

Il campo elettrico si sviluppa principalmente fra la pista e la regione sottostante del piano di massa. Questo perché attraverso questi due conduttori avviene il movimento di carica dovuto all'azione dei campi elettrico e magnetico trasmessi dalle porte in guida d'onda. Il campo tuttavia non si limita soltanto alla regione sopra citata ma si espande nello spazio circostante in modo analogo a quanto accaduto nel modello precedente. I fori presenti nel piano di massa non costituiscono un ostacolo significativo alla propagazione del campo elettrico che si sviluppa senza risentire di nulla nello spazio circostante. La cosa viene ulteriormente confermata dalle immagini che visualizzano il valore del modulo del campo evidenziandone le linee isopotenziali. Si nota tuttavia che le linee più interne sembrano delimitare delle

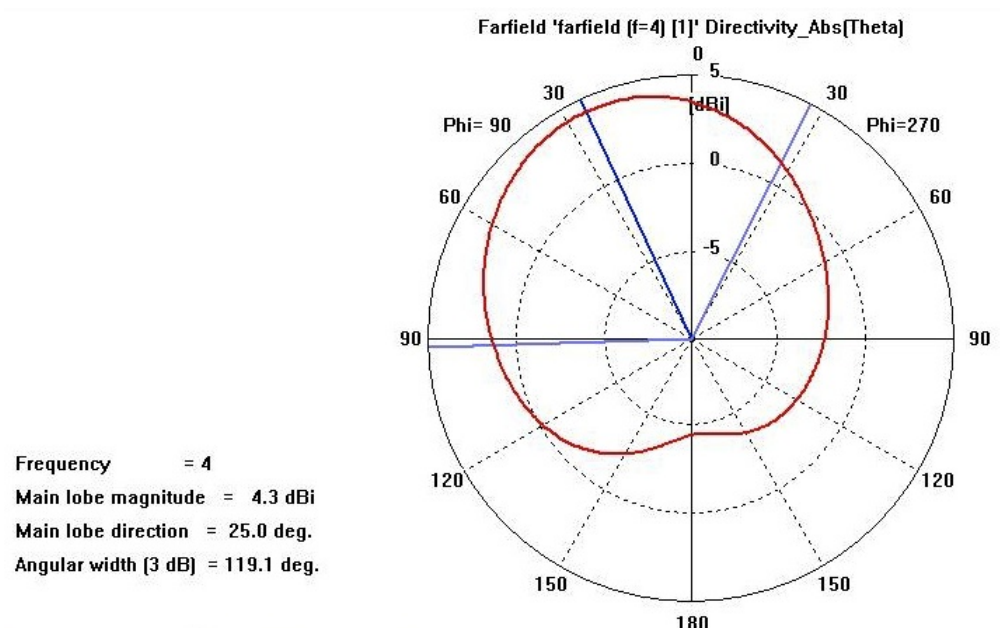


Figura 5.14: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Theta.

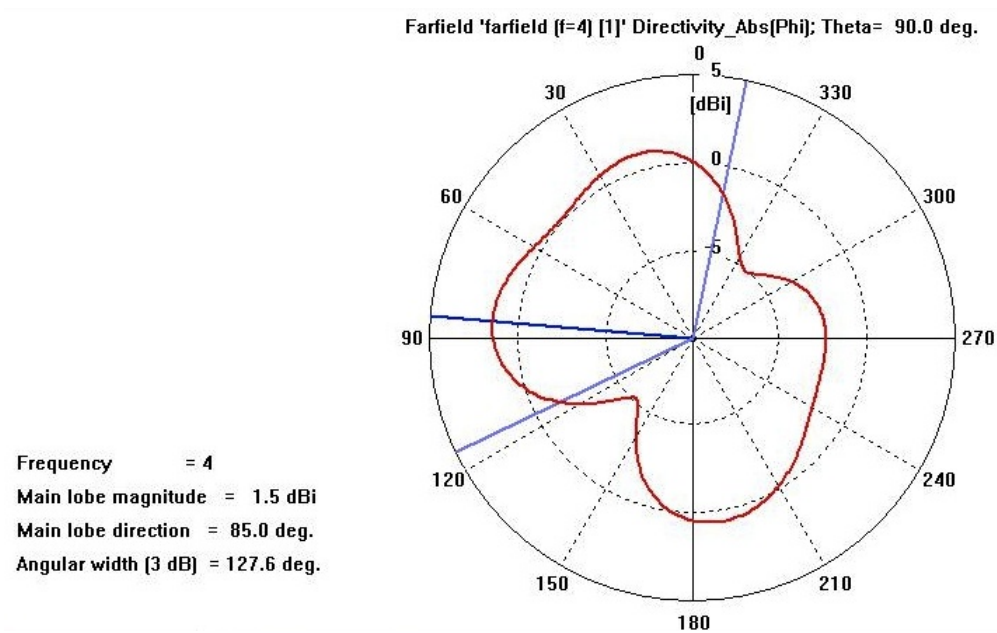


Figura 5.15: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Phi.

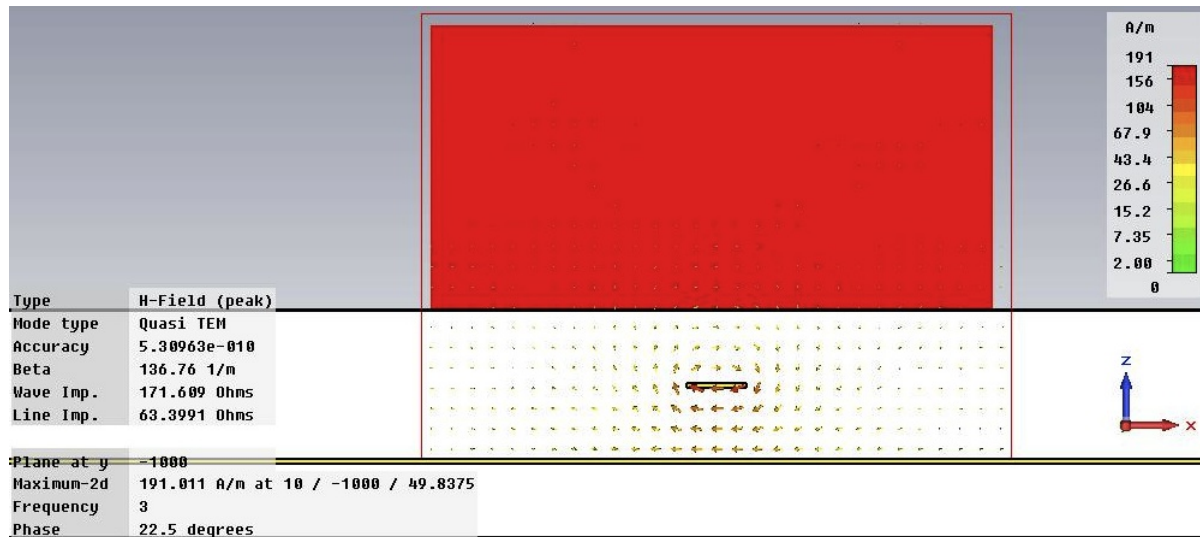


Figura 5.16: Disposizione del campo magnetico nella porta in guida d'onda. Dalla disposizione delle frecce si possono intuire le linee sempre chiuse del campo magnetico.

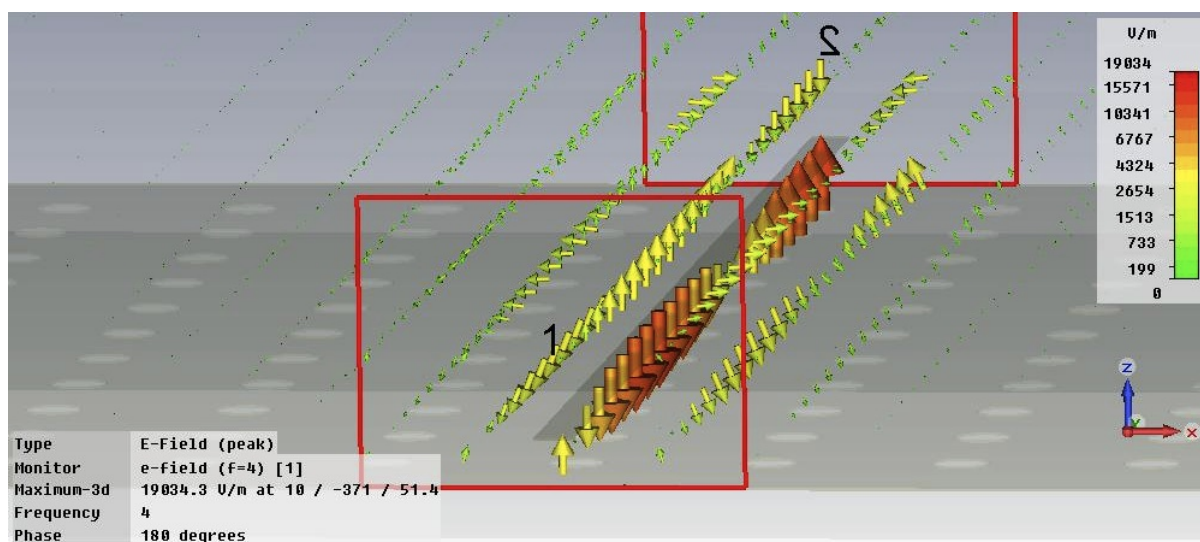


Figura 5.17: Disposizione del campo elettrico a frequenza pari a 4 GHz.

zone abbastanza rettangolari; questo effetto si perde tuttavia allontanandosi dalla pista poiché le zone descritte assumono la classica forma affusolata. La squadratura delle linee più interne è dovuta al fatto che i fori presenti al di sotto della pista influenzano la disposizione delle cariche, concentrandole nei loro contorni e creando l'effetto visualizzato. Quanto accade per il campo elettrico si può tranquillamente estendere anche al magnetico ed è comprensibile dal momento che queste due grandezze sono fortemente correlate fra loro.

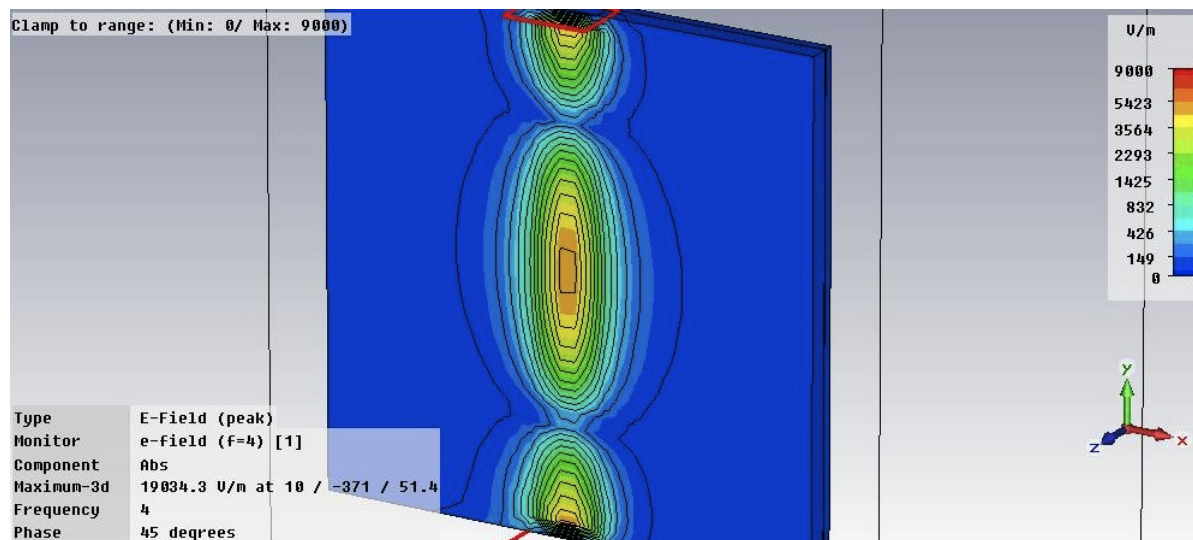


Figura 5.18: Disposizione del campo elettrico nel modello a 4 GHz; in evidenza le linee delimitante le zone dove il campo assume lo stesso valore.

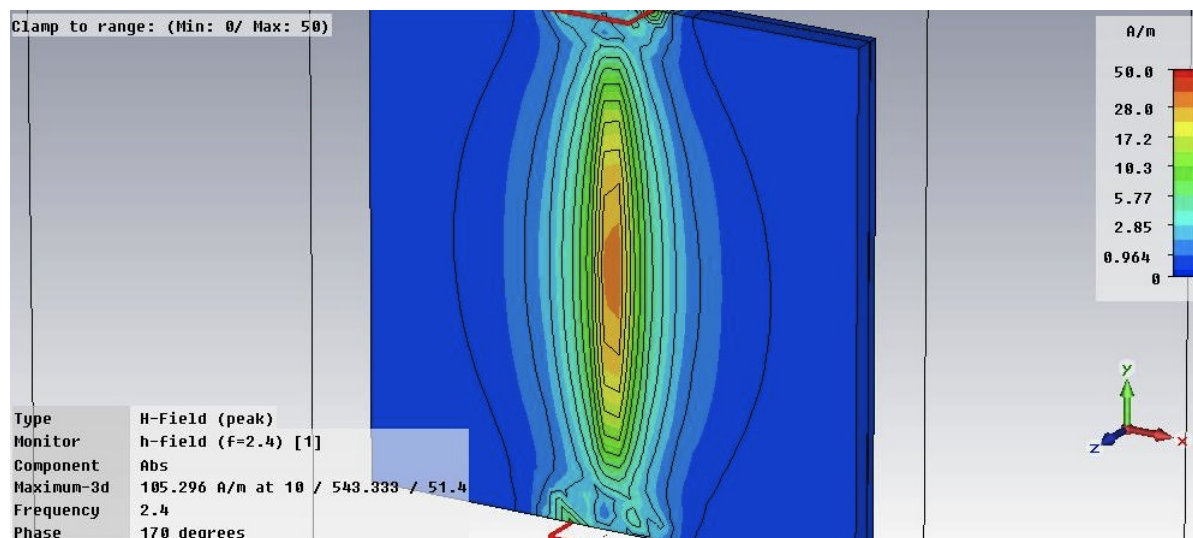


Figura 5.19: Disposizione del campo magnetico nel modello a 2.4 GHz; in evidenza le linee delimitante le zone dove il campo assume lo stesso valore.

Corrente di superficie

Si nota la presenza della corrente sulla pista e sulla zona del piano di massa immediatamente al di sotto di essa. La disposizione sulla pista segue, come ovvio, l'andamento del conduttore e non presenta

tratti di particolare interesse. Al contrario la disposizione sul piano di massa è caratterizzata da un particolare accumulo della corrente soltanto nella zona sottostante la pista ed in misura nettamente inferiore nei dintorni. Questa particolare disposizione è causata dalla presenza dei fori nel piano di massa ed in particolare dal fatto che la pista viene a trovarsi esattamente sopra ad una riga di questi. La presenza dei fori causa principalmente due effetti sulle correnti che scorrono nel piano. Come primo effetto, vengono definite delle precise regioni rettangolari, costeggiate parte per parte da righe di fori, attraverso le quali la corrente può scorrere nel piano senza trovare alcun ostacolo. Per questo la corrente tenderà a scegliere queste vie preferenziali per richiudersi, causando in alcuni punti delle deviazioni rispetto al percorso più naturale osservato nel modello precedente. Il secondo effetto si può notare invece quando la corrente, nel suo percorso, tenta di attraversare un foro. Infatti non riuscendovi a causa della discontinuità del conduttore cerca di percorrere il bordo circolare del foro per poi tentare nuovamente di immettersi nel piano di massa, dal lato opposto. Questo tuttavia non accade facilmente e quindi frequentemente la corrente rimane intrappolata all'interno del bordo del foro, continuando a ruotare. Questo secondo effetto fa sì che localmente i fori si comportino come dei piccoli magneti; oltre a questo il fenomeno provoca anche dissipazione di energia per effetto Joule a causa delle correnti intrappolate.

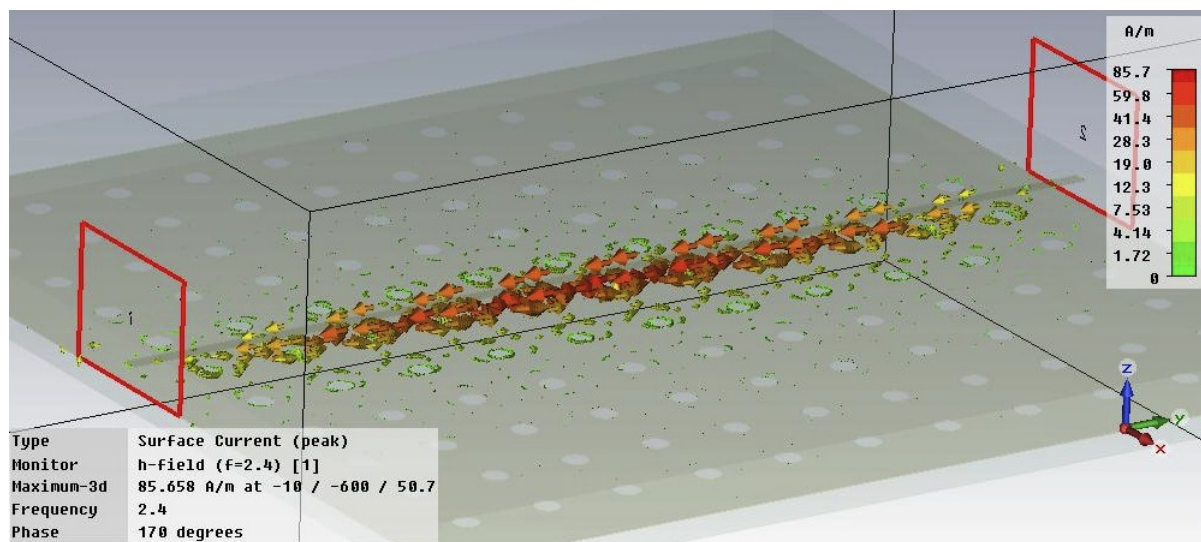


Figura 5.20: Disposizione delle correnti nel modello, si noti l'accumulo nei bordi dei fori del piano di massa.

Profilo di irradiazione

Il profilo di irradiazione calcolato a 2.4 GHz presenta una forma abbastanza sferica, caratterizzata dalla presenza di un solo lobo principale orientato verso l'alto e del tutto simile a quella descritta nel capitolo precedente. La regione dove c'è la massima irradiazione di energia elettromagnetica è localizzata sulla parte superiore leggermente spostata sulla destra rispetto all'asse del modello evidenziato in blu sull'immagine. Per quanto riguarda il bordo inferiore, all'altezza del piano di massa danneggiato, se ne possono notare i contorni dalla forma sferica e priva di rilevanti irregolarità, fatta eccezione però per una significativa rientranza localizzabile nella parte superiore sinistra. La parte inferiore del profilo presenta un'irradiazione di energia che può essere trascurata se confrontata con la parte superiore, di importanza nettamente superiore ai fini di un'analisi della compatibilità elettromagnetica.

Il profilo di irradiazione calcolato a 4 GHz presenta una forma più irregolare, che assomiglia ad una sfera schiacciata nella sommità. La regione in cui è localizzato il massimo irraggiamento di energia viene a trovarsi anche questa volta in corrispondenza della parte alta del profilo anche se abbondantemente spostata in avanti rispetto all'asse di riferimento marcato in blu. Il bordo inferiore del profilo, caratterizzato sempre da contorni abbastanza sferici e regolari presenta in questo caso due rientranze significative localizzabili in corrispondenza della diagonale che attraversa il substrato dall'angolo superiore sinistro a quello inferiore destro. Anche in questo caso si può notare una simmetria del profilo rispetto alle diago-

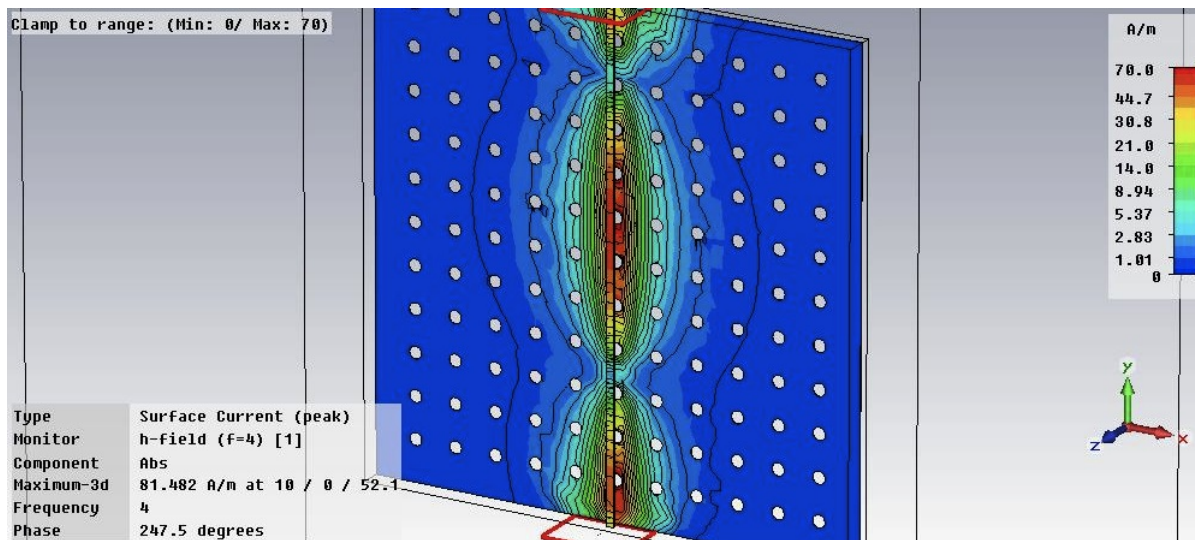


Figura 5.21: Disposizione della corrente di superficie nel modello a 4 GHz; in evidenza le linee delimitante le zone dove l'intensità di corrente assume lo stesso valore.

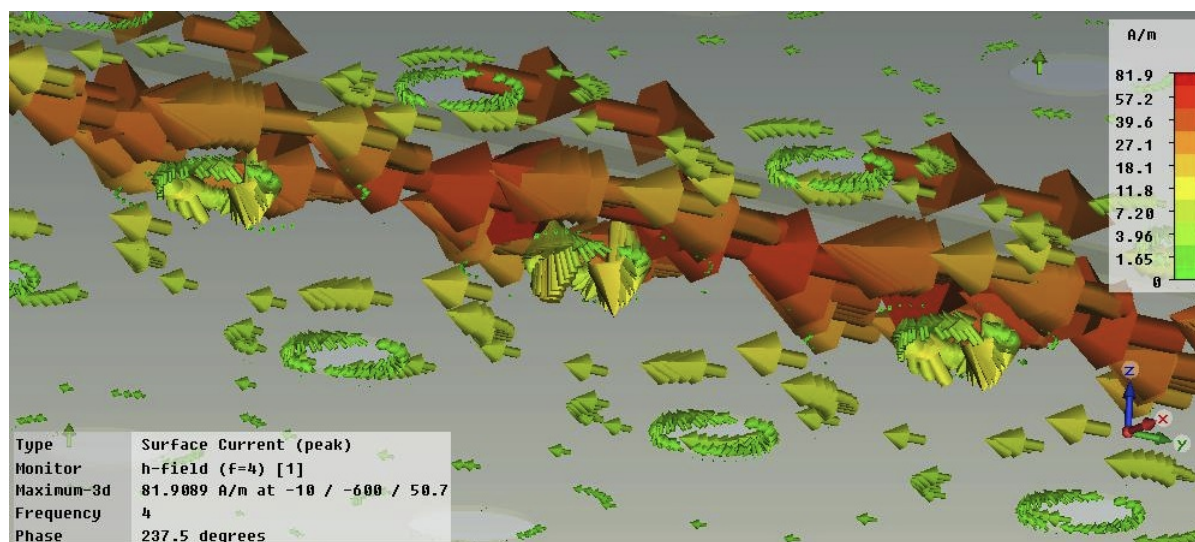


Figura 5.22: Dettaglio dell'accumulo di corrente nei bordi circolari dei fori.

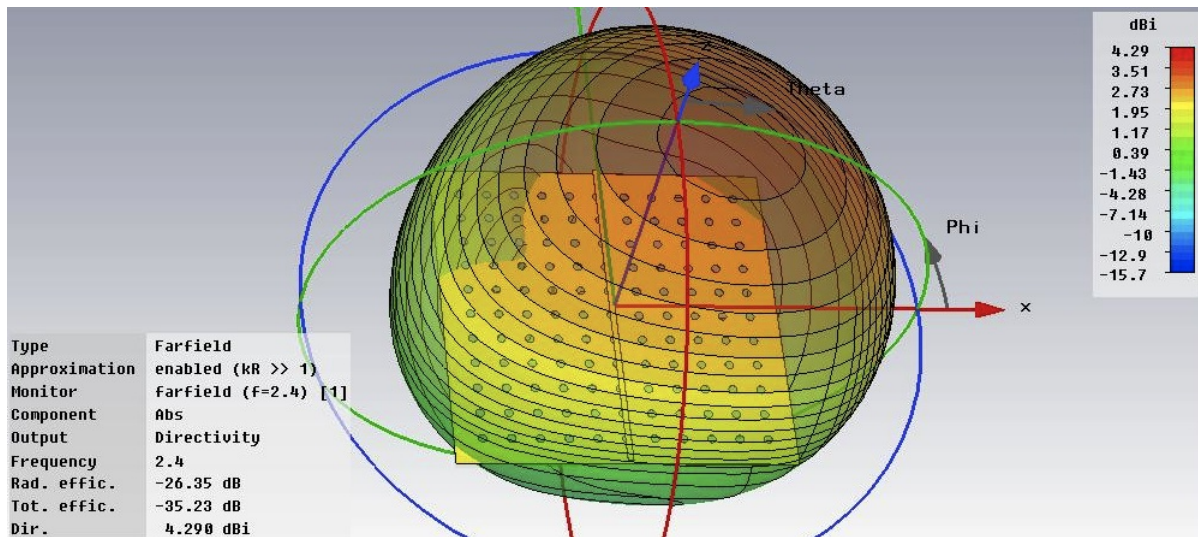


Figura 5.23: Profilo di irradiazione a 2.4 GHz.

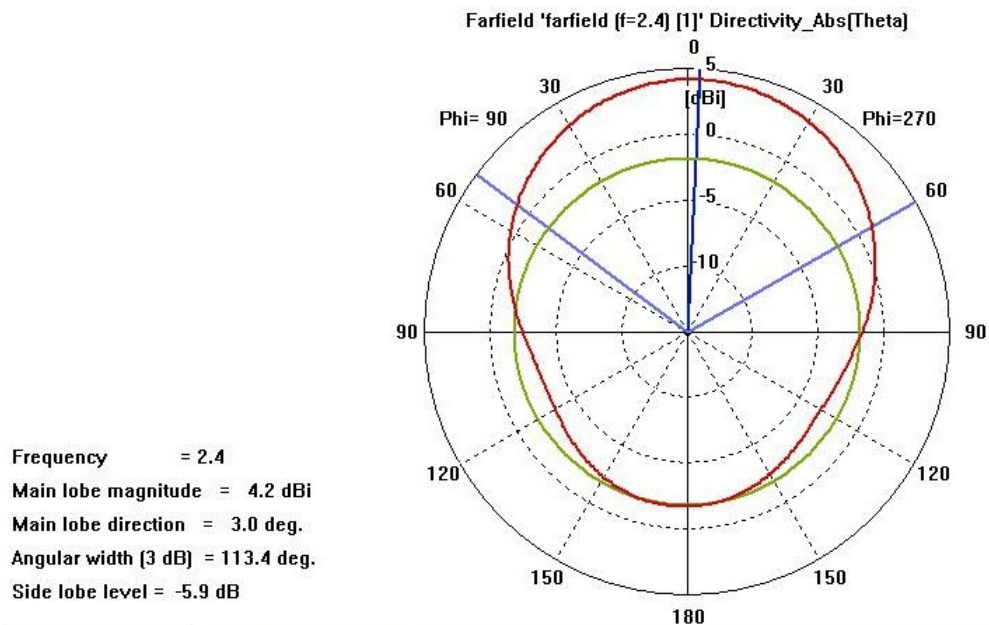


Figura 5.24: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Theta.

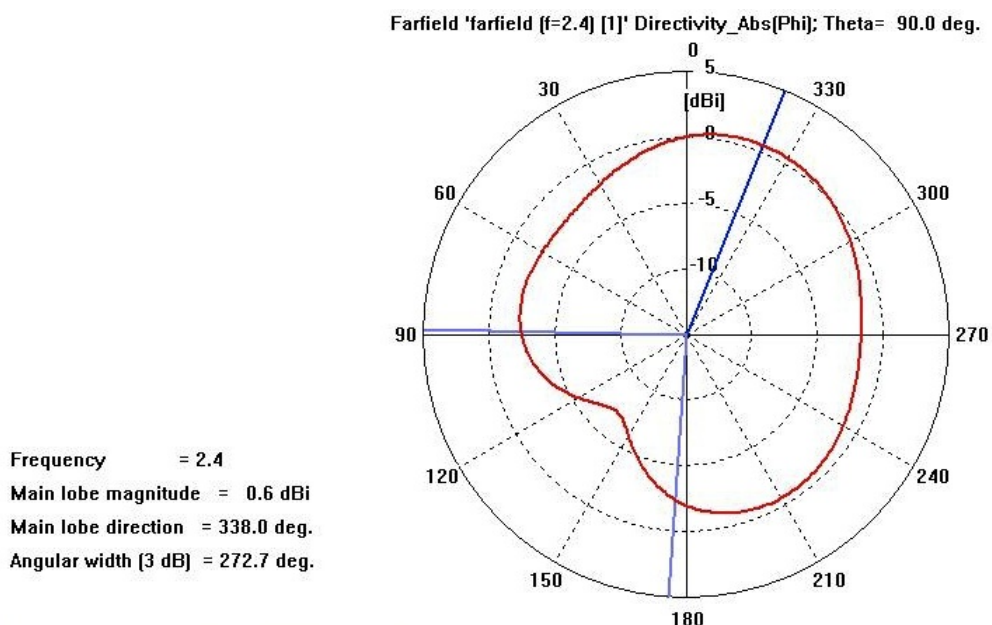


Figura 5.25: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Phi.

nali del substrato al contrario delle aspettative che farebbero predire più semplicemente una simmetria rispetto alla pista centrale. La parte inferiore del profilo, localizzata sotto il piano di massa, anche in questo caso presenta un'intensità trascurabile e una regione, localizzata al centro del substrato in cui non è presente irradiazione. Il comportamento del piano di massa con i fori è simile in questo caso a quello senza; la cosa è dovuta al fatto che il diametro delle aperture è significativamente più piccolo della minima lunghezza d'onda utilizzata nel segnale di sollecitazione del modello. Il piano di massa quindi ha svolto anche in questo caso un'azione schermante, comportandosi in modo simile ad una gabbia di Faraday.

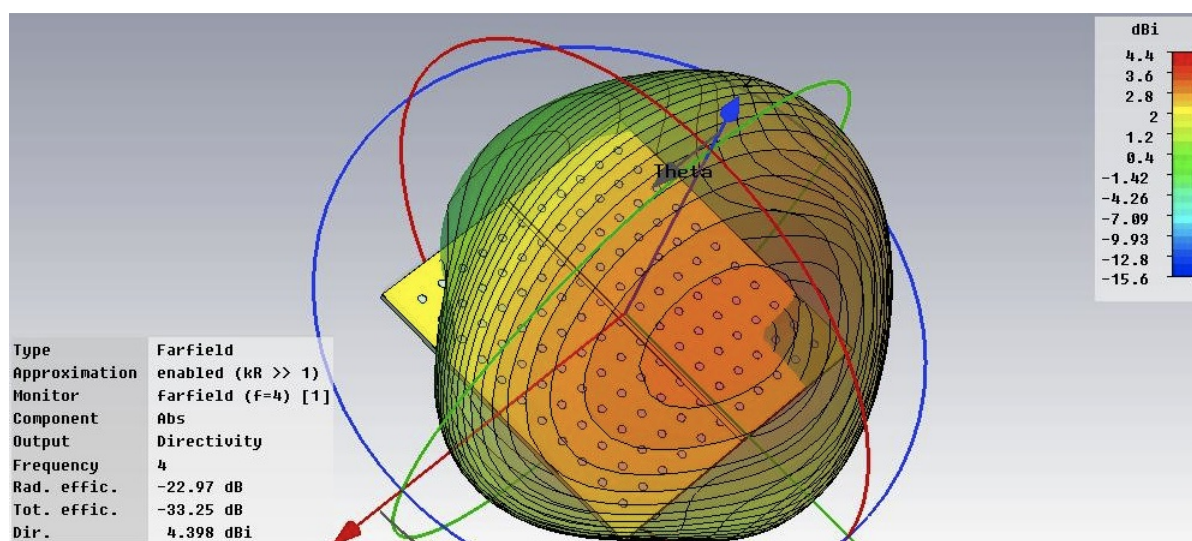


Figura 5.26: Profilo di irradiazione a 4 GHz.

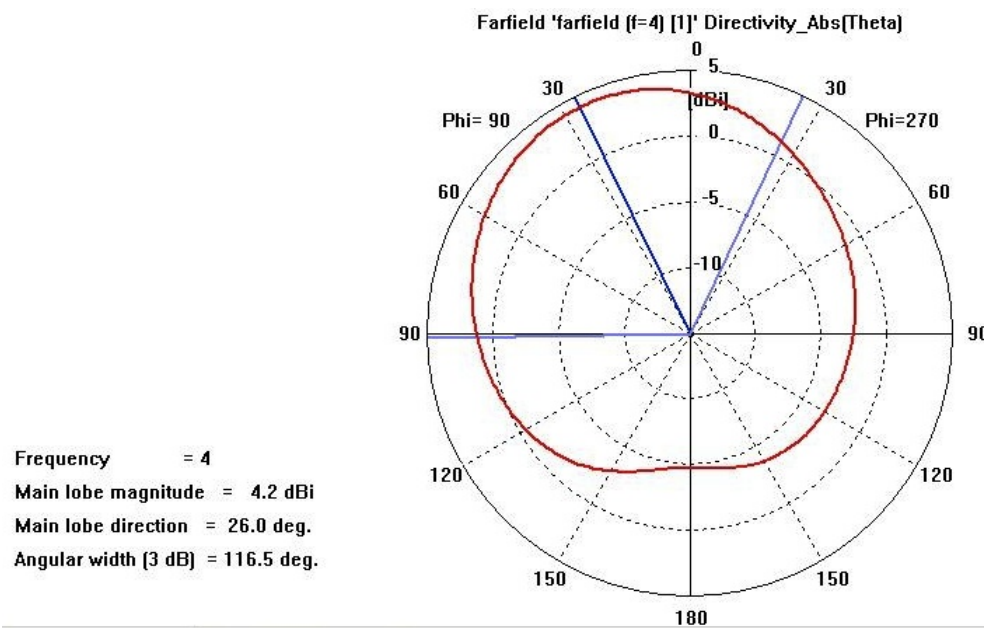


Figura 5.27: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Theta.

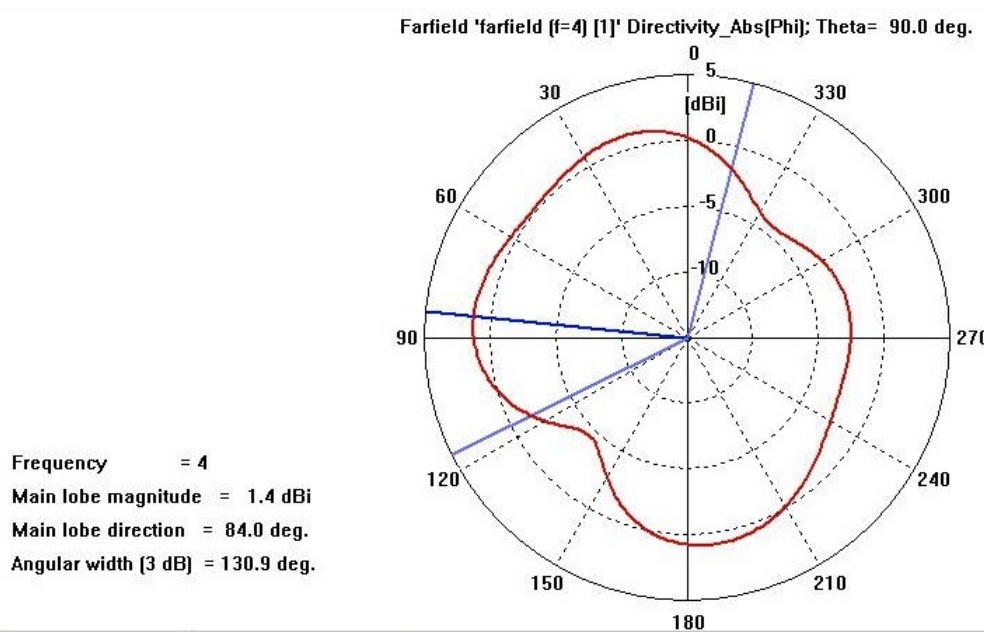


Figura 5.28: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Phi.

5.6 Osservazioni

I modelli esaminati sono simili fra loro sia per quanto riguarda le parti che li compongono sia per le dimensioni di quest'ultime. La differenza sostanziale riguarda il piano di massa che in un caso è formato da una lamina metallica integra, mentre nell'altro da una lamina nella quale sono stati fatti dei fori per simulare un danneggiamento della struttura, dovuto alla creazione delle interconnessioni fra i vari componenti. Dal confronto dei campi elettrico e magnetico nei due modelli non si sono rivelate differenze sostanziali nella disposizione; a prima vista sembra essere pressoché identica. Se tuttavia la si osserva più attentamente si potrà notare una certa differenza presente nelle linee di campo centrali. Nel primo modello infatti queste hanno forma affusolata e si espandono nello spazio circostante mantenendo inalterati i tratti fondamentali. Al contrario nel secondo modello le linee di capo centrali hanno una forma più squadrata che assomiglia ad un rettangolo leggermente deformato. Espandendosi poi nello spazio circostante perdono questa caratteristica e riassumono una forma affusolata come nel primo modello. Questa particolarità è dovuta essenzialmente al fatto che nel secondo modello la pista si trova sopra ad una colonna di buchi del piano di massa; questi influenzando considerevolmente il percorso della corrente di ritorno provocano l'effetto evidenziato. Infatti nel suo percorso di ritorno la corrente, a causa della topologia del piano di massa, rimane spesso intrappolata nei contorni dei fori, aumentando la propria concentrazione in zone nettamente definite, dalla forma squadrata e dando origine alla disposizione anomala sopra descritta. Questo fenomeno può anche provocare un deterioramento dei segnali che attraversano il piano di massa a causa degli effetti dissipativi causati dai fori. L'impatto tuttavia dipende fortemente dalla geometria e dalla topologia dei circuiti e dei danni presenti nel piano di massa sotto forma di fori. Risulta pertanto complicato predire a priori l'effetto della cosa sui segnali elettrici, rendendo necessario il bisogno di eseguire una simulazione del modello in questione. Infine i profili di irradiazione

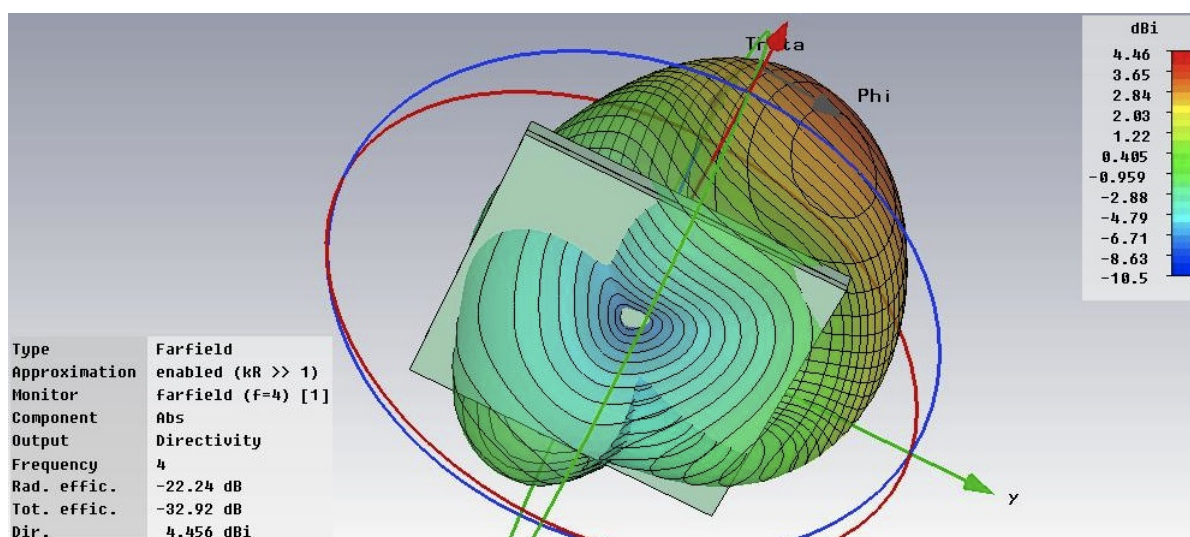


Figura 5.29: Dettaglio della parte inferiore del profilo di irradiazione calcolato a 4 GHz.

dei due modelli sono quasi totalmente identici sia nella forma e nelle dimensioni che nelle intensità. Come si può osservare le variazioni introdotte dai fori presenti nel piano di massa sono minime e difficilmente rilevabili. L'unica variazione di rilievo è facilmente osservabile nei profili simulati a 4 GHz dove si nota nel secondo modello come il profilo abbia una forma più schiacciata rispetto a quella del primo. La scarsa influenza dei fori in questo frangente è da attribuirsi al fatto che il loro diametro non è rilevante se paragonato alle lunghezze d'onda dei segnali in gioco. Il piano di massa pertanto ha la medesima influenza sull'intero sistema in entrambi i modelli come si può osservare dai vari profili.

Capitolo 6

Microstrip con griglia di massa

6.1 Descrizione

Verranno di seguito implementati due modelli di schede elettroniche in cui vengono sperimentate altre strutture al posto del convenzionale piano di massa. L'intento è quello di valutarne il comportamento sia nella propagazione dei segnali e dei campi elettromagnetici, sia nell'irraggiamento di disturbi da parte dell'intera struttura. I modelli saranno generalmente composti da una pista e da queste strutture separati però da strati di materiale isolante. Nel dettaglio il primo modello implementa una scheda elettronica formata sostanzialmente da due piste, collocate una sotto all'altra, all'interno di un piccolo blocco di materiale isolante. La pista più alta viene utilizzata per la trasmissione di un segnale mentre a quella sottostante è delegato il compito di fare da piano di massa. Nel secondo modello la struttura è analoga a quella appena descritta per il primo; vi è tuttavia la presenza di una griglia di massa la posto di una semplice pista, come si può vedere anche dalle immagini. Generalmente, nelle implementazioni reali, non vengono costruite griglie dalla geometria regolare in quanto il posizionamento e la connessione dei componenti obbliga spesso i progettisti ad adattare la geometria delle griglie ai progetti. Non essendo possibile tenere conto di tutte le possibili e specifiche varianti, si è scelto di implementare la griglia con una geometria quadrata poiché questa configurazione è comunque la più simile alle varie casistiche.

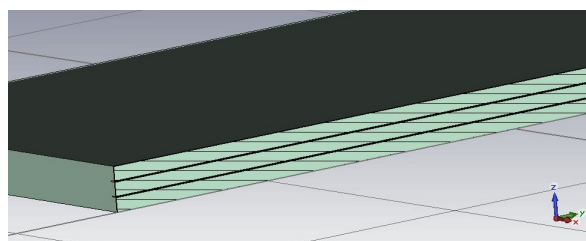


Figura 6.1: Sezione del primo modello composto da due piste all'interno di un substrato visibili nella sezione di quest'ultimo.

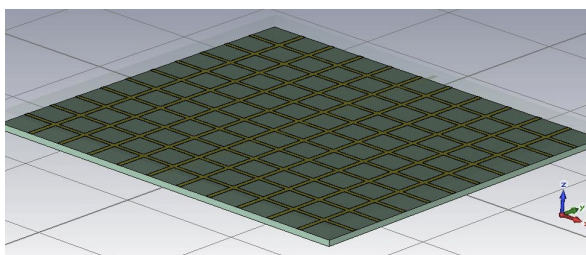


Figura 6.2: Griglia di massa del secondo modello.

6.2 Costruzione dei modelli CAD

Si procederà ora con l'illustrazione dei passaggi più importanti che hanno consentito la costruzione CAD dei due modelli. Anche in questo caso la realizzazione di strutture completamente scalabili grazie ai parametri poteva essere fatta seguendo varie tecniche; in questa ampia scelta di procedimenti si è cercato di seguire il più semplice. Infine le dimensioni dei modelli sono state scelte da un lato tenendo conto dei layout comunemente impiegati dall'altro dei tempi di simulazione richiesti dal software.

Pista di massa

Alla costruzione del modello è prima preceduta una fase di studio in cui si sono individuati i parametri e le grandezze fondamentali alla sua completa descrizione geometrica. Sono riportate, fra parentesi, le misure in (*mil*) e (*mm*):

- (1.4) (0.036) **strip_h**: rappresenta lo spessore delle piste;
- (10) (0.25) **strip_w**: rappresenta metà della larghezza della delle piste;
- (25) (0.64) **sub_h**: rappresenta l'altezza di uno strato di substrato. Uno strato viene definito come quella porzione di substrato compresa fra altri due componenti del modello, come ad esempio le due piste o fra un componente ed un estremo;
- (800) (20.32) **sub_w**: rappresenta metà della larghezza del substrato a cui per comodità si è data forma quadrata.

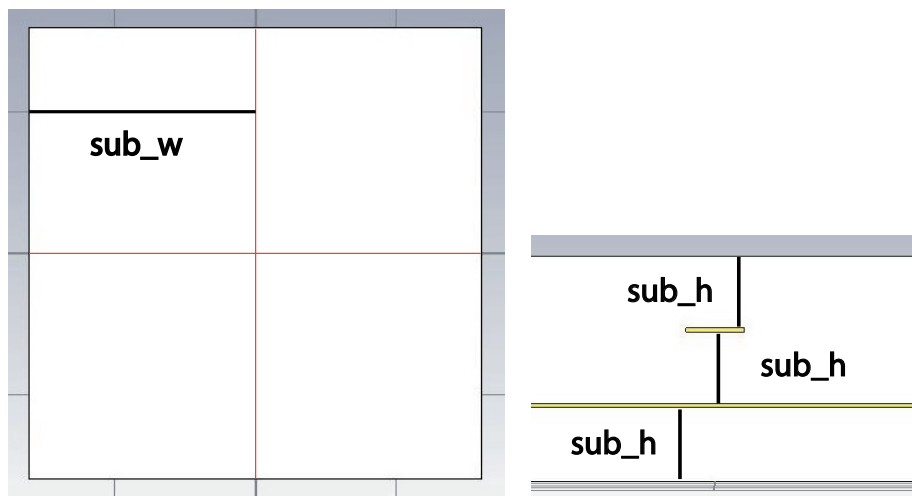


Figura 6.3: Schema del secondo modello con evidenziazione dei parametri.

I nomi evidenziati mediante un diverso carattere indicano l'abbreviazione attribuita nel menù dei parametri del simulatore. Oltre a quelli sopra elencati è presente un ulteriore parametro chiamato **bound** che rappresenta la dimensione del margine di spazio vuoto che volendo può essere aggiunto su ogni lato del modello; la cosa può tornare utile per il calcolo del profilo di irradiazione.

Il modello CAD è stato costruito mediante l'assemblaggio dei vari strati in cui era stato precedentemente suddiviso nella fase di studio. Per prima cosa si è quindi creato, tramite il comando *Object - Basic Shapes - Brick*, uno strato di materiale isolante di forma quadrata avente dimensioni pari a quelle riportate nell'elenco dei parametri. La scelta della forma quadrata è stata effettuata tenendo conto dei vantaggi costruttivi che si avrebbero dalla simmetria nell'inserimento delle varie coordinate nei menù. Anche questo solido è stato costruito in modo da svilupparsi sul piano xy per quanto riguarda lunghezza e larghezza e sul piano z per quanto riguarda l'altezza. Successivamente si è creata una prima pista sul substrato; si è posizionata esattamente sull'asse di simmetria di una faccia e si è fatto in modo che si estendesse per tutta la sua lunghezza. Si è inoltre fatto in modo che la pista, per metà della sua altezza

fosse compenetrata sul substrato sottostante. Costruiti i primi due elementi si è aggiunto un'altro strato di materiale isolante al di sopra del precedente, sempre rispettando le dimensioni e i vincoli imposti dalla parametrizzazione. Per costruzione anche il nuovo strato di materiale isolante è intersecato con la pista per metà della sua altezza. Si è quindi proceduto con la creazione della seconda pista posizionandola, rispetto al secondo strato di materiale isolante, in modo del tutto analogo a quanto fatto con la prima. Si è quindi completato il modello aggiungendovi in cima un ulteriore strato di isolante. Si è proseguita la costruzione invocando la funzione booleana di addizione sui tre strati di materiale isolante, creando quindi un blocco unico; si sono anche sottratti, con l'opportuna funzione booleana, i volumi delle piste dal blocco precedentemente creato in modo da scavarne un alloggiamento all'interno. Si è quindi terminato il modello assegnando i materiali alle varie componenti; per gli strati di isolante si è scelto ancora una volta l'FR4, mentre è stato assegnato il rame alle piste.

Griglia di massa

Anche alla costruzione del secondo modello è stata prima anteposta una fase di analisi dei principali parametri con cui rappresentarlo; lo studio ha portato alla stesura del seguente elenco dove sono riportate, fra parentesi, le misure in (*mil*) e (*mm*):

- (150) (3.81) **dist**: rappresenta la distanza fra gli assi delle piste formanti la griglia di massa desiderata dall'utente. Non sempre corrisponde alla distanza reale, a meno che il valore inserito non sia multiplo della larghezza del substrato;
- **n**: rappresenta il numero di volte che la distanza *dist* è contenuta in un lato del piano di massa; del risultato finale viene sempre presa la parte intera;
- **dist1**: rappresenta la distanza reale fra gli assi delle piste formanti la griglia di massa. Viene calcolata con una divisione fra la larghezza del substrato e il numero di linee *n*;
- (1.4) (0.036) **strip_h**: rappresenta lo spessore della pista e del circuito della griglia di massa;
- (20) (0.51) **strip_l**: rappresenta la larghezza della pista e delle maglie che compongono la griglia di massa;
- (25) (0.64) **sub_h**: rappresenta lo spessore di uno strato di substrato; la definizione di strato è analoga a quella fatta per il modello precedente;
- (800) (20.32) **sub_w**: rappresenta metà della larghezza del lato del substrato.

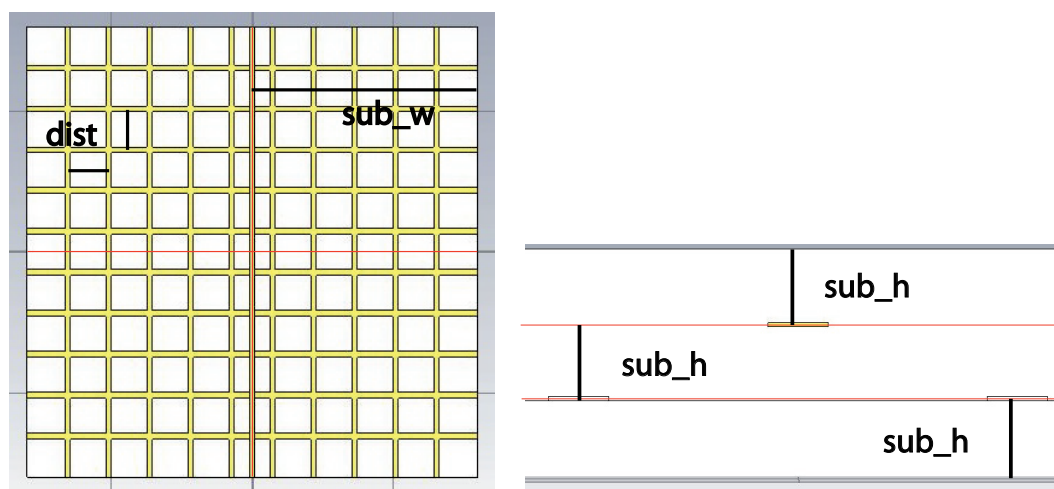


Figura 6.4: Schema del secondo modello con evidenziazione dei parametri.

I nomi evidenziati mediante un diverso carattere indicano l'abbreviazione attribuita nel menù dei parametri del simulatore. Oltre a quelli sopra elencati è presente, anche in questo caso, il parametro **bound**

avente la stessa funzione descritta nei capitoli precedenti.

Per la costruzione del modello si è ripetuto approssimativamente lo stesso procedimento utilizzato per il precedente, ad eccezione del fatto che la pista inferiore è stata sostituita da una griglia, a maglie quadrate, che si estende per tutta la superficie del substrato. Le maglie della griglia sono state ottenute mediante la costruzione e la successiva unione di più piste costruite con lo stesso spessore di quella principale sovrastante. Per caratterizzare la griglia si è scelto il parametro $dist$ in modo da poterla rendere più fitta o più rada a seconda delle esigenze dell'utente. Tuttavia $dist$ non può assumere qualsiasi valore, infatti dal momento che la griglia segue una geometria regolare deve essere necessariamente un multiplo della larghezza del substrato. Per questo motivo, per non appesantire ogni volta l'utente con questa verifica, si è implementato un sistema per approssimare il valore della distanza inserita con il multiplo del lato del substrato più prossimo. Per prima cosa si è quindi definito il parametro n che quantifica quante linee della griglia, alla distanza $dist$ voluta, possono essere contenute in un lato del substrato; per la natura della divisione, viene presa la parte intera del risultato. Successivamente viene determinato il valore del parametro $dist_1$ rappresentante la vera distanza fra le maglie. $dist_1$ è calcolato con la divisione fra la lunghezza del lato del substrato e il valore di n . Determinate quindi le dimensioni della griglia si può procedere alla creazione delle sue maglie. Per fare questo si è dapprima creata una pista orizzontale, estesa per tutta la larghezza del substrato, e la si è posizionata in alto ad una distanza pari a $dist_1$ dal bordo del substrato. Successivamente si è invocata la funzione di replicazione della forma per $n - 1$ volte ottenendo quindi tutti i bordi delle maglie orizzontali. Si è seguito lo stesso procedimento per la creazione dei bordi verticali. Inizialmente si è costruita la prima pista posizionata ad una distanza $dist_1$ dal lato sinistro del modello e poi si è invocata anche su di essa la funzione di replicazione ottenendo un risultato analogo a quello descritto per il caso orizzontale. Naturalmente nell'invocare la funzione di replicazione

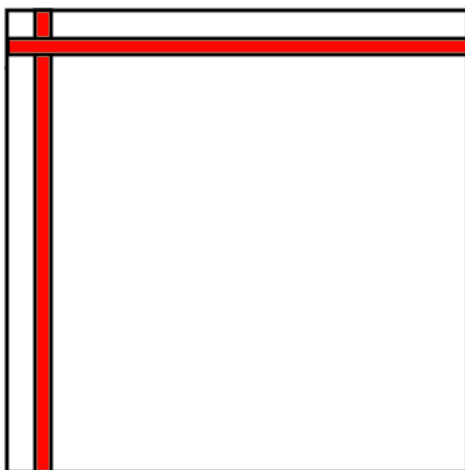


Figura 6.5: Collocazione della prima pista verticale e orizzontale sulla griglia. Il comando di replicazione ha poi permesso di creare in pochi passi l'intera struttura.

si è dovuto porre particolare attenzione nello specificare la direzione e la spaziatura con cui riprodurre le forme; anche in questo caso tutti i valori richiesti nei campi dei menù sono stati inseriti in forma parametrica. Prima di terminare la costruzione della griglia si sono raggruppate a parte tutte le forme rappresentanti le piste orizzontali e verticali e su di esse si è invocata la funzione booleana di addizione. Dal momento che variando i parametri di controllo della griglia può accadere che vengano aggiunte delle nuove piste si è deciso di raggrupparle insieme per facilitarne l'individuazione e la conseguente unione mediante addizione.

Anche per questo modello vi sono degli accorgimenti particolari da considerare a causa della sua complessità. Infatti poiché il software CAD conserva una lista cronologica di tutte le azioni eseguite e le configurazioni inserite, può capitare che modificando i parametri si cerchi di tornare ad uno stato o ad una configurazione precedente rispetto all'ultima della lista. Il software infatti non ricostruisce il modello ad ogni aggiornamento dei parametri ma per prima cosa ricerca nella lista se esiste già la configurazione voluta, altrimenti la crea. Nel caso in cui il software debba tornare ad una configurazione precedente,

sposta il cursore della lista dall'ultimo posto alla posizione richiesta. A causa di questo il software potrebbe non rispondere correttamente ad alcuni comandi dell'utente in quanto vengono trascurate tutte quelle operazioni effettuate dall'utente e registrate nella lista che si trovano dopo l'attuale posizione del cursore. È pertanto opportuno, per sbloccare la situazione, che l'utente apra il menù di modifica della lista ed elimini tutte le operazioni elencate dopo la posizione del cursore. In questo modo si può riprendere a configurare il modello sfruttando tutte le risorse del software e senza incorrere in restrizioni o errori. Va tuttavia segnalato come la procedura debba essere eseguita con attenzione per non stravolgere o danneggiare il progetto al quale si sta lavorando. Nel modello in questione la cosa si può verificare modificando il parametro *dist*; il software infatti può avere la necessità di togliere alcuni dei bordi delle maglie della griglia con il rischio che per farlo cerchi di ricondursi ad una situazione precedente.

Va infine sottolineato come la pista non sia stata collocata esattamente sopra una delle linee che formano la maglia della griglia; il modello è stato intenzionalmente costruito così per cercare di simulare una configurazione abbastanza generica e casuale.

6.3 Parametri di simulazione

La definizione dei parametri di simulazione è iniziata con l'installazione delle porte in guida d'onda. Sul primo modello sono state posizionate ortogonalmente rispetto alla pista superiore, come si può vedere dalla figura, ed in modo da toccare con il bordo inferiore la pista sottostante a quella sopraccitata. In altre parole il posizionamento è avvenuto con le stesse modalità utilizzate nei modelli precedenti, considerando però la pista inferiore come un piano di massa. Analogamente è avvenuto il posizionamento per il secondo modello, questa volta considerando il livello della griglia come piano di massa, come si può vedere nella relativa immagine.

Conclusa l'assegnazione delle porte si è proseguito con la verifica di una corretta definizione della mesh.

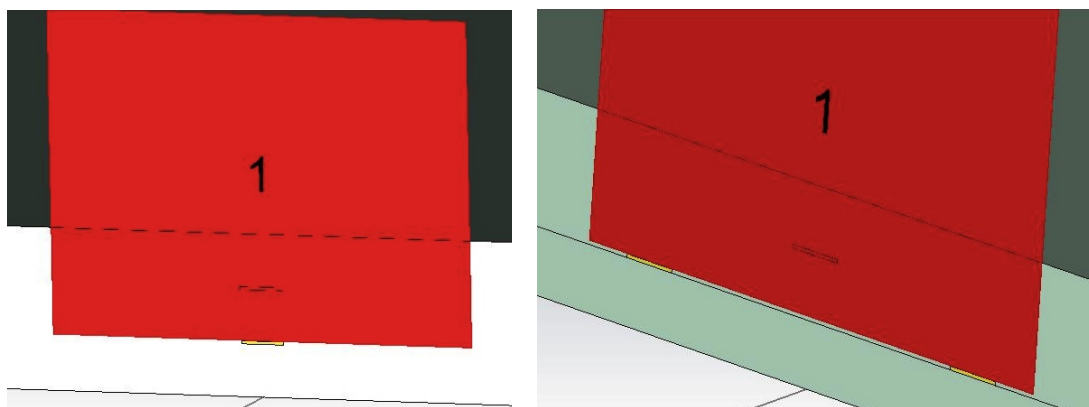


Figura 6.6: Collocazione delle porte su entrambi i modelli. Si noti nel secondo come la porta sia tangente in basso a due linee della griglia di massa.

Anche in questo caso sono stati sostanzialmente riconfermati i parametri utilizzati nei precedenti modelli ed illustrati nel quarto capitolo. Infatti la mancata modifica delle dimensioni riguardanti lo spessore dei substrati di materiale isolante e della larghezza delle piste non ha infranto il rispetto dei vincoli necessari alla corretta definizione della mesh. Analogo ragionamento è stato eseguito per l'impostazione delle condizioni al contorno, scegliendo anche in questo caso l'opzione *Open (Add Space)*.

Si è infine terminata la configurazione dei parametri di simulazione impostando i valori da monitorare:

- **campo elettrico e magnetico** a 2.4 e 4 GHz;
- **corrente di superficie** a 2.4 e 4 GHz;
- **profilo di irradiazione** a 2.4 e 4 GHz;

ed infine specificando la simmetria nei parametri S fra S_{11} e S_{22} .

6.4 Risultati della simulazione del primo modello

Prima di passare alla descrizione dei campi elettrico e magnetico nel modello è opportuno verificarne la disposizione nelle porte in guida d'onda. Da questo infatti si può capire se i risultati ottenuti possono essere considerati più o meno attendibili. Dalla visione delle immagini si può chiaramente verificare come i campi si propagano, in questo caso, secondo una modalità TEM, indice di un corretto funzionamento del processo di simulazione. La cosa è anche ulteriormente confermata dalla totale assenza di messaggi di errore all'interno dell'apposita finestra.

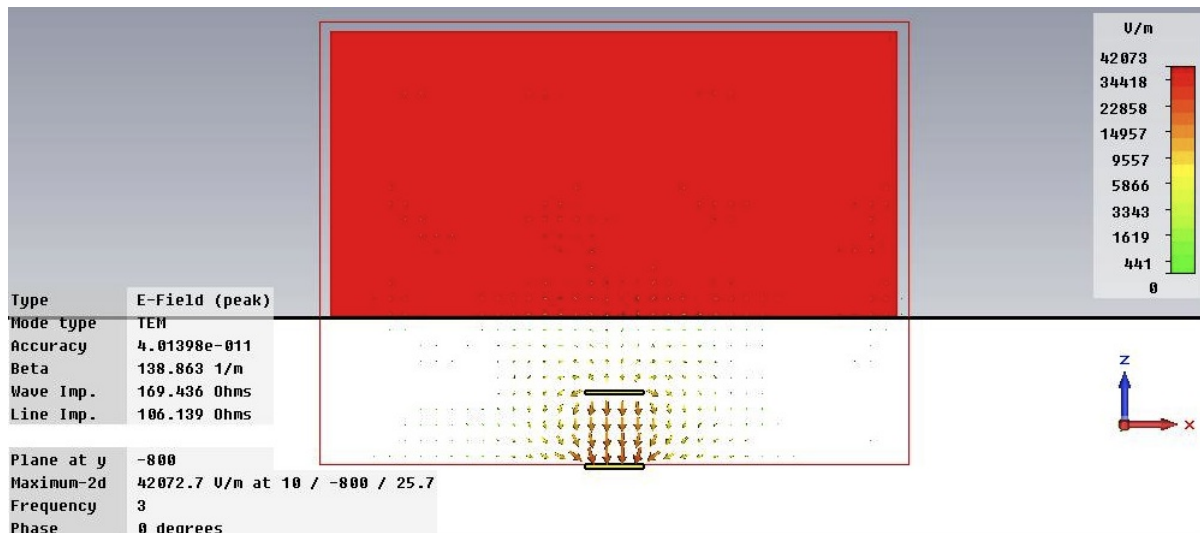


Figura 6.7: Disposizione del campo elettrico sulle porte in guida d'onda del primo modello.

Campo elettrico e magnetico

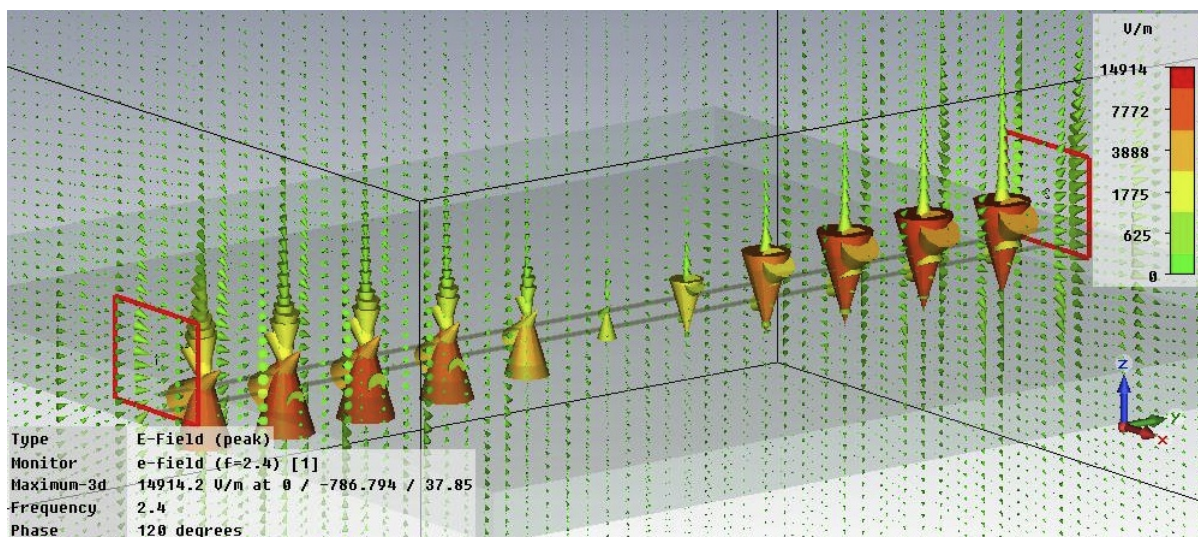


Figura 6.8: Disposizione del campo elettrico nel modello a 2.4 GHz.

Il campo elettrico è disposto perpendicolarmente fra le due piste che implementano un sistema identico ad un condensatore a facce piane parallele. L'intensità maggiore del campo viene assunta in corrispondenza dell'asse delle due piste, come viene confermato dall'immagine in cui si può notare come i coni più grandi

siano collocati proprio in quella regione. Anche in questo caso si possono facilmente immaginare le linee di campo, rettilinee nella porzione di spazio dove avviene la sovrapposizione delle piste e curvilinee man mano che ci si avvicina ai bordi e da questi ci si allontana. Come si può notare il campo elettrico è presente in forma più intensa nella regione appena descritta ma si espande comunque in maniera considerevole in tutto l'intorno del modello quasi come se le due piste formassero un unico conduttore che irradia il campo nello spazio circostante. Dall'immagine è anche possibile apprezzare il campo elettrico uscente dalla guida d'onda notandone la direzione perpendicolare rispetto al lato del modello su cui è stata posizionata la porta. La situazione appena descritta viene ampiamente confermata dalle immagini che riportano le zone

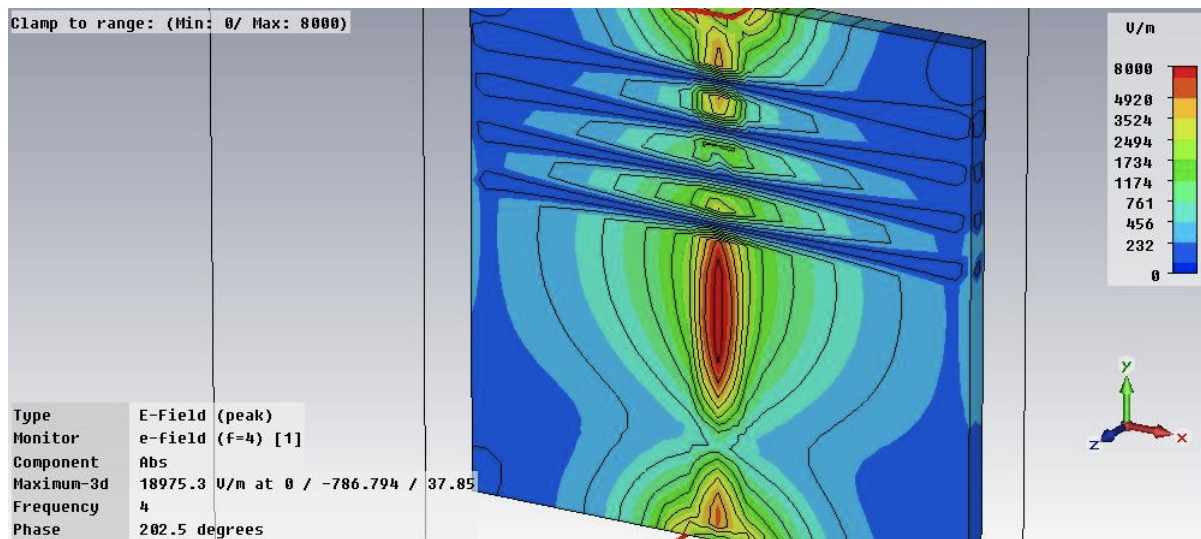


Figura 6.9: Disposizione del campo elettrico nel modello a 4 GHz; in evidenza le linee delimitanti le zone dove il campo assume lo stesso valore..

del modello in cui vi sono gli stessi valori di campo elettrico. Anche in questo caso si può osservare come l'intensità maggiore sia collocata al centro della pista e come l'irraggiamento circostante sia notevole. Oltre a questo vi sono alcuni dettagli di particolare interesse. Per prima cosa la disposizione del campo avviene sempre in quattro lobi, se si tralasciano i due estremi vicini alle porte e dovuti all'azione di queste; i lobi aumentano e diminuiscono di intensità ma non variano la loro posizione all'interno del modello. Di questi quattro lobi, quello più basso è il più esteso nel verso della pista, mentre gli altri tre sono notoriamente più corti per quanto riguarda la loro lunghezza. Dall'immagine si può inoltre notare come all'interno del lobo centrale venga raggiunto il valore di picco del campo elettrico; probabilmente a causa di questo fattore si deve la sua notevole estensione. Tutti e quattro i lobi si estendono ai lati delle piste per lunghezze approssimativamente uguali in cui si può notare un calo dell'intensità del campo in accordo ciò che ci si aspetterebbe. Ogni lobo infine è separato dal successivo da una piccola regione in cui si registra un minimo di intensità del campo; se osservato nell'insieme sembra che verticalmente il modello possa essere suddiviso in righe dove vi è l'alternanza fra la presenza e l'assenza del campo elettrico. Un'ultima particolarità riguarda il fatto che non vi è la presenza di una zona di minimo fra il lobo più grande e la porta in guida d'onda più vicina. Una disposizione del tutto analoga a quella appena illustrata per il campo elettrico si ritrova anche per il magnetico, disposto però ortogonalmente all'elettrico, come è del resto prevedibile grazie alle equazioni di Maxwell. Questa particolare disposizione dei campi si verifica sia per i 2.4 che per i 4 GHz. Dall'osservazione della loro evoluzione temporale non si riconosce però uno schema riconducibile all'effetto di sovrapposizione dei segnali creando un'onda stazionaria; questo fondamentalmente poiché soltanto i punti di minimo rimangono fissi nella stessa posizione nel modello e non quelli di massimo. Si tende quindi ad ipotizzare che la modalità con la quale si dispongono i campi sia dovuta alla particolare geometria e configurazione del modello e sia quindi svincolata dalla frequenza utilizzate nei segnali di test.

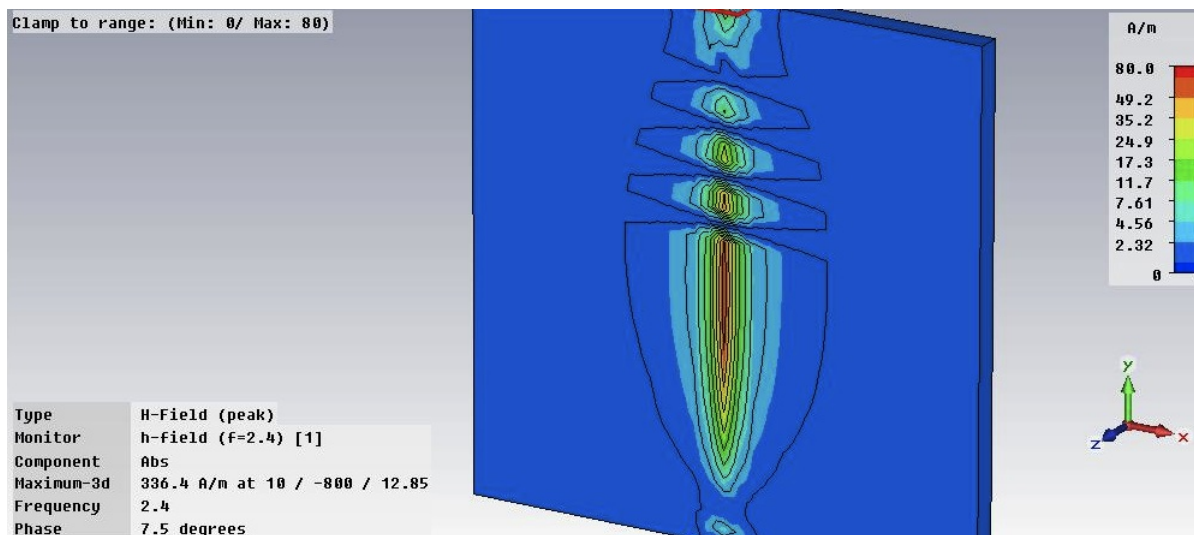


Figura 6.10: Disposizione del campo magnetico nel modello a 2.4 GHz.

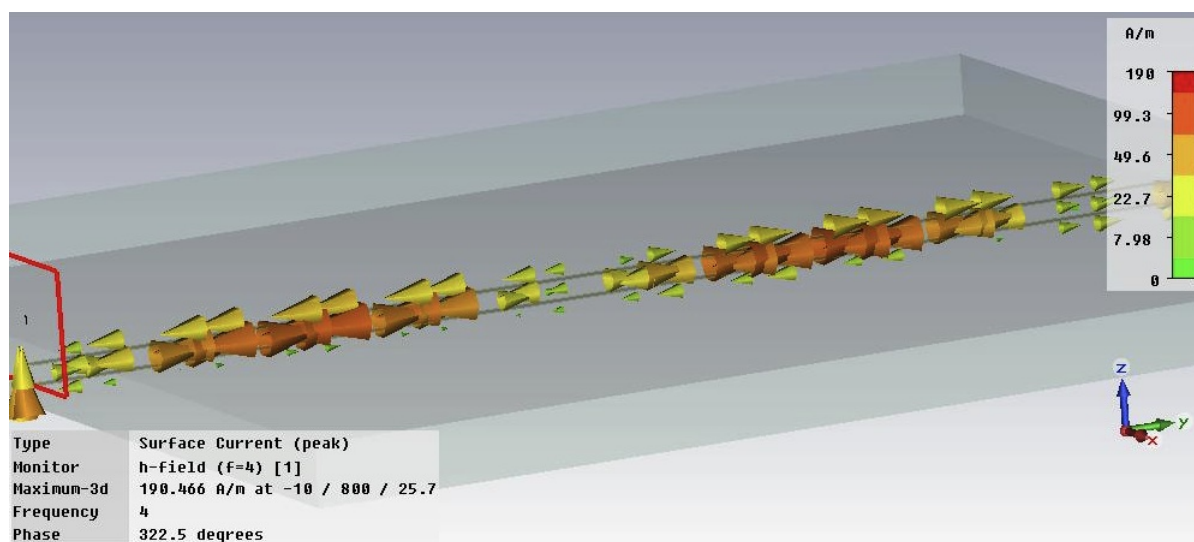


Figura 6.11: Disposizione delle correnti di superficie nel modello a 4 GHz.

Corrente di superficie

In questo modello la disposizione della corrente di superficie è abbastanza semplice dal momento che sono presenti soltanto due conduttori. Come si può vedere dall'immagine le correnti, evidenziate dai coni, scorrono sulle due piste. In alcuni punti è possibile notare coni orientati verso destra, intersecati con coni orientati verso sinistra; la cosa è dovuta al fatto che il software rappresenta sullo stesso spazio sia la corrente che scorre sulla pista superiore che quelle che scorre sulla pista inferiore. La cosa è dovuta alla vicinanza dei due conduttori ma rimane soltanto una rappresentazione grafica. Se infatti si ingrandisce una particolare regione delle due piste si può notare come le correnti siano effettivamente separate fra loro. È anche possibile apprezzare come le porte in guida d'onda mettano in comunicazione le due piste ai loro estremi. In queste regioni infatti le correnti non sono disposte parallelamente al piano contenente le piste ma ortogonalmente a questo. Viene quindi messo in evidenza il passaggio di corrente da una pista ad un'altra tramite i coni verticali. Un ulteriore conferma della descrizione effettuata si può avere

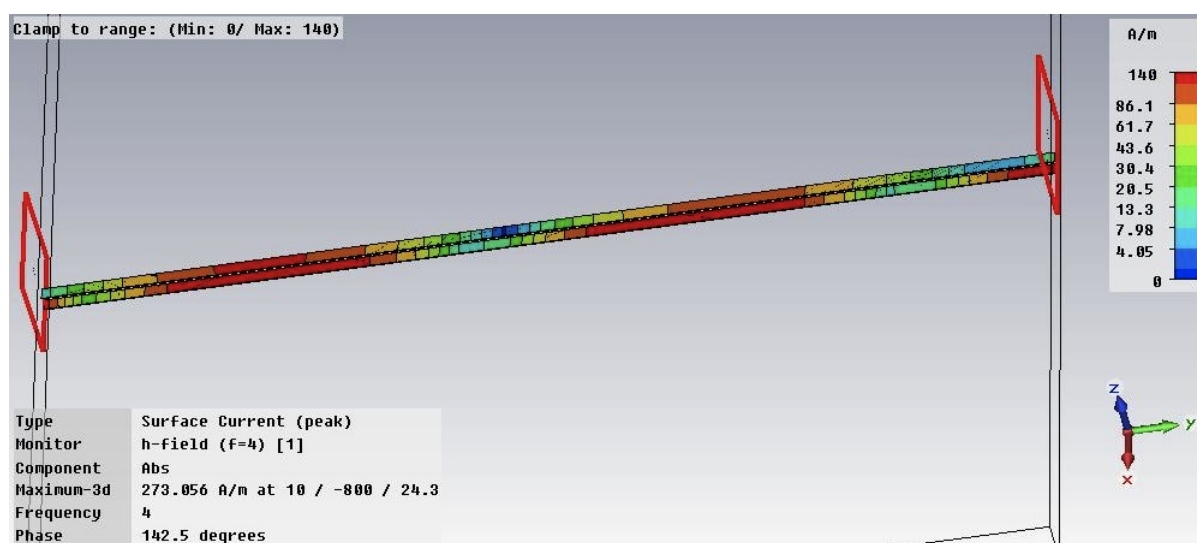


Figura 6.12: Disposizione delle correnti di superficie nel modello a 4 GHz; in evidenza le linee delimitanti le zone con la stessa intensità di corrente.

dall'immagine che raffigura la disposizione delle correnti evidenziando le zone in cui queste hanno gli stessi valori. Ancora una volta è possibile notare come il tutto sia contenuto soltanto nelle due piste.

Profilo di irradiazione

A 2.4 GHz il profilo di irradiazione presenta una forma quasi sferica poiché si può notare un leggero schiacciamento nella parte superiore ed inferiore in corrispondenza dell'asse z evidenziato in blu nell'immagine riportata. Si può notare anche la presenza di un incavo all'interno della sfera formato da due coni aventi il vertice nella prossimità del centro del modello. Questo incavo, che si estende in linea retta per tutto il volume della sfera e ne descrive quasi il diametro, è collocato in parallelo alle due piste, inglobandole all'interno del suo volume. Da una visione più ampia sembra quindi che le piste si comportino come un unico conduttore che irradia energia elettromagnetica nello spazio circostante tuttavia non in modo isotropico. Ipotizzando infatti di sezionare il profilo di irradiazione con dei piani ortogonali alla superficie di materiale isolante del conduttore si possono evidenziare delle zone con differente intensità di energia irradiata. Partendo da una delle due estremità del modello, quindi anche delle piste, e procedendo verso il centro si incontra dapprima una zona in cui vi è un minimo di irradiazione. Procedendo si può notare come il valore aumenti fino a raggiungere il suo massimo nella zona centrale in corrispondenza di metà modello. Le fasce appena descritte non hanno tuttavia geometria esattamente regolare poiché i bordi non seguono esattamente l'intersezione della superficie della sfera con l'insieme dei piani sopra citati. Il profilo di irradiazione presenta comunque un altissimo grado di simmetria, confermato anche dalle proiezioni effettuate sui piani Theta e Phi e visibili nei grafici riportati. In definitiva si può

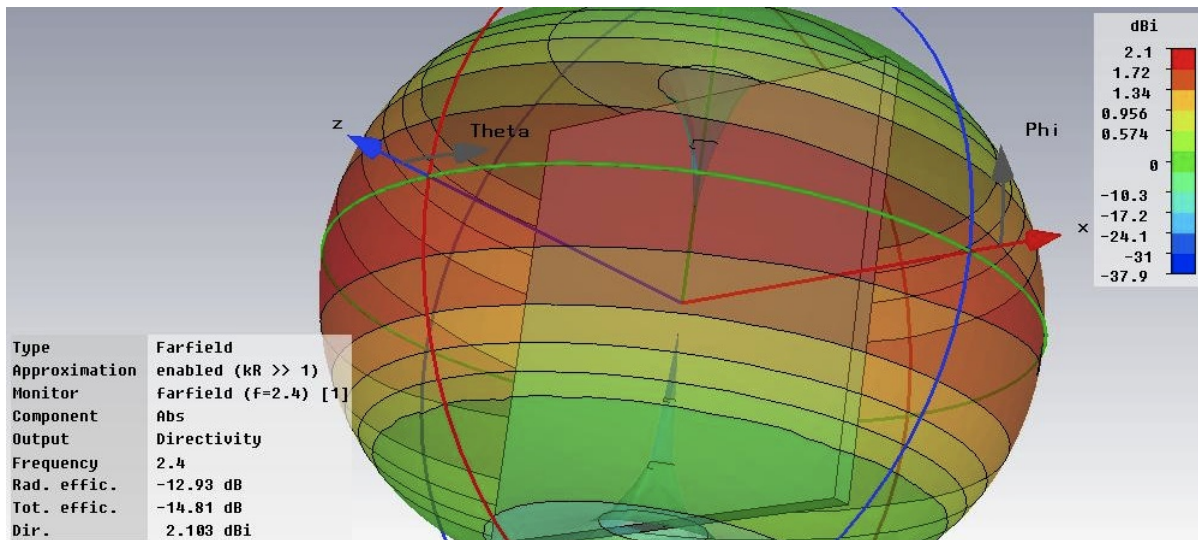


Figura 6.13: Profilo di irradiazione a 2.4 GHz.

quindi concludere che ai fini della compatibilità elettromagnetica bisognerà porre particolare attenzione a quella zona che si estende radialmente dal modello, dal punto di vista geometrico radialmente all'asse y , e che è situata a metà della sua lunghezza. A 4 GHz invece il profilo di irradiazione si presenta più

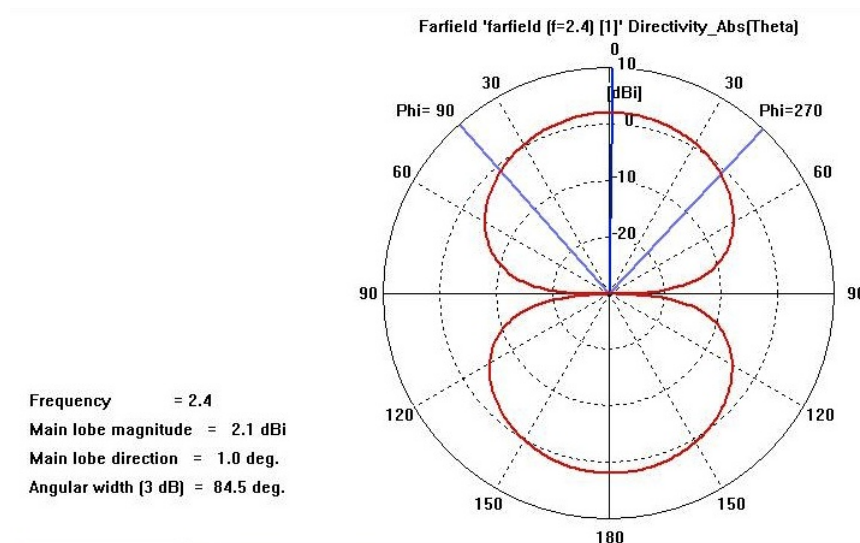


Figura 6.14: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Theta.

elaborato. Geometricamente sembra composto da due sezioni di forma quasi toroidale sovrapposte. Ogni toro è inoltre caratterizzato da una particolare geometria dell'incavo interno in quanto questa presenta un raggio decrescente che fa sì che l'incavo abbia la forma di un cono. Le due figure toroidali principali sono disposte ortogonalmente rispetto alla superficie più ampia del substrato di materiale isolante; il loro asse quindi coincide con l'asse y del sistema di riferimento. Il piano dove avviene la giunzione delle due figure è situato esattamente sulla metà del modello; pertanto anche in questo caso è possibile rilevare un altissimo grado di simmetria nel profilo. La cosa viene inoltre sottolineata dai grafici riportanti le proiezioni sui piani Theta e Phi del profilo dai quali si può constatare come questo sia composto, nonostante la forma toroidale da quattro lobi principali nei quali c'è la presenza del massimo irradiazione di energia. Tornando alla visione tridimensionale la superficie laterale dell'intero diagramma può essere suddivisa

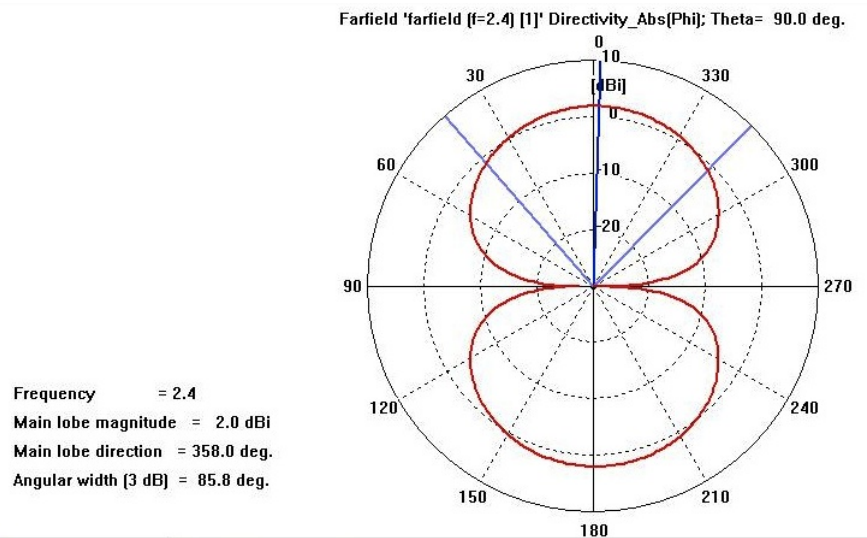


Figura 6.15: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Phi.

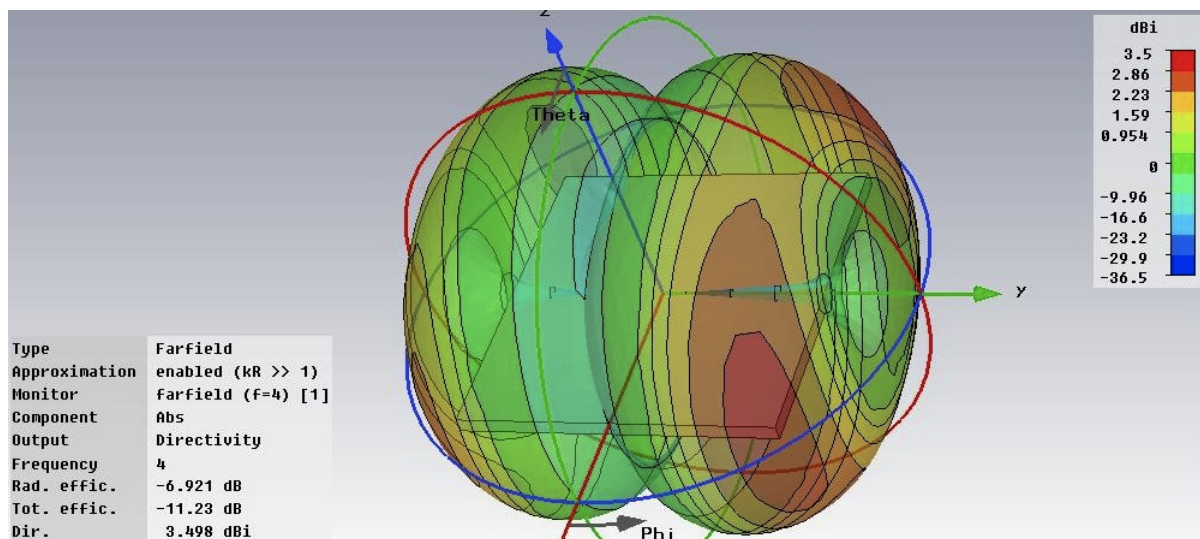


Figura 6.16: Profilo di irradiazione a 4 GHz.

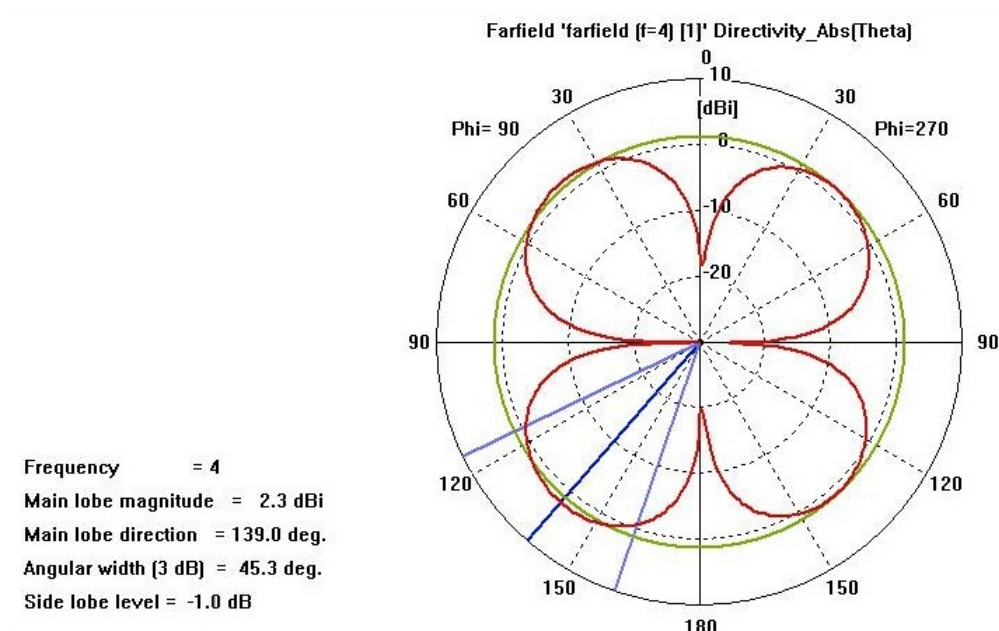


Figura 6.17: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Theta.

in più fasce, ognuna caratterizzata da una differente intensità di energia elettromagnetica irradiata. La cosa non vale tuttavia per tutte le fasce del profilo; se infatti si considerano le due esterne si possono individuare alcune particolarità. Queste fasce infatti presentano al loro interno un'ulteriore simmetria delle regioni di irradiazione, particolarmente evidente rispetto all'asse z nelle zone colorate di rosso e arancione. In definitiva si possono quindi individuare quattro zone del profilo, evidenziate in rosso, particolarmente interessanti per la compatibilità magnetica. Queste sono localizzabili in corrispondenza dei quattro spigoli del modello quasi come se si espandessero dalle estremità delle due diagonali che tagliano il substrato di forma quadrata.

6.5 Risultati della simulazione del secondo modello

Anche per questo modello, dopo aver terminato la simulazione è stata controllata la disposizione dei campi all'interno delle porte in guida d'onda. Si è così potuto appurare la buona riuscita della simulazione verificando che i campi elettrico e magnetico nella porta fossero propagati secondo la modalità quasi TEM.

Campo elettrico e magnetico

La disposizione del campo elettrico è in questo modello leggermente differente rispetto a quella che si può trovare negli altri e la cosa è dovuta al fatto che non vi è al di sotto della pista principale una regione uniforme di materiale conduttore con la funzione di piano di massa. Le linee di campo partono infatti dalla pista principale e terminano sul materiale conduttore che compone le maglie della griglia. Vi è tuttavia una disposizione particolare poiché le linee tendono a richiudersi prevalentemente sulle componenti verticali della griglia, parallele alla pista principale, piuttosto che su quelle orizzontali. Si possono quindi osservare una massiccia quantità di linee di campo che partendo dalla destra e dalla sinistra della pista descrivono percorsi obliqui prima di terminare sulla griglia di massa. Per questo motivo, dal momento cioè che non si ritrovano mai due conduttori con le facce allineate parallelamente, si può anche osservare come la traiettoria che descrivono le linee non sia mai perfettamente rettilinea ma sempre curva. L'effetto tuttavia si può notare soltanto per una ristretta regione nei dintorni della pista principale e coinvolge prevalentemente soltanto una linea di maglia verticale della griglia a destra della pista sopra citata e una a sinistra. La cosa è perfettamente in linea con le leggi che regolano il comportamento del campo elettrico e che determinano il valore della sua intensità in funzione della distanza dalla sorgente;

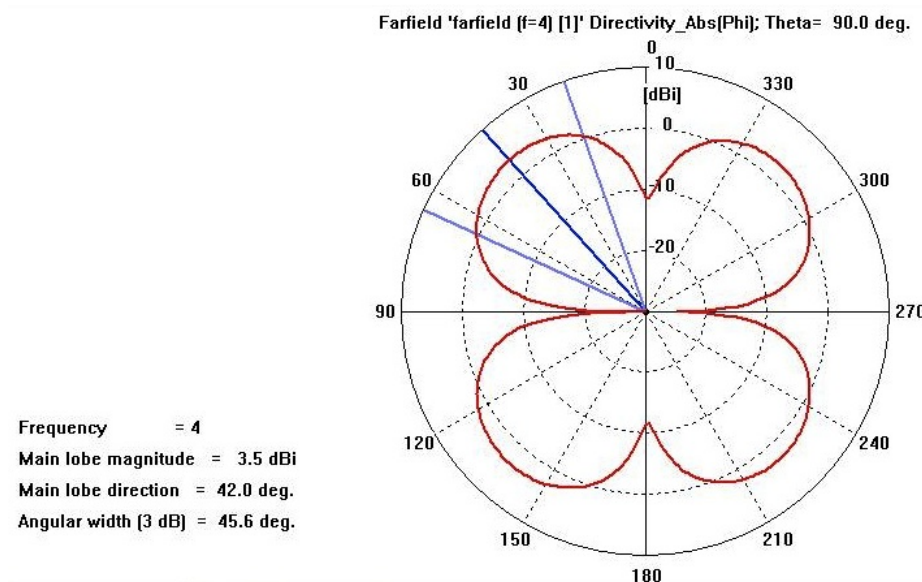


Figura 6.18: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Phi.

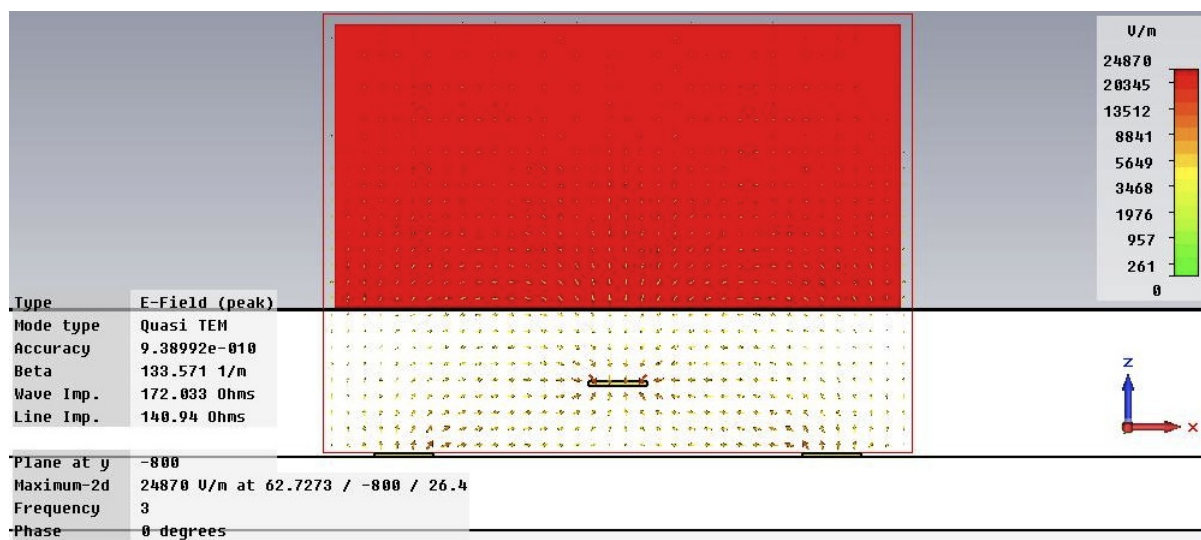


Figura 6.19: Disposizione del campo elettrico nelle porte in guida d'onda.

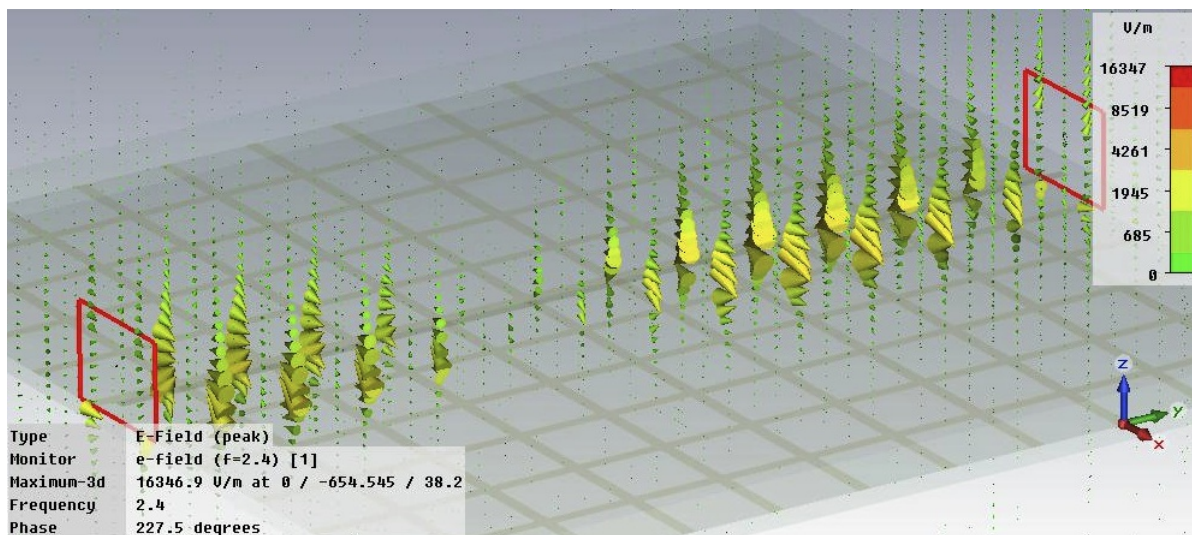


Figura 6.20: Disposizione del campo elettrico nel modello a 2.4 GHz.

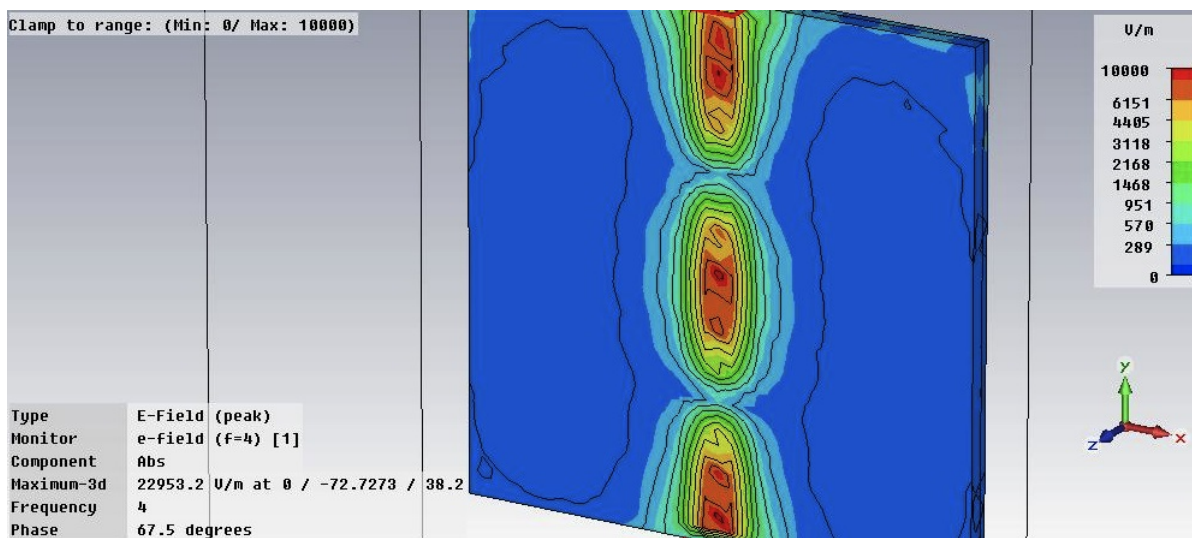


Figura 6.21: Disposizione del campo elettrico nel modello a 4 GHz; in evidenza le linee delimitanti le zone dove il campo assume lo stesso valore.

le altre linee verticali della griglia sono purtroppo troppo lontane dalla pista principale per poterne apprezzare l'effetto. La particolare disposizione delle linee del campo è riportata, come in sezione, anche nell'immagine che raffigura la propagazione nella porta in guida d'onda; la figura risulta particolarmente significativa come rappresentazione della descrizione data. Dall'analisi delle immagini che raffigurano il campo evidenziandone le zone con lo stesso potenziale, si può invece notare come le intensità maggiori vengano registrate sulla pista e nei suoi dintorni. Le linee che delimitano le zone con lo stesso potenziale sono caratterizzate dall'aver i bordi dalla forma abbastanza squadrata e talvolta irregolare nell'intorno della pista principale e più curvilinei man mano che da essa ci si allontana. La cosa si può rilevare per tutti i valori che assume il campo ed è imputabile alla presenza della griglia che definisce in modo netto e preciso le zone in cui le linee possono convergere con una conseguente influenza diretta della disposizione del potenziale. Oltre a questo quando il campo elettrico assume il valore massimo si può notare la comparsa, ai lati della pista, di due nuove regioni dalla forma ovale e dai bordi irregolari con un diverso potenziale rispetto allo spazio circostante. La disposizione del campo magnetico è analoga a quella descritta per l'elettrico, ad eccezione della sua direzione di propagazione che è perpendicolare rispetto a quella precedentemente vista. Ulteriori analogie si ritrovano anche nei grafici che raffigurano le zone in cui il modulo del campo magnetico è uguale. In questo caso tuttavia le linee che delimitano tali regioni descrivono forme meno squadrate, ad eccezione di quelle più esterne che presentano anche una maggiore irregolarità nei bordi. Tutte le osservazioni fatte sono valide sia osservando i campi sia a 2.4 che a 4 GHz.

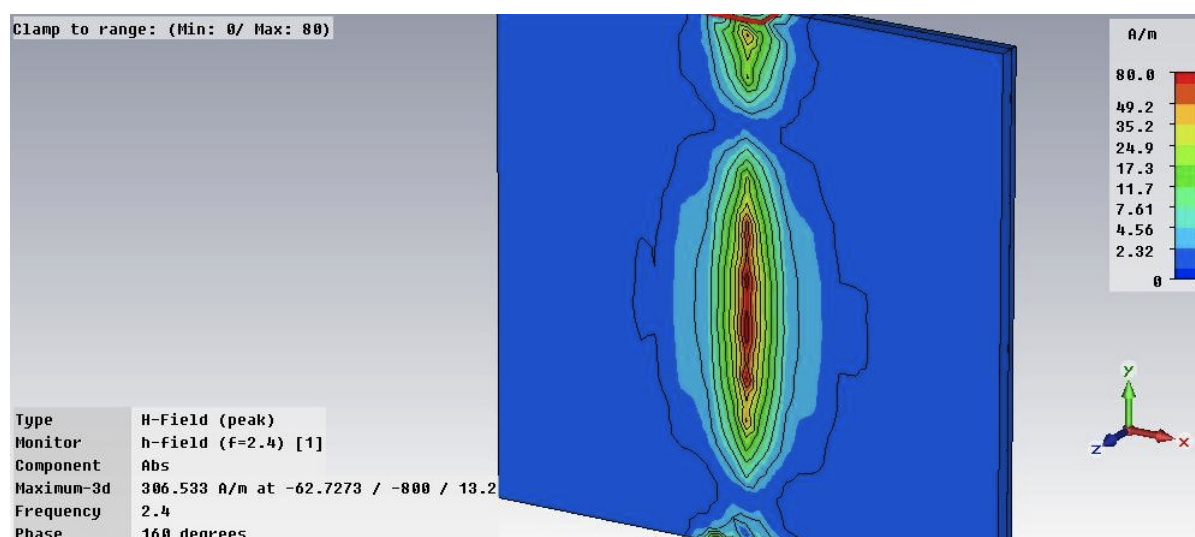


Figura 6.22: Disposizione del campo magnetico nel modello a 4 GHz; in evidenza le linee delimitanti le zone dove il campo assume lo stesso valore.

Corrente di superficie

Le correnti sono disposte principalmente lungo la pista e lungo le maglie della griglia nei dintorni di essa, come ci si può aspettare dal fatto che la corrente tende a disporsi, nei dispositivi che fungono da piano di massa, sempre al di sotto del conduttore principale sovrastante. Come si può notare dall'immagine l'intensità di corrente presente sulla pista è maggiore rispetto a quella che si può ritrovare sulla griglia; ciò è dovuto al fatto che nel secondo caso sono presenti più vie attraverso le quali la corrente può richiudersi. Da un'osservazione più approfondita è possibile notare la presenza di corrente su tutte le maglie della pista anche se con intensità fortemente decrescente man mano che ci si allontana dalla proiezione della pista principale. Nella griglia la corrente utilizza principalmente le linee verticali per richiudersi come è evidenziato dalla disposizione dei coni che la rappresentano, tutti ben allineati in un'unica direzione. Diversamente quando incontra i segmenti orizzontali di congiunzione, la corrente tenta di passare da un conduttore verticale all'altro, alterando, seppur brevemente il suo flusso ordinato influenzato anche dai campi presenti. È infatti possibile notare, in particolare all'interno dei segmenti

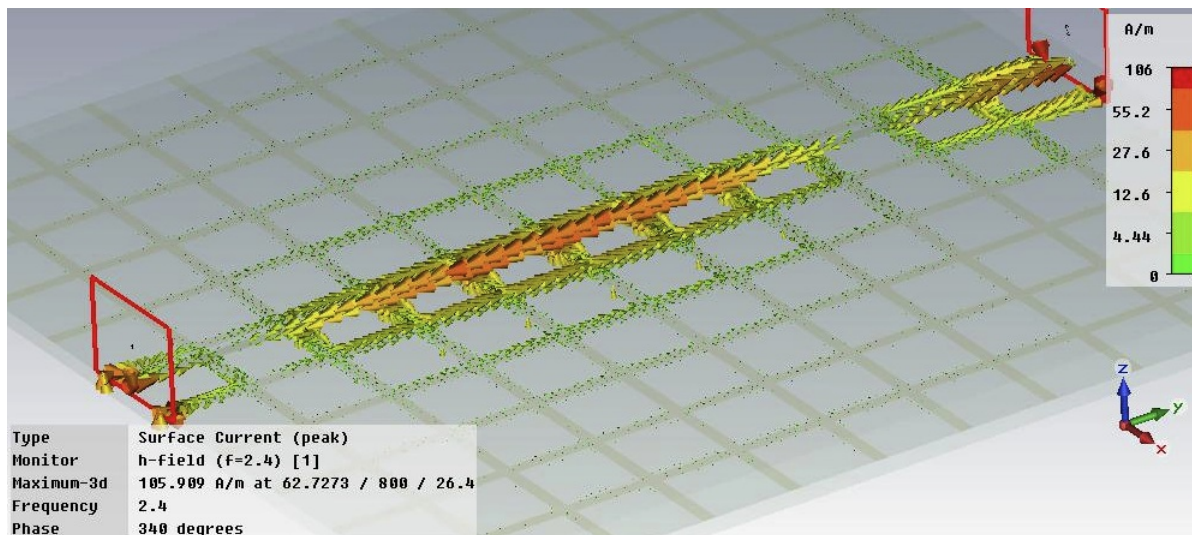


Figura 6.23: Disposizione delle correnti di superficie nel modello a 2.4 GHz.

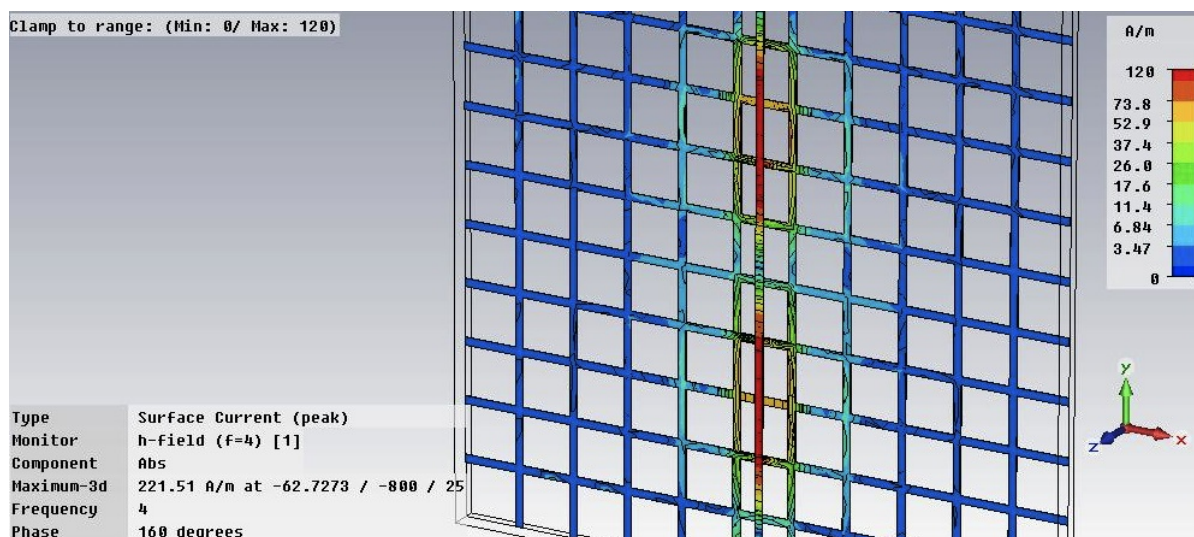


Figura 6.24: Disposizione delle correnti di superficie nel modello a 4 GHz; in evidenza le linee delimitanti le zone con la stessa intensità di corrente.

orizzontali sottostanti la pista principale, come vi siano tre principali disposizioni del flusso di elettroni che costituiscono la corrente. Nella raffigurazione alcuni coni sono infatti orientati o verso destra o verso sinistra e rappresentano quella parte di corrente che passa da una linea verticale all'altra. Altri coni, localizzabili prevalentemente al centro dei segmenti, sono invece orientati parallelamente al verso della pista principale; la cosa è dovuta al fatto che il verso preferenziale di scorrimento della corrente è quello verticale, come accade nella pista sovrastante. Il terzo gruppo di coni è invece orientato verso l'altro, perpendicolarmente ai piani che contengono i due differenti conduttori. La cosa è dovuta al fatto che la corrente tenderebbe sempre a scegliere la via a minore impedenza per la sua chiusura; nello specifico si può notare il tentativo di attraversare lo strato di materiale isolante. Quanto descritto trova ulteriore conferma nelle immagini che illustrano le zone del modello con la stessa intensità, in modulo, di corrente. Anche in queste figure si può apprezzare come la propagazione avvenga in tutta la griglia anche in zone lontane dalla pista principale.

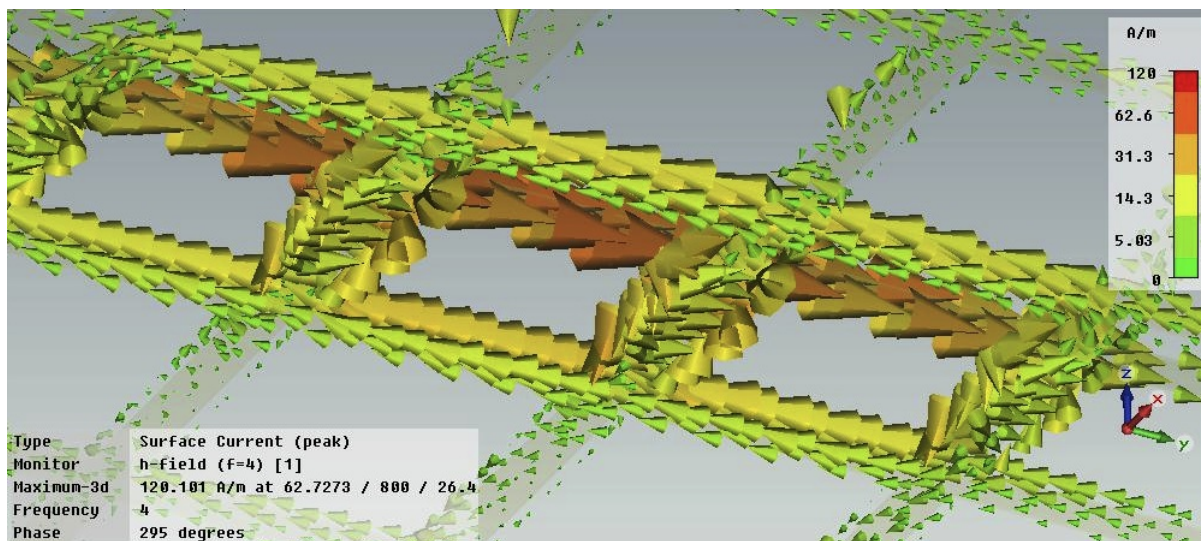


Figura 6.25: Dettaglio della distribuzione delle correnti sulla griglia di massa.

Profilo di irradiazione

A 2.4 GHz il profilo di irradiazione presenta una forma che ricorda un ellissoide, è infatti leggermente schiacciato sulla parte superiore e allungato ai lati. Il lobo superiore è caratterizzato dall'estendersi maggiormente a destra e a sinistra, piuttosto che verso l'alto e il basso, evidenziano una buona simmetria rispetto alla pista principale. Il bordo inferiore, a livello cioè del substrato ricalca la stessa forma ellittica del profilo ad eccezione di una rientranza significativa in corrispondenza dell'estremo inferiore della pista principale. Al di sotto del substrato il profilo è caratterizzato dalla presenza di un'altro lobo di irradiazione di estensione però inferiore rispetto a quello superiore, come si può anche vedere nei diagrammi che riportano le proiezioni del profilo sui piani Theta e Phi. Per quanto riguarda invece l'intensità con cui l'energia elettromagnetica viene irradiata nello spazio circostante si può notare come il profilo sia suddivisibile, nella parte superiore, in regioni di forma ellittica, ognuna caratterizzata da un particolare livello di irradiazione. Le regioni citate sono contenute una dentro all'altra; partendo dal basso, in prossimità del piano del substrato, si hanno le zone con meno irradiazione e salendo verso l'alto questa aumenta sempre di più. La zona di maggiore interesse, contrassegnata in rosso nel diagramma e di forma ellittica, si trova sulla sommità del profilo, leggermente spostata in avanti ed abbastanza estesa sia a destra che a sinistra rispetto all'asse blu di riferimento. Per questo motivo è bene porre particolare attenzione a tutti quei congegni elettronici che, trovandosi al di sopra del modello, potrebbero risentire dei disturbi irradiati. Al contrario il lobo al di sotto del modello, pur estendendosi nello spazio non presenta zone dove l'irradiazione di energia raggiunga valori particolarmente significativi. La cosa è in parte dovuta alla geometria del modello e alla sua interazione con la frequenza dei 2.4 GHz alla quale è stato stimolato ma anche all'azione schermante della griglia di massa. A 4 GHz il profilo ha

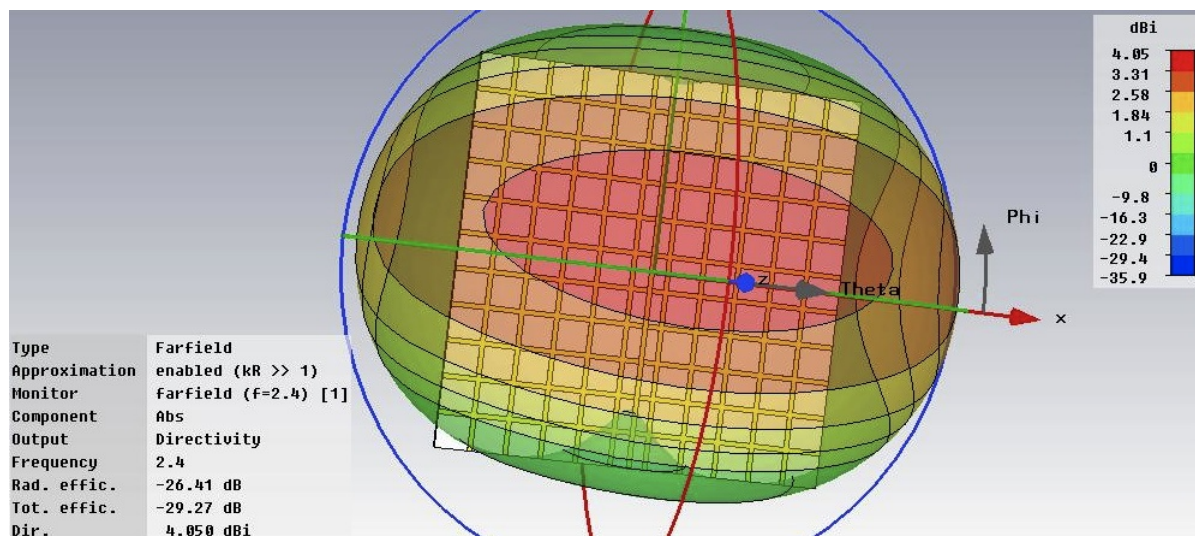


Figura 6.26: Profilo di irradiazione a 2.4 GHz.

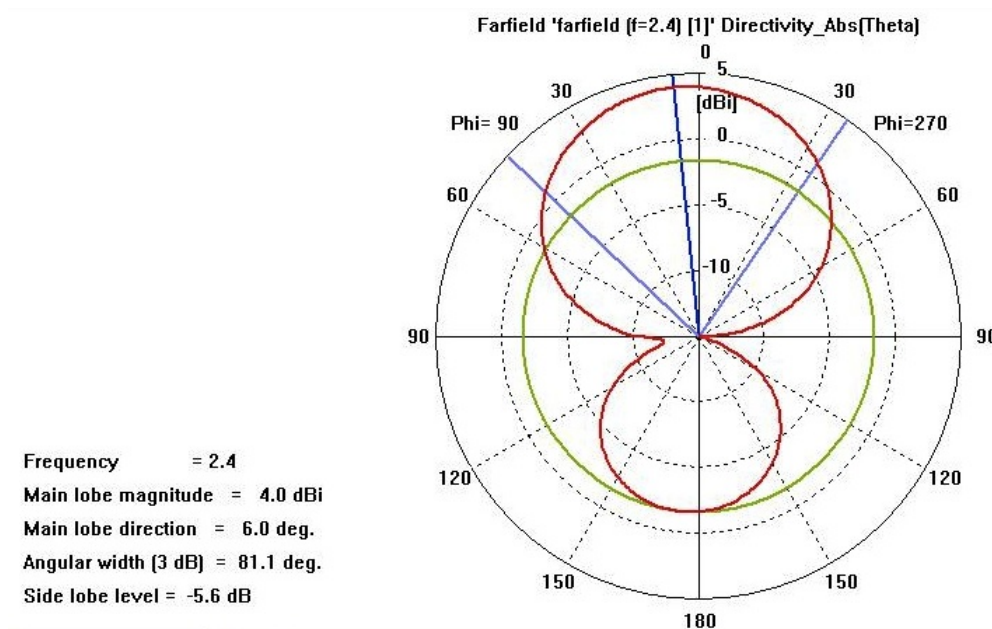


Figura 6.27: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Theta.

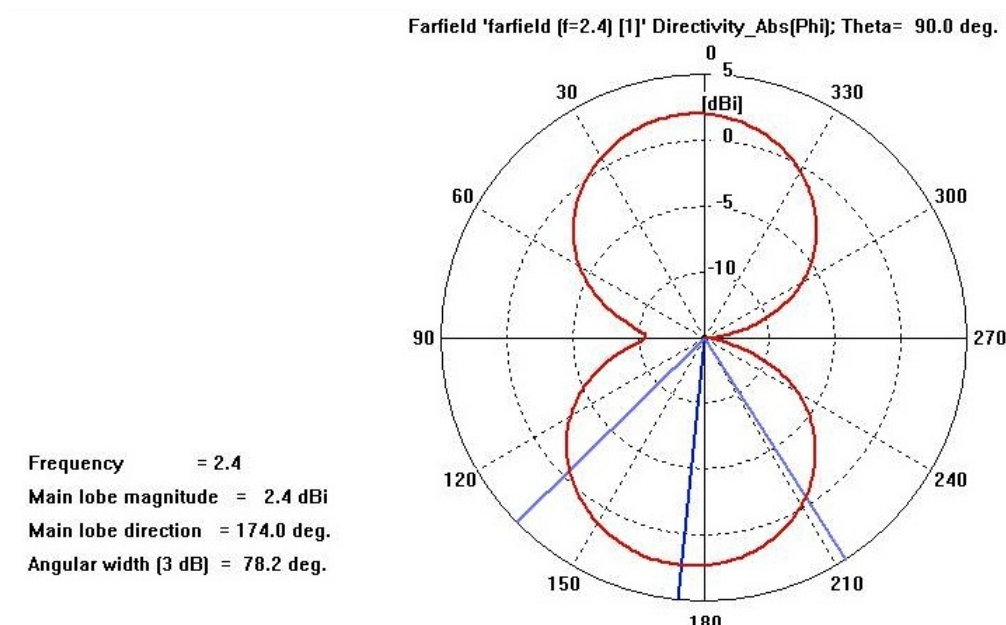


Figura 6.28: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Phi.

una forma del tutto simile a quella descritta per il modello precedente. Anche in questo caso è formato dall'unione di due solidi aventi forma approssimativamente toroidale, con una evidente deformazione sulla parte superiore dove inizia l'incavo interno. In questa regione infatti è come se i due solidi avessero subito una curvatura verso l'asse x poiché la superficie presenta una tipica forma a sella. I due solidi tuttavia presentano una regione di intersezione molto più sviluppata rispetto al modello precedente, tanto che la zona centrale si potrebbe quasi confondere con un cilindro con due rientranze in corrispondenza della superficie laterale. Il profilo è suddivisibile, anche in questo caso, con delle fasce radiali rispetto all'asse x , che delimitano le zone dove vi è una differente irradiazione di energia. In aggiunta alla suddivisione appena descritta si nota la presenza di quattro regioni in corrispondenza degli angoli del substrato, geometricamente autonome rispetto alla descrizione appena data, in cui sono presenti quattro massimi di irradiazione. Queste zone sono particolarmente riconoscibili sia dalla loro posizione che dalla

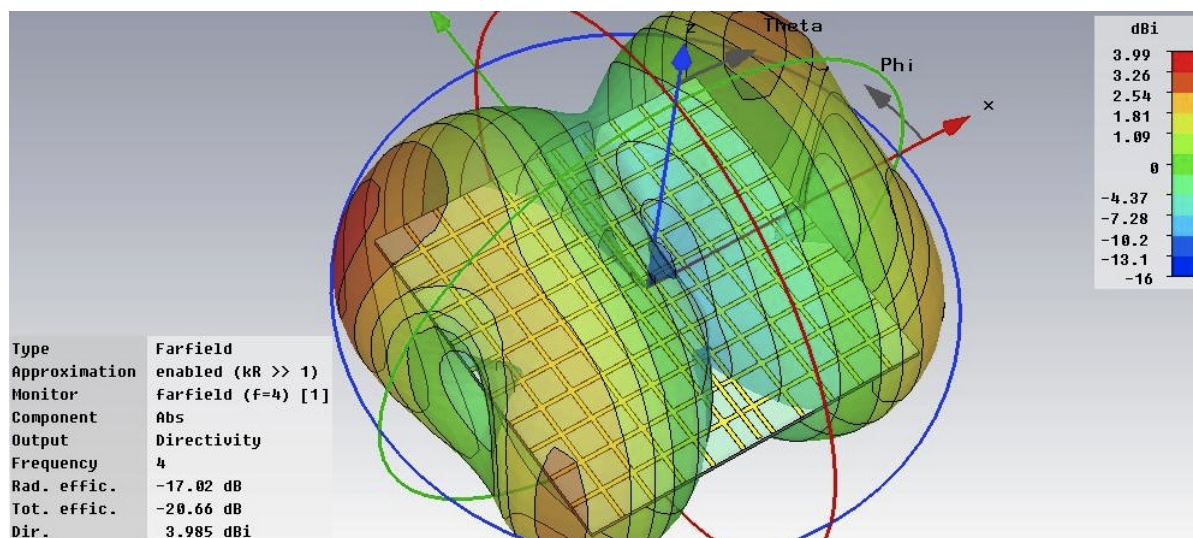


Figura 6.29: Profilo di irradiazione a 4 GHz.

colorazione arancione scuro o rossa e sono particolarmente evidenti anche nei grafici che rappresentano le proiezioni del profilo sui piani Theta o Phi. Sempre da questi si può anche vedere come il lobo che irradia maggiormente sia quello in basso a sinistra se si orienta in avanti l'asse x . Sempre dai grafici sopra citati si può anche vedere come il profilo, pur mantenendo approssimativamente la stessa forma, si estenda maggiormente nella parte superiore rispetto a quella inferiore, evidenziando anche in questo caso l'azione parzialmente schermante della griglia di massa.

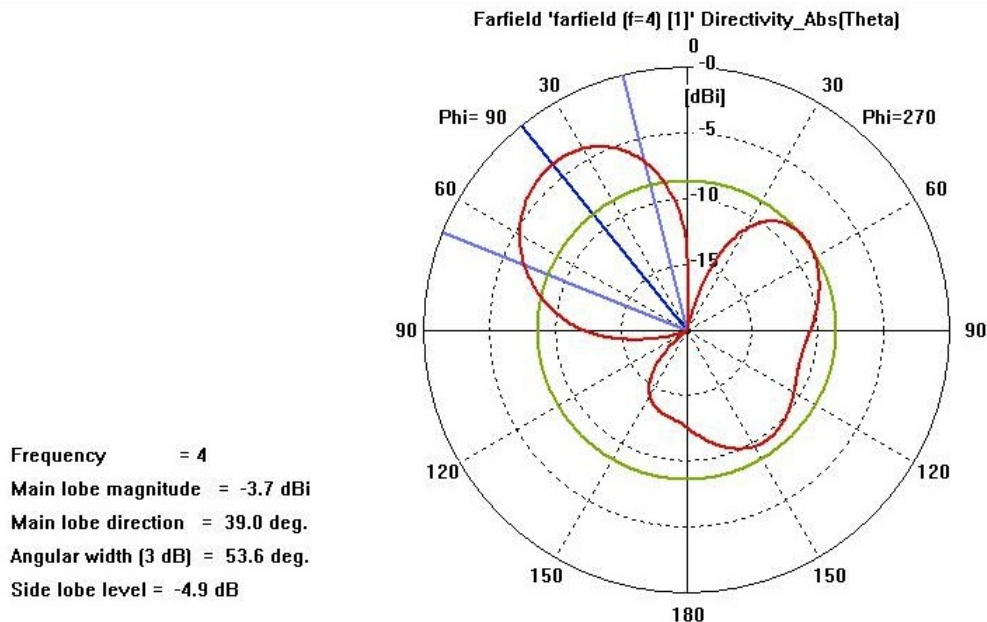


Figura 6.30: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Theta.

6.6 Osservazioni

I due modelli sono stati costruiti impostando le stesse dimensioni per le componenti omologhe: ciò permette di poter eseguire un confronto sui risultati ottenuti in modo da individuare analogie e differenze. Per prima cosa si può notare che i campi si propagano nel primo modello secondo la modalità TEM e nel secondo invece secondo la modalità quasi TEM. La cosa è dovuta al fatto che il primo modello presenta una simmetria perfetta fra la pista e ciò che funge da piano di massa per cui i campi, non risentendo di nessuna disomogeneità strutturale possono disporsi secondo uno schema molto più regolare. La disposizione dei campi nei due modelli risulta abbastanza simile per quanto riguarda la posizione; le regioni di massimo sono infatti sempre collocate al di sopra della pista principale e le estensioni spaziali sono caratterizzate da un alto grado di simmetria. Si possono però notare parecchie differenze sia nella forma delle linee di campo: a volte più squadrate, a volte più curvilinee, sia nella disposizione. Nel primo modello infatti le linee si estendono fino alle estremità del substrato evidenziando inoltre grazie ai colori la presenza di elevate differenze di potenziale; nel secondo modello invece l'estensione del campo è molto più contenuta. Anche la disposizione delle correnti è simile per i due modelli a cominciare dalla disposizione lungo le piste principali. Oltre a ciò anche nelle strutture che fungono da piano di massa si può notare una buona somiglianza in quanto la corrente, nel secondo modello, tende ad imitare il comportamento che ha nel primo: preferisce infatti cercare una via di chiusura nelle piste verticali della griglia.

Nei profili di irradiazione si possono infine osservare parecchie analogie nella forma dei grafici calcolati per le medesime frequenze. Questo fa supporre che la forma geometrica del profilo sia fortemente correlata alle dimensioni e alla geometria generale dei modelli oltre che alle frequenze dei segnali con cui questi vengono sollecitati. Nonostante però la struttura generale sia pressoché identica nei due casi, si possono notare delle piccole ma significative differenze, come ad esempio le diverse intensità di irradia-

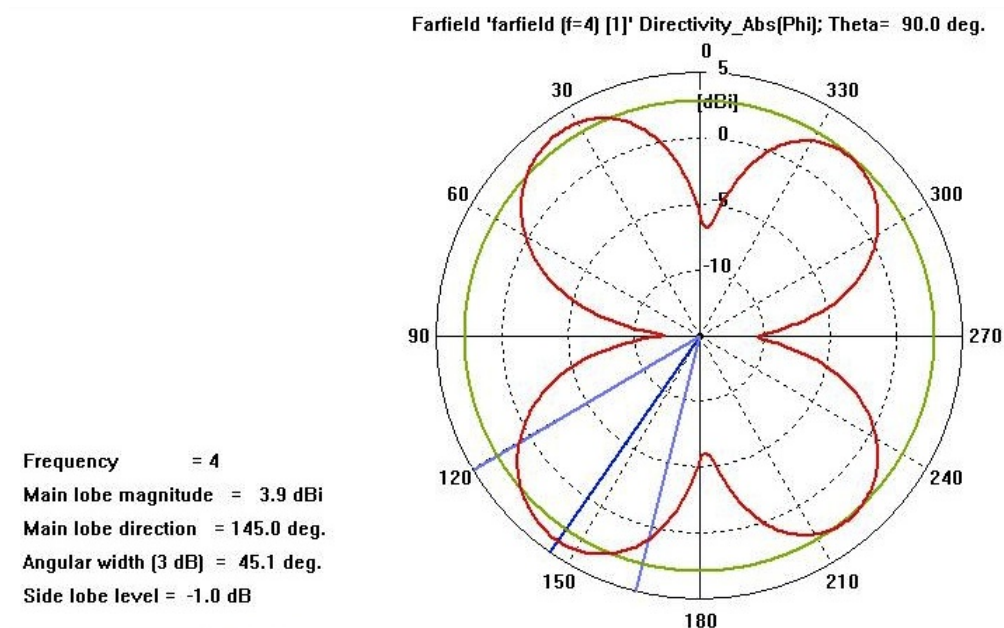


Figura 6.31: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Phi.

zione nelle stesse zone, che vengono provocate da componenti presenti in un modello e assenti nell'altro. Oltre a questo è fondamentale osservare che i profili del secondo modello sono caratterizzati dall'aver una maggiore attenuazione nella parte sottostante al substrato, fenomeno sicuramente correlato con la presenza di una griglia metallica avente le maglie più strette delle lunghezze d'onda dei segnali utilizzati in fase sollecitazione durante la simulazione.

Capitolo 7

Microstrip con bordo di massa

7.1 Descrizione

I modelli che verranno a breve esaminati sono entrambi composti dalla stessa struttura, analoga a quella vista nei capitoli precedenti. Riproducono cioè una scheda elettronica avente una pista e un dispositivo che funge da piano di massa separati da vari livelli di materiale isolante. In entrambi i casi, invece di un piano intero, si è creato un semplice bordo di massa costeggiante il perimetro del modello. Oltre a questo nel secondo modello viene collocata una pista nello spazio vuoto circoscritto dal bordo di massa; questa è priva di qualsiasi connessione con altri elementi circuitali e simula una linea attraverso la quale si può far giungere dall'esterno un segnale alla scheda. La configurazione creata, anche se può sembrare insolita, viene spesso utilizzata in quanto si adopera la pista al livello del piano per la trasmissione di segnali il cui uso non è frequente, come per esempio accade per il comando di reset.

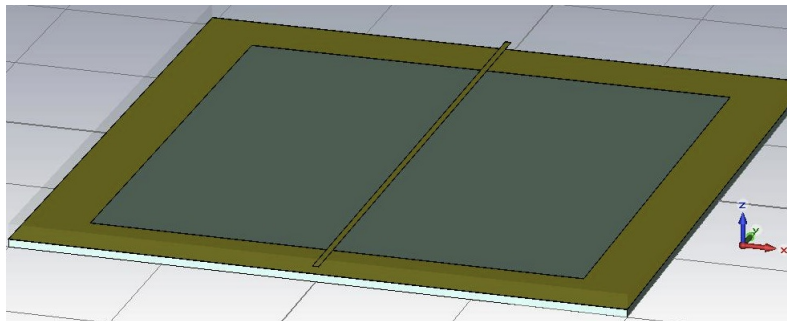


Figura 7.1: Modello con bordo di massa.

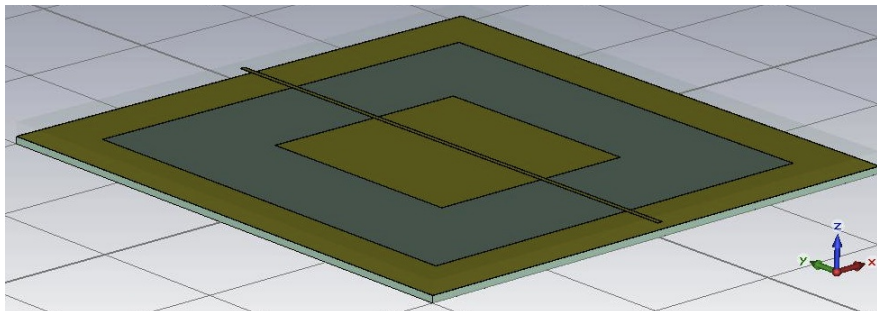


Figura 7.2: Modello con bordo di massa e pista centrale.

7.2 Costruzione dei modelli CAD

Verrà ora descritta la procedura e gli accorgimenti adottati durante la costruzione CAD dei modelli. Anche in questo caso si sono sfruttati al massimo gli strumenti messi a disposizione dal software, in particolare i due modelli sono completamente scalabili grazie ad un'efficiente parametrizzazione.

Bordo di massa

Prima di procedere con la costruzione del modello si è provveduto a schematizzarlo estrapolandone i parametri necessari alla rappresentazione, inseriti successivamente nell'apposito menù dove sono riportate, fra parentesi, le misure in (*mil*) e (*mm*):

- (1.4) (0.036) **str_h**: rappresenta lo spessore della pista principale;
- (10) (0.25) **str_w**: rappresenta metà della larghezza della pista principale;
- (1.4) (0.036) **strip_h**: rappresenta lo spessore del bordo di massa;
- (200) (5.08) **strip_lx**: rappresenta la larghezza del bordo di massa sui lati del modello perpendicolari all'asse *x*;
- (200) (5.08) **strip_ly**: rappresenta la larghezza del bordo di massa sui lati del modello perpendicolari all'asse *y*;
- (25) (0.64) **sub_h**: rappresenta lo spessore di uno strato di materiale isolante;
- (1000) (25.40) **sub_w**: rappresenta metà della larghezza del modello che è stato scelto con una forma quadrata per ragioni di simmetria.

I nomi evidenziati mediante un diverso carattere indicano l'abbreviazione attribuita nel menù dei parametri del simulatore. Oltre a quelli sopra elencati è presente, anche in questo caso, il parametro **bound** avente la stessa funzione descritta nei capitoli precedenti.

La costruzione del modello CAD è stata effettuata livello per livello, a cominciare dal più basso. Per pri-

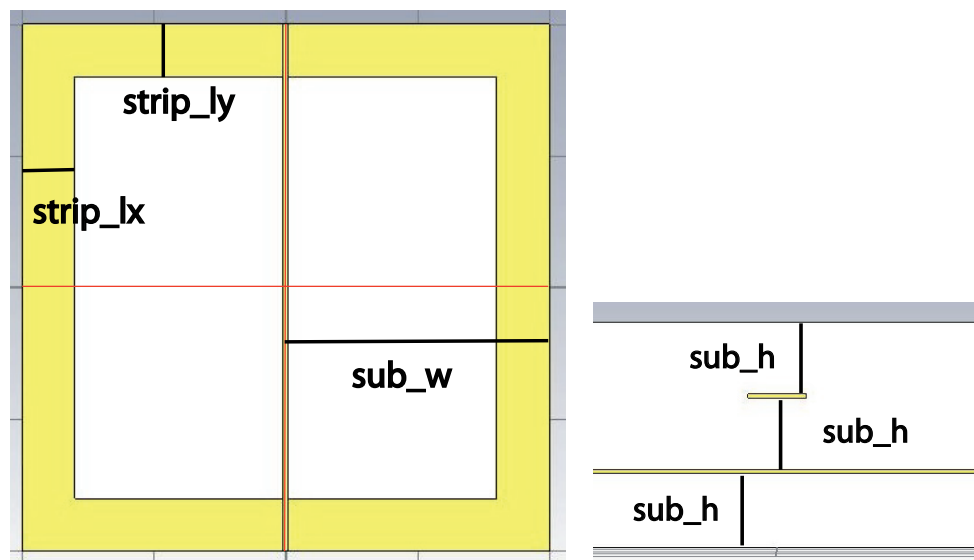


Figura 7.3: Schema del primo modello con evidenziazione dei parametri.

ma cosa si è creato uno strato di materiale isolante avente forma quadrata, invocando il comando *Object - Basic Shapes - Brick*. Si è scelto subito di inserire, direttamente all'interno dei menù, le coordinate cartesiane del solido, espresse mediante i parametri precedentemente inseriti. Lo strato di materiale isolante è stato collocato nello spazio 3D in modo da svilupparsi in larghezza e lunghezza sul piano *xy* e in altezza

secondo l'asse z partendo dalla coordinata $z = 0$. Si è quindi proceduto con la creazione di un altro parallelepipedo, identico al primo nell'estensione ma molto più sottile, rappresentante un piano di massa integro. Questa seconda forma è stata collocata al di sopra della prima ed analogamente parametrizzata; lo spessore è stato tuttavia diminuito. Si è quindi creato un terzo parallelepipedo, avente la stessa altezza del secondo ma dalle dimensioni più ridotte; questo è stato collocato al centro del piano di massa e sul suo stesso livello. A questo punto si è eseguita un'operazione di sottrazione booleana fra la seconda e la terza forma ottenendo il bordo di massa desiderato e riportato anche nelle immagini. Nell'inserimento delle coordinate dell'ultimo parallelepipedo si sono utilizzati i parametri `strip_lx` e `strip_ly` in modo che il bordo finale fosse della misura indicata da questi. La cosa ha richiesto una brevissima riflessione per la determinazione di una corretta, anche se poco intuitiva, espressione cartesiana della porzione spaziale da sottrarre al piano di massa integro. Terminata questa prima parte è stato sovrapposto al bordo di massa uno strato di materiale isolante di spessore doppio rispetto al primo creato; si è quindi proceduto con l'inserimento della pista principale, all'interno di quest'ultimo solido. La pista è stata posizionata a metà dell'altezza e della larghezza del substrato e la si è estesa per tutta la sua lunghezza. Come ultima operazione si è invocata la sottrazione booleana fra il substrato e la pista principale in modo da rendere il modello conforme alla realtà. Per quanto riguarda infine la scelta dei materiali si è assegnato l'FR4 ai vari livelli di substrato e il rame al bordo di massa e alla pista principale.

Bordo di massa con pista interna

I parametri scelti per rappresentare il secondo modello sono analoghi a quelli utilizzati per il primo ai quali però è stata fatta un'aggiunta. Sono riportate, fra parentesi, le misure in (*mil*) e (*mm*):

- (400) (10.16) `str2_w`: rappresenta metà della larghezza della pista inserita nello spazio circoscritto dal bordo di massa. La pista è stata scelta di dimensioni quadrate per ragioni di simmetria;
- (1.4) (0.036) `str_h`: rappresenta lo spessore della pista principale;
- (10) (0.25) `str_w`: rappresenta metà della larghezza della pista principale;
- (1.4) (0.036) `strip_h`: rappresenta lo spessore del bordo di massa;
- (200) (5.08) `strip_lx`: rappresenta la larghezza del bordo di massa sui lati del modello perpendicolari all'asse x ;
- (200) (5.08) `strip_ly`: rappresenta la larghezza del bordo di massa sui lati del modello perpendicolari all'asse y ;
- (25) (0.64) `sub_h`: rappresenta lo spessore di uno strato di materiale isolante;
- (1000) (25.40) `sub_w`: rappresenta metà della larghezza del modello che è stato scelto con una forma quadrata per ragioni di simmetria.

I nomi evidenziati mediante un diverso carattere indicano l'abbreviazione attribuita nel menù dei parametri del simulatore. Oltre a quelli sopra elencati è presente, anche in questo caso, il parametro `bound` avente la stessa funzione descritta nei capitoli precedenti.

La costruzione del CAD è stata suddivisa in due parti: durante la prima si è riprodotto lo stesso modello descritto nella sezione precedente e durante la seconda si è aggiunta la pista all'interno dello spazio delimitato dal bordo di massa. Per la creazione di tale forma si è utilizzato ancora una volta il comando *Object - Basic Shapes - Brick* con il quale si è creato un parallelepipedo dello stesso spessore del bordo di massa e posizionato al suo interno. Anche questa forma è stata creata, come tutto il modello, simmetricamente rispetto agli assi x e y poiché da questo si sono avuti infatti notevoli vantaggi nell'inserimento delle coordinate cartesiane all'interno degli appositi menù per la creazione dei solidi. Per la scelta dei materiali da assegnare alle varie parti si sono seguiti gli stessi criteri precedentemente esposti; per la nuova pista si è scelto il rame.

Non è stato inoltre necessario apportare modifiche alle dimensioni dei modelli ed in particolare alla lunghezza dei lati che è stata mantenuta uguale a quella utilizzata nel capitolo 4. Infatti la mancanza di elementi minuti ha fatto sì che il numero di celle della mesh richiesto per descrivere i modelli fosse tale da non appesantire eccessivamente i tempi della simulazione. Come ultimo problema si è affrontata la ricerca di una misura consona da assegnare alla larghezza del bordo di massa. Non potendo fare riferimento

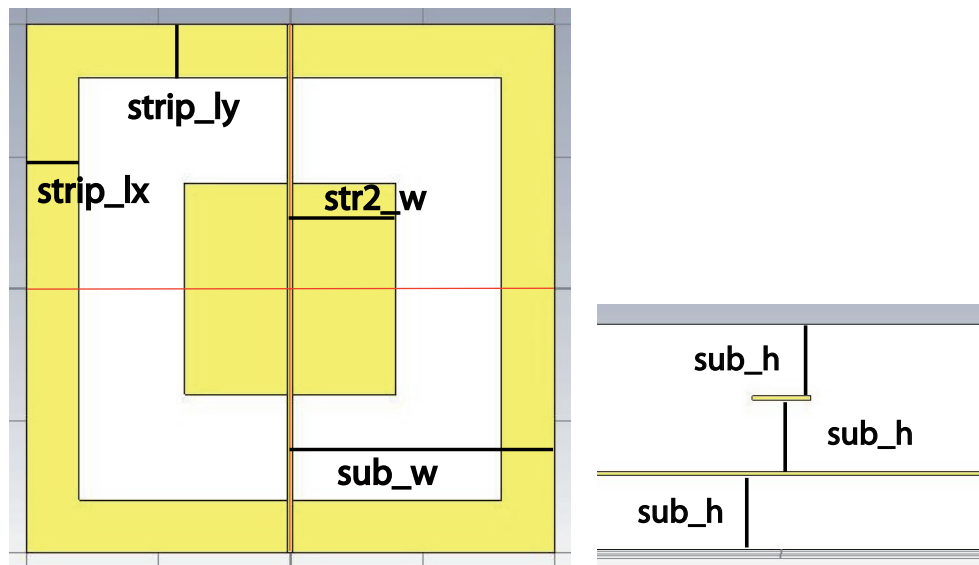


Figura 7.4: Schema del secondo modello con evidenziazione dei parametri.

a qualche preciso modello di scheda elettronica si è cercato di far sì che il bordo fosse molto più spesso rispetto ad una pista, in modo da fornire una via a bassa impedenza per la chiusura delle correnti, ma anche che si discostasse poco dal bordo del modello in modo da rimanere un conduttore perimetrale.

7.3 Parametri di simulazione

Prima di avviare la simulazione sono stati impostati i parametri relativi ad essa cominciando, come di consueto, con la collocazione delle porte in guida d'onda. Queste sono state posizionate ortogonalmente alla pista principale ed in modo che il loro lato inferiore tocchi il bordo di massa. Tale modalità di posizionamento è fondamentale poiché in questo modo le porte forniscono una sorta di connessione fra la pista e il bordo permettendo così la chiusura del circuito elettrico rappresentato nel modello. Per ogni porta, prima di collocarla, è stata selezionata la faccia della pista su cui doveva essere adagiata e nelle impostazioni si è specificata questa associazione fra la porta e la selezione in modo che un ridimensionamento, anche locale del modello non alteri la posizione delle porte rispetto alla pista. Per quanto riguarda invece le dimensioni la larghezza delle porte è stata impostata essere 10 volte la larghezza della pista, mentre l'altezza è stata impostata come 6 volte lo spessore dello strato inferiore di substrato. Anche in questo caso la misura dell'altezza è stata aumentata rispetto a quella utilizzata nel quarto capitolo poiché sopra la pista è presente un ulteriore strato di materiale isolante. Terminata la definizione

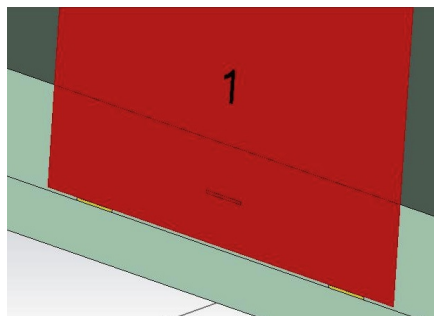


Figura 7.5: Collocazione delle porte in guida d'onda ai lati del modello.

delle porte si sono impostate le condizioni al contorno, specificando anche in questo caso l'opzione *Open*

(*Add Space*) per aggiungere dello spazio vuoto intorno ai modelli. La quantità di spazio aggiunta viene decisa in automatico dal simulatore che tiene conto delle dimensioni del modello e delle frequenze in gioco. Si è scelta ancora una volta questa opzione e non si è aggiunto dello spazio manualmente tramite il parametro `bound` poiché si è visto che in questo modo il tempo della simulazione risulta leggermente più contenuto, mantenendo invariata la qualità dei risultati.

Si è quindi proceduto con la definizione delle grandezze da monitorare durante la simulazione ed in particolare:

- **campo elettrico e magnetico** a 2.4 e 4 GHz;
- **corrente di superficie** a 2.4 e 4 GHz;
- **profilo di irradiazione** a 2.4 e 4 GHz;

aggiungendo manualmente i punti di controllo sopra citati mediante il comando *Solve - Field Monitors*. Si è quindi concluso con il controllo della definizione della mesh per la quale si sono mantenuti i parametri uguali a quelli utilizzati nelle simulazioni precedenti. Anche in questo caso infatti le grandezze fondamentali del modello, che influenzano la densità della mesh, quali la larghezza della pista principale e lo spessore del substrato, sono rimaste invariate. Infine come ultima impostazione si è specificata la simmetria fra S_{11} e S_{22} all'interno del gruppo dei parametri S per sottolineare che il comportamento elettrico del modello è lo stesso sia in un verso che nell'altro.

7.4 Risultati della simulazione del primo modello

Prima di procedere con l'esaminazione dei risultati ottenuti è doveroso esaminare il modo il cui i campi elettrico e magnetico si sono propagati nelle porte in guida d'onda per capire se la simulazione è stata condotta dal software nel modo corretto. Dalle immagini si trova conferma che i campi si sono propagati secondo la ormai ben nota modalità quasi TEM, assicurando quindi la buona riuscita della simulazione.

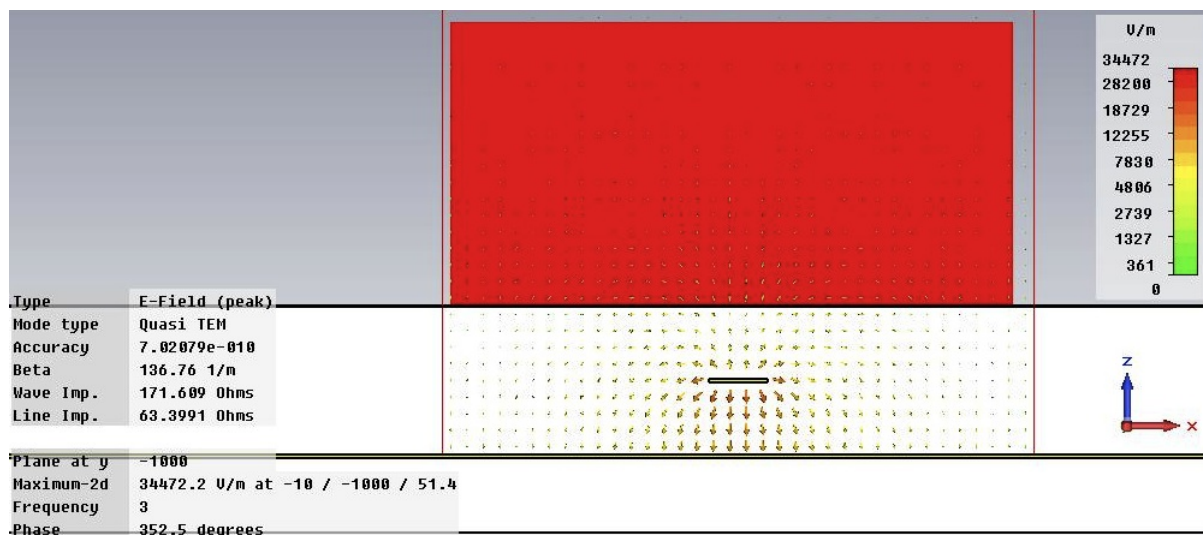


Figura 7.6: Disposizione del campo elettrico nelle porte in guida d'onda; si noti la disposizione secondo la modalità quasi TEM.

Campo elettrico e magnetico

All'interno del modello si possono riconoscere tre zone distinte nelle quali il campo elettrico ha una disposizione differente. Queste si possono riconoscere tagliando il modello in tre fasce con piani perpendicolare all'asse z . La prima e la seconda zona sono localizzate nelle estremità, in quelle regioni in cui

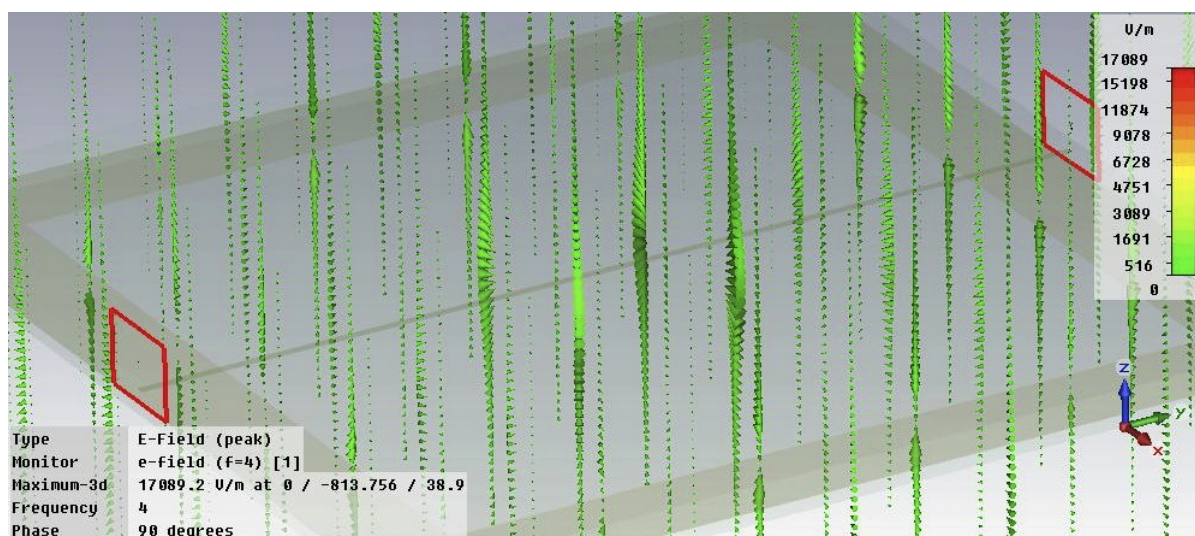


Figura 7.7: Disposizione del campo elettrico nel modello a 2.4 GHz.

la pista principale passa sopra alla superficie del bordo di massa. Qui si possono notare delle linee di campo perpendicolari fra la pista e la proiezione ortogonale di questa sul bordo di massa. Man mano che ci si allontana dalla proiezione appena descritta si osserva che le linee di campo hanno una traiettoria più curvilinea pur continuando a partire dalla pista e richiudendosi sempre nei bordi di massa paralleli all'asse x . La terza zona è situata invece al centro del modello e si estende quasi fino alle due estremità.

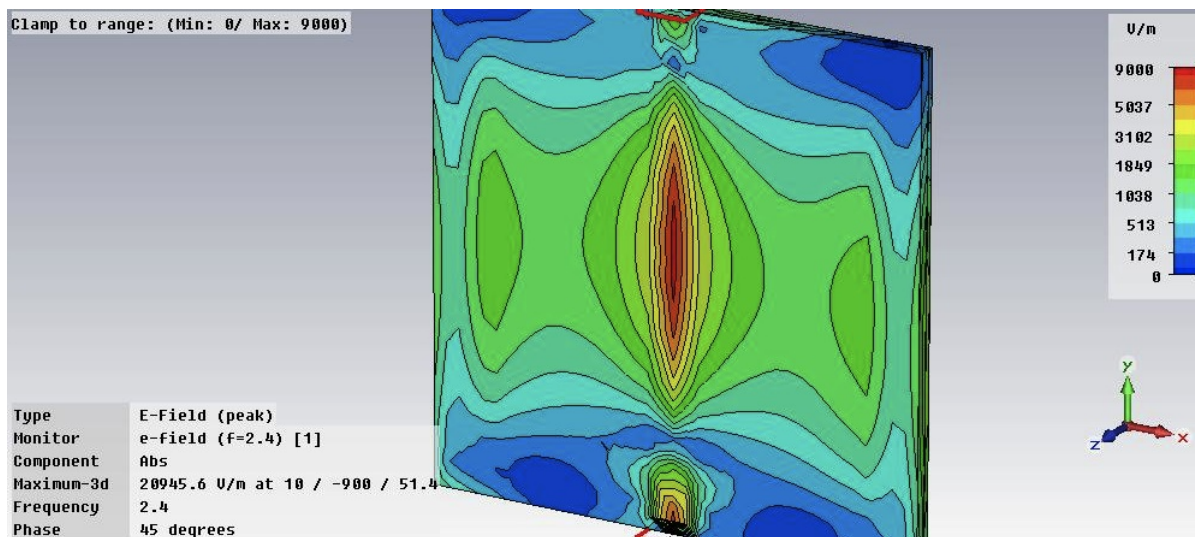


Figura 7.8: Disposizione del campo elettrico nel modello a 2.4 GHz; in evidenza le linee delimitanti le zone dove il campo assume lo stesso valore.

Qui è possibile notare come le linee del campo elettrico partano dalla pista e si richiudano nei segmenti del bordo di massa paralleli all'asse y descrivendo anche in questo caso traiettorie curvilinee intuibili dall'orientamento dei coni. Dall'immagine si può anche notare come il campo elettrico si estenda notevolmente nello spazio circostante il modello, propagandosi prevalentemente verso l'altro. Quanto appena descritto lo si può ritrovare anche nelle immagini raffiguranti le zone del modello, delimitate dalle linee isopotenziali, dove l'intensità del campo elettrico è in modulo uguale. Si può quindi verificare come il campo si estenda spazialmente nei dintorni della pista raggiungendo picchi di intensità su quest'ultima e sui segmenti verticali del bordo di massa. Anche in questo caso si può notare come gli spigoli esterni

del bordo di massa non siano caratterizzati dal raggiungimento di picchi nell'intensità del campo elettrico. Al contrario invece negli spigoli interni il campo raggiunge valori elevati; questo perché le cariche elettriche tenderebbero ad abbreviare il loro percorso diagonalmente cercando quindi di descrivere una traiettoria più vicina alla proiezione della pista principale sul livello del bordo di massa. Questo perché, analogamente a quanto accade con un piano di massa integro, le cariche formanti la corrente tendono a percorrere la strada a minor impedenza per chiudere il circuito elettrico, che in questo caso coincide anche con la più breve; vista la collocazione della pista, il loro percorso non tocca minimamente gli angoli esterni. Per il campo magnetico la disposizione delle linee avviene prevalentemente nell'intorno della pista e dei segmenti di conduttore formanti il bordo di massa; come ci si può aspettare dal momento che in queste zone del modello scorre corrente. Dalle immagini raffiguranti le intensità si può anche vedere come il campo magnetico assuma valore massimo sulla pista e in prevalenza sui segmenti orizzontali formanti il bordo di massa, rispetto che sui verticali.

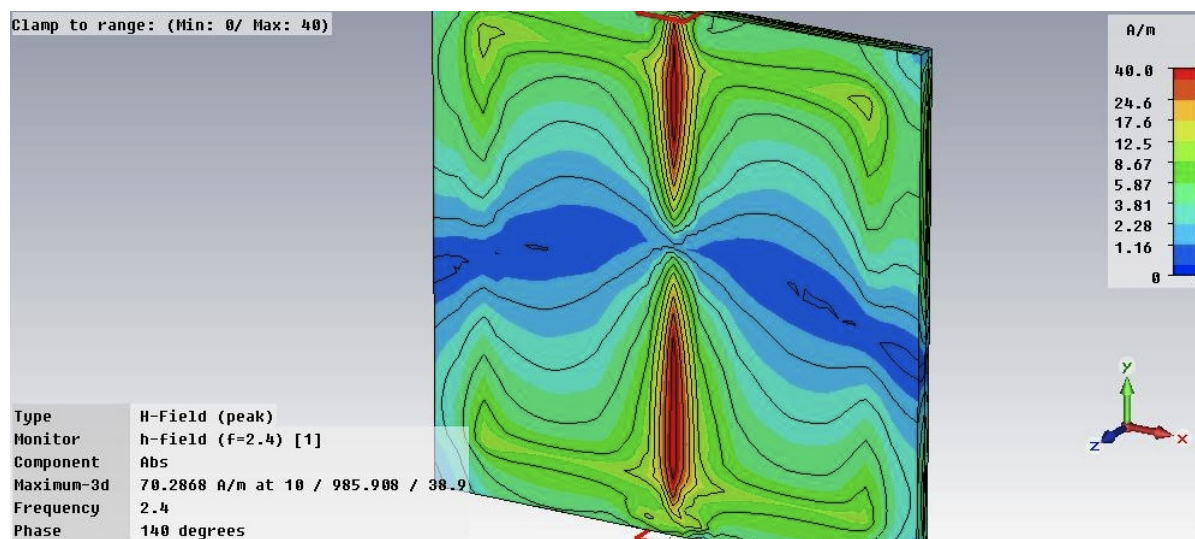


Figura 7.9: Disposizione del campo magnetico nel modello a 2.4 GHz; in evidenza le linee delimitanti le zone dove il campo assume lo stesso valore.

Corrente di superficie

Come si può vedere dalle immagini la corrente nel modello è localizzata sui due conduttori principali: la pista e il bordo di massa. Dai colori con i quali vengono rappresentati i coni indicanti il flusso della corrente si può vedere come questa sia molto più concentrata nella pista rispetto che nel bordo. La cosa è dovuta essenzialmente alla diversa larghezza dei due conduttori che tuttavia mantengono lo stesso spessore. Essendo il bordo di massa abbondantemente più largo della pista è ben comprensibile come la corrente abbia più spazio in cui stare. Oltre a questo si può notare come la disposizione della corrente rispetto alla larghezza della pista sia uniforme, cosa che non accade invece nel bordo di massa. In quest'ultimo è infatti possibile notare come la corrente tenda a scorrere maggiormente vicina al bordo interno piuttosto che a quello esterno, creando il ben noto effetto Pelle. La ragione è che il percorso naturale attraverso cui la corrente tenterebbe di richiudersi è quello visto più volte quando si sono esaminati i modelli aventi un piano di massa integro. Per questo motivo è logico che la corrente tenda il più possibile ad avvicinarsi al percorso della pista causando una disposizione non uniforme come quella osservata. La particolarità dell'andamento è ulteriormente confermata anche nelle immagini che raffigurano il valore dell'intensità della corrente nelle quali si può anche apprezzarne l'aumento proprio in corrispondenza degli angoli interni del bordo di massa, come precedentemente descritto parlando del campo elettrico. Si può infine vedere come vi sia un addensamento di corrente davanti alle porte in guida d'onda dove avviene il passaggio della corrente dal bordo alla pista; la cosa è anche sottolineata nella precedente immagine da alcuni coni orientati verticalmente nell'intorno sopra descritto.

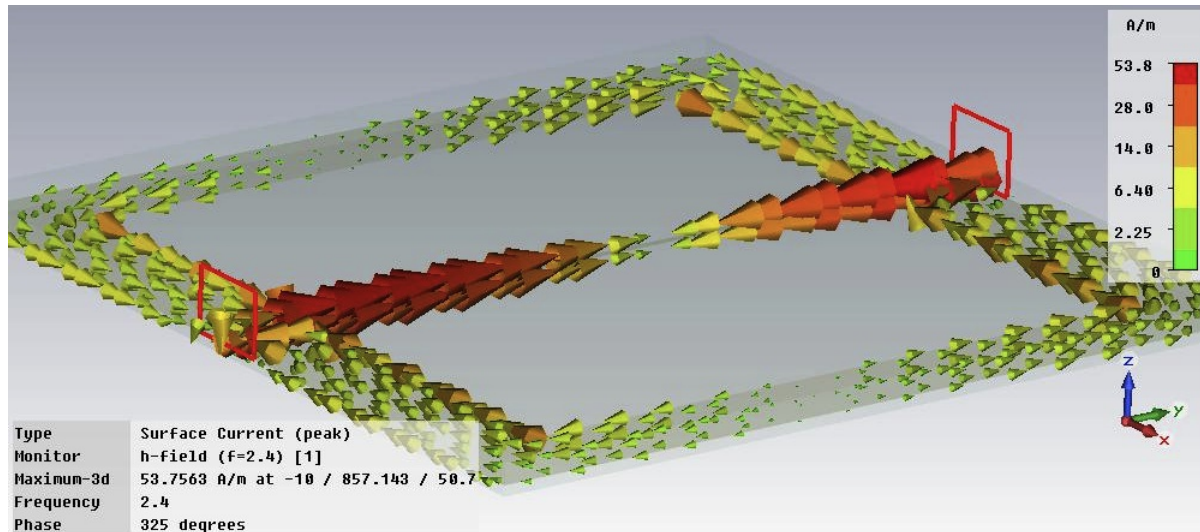


Figura 7.10: Disposizione delle correnti di superficie nel modello a 2.4 GHz.

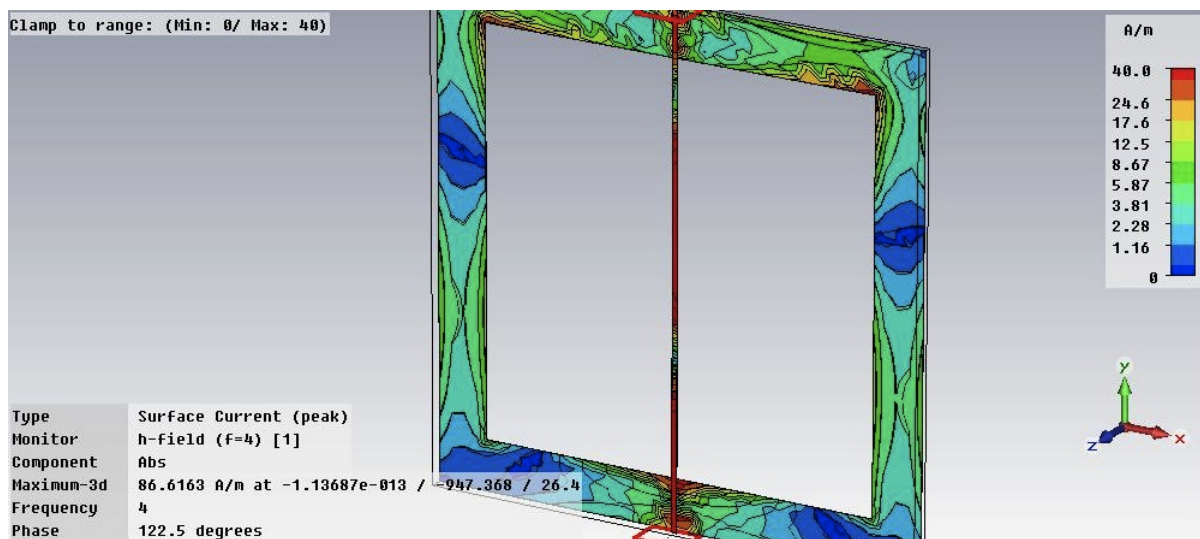


Figura 7.11: Disposizione delle correnti di superficie nel modello a 4 GHz; in evidenza le linee delimitanti le zone con la stessa intensità di corrente.

Profilo di irradiazione

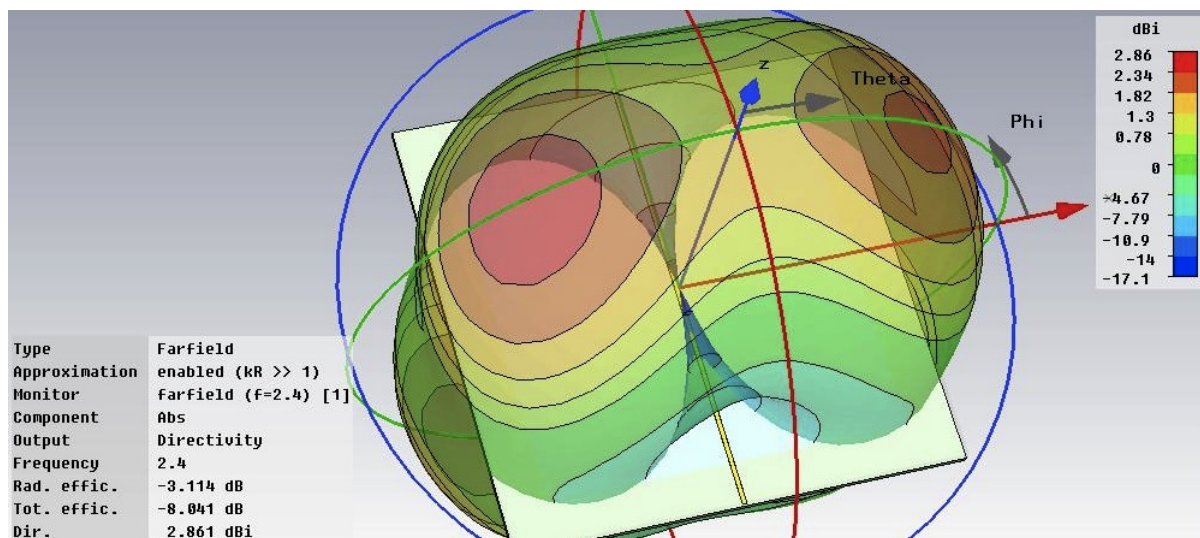


Figura 7.12: Profilo di irradiazione a 2.4 GHz.

A 2.4 GHz il profilo di irradiazione è simmetrico rispetto al piano xy ed appare formato da due emisfere separate dal modello. Ogni emisfera presenta inoltre un'incavo al suo interno, in prossimità della pista principale, formato dalla congiunzione di due coni dalla parte dei vertici. Se non fosse per l'eccessivo rigonfiamento della struttura, la si potrebbe tranquillamente assimilare ad una sezione di un toroide. Il

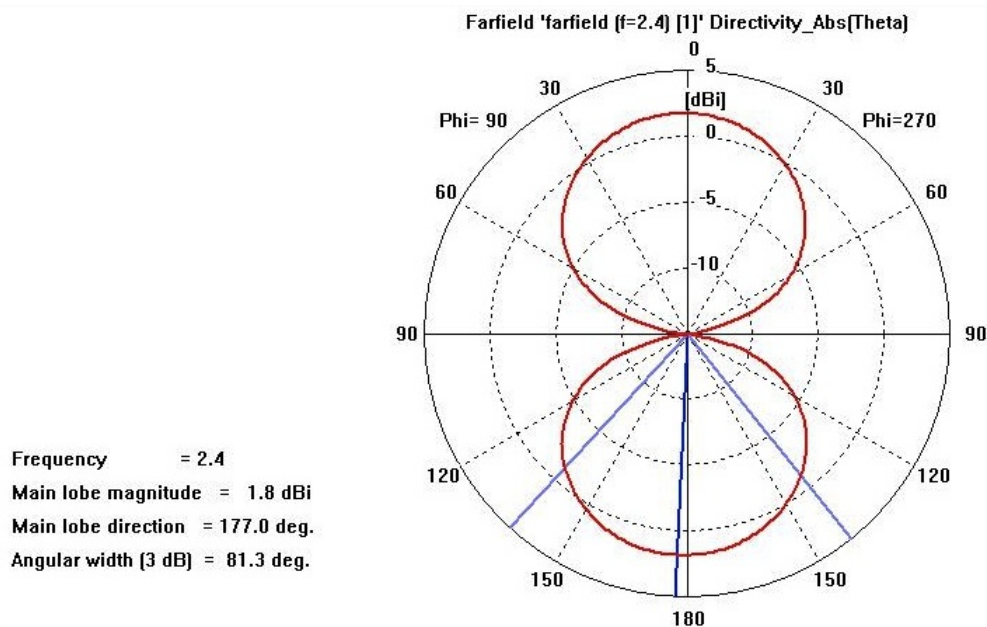


Figura 7.13: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Theta.

profilo presenta due zone, marcate in rosso, dove vengono registrati i picchi di emissione; queste sono collocate simmetricamente rispetto alla pista principale, a destra e a sinistra dell'asse x di riferimento marcato in blu. Le due regioni principali sono inoltre attorniate da varie fasce, sempre simmetriche rispetto all'asse z che presentano un'intensità di emissione decrescente. A livello del substrato il profilo è formato da due lobi principali, ognuno dei quali avente forma ovale, e posti uno in fianco all'altro. I

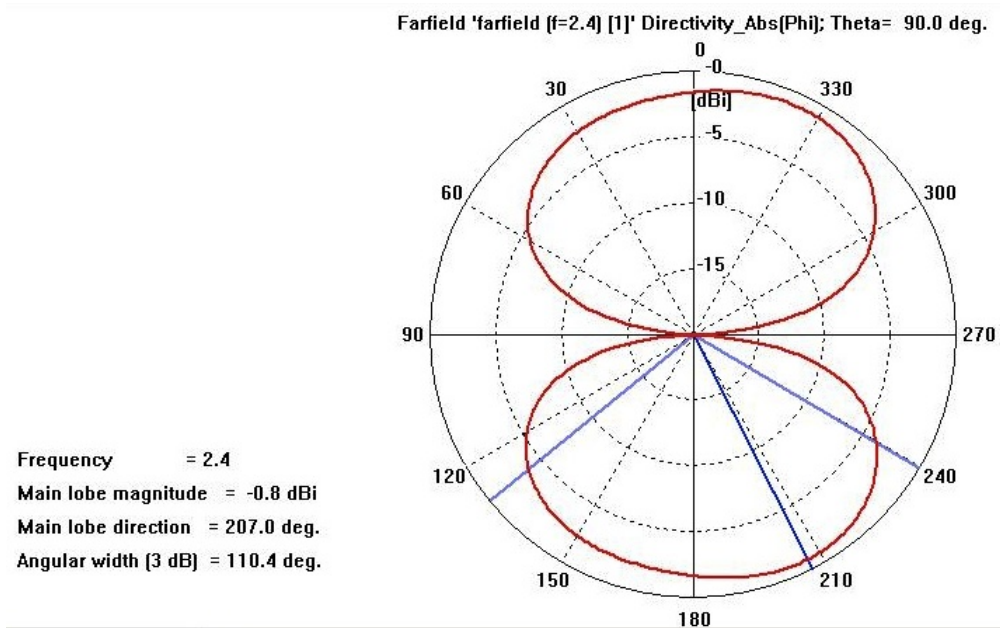


Figura 7.14: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Phi.

due lobi sono inoltre tangenti in un solo punto in corrispondenza della metà della pista principale. È naturale quindi ipotizzare che ad ogni lobo possa essere associata una regione di massimo irraggiamento marcata in rosso. Il profilo, sia nella struttura geometrica, sia nella divisione di questa nelle varie zone di irraggiamento, presenta un altissimo grado di simmetria sia orizzontale che verticale. La presenza dei due lobi, e non di uno soltanto, è imputabile all'azione combinata della pista e dei due tratti del bordo di massa paralleli ad essa che alla frequenza corrente rappresentano, molto probabilmente, gli elementi principali di irradiazione per il modello. La supposizione viene comunque fatta in base al riscontro geometrico eseguito fra il modello e il profilo. Ai fini di compatibilità elettromagnetica risultano comunque decisamente importanti la parte superiore ed inferiore del modello dove sono localizzati i disturbi irradiati più forti. Nel dettaglio si può anche notare nei grafici polari del profilo come la regione con l'irradiazione più forte sia quella inferiore. A 4 GHz il profilo di irradiazione si presenta ancora simmetrico rispetto

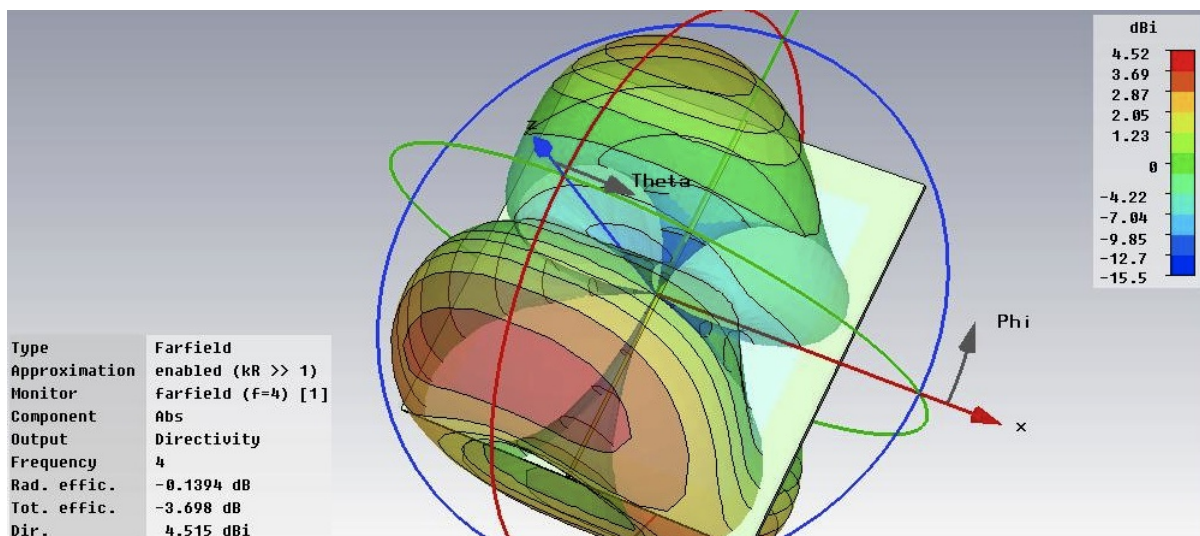


Figura 7.15: Profilo di irradiazione a 4 GHz.

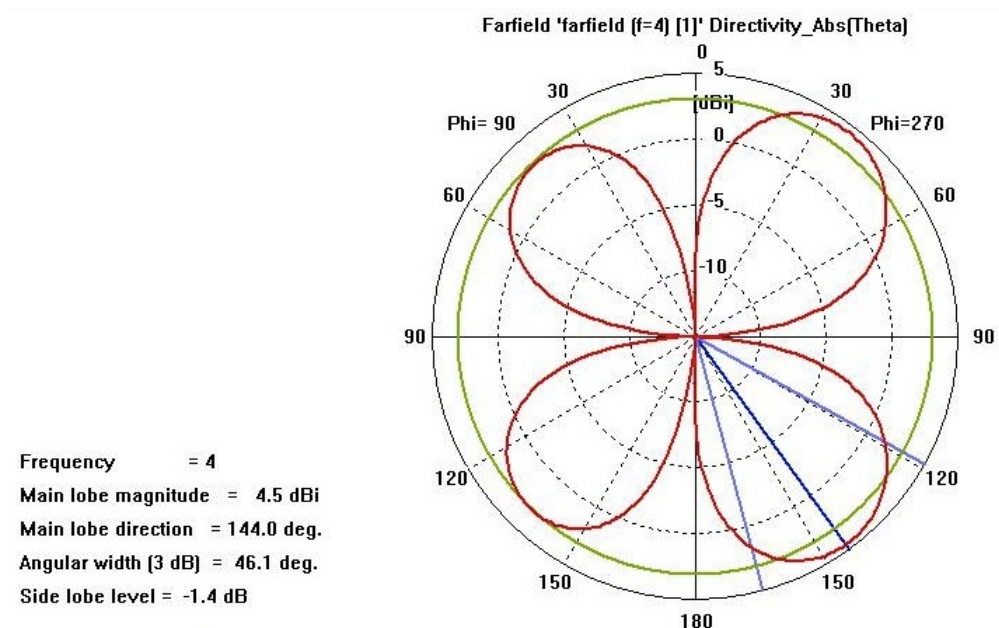


Figura 7.16: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Theta.

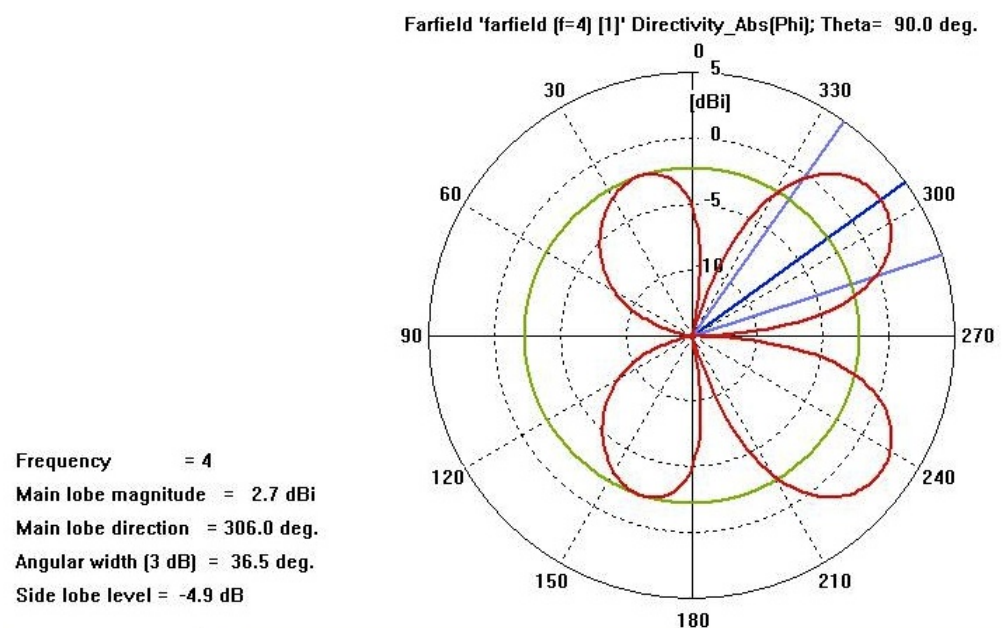


Figura 7.17: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Phi.

al piano definito dal substrato del modello. Risulta anche essere composto da due solidi posizionati uno dietro l'altro a partire dalla metà del modello evidenziata all'asse x . Il primo, più contenuto si trova sulla parte posteriore del modello, mentre il secondo, più esteso si trova sulla parte anteriore. Il solido posteriore è formato, nel contorno al livello del substrato da due piccoli lobi, dall'estensione modesta e dai contorni ellittici, che si congiungono circa a metà della pista principale. Spazialmente si estende poi con una protuberanza, abbastanza pronunciata, nella direzione positiva dell'asse y ; all'estremo di questa si può notare la presenza di una regione con un discreto irraggiamento di energia elettromagnetica evidenziata da un colore giallo scuro tendente all'arancione. La parte anteriore del profilo è anche lei formata, a livello del substrato, da due lobi principali aventi entrambi la forma di un'asola. I due lobi sono affiancati e tangenti nello stesso punto localizzato circa al centro della pista che si è prima citato descrivendo i lobi della parte posteriore del profilo. La cosa è particolarmente ben sottolineata dalla proiezione del profilo nei grafici in coordinate polari, nei quali si può anche vedere qual'è il lobo che irradia maggiormente. Spazialmente la parte anteriore del profilo si estende abbondantemente nello spazio con la forma di una fascia che avvolge il modello intorno all'asse y . La fascia è a sua volta suddivisa in altre regioni approssimativamente circolari caratterizzate ognuna da una differente intensità di irraggiamento. Nella parte superiore è tuttavia presente una zona di forma ellittica, colorata in rosso in cui si registra la massima intensità di irradiazione. Questa zona sembra essere originata dalla parte sottostante del bordo di massa che, data la sua particolare interazione con la frequenza utilizzata potrebbe provocarne la formazione. In definitiva la zona più interessante del profilo di irradiazione e quindi anche del modello risulta essere quella anteriore in cui sono localizzati ben due massimi di irradiazione.

Dalla simmetria rispetto il piano xy presente per entrambi i profili è possibile apprezzare il fatto il bordo di massa non fornisce nessuna schermatura, dal punto di vista elettromagnetico, per quello che si trova al di sotto del profilo. Infatti il foro centrale delimitato dai bordi è più grande delle lunghezze d'onda utilizzate nei segnali della simulazione e pertanto non si nota nessun effetto simile a quello di una gabbia di Faraday.

7.5 Risultati della simulazione del secondo modello

Prima di procedere con l'esposizione dei risultati ottenuti si è effettuato anche in questo caso un controllo dei modi di propagazione all'interno delle porte in guida d'onda. Dalla verifica è emersa ancora una volta la correttezza della simulazione in quanto i campi sono disposti nelle porte secondo la modalità quasi TEM.

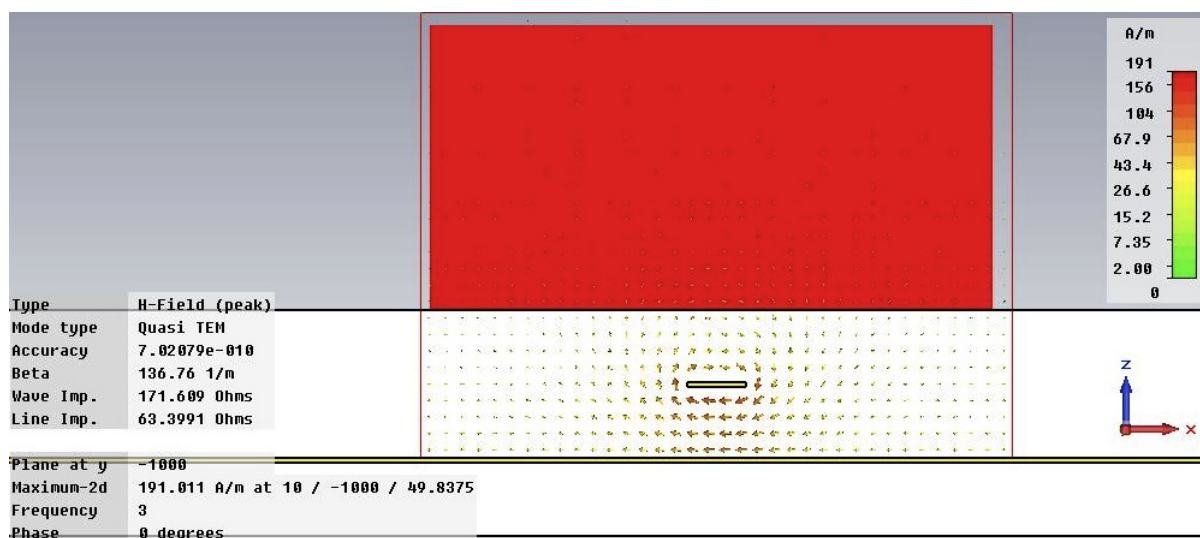


Figura 7.18: Disposizione del campo magnetico nelle porte in guida d'onda secondo la modalità quasi TEM.

Campo elettrico e magnetico

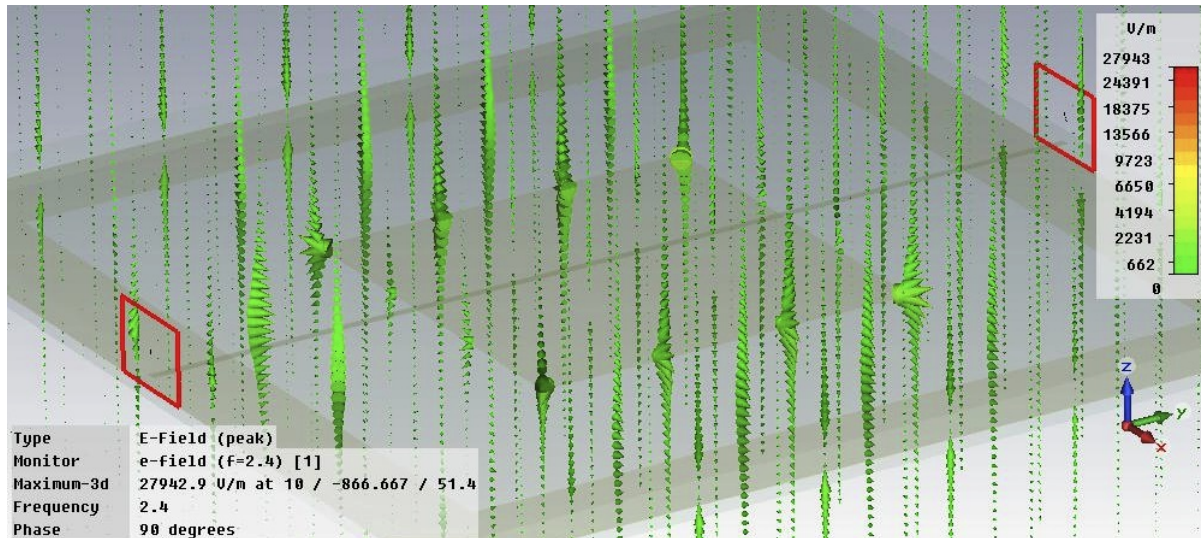


Figura 7.19: Disposizione del campo elettrico nel modello a 4 GHz.

La disposizione del campo elettrico risulta essere diversa a seconda della zona del modello che si considera. Negli estremi infatti, dove la pista principale si trova sopra al bordo di massa, si può notare che i coni, rappresentanti il vettore campo elettrico, sono disposti fra questi due elementi. Nella zona dove la pista sovrasta la sua proiezione sul piano di massa le linee di campo risultano rette e perpendicolari alle due superfici appena citate. Man mano che ci si allontana dalla pista si nota un'altro gruppo di linee di campo che partendo dagli estremi si chiudono sempre sul bordo di massa descrivendo traiettorie questa volta curvilinee. Questa disposizione del campo è del tutto normale considerata la topologia circuitale in cui si trova e ampiamente vista anche nei capitoli precedenti. Spostandosi invece nella zona centrale del modello si nota che i coni sono orientati dalla pista centrale e non da quella principale ai lati del bordo di massa. La cosa è particolarmente evidenziata dal fatto che vi sono parecchi coni sul bordo della pista centrale, particolarmente densi negli angoli, ad identificare una presenza forte ed inequivocabile di campo elettrico. Nonostante quindi la pista centrale non abbia alcuna connessione con le porte del modello si tende a supporre che i campi presenti nel bordo di massa producano localmente nella suddetta pista una divisione di cariche che provoca gli effetti osservati nell'immagine. È anche intuitivo supporre che dal momento che i campi sono tempo varianti, daranno origine ad movimento locale di carica nella pista centrale che potrebbe essere successivamente rilevato nei grafici illustranti l'andamento della corrente. Se tuttavia si osserva con particolare attenzione la disposizione dei coni, si può notare che si possono ancora intravedere alcune linee di campo che partendo dalla pista giungono direttamente sulle flange verticali del bordo di massa. Naturalmente il fenomeno è osservabile in quelle zone in cui al di sotto della pista principale vi è soltanto lo strato di materiale isolante e non la pista centrale. Anche in questo caso si può osservare come il campo elettrico si estenda notevolmente nello spazio in modo simmetrico sia sopra che sotto il modello. Quanto appena descritto viene confermato con forza dalle immagini raffiguranti l'intensità del campo elettrico dalle quali si può chiaramente notare la pista centrale all'interno dello spazio delimitato dai bordi di massa. In evidenza è anche posto il fatto che il campo parte soltanto dai suoi bordi e non dal suo interno a conferma ulteriore che lo spostamento di cariche ha natura soltanto locale. I concetti esposti per il campo elettrico sono analoghi a quelli necessari alla descrizione del comportamento del campo magnetico che ancora una volta, nell'evidenziazione della sua intensità, mette in risalto la presenza della pista centrale. Si può infatti notare come le linee delimitanti le zone con valori diversi del campo tendano ad essere caratterizzate da una geometria più squadrata nella zona centrale del modello.

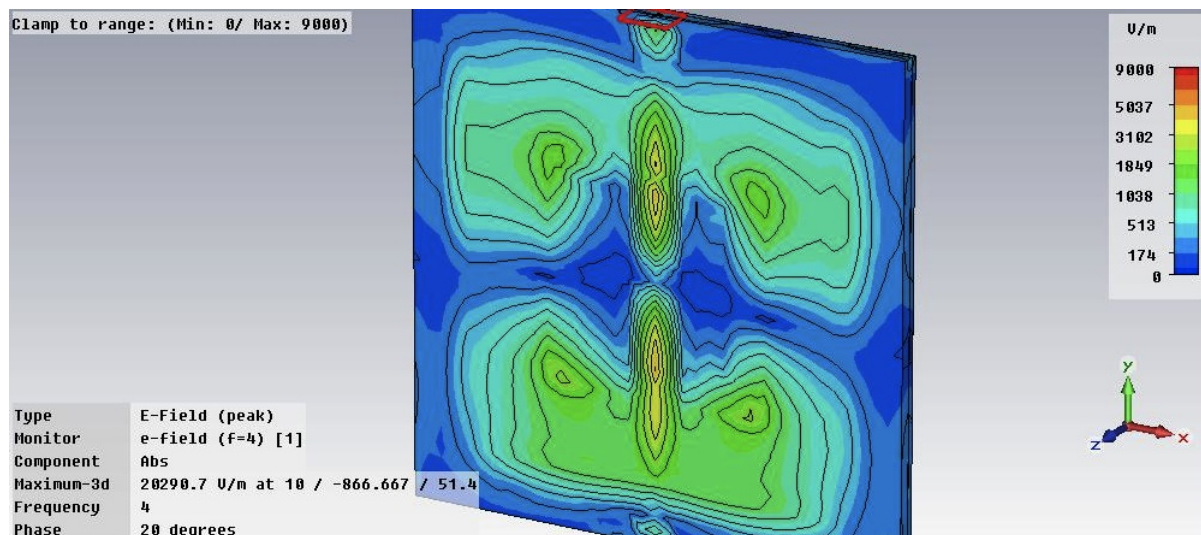


Figura 7.20: Disposizione del campo elettrico nel modello a 4 GHz; in evidenza le linee delimitanti le zone dove il campo assume lo stesso valore.

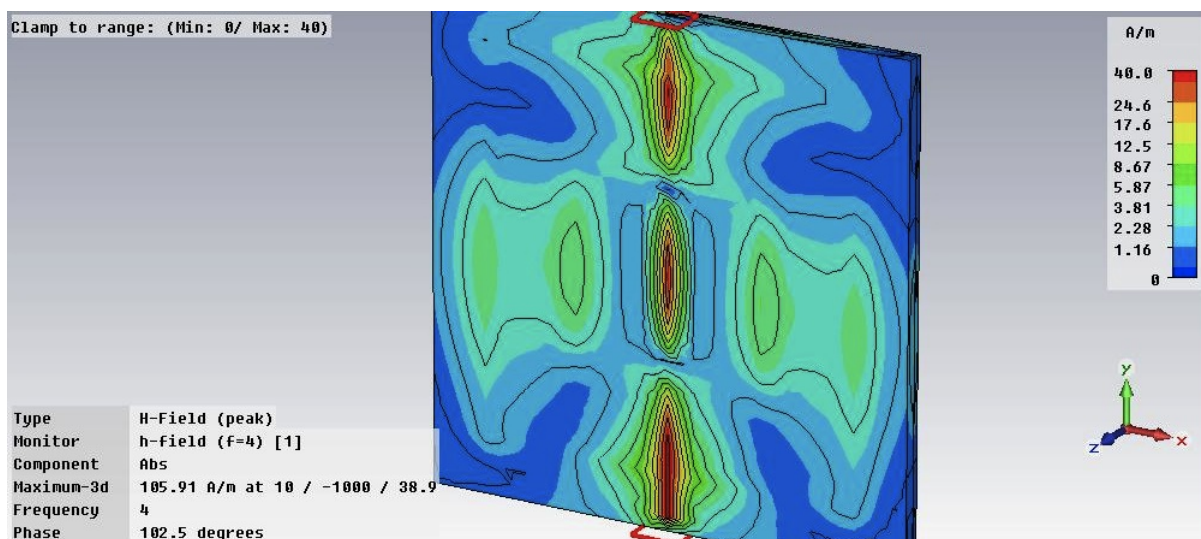


Figura 7.21: Disposizione del campo magnetico nel modello a 4 GHz; in evidenza le linee delimitanti le zone dove il campo assume lo stesso valore.

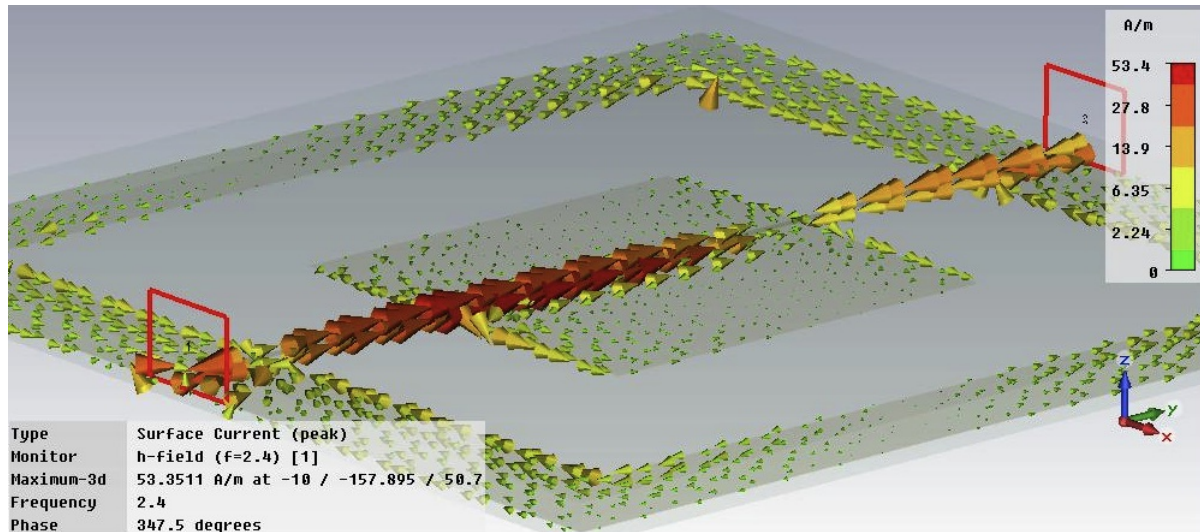


Figura 7.22: Disposizione della corrente di superficie nel modello a 2.4 GHz.

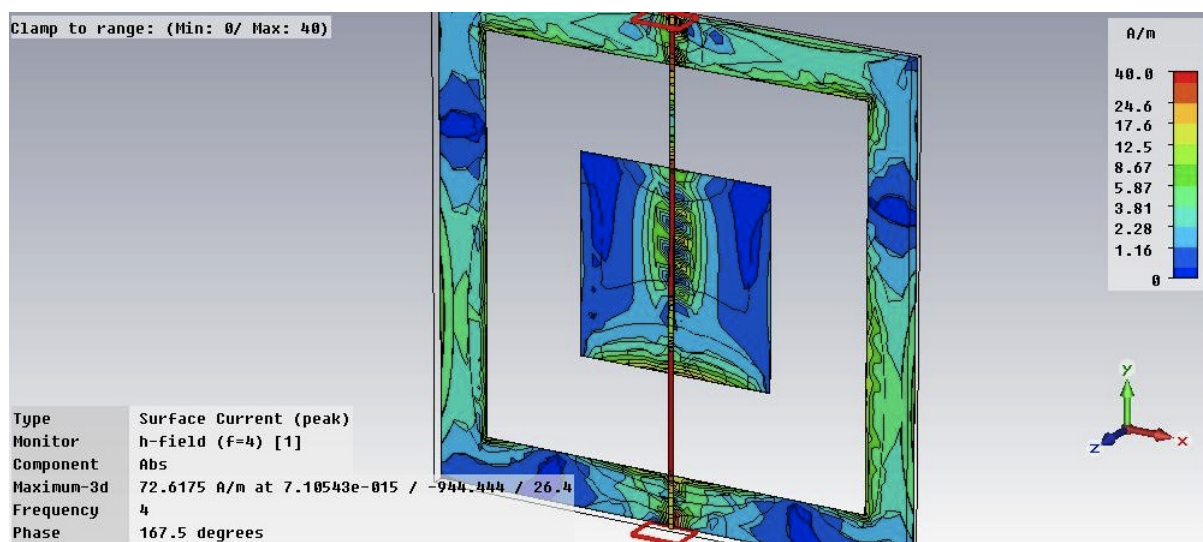


Figura 7.23: Disposizione delle correnti di superficie nel modello a 4 GHz; in evidenza le linee delimitanti le zone con la stessa intensità di corrente.

Corrente di superficie

Si può rilevare lo scorrere di corrente elettrica in ogni conduttore del modello: nella pista principale, nel bordo di massa e nella pista centrale. Le intensità maggiori, evidenziate dalla colorazione e dalla grandezza dei coni, si trovano però soltanto sulla pista , dove fra l'altro si registra il massimo, e sul bordo. La disposizione della corrente, in analogia a quanto visto nel modello precedente; è asimmetrica nei bordi di massa e tende ad essere più intensa verso l'interno che verso l'esterno. Anche in questo modello è possibile osservare come l'intensità della corrente sia maggiore negli angoli interni del bordo; in particolare in quello in alto a sinistra è anche presente un cono orientato diagonalmente verso l'alto che indica a fortissima propensione della corrente ad avvicinarsi il più possibile alla pista.

È presente corrente anche nella pista centrale, nonostante questa non sia connessa con nessun altro elemento circuitale del modello. La cosa è dovuta al fatto che la presenza di un campo elettrico sulla pista principale e sul bordo di massa influenza il metallo di cui è composta la pista centrale provocando, al suo interno, una locale separazione di cariche. Tuttavia il campo elettrico sopra citato è tempo variante, caratteristica che viene trasmessa anche ai gruppi di cariche locali e che ne modifica la concentrazione generano un flusso di corrente. Tale flusso tuttavia non coinvolge tutta la superficie del modello ma è localizzato prevalentemente sui bordi e su quella porzione di conduttore su cui cade la proiezione ortogonale della pista principale.

Profilo di irradiazione

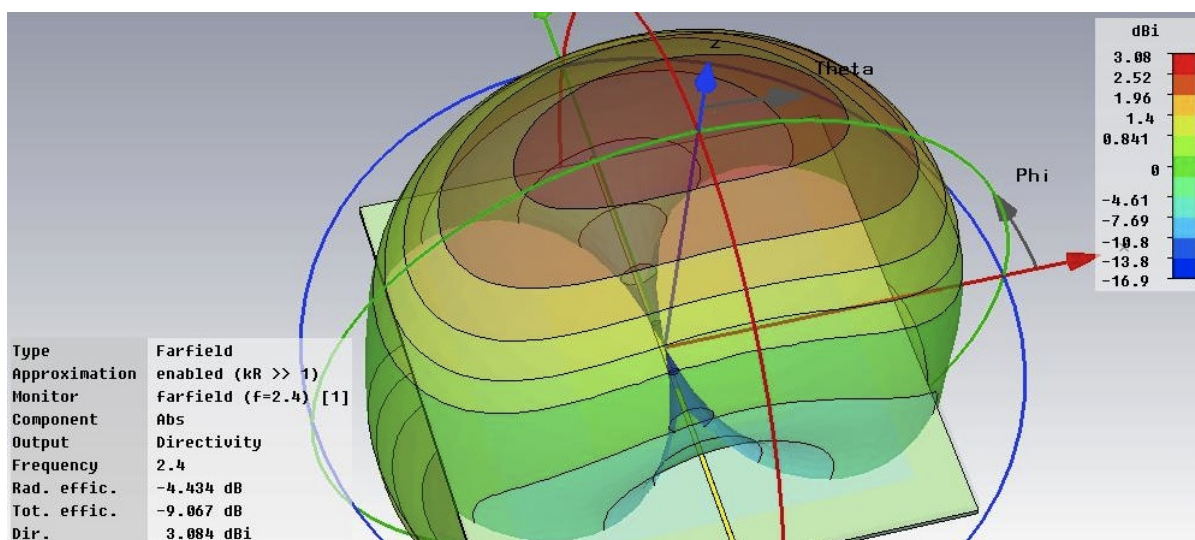


Figura 7.24: Profilo di irradiazione a 2.4 GHz.

A 2.4 GHz il profilo di irradiazione è simmetrico rispetto al piano xy in cui si sviluppa in larghezza il modello e ha la forma di una sfera leggermente schiacciata alle estremità nella direzione dell'asse y . È anche presente un incavo nella sfera dalla che sembra composto dall'unione di due coni dalla parte del vertice; il centro dell'incavo è localizzabile circa sulla metà della pista principale. Sulla sommità del profilo si può osservare la presenza di una regione dai contorni ellittici colorata di rosso, simmetrica rispetto alla pista principale e leggermente spostata più avanti rispetto all'asse z marcato in blu. Tale zona che rappresenta una delle due regioni del profilo dove è presente il massimo irraggiamento di energia elettromagnetica; l'altra si trova esattamente dalla parte opposta del profilo. Intorno alla zona appena descritta si possono trovare altre fasce concentriche caratterizzate da una diminuzione per quanto riguarda l'intensità dell'energia elettromagnetica emessa. A livello del substrato il profilo è caratterizzato invece da due lobi principali affiancati, di forma ellittica e aventi i bordi regolari, tangenti in un unico punto localizzabile sulla metà della pista principale, lo stesso citato precedentemente descrivendo l'incavo centrale. Ai fini quindi del controllo dell'irraggiamento elettromagnetico risultano fondamentali le zone sovrastanti e sottostanti il modello, come evidenziato anche nei grafici in coordinate polari riportanti

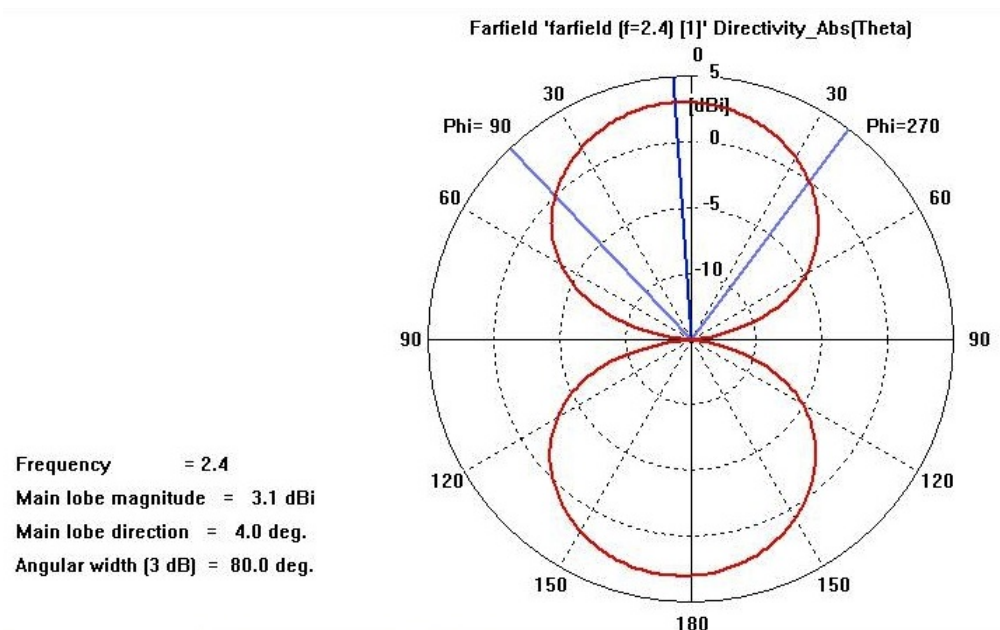


Figura 7.25: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Theta.

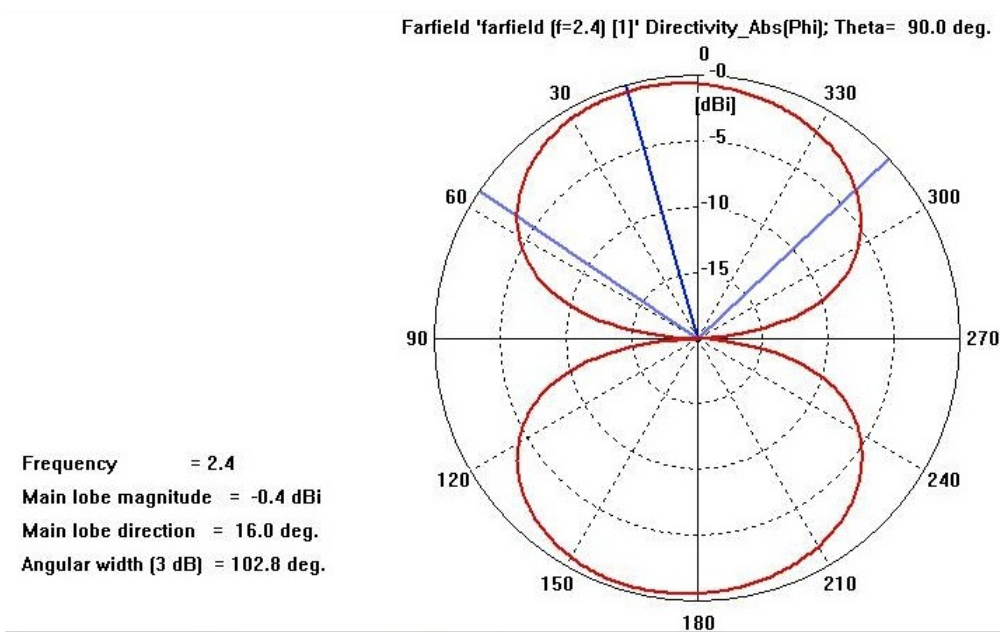


Figura 7.26: Proiezione del profilo di irradiazione a 2.4 GHz sul piano Phi.

le proiezioni del profilo di irradiazione. A 4 GHz il profilo si presenta anch'esso formato da due lobi

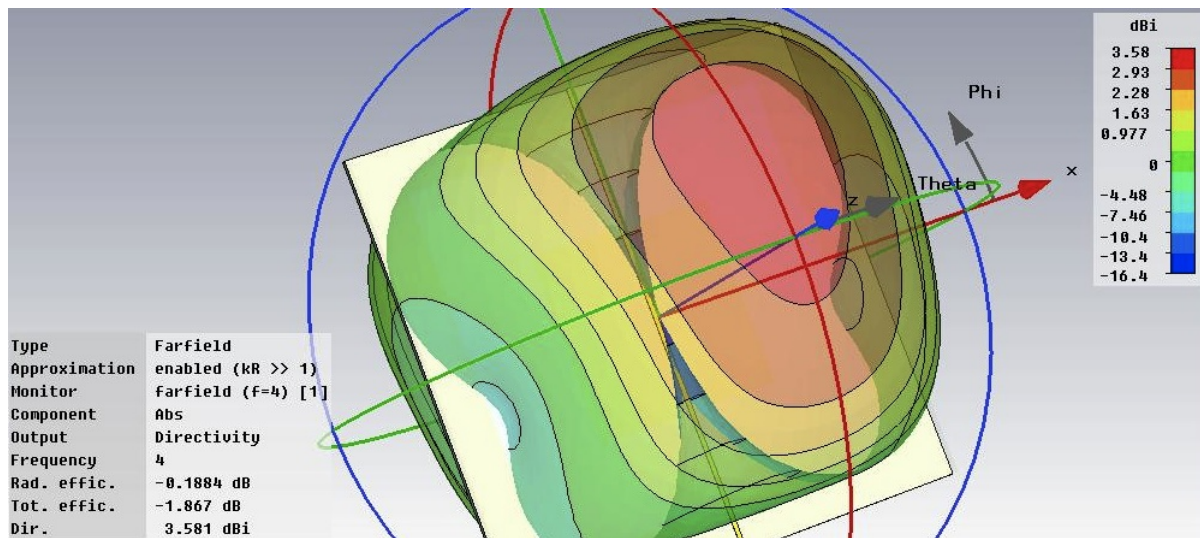


Figura 7.27: Profilo di irradiazione a 4 GHz.

principali, uno localizzabile sopra al modello ed uno sotto. Anche in questo caso vige una totale simmetria rispetto alle due parti appena citate, come del resto si può notare dagli ormai ben conosciuti diagrammi polari di proiezione. Esaminando uno dei due lobi del profilo si può la sua forma assomigliante a quella di una sfera su cui è stata esercitata una compressione agli estremi. Nel caso in questione si possono notare delle rientranze in corrispondenza dei margini del profilo situati lungo gli assi x e y . Anche in questo lobo è presente l'incavo a doppio cono, posizionato in maniera del tutto analoga a quanto visto nel precedente. Nonostante quindi i bordi della struttura siano curvilinei, la figura generale del profilo che emerge risulta di gran lunga più squadrata rispetto a quella che si aveva a 2.4 GHz. Grazie a questo vengono anche messe in evidenza, in modo migliore le regioni, approssimativamente circolari, nelle quali si può dividere il lobo per studiarne le emissioni. Ancora una volta si ritrova una zona marcata in rosso sulla sommità del profilo indice, ancora una volta, che le parti più interessanti ai fini della compatibilità elettromagnetica sono quelle sovrastanti e sottostanti il modello.

7.6 Osservazioni

I due modelli sono stati costruiti utilizzando le stesse dimensioni per le parti corrispondenti: ciò consente di confrontare, seppur in maniera qualitativa, i risultati ottenuti. Da questi si può notare come vi siano alcune analogie fra i modelli nelle zone periferiche: per esempio i campi elettrico e magnetico nelle estremità della pista principale sono disposti alla stessa maniera come del resto la distribuzione della corrente nei vari conduttori. Le differenze maggiori si riscontrano tuttavia nella zona centrale del modello: in un caso i campi coinvolgono principalmente la pista principale ed il bordo di massa, nell'altro si dispongono fra la pista principale e quella centrale. Il fatto che la pista centrale sia isolata dal resto dei conduttori del modello fa sì che abbia un effetto parzialmente schermante nei confronti della pista sovrastante, poiché, come si è visto dalle immagini, tende a venire influenzata dai campi circostanti e a dirigerli nuovamente secondo la sua geometria. L'effetto è particolarmente significativo quando si esaminano i diagrammi relativi alle correnti; in questi si può notare che la pista centrale diventa quasi in elemento attivo del modello, le correnti che si ritrovano sulla sua superficie infatti non hanno di certo bassa intensità. Nell'ipotesi quindi che la pista centrale porti un segnale dall'esterno è doveroso tener conto dell'influenza che viene dai campi dei conduttori nel suo intorno per far sì che i disturbi non lo danneggino e conducano quindi a malfunzionamenti dell'intera struttura. Interessante sarebbe simulare cosa accadrebbe se in qualche momento si venisse a creare un percorso diretto fra la pista centrale e il bordo di massa per l'azione di componenti elettronici presenti in una scheda implementante uno schema simile a quello visto. Infine va considerato l'effetto della pista centrale per quanto riguarda

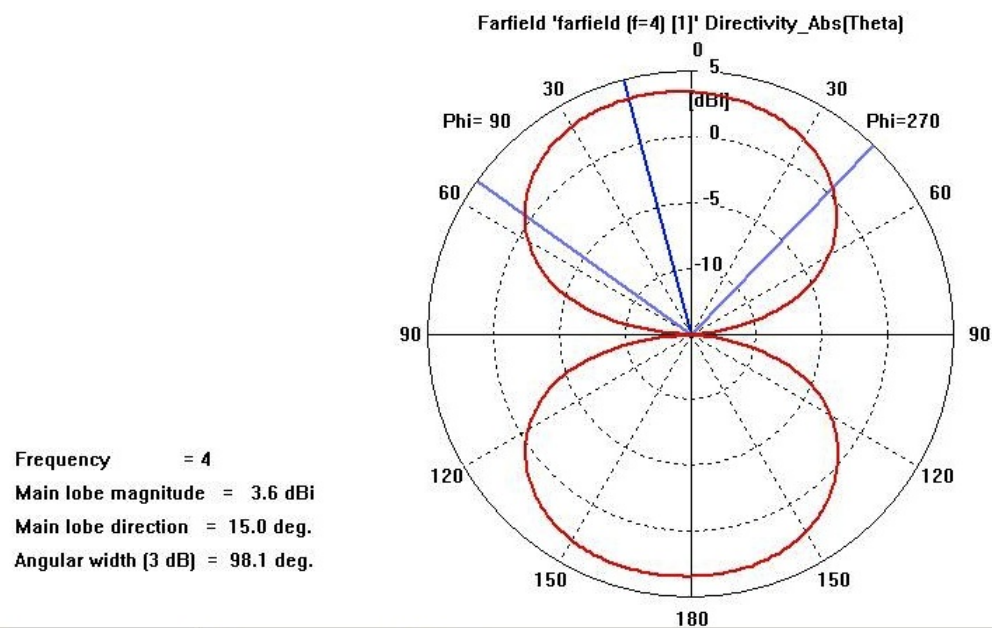


Figura 7.28: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Theta.

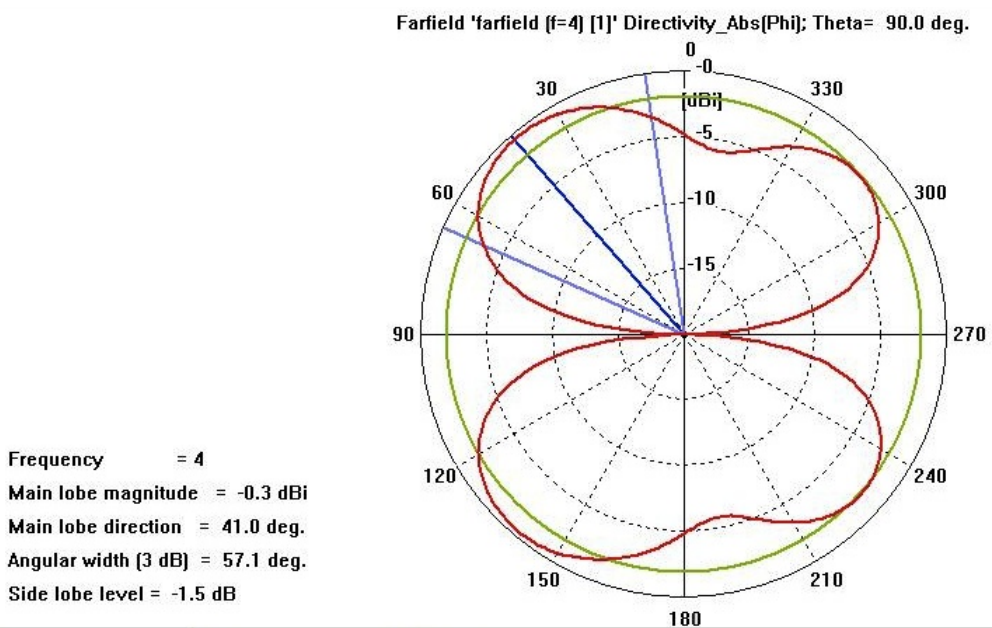


Figura 7.29: Proiezione del profilo di irradiazione a 4 GHz sul piano Phi.

l'irradiazione elettromagnetica. I profili del secondo modello sono infatti sempre caratterizzati, oltre che dalla simmetria rispetto alla pista principale, da un'unica zona in cui si registra un massimo di irraggiamento, sempre in corrispondenza della pista centrale. La differenza abissale con i profili del primo modello conduce ad ipotizzare che la pista centrale svolga una funzione di irraggiamento direttivo, come accade per un'antenna a microstriscia, assorbendo e ridirezionando i campi prodotti dagli altri conduttori del modello. Per questo motivo si sconsiglia l'utilizzo di un simile layout nel caso si voglia sfruttare l'azione schermante proveniente invece da un piano di massa integro.

Conclusioni

Dai dati raccolti ed esposti in questo elaborato si è potuto apprezzare prima di tutto la potenza e la versatilità del software CST, grazie al quale è stato possibile determinare con precisione il comportamento elettrico dei modelli esaminati. Si è anche potuto constatare il fatto che simili programmi di simulazione devono essere utilizzati consapevolmente dall'utente, il quale deve essere in grado di impostarne con precisione e competenza tutti i parametri. Questo per evitare di effettuare una descrizione poco accurata o errata dei modelli che porterebbe ad ottenere risultati altrettanto imprecisi o sbagliati. Emerge quindi la necessità, vista la complessità del programma, di consultare costantemente la sua guida che, seppure in modo non molto approfondito, può fornire spunti e consigli per ogni situazione di dubbio.

In secondo luogo, considerando i modelli dei quali si è simulato il comportamento e i risultati ottenuti, si devono fare alcune considerazioni relative ad analogie e differenze riscontrate. Si può infatti notare come le disposizioni dei campi elettrico e magnetico fossero molto simili fra loro e venissero soltanto parzialmente influenzate nell'andamento generale e dalla geometria del modello in questione e dalle frequenze utilizzate nei segnali di test. La cosa è già più complicata se si considerano le correnti di superficie; queste infatti non erano libere di disporsi liberamente nello spazio ma dovevano seguire la geometria dei conduttori provocando a volte effetti curiosi nel percorso che compivano per chiudere elettricamente il circuito. Si può infatti pensare a quanto visto nel piano di massa danneggiato dai fori, oppure nella griglia di massa o ancora nell'ultimo modello esaminato dove si è potuto notare come i campi inducano una corrente nella pista centrale. Un discorso a parte merita poi il profilo di irradiazione, fortemente influenzato sia dalla geometria del modello che dalle frequenze utilizzate nei segnali della simulazione. In più di qualche caso è stato infatti possibile apprezzare come cambiamenti anche minimali del modello influenzassero con forza tale risultato.

Alla luce quindi di quanto si è visto ci si può quindi rendere conto di quanto sia vasto e complesso l'ambito dell'elettromagnetismo e del fatto che al giorno d'oggi le simulazioni, come quelle viste, rappresentano uno dei mezzi più potenti, se non l'unico, che si hanno a disposizione per indagare tale ramo dell'elettronica e fornire soluzioni sempre nuove nella progettazione di dispositivi e nella verifica del loro rispetto delle normative della compatibilità elettromagnetica.

Bibliografia

- [MNV, 2005] P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci *Elementi di Fisica: elettromagnetismo*, EdiSES, 2005
- [KST, 2001] B. Krietenstein, R. Schuhmann, P. Thoma, T. Weiland *The perfect boundary approximation technique facing the big challenge of high precision field computation*, Darmstadt University of Technology, Germany, 2001
- [SorBi, 2006] R. Sorrentino, G. Bianchi *Ingegneria delle microonde e radiofrequenze*, McGraw-Hill, 2006
- [Xin, 2006] G. Xin, *ELE3310 Basic Electromagnetics Lab Session 1*, CST MICROWAVE STUDIO tutorials, 2006
- [Paul, 2005] C. R. Paul, *Introduction to electromagnetic compatibility*, Wiley, 2005
- [CTSHelp, 2009] *CST Studio Suite Help*, CST Inc., 2009
- [CTS Microwave, 2008] *CST MICROWAVE STUDIO: Workflow and Solver Overview*, CST Inc., 2008
- [Neri, 2009] N. Neri, *Antenne: progettazione e costruzione*, Edizioni C&C, 2009