



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

“ANTENNE A LARGA BANDA”

Relatore: Prof. M. Santagiustina

Laureando: Riccardo Broetto

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022

Data di laurea 23 Settembre 2022

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Banda di un'antenna	1
1.1.1	Relazione tra banda ed impedenza	2
1.1.2	Relazione tra banda ed irradiazione	3
1.1.3	Relazione tra banda e polarizzazione	4
1.1.4	Considerazioni riassuntive sulla banda di un'antenna	4
1.2	Antenne planari	4
2	Antenne a microstriscia	7
2.1	Caratteristiche generali	7
2.1.1	Struttura e progettazione	10
2.1.2	Forme della patch	10
2.1.3	Substrato	11
2.1.4	Strutture di alimentazione	11
2.2	Antenne a microstriscia a banda larga	14
2.2.1	Ridurre Q	14
2.2.2	Implementazione di una rete di adattamento di impedenza	16
2.2.3	Introduzione di risonanze multiple	18
2.2.4	Casi di studio	20
3	Antenne a monopolo planare	29
3.1	Caratteristiche generali	29
3.2	Il monopolo planare	29
3.3	Applicazioni UWB(Ultra Wide Band)	31

3.3.1	La tecnologia UWB	31
3.3.2	Considerazioni su antenne e impulsi sorgente	32
3.4	Caso di studio: antenna planare UWB integrata in un laptop .	34
4	Conclusioni	41
	Bibliografia	43

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Banda di un'antenna

La rapida evoluzione dei sistemi di comunicazione ha portato alla necessità di sviluppare nuovi dispositivi di trasmissione in grado di svolgere una varietà di compiti e di essere impiegabili per svariate applicazioni. Innanzitutto, queste antenne devono avere elevato guadagno, banda larga e, in molti casi, dimensioni ridotte.

Si definisce "Banda di un'antenna" quell'intervallo di frequenze in cui uno o più parametri specifici (ad esempio l'impedenza) hanno il valore desiderato. Chiamiamo f_u e f_l la massima e la minima frequenza alle quali i parametri in questione rientrano nei valori prescelti e definiamo così la larghezza di banda dell'antenna:

$$BW = f_u - f_l \quad (1.1)$$

Definiamo poi la "Larghezza di banda percentuale", il rapporto tra BW e la frequenza centrale (f_c), calcolabile come $f_c = \frac{f_u + f_l}{2}$:

$$B_p = \frac{BW}{f_c} = 2 \frac{f_u - f_l}{f_u + f_l} \quad (1.2)$$

Ed il "Rapporto di banda", la quantità:

$$B_r = \frac{f_u}{f_l} \quad (1.3)$$

Le *antenne a banda stretta* sono solitamente definite in funzione di B_p , mentre le *antenne a banda larga* sono definite in funzione di B_r ($B_r > 2$).

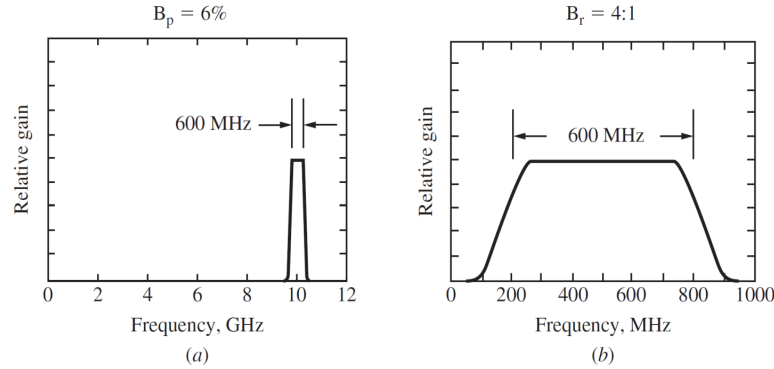


Figure 1.1: Guadagno relativo vs. frequenza. (a) Esempio di *larghezza di banda percentuale*. (b) Esempio di *Rapporto di banda*.

[Lucidi di ICT for Internet & Multimedia, Marco Santagiustina]

Esistono poi le *antenne multibanda*, in grado di operare su più di una banda, e le *antenne a banda regolabile*.

1.1.1 Relazione tra banda ed impedenza

La banda che consente di ottenere il parametro di impedenza ottimale per una determinata antenna può essere definita in funzione del *return loss* (S), che deve mantenersi attorno ai -10dB o -15dB, o del *rapporto di onda stazionaria* ($VSWR$), il quale deve avere un valore inferiore a 2 o 1.5. Inoltre si dimostra che la banda ottimale per l'impedenza è inversamente proporzionale al *quality factor* (Q) di un'antenna:

$$BW = \frac{VSWR - 1}{Q\sqrt{VSWR}} \quad (1.4)$$

Il minimo quality factor per un'antenna di date dimensioni (Q_{\min}) è calcolabile secondo il criterio di Chu:

$$Q_{\min} = \frac{1 + 3(k_o R)^2}{(k_o R)^3 [1 + (k_o R)^2]} \quad (1.5)$$

Dove il raggio R della più piccola sfera che racchiude completamente l'antenna determina il Q_{\min} di un'antenna con efficienza di radiazione del 100%. Tut-

tavia un'antenna ha solitamente un Q assai più grande di Q_{\min} , poiché, a causa della sua forma, non può sfruttare tutto il volume della sfera di raggio R . D'altra parte un Q molto basso non implica soltanto una banda più larga su cui operare, ma può anche essere sintomo di una perdita di energia da parte dell'antenna, è perciò necessario analizzare l'efficienza ed il guadagno del dispositivo su tutta la banda.

1.1.2 Relazione tra banda ed irradiazione

Vi sono vari parametri utilizzati per descrivere le performance di radiazione di un'antenna (direzione del raggio principale, direttività, efficienza etc.), e tutti variano con la frequenza. Il pattern di radiazione di un'antenna è una caratteristica fondamentale per determinare il funzionamento del dispositivo e viene solitamente espresso in coordinate polari o cartesiane.

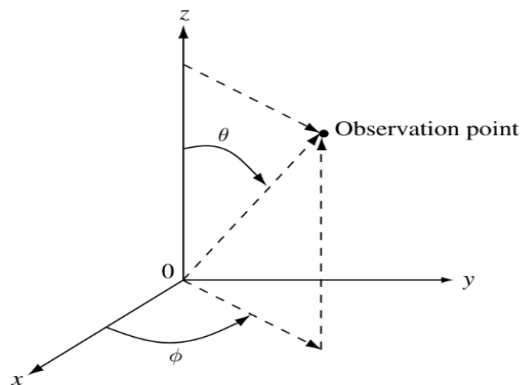


Figure 1.2: Esempio di rappresentazione in coordinate cartesiane

1.1.3 Relazione tra banda e polarizzazione

Le proprietà di polarizzazione di un'antenna vanno sempre specificate, per evitare perdite dovute ad una differenza di polarizzazione. La banda può essere determinata specificando il livello massimo desiderato di *cross polarization* o di *axial ratio*, entrambi determinati dall'isolamento tra le componenti ortogonali. Va tenuto in conto anche il fattore Q dell'antenna: generalmente un Q basso implica una bassa indipendenza delle componenti ortogonali. Di conseguenza, risulta complesso aumentare contemporaneamente sia la banda ottimale per l'impedenza che quella ottimale per la polarizzazione riducendo il Q dell'antenna. Un metodo per migliorare la polarizzazione di un'antenna su una larga banda è quello di progettare con estrema cura la sua geometria. In particolare, il rapporto tra la massima *co-polarization* e la massima *cross polarization* è solitamente utilizzato per valutare la qualità della polarizzazione.

1.1.4 Considerazioni riassuntive sulla banda di un'antenna

Riassumendo, quando si progetta un'antenna è fondamentale ottenere larghezze di banda accettabili per il sistema da implementare: innanzitutto, la banda di impedenza ottima deve ricoprire tutto l'intervallo delle frequenze su cui l'antenna opera per i livelli di S e $VSWR$ sopra descritti. Poi, su questa banda, il guadagno, la larghezza del lobo principale, ed il pattern di radiazione di un'antenna devono soddisfare i requisiti del dispositivo. Infine, su tutta la banda, il rapporto tra la massima *co-polarization* e la massima *cross polarization* deve essere superiore ad una certa soglia definita dall'applicazione a cui sarà destinato il dispositivo progettato.

1.2 Antenne planari

Definiamo antenne planari tutte le antenne con superficie piatta o incurvata collegate ad almeno una sorgente. In genere si tratta di antenne dalla struttura semplice, basso costo e dimensioni ridotte. Tra queste sono comprese le

antenne a microstriscia (Capitolo 2), molto utilizzate nell'industria aeronautica e nell'aeronautica spaziale, ma anche nelle radio delle nostre macchine e nei sistemi di comunicazione wireless che utilizziamo quotidianamente, e le *antenne a monopolo planare* (Capitolo 3), che con la loro struttura semplice e la capacità di radiazione omnidirezionale sul piano orizzontale trovavano utilizzo già alla fine del 1800 negli esperimenti di Guglielmo Marconi.

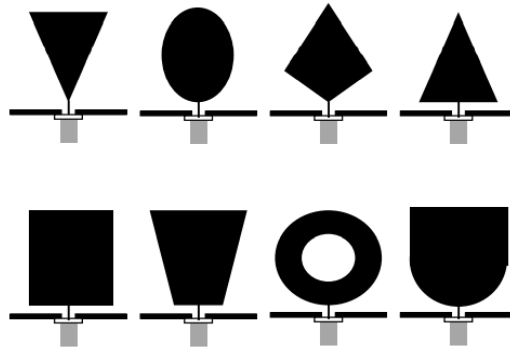


Figure 1.3: Varie forme di antenne a monopolo planare

Capitolo 2

Antenne a microstriscia

2.1 Caratteristiche generali

Le *antenne a microstriscia* sono utilizzate estensivamente nei sistemi di navigazione, di comunicazione, nella costruzione e progettazione di sistemi radar e nelle applicazioni biomediche. Si presentano in una gran varietà di forme, tra le più comuni abbiamo le *microstrip patch antennas*, le *microstrip dipole antennas*, le *microstrip slot antennas* e le *microstrip travelling-wave antennas* utilizzate per applicazioni più specifiche.

Queste antenne offrono una serie di importanti vantaggi:

- *Dimensioni e peso ridotti*: queste antenne sono solitamente costituite da un foglio di materiale conduttore, ad esempio rame, fissato su un substrato dielettrico, ed hanno uno spessore non superiore a $0,03\lambda_0$, dove λ_0 è la lunghezza d'onda a cui opera l'antenna in spazio libero.
- *Adattabilità alla superficie del substrato*: un'antenna a microstriscia può avere superficie planare o non planare, che può quindi conformarsi facilmente alla forma del substrato dielettrico a cui è attaccata.
- *Basso costo*: le antenne a microstriscia vengono solitamente fabbricate utilizzando un circuito stampato. La parte più costosa è solitamente il metallo conduttore.

- *Integrabilità con altri circuiti*: le antenne a microstriscia si integrano facilmente con altri circuiti elettronici planari.
- *Versatilità*: queste antenne sono molto versatili in termini di impedenza, frequenze di risonanza, pattern di radiazione e polarizzazione. Tutto ciò è dovuto al fatto che sono molto semplici da modificare, aggiungendo pin, diodi, carichi ed elementi parassiti

Tali antenne, tuttavia, hanno anche alcuni difetti, tra i principali vediamo sicuramente il ristretto intervallo di frequenze in cui l'impedenza risulta ottimale e la bassa efficienza di radiazione. Questi problemi sono causati dalla forte relazione tra la frequenza operativa e l'efficienza, tipica di queste antenne.

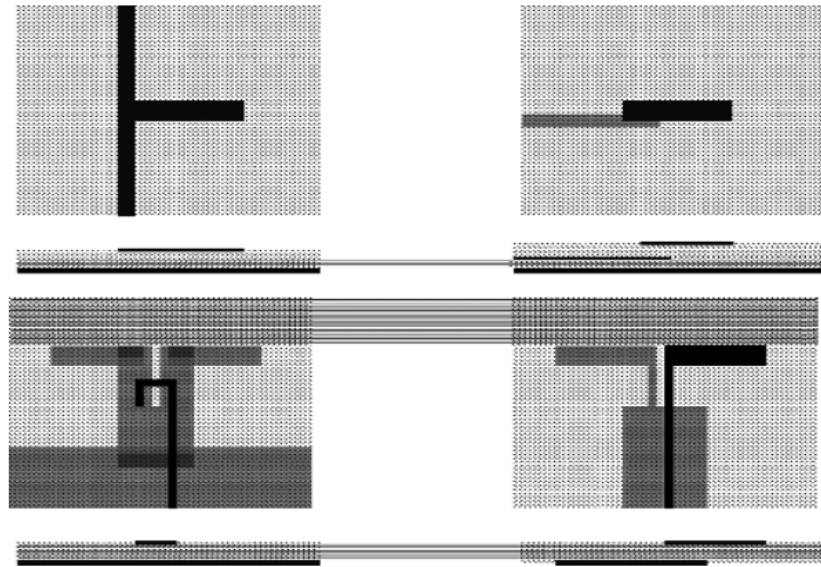


Figure 2.1: Esempi di Microstrip dipole antenna

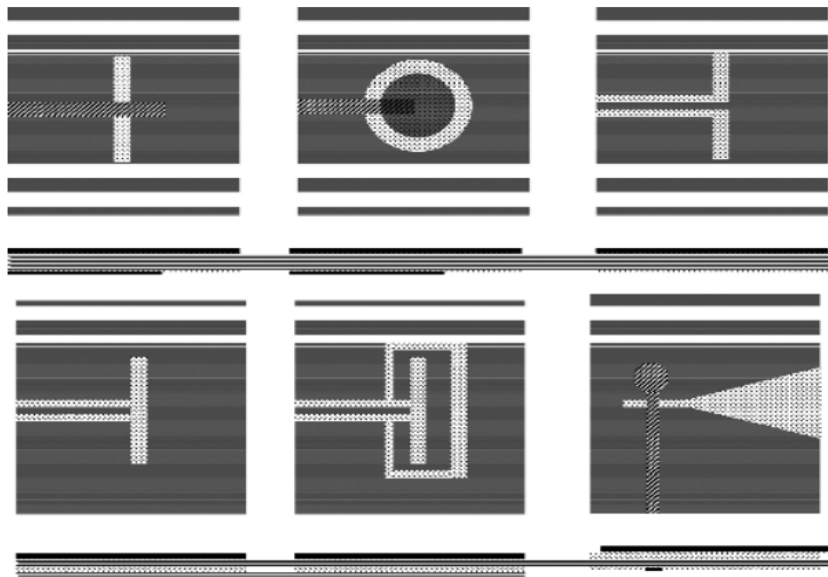


Figure 2.2: Esempi di Microstrip printed slot antenna

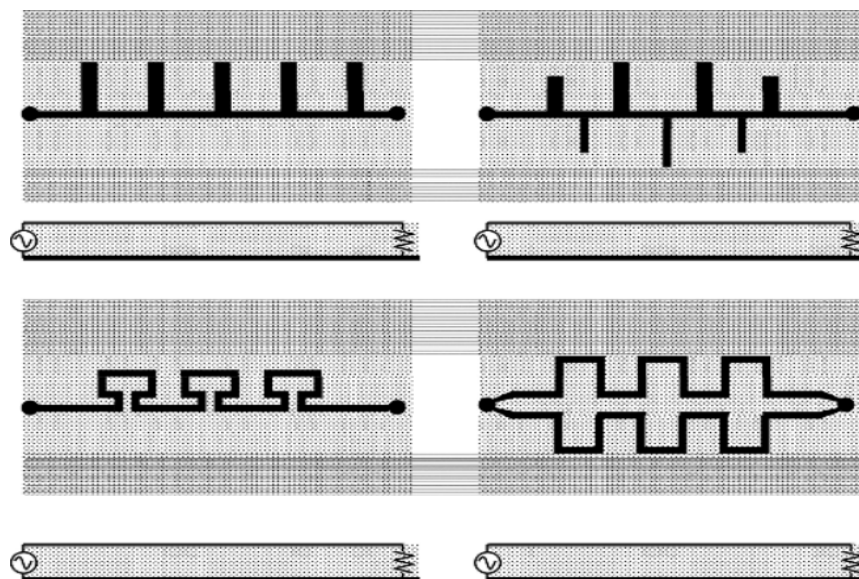


Figure 2.3: Esempi di Microstrip travelling-wave antenna

2.1.1 Struttura e progettazione

La configurazione più comune è una patch metallica fissata ad un substrato sottile (di spessore molto inferiore a λ_0) collegato a massa. Il pattern di radiazione dipende dalla distribuzione di corrente sulla patch (generalmente alimentata in maniera asimmetrica). La forma della patch, l'alimentazione ed il substrato possono essere modificati per ottenere un'antenna con le proprietà desiderate.

2.1.2 Forme della patch

Il radiatore è solitamente costruito con materiali che conducono bene alle frequenze a cui il dispositivo dovrà operare e che possano essere fissati al substrato. Le forme possibili vanno dai semplici rettangoli, quadrati, ellissi, cerchi, triangoli, anelli, pentagoni, a forme più complesse e progettabili a seconda delle necessità. Generalmente le caratteristiche dell'antenna sono definite dai suoi modi elettromagnetici, che dipendono dalla forma e dalla dimensione della patch e dall'alimentazione, ma anche dallo spessore e dalla costante dielettrica del substrato.

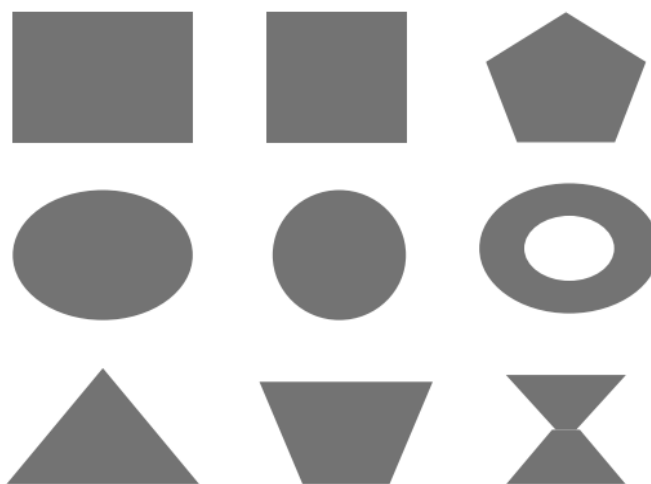


Figure 2.4: Possibili forme di radiatori

2.1.3 Substrato

Vi sono molti dielettrici adatti a compiere la funzione di substrato, tuttavia è importante che il dielettrico scelto abbia una costante dielettrica $2 < \epsilon_r < 16$. Solitamente si utilizzano delle plastiche poiché hanno un costo inferiore di altri materiali adatti allo scopo, come ceramica e zaffiro.

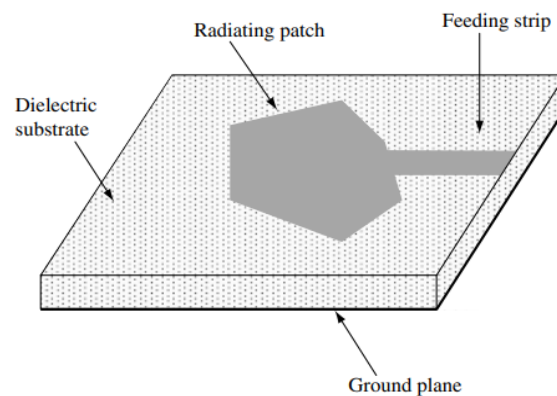


Figure 2.5: Un'antenna a microstriscia con un radiatore di forma arbitraria

2.1.4 Strutture di alimentazione

L'alimentazione deve trasferire energia a RF o a microonde efficientemente fino all'antenna. Il design della struttura di alimentazione governa direttamente l'adattamento dell'impedenza, i modi operativi e le onde di superficie dell'antenna, di conseguenza questa struttura ricopre un ruolo fondamentale nell'allargare la banda in cui l'impedenza è ottimale e nel migliorare le performance di radiazione dell'antenna.

Queste sono alcune delle strutture utilizzate per alimentare antenne a microstriscia:

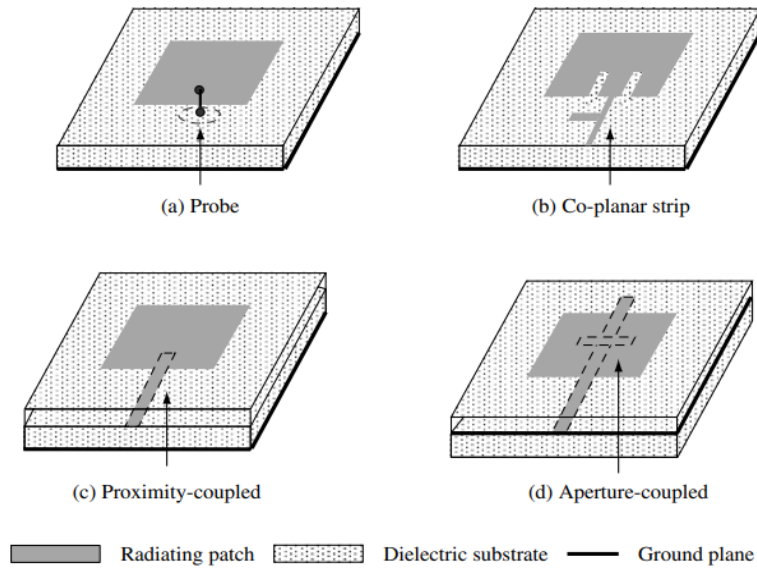


Figure 2.6: Tipi di alimentazione utilizzati nelle antenne a microstriscia

Nella figura 2.6(a) l'antenna è alimentata da una sonda che arriva da una linea coassiale, vi è poi un connettore coassiale che porta a massa la parte sottostante del substrato e modificando il punto in cui viene connessa l'alimentazione si può ottenere il bilanciamento delle impedenze della linea coassiale e della patch. Tuttavia questo tipo di struttura genera onde di superficie e induttanze parassite se il substrato è troppo spesso e non è adatta ad alimentare array di antenne.

La soluzione adottata nella figura 2.6(b) è più economica della precedente e necessità di meno spazio: consiste nell'implementazione di una striscia di alimentazione complanare alla patch, che riceve alimentazione a sua volta sul bordo del piano di messa a terra. Questa configurazione è particolarmente utile quando si devono implementare array di antenne. Per ottenere un buon bilanciamento delle impedenze tra alimentazione e patch si possono utilizzare svariate tecniche di adattamento planare, ad esempio aggiungere un circuito di adattamento di impedenza.

Nella figura 2.6(c) è rappresentata una struttura di alimentazione in cui la striscia di alimentazione è situata sotto la patch ma sopra la messa a massa. Ci sono perciò due livelli di dielettrico tra la patch e la massa. L'energia

viene trasmessa tramite l'accoppiamento elettromagnetico che si genera tra la patch e la striscia di alimentazione. Questa struttura a più livelli aumenta però i costi di fabbricazione e le perdite dovute ad onde di superficie.

Infine, nella figura 2.6(d), vediamo una struttura in cui due substrati sono separati da un piano di massa comune, la patch è situata sopra al piano superiore mentre la striscia di alimentazione si trova sopra al piano inferiore e viene fatta un'apertura sul piano di massa tra la patch e l'alimentazione. Attraverso essa si genera l'accoppiamento elettromagnetico tra i due elementi, che viene controllato dalle dimensioni e dalla forma dell'apertura. Il bilanciamento delle impedenze si ottiene ottimizzando tali parametri, il posizionamento e la lunghezza della striscia e le costanti dielettriche dei due substrati. Questa struttura di alimentazione risulta più costosa delle precedenti ma migliora notevolmente le prestazioni dell'antenna.

Un altro schema di alimentazione è quello basato sulla guida d'onda coplanare (CPW). Questo schema è particolarmente adatto per la progettazione di antenne a microstriscia e per l'alimentazione di array di antenne.

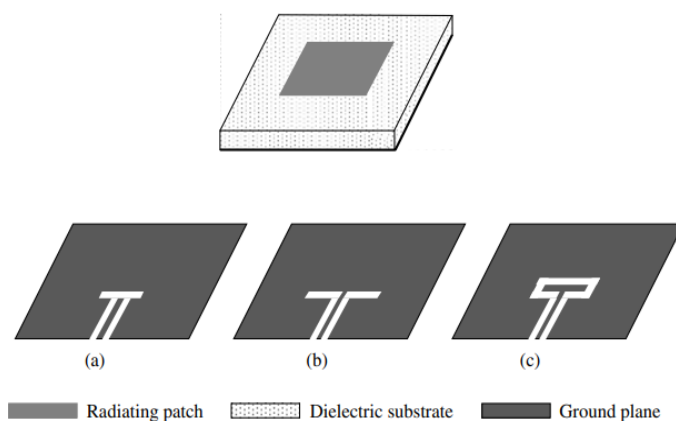


Figure 2.7: Strutture di alimentazione CPW

La guida è intagliata nel piano di massa e al termine di essa vi sono delle ulteriori cavità di varia forma, utilizzate per ottenere il bilanciamento delle impedenze.

2.2 Antenne a microstriscia a banda larga

Vi sono vari fattori che influenzano la larghezza di banda di un'antenna a microstriscia, tra cui la forma del radiatore, lo schema di alimentazione, il substrato e la disposizione di elementi parassiti. Essenzialmente, la possibilità di far operare in banda larga un'antenna a microstriscia può essere attribuita al suo basso valore di Q e alle sue risonanze.

2.2.1 Ridurre Q

Come anticipato nel Capitolo 1, un'antenna a microstriscia ha tipicamente una larghezza di banda ottimale piuttosto ridotta, poiché occupa solo una piccola parte della più piccola sfera che la contiene, ed ha di conseguenza un alto fattore Q . Il primo metodo per allargare la banda è, quindi, ridurre questo fattore. Un metodo per ottenere ciò è quello di modificare la forma del radiatore, tuttavia il miglioramento che si ottiene così è piuttosto limitato. Ad esempio le larghezze di banda in cui la return loss ($|S_{11}|$) è minore di -10 dB per l'antenna illustrata nella figura 2.8, al variare di W/L , sono illustrate nella tabella 2.9. La lunghezza L è fissa a 54 mm mentre la larghezza W varia da 10 mm a 108 mm. La larghezza di banda è influenzata dalla geometria dell'antenna e dal suo Q , tuttavia la larghezza della banda in cui l'impedenza è ottima, con $|S_{11}| < -10dB$, è ancora inferiore all' 1%. Bisogna anche ricordare che la forma del radiatore influenza i suoi modi elettromagnetici, ed è quindi di importanza critica per far operare l'antenna nel modo corretto, di conseguenza questa tecnica è poco utilizzata nella progettazione di antenne a microstriscia.

In alternativa, un substrato spesso con una bassa costante dielettrica è ottimo per allargare la banda di impedenza ottima di questo tipo di antenne, infatti riduce Q e allarga la banda tuttavia porta ad un incremento delle dimensioni del dispositivo.

Un altro fattore importante da considerare è l'aumento delle perdite causato da onde superficiali indesiderate, che abbassa l'efficienza della radiazione degradando il pattern. Ricerche hanno dimostrato che la larghezza della banda di impedenza ottima aumenta in maniera monotona all'aumentare

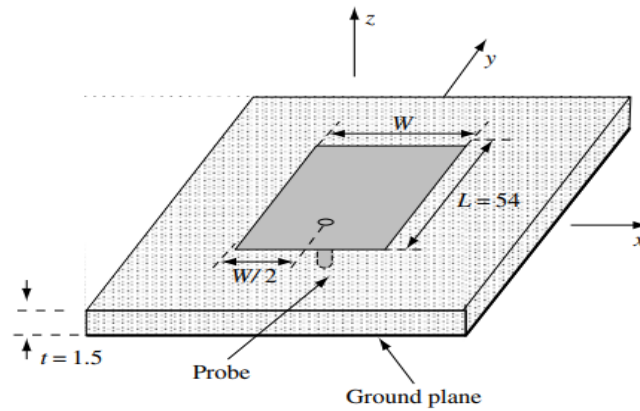


Figure 2.8: Un'antenna a microstriscia alimentata via sonda(dimensioni in millimetri)

W/L	10/54	27/54	54/54	81/54	108/54
Bandwidth for $ S_{11} < -10$ dB	0.38 %	0.68 %	0.70 %	0.95 %	1.2 %

Figure 2.9: Larghezza di banda al variare di W/L

dello spessore del substrato mentre l'efficienza della radiazione decresce rapidamente. Inoltre, la larghezza di banda inizia a diminuire anch'essa dopo che lo spessore del substrato ha superato una determinata soglia, come illustrato nel grafico 2.10.

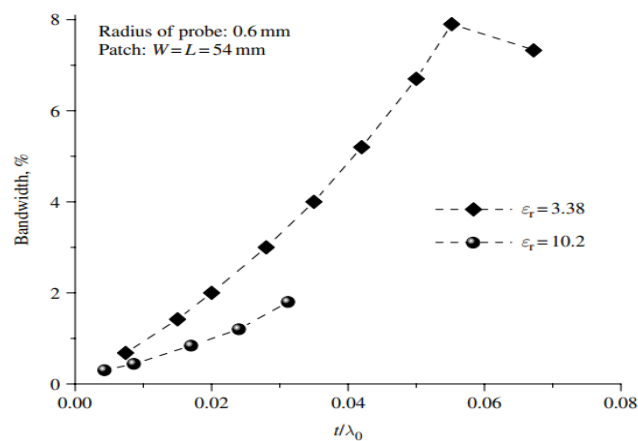


Figure 2.10: Relazione tra la larghezza di banda e lo spessore del substrato

2.2.2 Implementazione di una rete di adattamento di impedenza

Si può introdurre un circuito di adattamento di impedenza per ottenere un buon bilanciamento tra un radiatore la cui impedenza dipende dalla frequenza e una struttura di alimentazione con una impedenza caratteristica costante, ottenendo così una larghezza di banda maggiore. Vi sono due metodi per ottenere questo risultato: il primo consiste nell'inserire semplicemente un circuito separato per ottenere l'adattamento delle impedenze, lasciando inalterato il radiatore, mentre il secondo consiste nell'inserire tale circuito direttamente sulla patch, modificando eventualmente la forma del radiatore.

L'implementazione raffigurata nell'immagine 2.11(c), invece, sopprime l'effetto di eventuali radiazioni spurie senza incrementare significativamente le dimensioni dell'antenna. Tuttavia, utilizzandolo su un'antenna a microstriscia alimentata tramite sonda e con uno spesso strato di dielettrico, si ottiene un'induttanza d'ingresso piuttosto alta. La figura 2.12 illustra alcuni circuiti capacitivi che possono essere inseriti tra la sonda e la patch per compensare l'induttanza in eccesso che viene generata.

Nelle immagini da (a)-(c), il forte accoppiamento tra la patch e la parte finale della sonda produce la capacità necessaria per regolare l'impedenza in ingresso, mentre nella figura (d) costituisce una piccola estensione della sonda.

L'inserimento del circuito in uno slot apposito della patch (Figura 2.13) è una delle soluzioni più comuni, poiché permette di ottenere ottimi risultati nel adattamento delle impedenze senza aumentare le dimensioni dell'antenna e senza doverne complicare troppo la progettazione. Di conseguenza questa tecnica si presta molto bene per essere utilizzata nella progettazione di array di antenne.

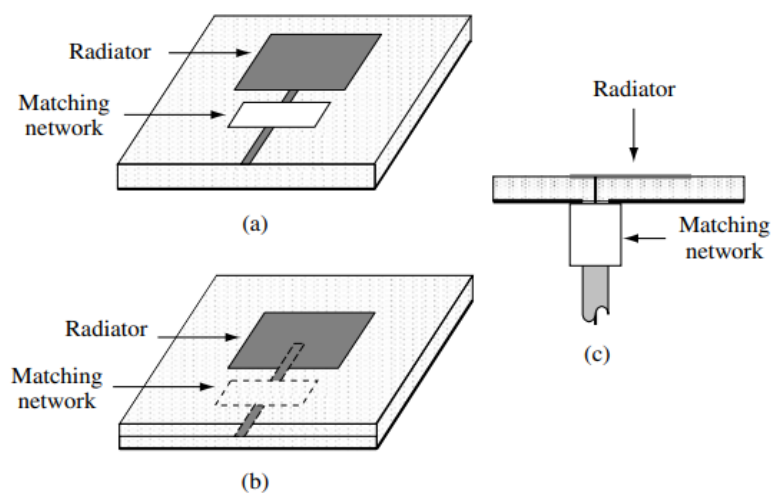


Figure 2.11: Reti di adattamento di impedenza teoriche

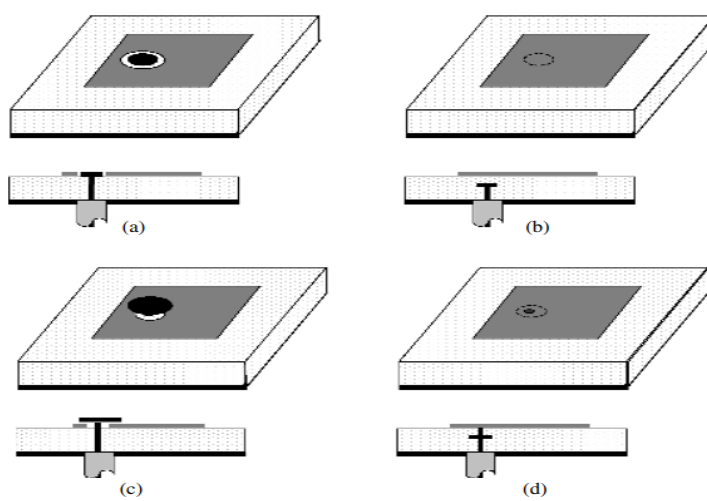


Figure 2.12: Reti di adattamento di impedenza per strutture di alimentazione con sonda

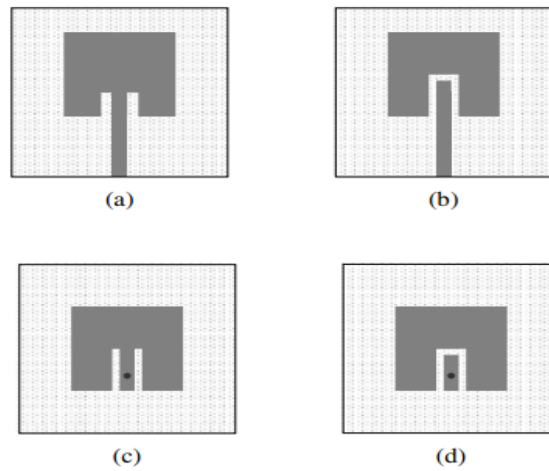


Figure 2.13: Reti di adattamento di impedenza con cavità

2.2.3 Introduzione di risonanze multiple

Le antenne a microstriscia sono strutture che operano alla loro frequenza risonanza con una banda molto limitata. È stato dimostrato che farle operare a molteplici frequenze di risonanza adiacenti è un buon metodo per aumentarne la larghezza di banda. Usando questo metodo, due o più risonanze adiacenti vengono eccitate simultaneamente.

Il modo più semplice per ottenere ciò è inserire delle patch addizionali vicino al radiatore principale. Questi elementi parassiti vengono eccitati dall'accoppiamento elettromagnetico che si genera tra essi e la patch principale. Le patch addizionali possono trovarsi sullo stesso piano della principale oppure su un livello superiore.

Design complanare

La figura 2.14 mostra alcuni schemi utilizzati per ottenere un'antenna con più patch sullo stesso piano, posizionando le patch parassite attorno all'elemento principale. I piccoli spazi tra gli elementi permettono un forte accoppiamento elettromagnetico. Le risonanze così eccitate sono vicine tra loro, così da

ottenere una larghezza di banda leggermente superiore a quella di un'antenna formata da una singola patch.

Negli schemi (a) e (b), gli elementi parassiti sono accoppiati alla patch principale lungo i lati che non irradiano, in questi casi non è necessaria una struttura di alimentazione specifica, tutte quelle viste in precedenza risultano adatte. Uno dei difetti di questo design è l'aumento della polarizzazione incrociata tra le radiazioni, soprattutto quando l'antenna opera a frequenze elevate.

Negli schemi (c), (d) ed (e) gli elementi parassiti sono accoppiati a quello principale lungo i margini da cui irradia. La banda così ottenuta può essere fino a cinque volte più grande rispetto a quella di un'antenna con una sola patch. Tuttavia anche questa soluzione introduce, anche se in quantità minore degli schemi (a) e (b), co-polarizzazione tra le varie radiazioni, soprattutto ad alte frequenze.

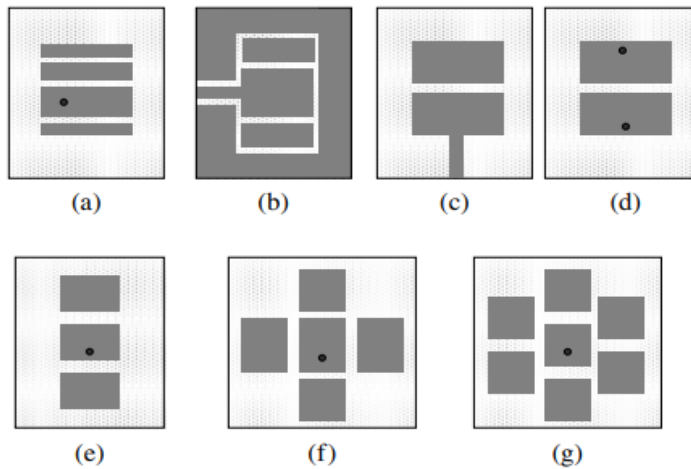


Figure 2.14: Accoppiamenti di patch complanari

La soluzione (f) combina i due schemi descritti precedentemente per migliorare ulteriormente la larghezza di banda. Questa soluzione permette di ottenere una banda pari a quasi il doppio delle soluzioni (a)-(e), inoltre, con un accurato posizionamento delle patch secondarie attorno a quella principale, si può ottenere una polarizzazione circolare (Schema (g)). Il maggiore difetto di questo design è l'incremento delle dimensioni laterali dell'antenna.

Design multi-livello

Gli schemi in figura 2.15 mostrano delle disposizioni in cui gli elementi parassiti sono posizionati al di sopra della patch principale. Grazie all'accoppiamento elettromagnetico che si genera tra i vari elementi sovrapposti la banda può essere allargata enormemente.

I design (a)-(c) sono semplici antenne a microstriscia sovrapposte tra loro. L'elemento sottostante riceve l'alimentazione ed è solitamente più piccolo dell'elemento parassita che si trova sullo strato superiore. Per aumentare il guadagno dell'antenna si possono sovrapporre più di due elementi parassiti sopra a quello principale, eventualmente leggermente sfalsati tra loro (schema (d)).

Un'altra possibile soluzione consiste nel combinare le strutture complanari e multi-livello, per ottenere antenne con banda più larga e maggiore guadagno (Schemi (e) ed (f)). Il maggiore difetto delle antenne progettate in questo modo è che occupano molto spazio lateralmente e ciò le rende di difficile utilizzo nella costruzione di array.

2.2.4 Casi di studio

Antenne a microstriscia con adattatore a Stub

Consideriamo una antenna a patch quadrata di dimensioni 54 mm x 54 mm, $t = 15$ mm ed $\epsilon_r = 3,38$, con una banda (per $|S_{11}| < -10$) del 7,3% (1,32-1,42 GHz) e la geometria illustrata alla figura 2.8. A causa dell'alta impedenza di ingresso è impossibile migliorare il bilanciamento delle impedenze semplicemente spostando il punto di ingresso dell'alimentazione, poiché si trova già sul

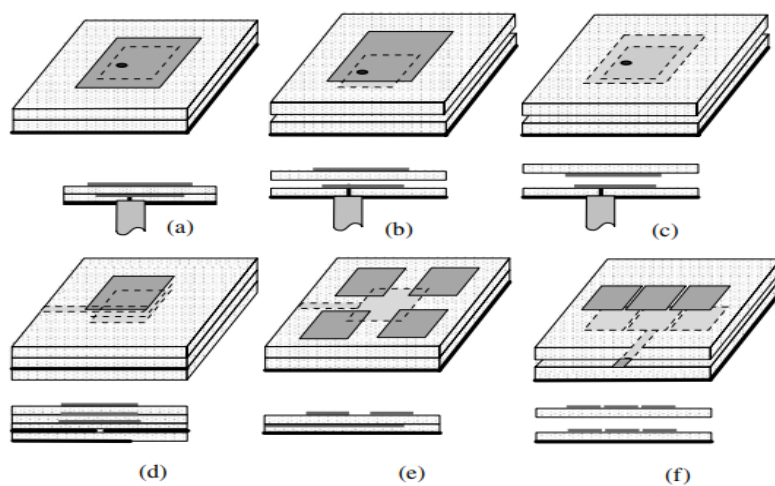


Figure 2.15: Accoppiamenti di patch multi-livello

bordo. In questo caso quindi si utilizza uno stub per regolare l'adattamento delle impedenze su banda larga.

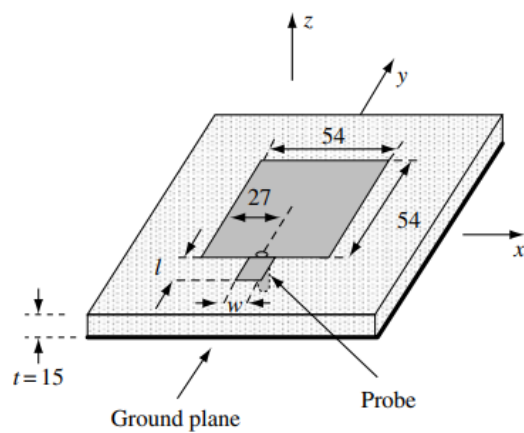


Figure 2.16: Geometria di antenna a patch quadrata con stub

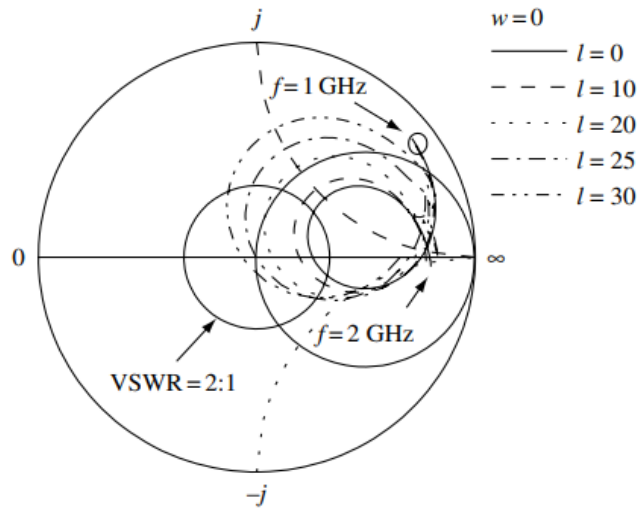


Figure 2.17: Impedenza di ingresso al variare della lunghezza dello stub

Lo stub è rettangolare $w \times l$, con $w = 8$, mentre l varia assumendo i valori riportati nella figura 2.17. Come si vede nella tabella 2.18 l'adattamento è ottimale quando $l = 25$ mm: la banda aumenta del 18%, mentre la frequenza di risonanza si sposta da 1.37GHz a 1.16GHz.

l mm	0	10	20	25	30
Bandwidth for $ S_{11} < -10$ dB (%)	7.3	7.6	8.1	8.6	7.4
Frequency range (GHz)	1.32–1.42	1.27–1.37	1.18–1.28	1.11–1.21	1.04–1.12

Figure 2.18: Larghezze di banda al variare di l

Antenna a microstriscia con elementi sovrapposti

In questo esempio, consideriamo un'antenna utilizzata per il funzionamento una rete WLAN che opera a 2.45 GHz. È quindi necessaria un'antenna a banda larga con polarizzazione lineare a 45° , tuttavia il range di frequenza del sistema va da 2.4 GHz a 2.4835 GHz. Uno dei modi per ottenere la polarizzazione desiderata consiste nell'eccitare uno degli angoli della patch sottostante. Per aumentare la larghezza della banda in cui l'impedenza è ottima si sovrappongono quattro elementi parassiti al di sopra della patch

principale, come mostrato nella figura 2.19. L'antenna può essere ottimizzata regolando le dimensioni delle patch soprastanti, la distanza tra i due substrati dielettrici e la separazione tra le patch che si trovano sul livello superiore.

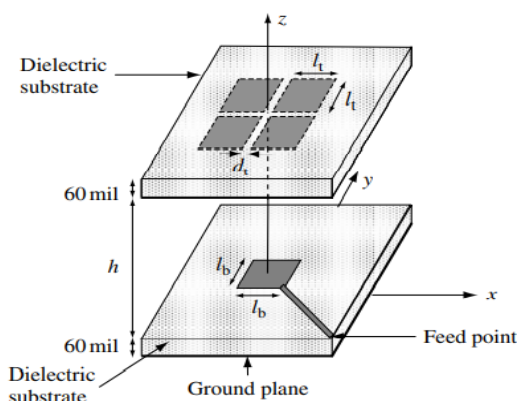


Figure 2.19: Antenna a microstriscia a più livelli con quattro elementi parassiti

Queste sono elettromagneticamente accoppiate alla patch principale (33mm x 33mm) che si trova sul substrato sottostante. Essa è alimentata diagonalmente da una microstriscia di larghezza 3,45 mm. La distanza tra i dielettrici è h . Lo stesso dielettrico (150 mm x 150 mm) è utilizzato per entrambi i livelli di substrato, ha una costante dielettrica $\epsilon_r = 3,38$ e uno spessore di circa 1,52 mm. Le quattro patch sul livello superiore (ciascuna 33 mm x 33 mm) sono separate dallo stesso spazio d_t in entrambe le direzioni.

Esaminiamo ora le prestazioni offerte dall'antenna al variare della dimensione delle patch, lo spazio che intercorre tra di esse e la distanza tra i due layer di substrato.

Innanzitutto, la dimensione l_t delle patch al livello superiore viene fatta variare da 32 mm a 35 mm con $l_b = 33\text{mm}$ ed $h = 7\text{mm}$. Come possiamo vedere nell'immagine 2.20, l'incremento di l_t causa un'eccitazione delle risonanze superiori, a frequenza più elevate di 2,6 GHz. Incrementare ulteriormente l_t causa la scomparsa della risonanza inferiore a 2,4 GHz. Entrambe le risonanze sono eccitate ad $l_t = 33\text{mm}$ per un $\text{VSWR} = 1,5$.

Successivamente fissiamo $l_b = l_t = 33\text{mm}$ e variamo il parametro h , ovvero la distanza tra i due dielettrici. Quando h è vicina a 7 mm, due

risonanze sono ben bilanciate, come mostrato alla figura 2.21. Inoltre, se le due risonanze vengono avvicinate tra loro, si può ottenere una banda leggermente più larga. Incrementare ulteriormente h porta ad un calo della larghezza di banda ed alla scomparsa della risonanza sottostante.

Infine, la figura 2.22 mostra gli effetti ottenuti variando d_t tra gli elementi dello strato superiore. La separazione varia tra i 2 mm ed i 6 mm, mantenendo tutti gli altri parametri ai valori definiti in precedenza. Si può osservare che la frequenza corrispondente al margine basso della banda aumenta all'aumentare di d_t , inoltre, all'aumentare del parametro, la risonanza superiore scompare, causando una riduzione considerevole della banda. Il valore di d_t a cui si ottiene un ottimo matching delle impedenze si aggira attorno ai 4 mm.

Riassumendo, è evidente che i tre parametri presi in esame influiscono sul bilanciamento delle due risonanze. Quella superiore è controllata soprattutto dalle dimensioni delle patch al livello più alto, mentre quella inferiore è influenzata soprattutto dalla taglia della patch che si trova sul substrato sottostante.

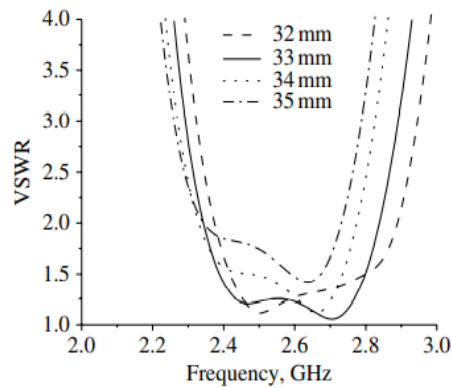
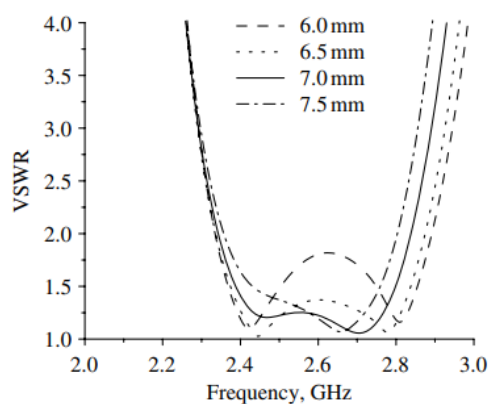
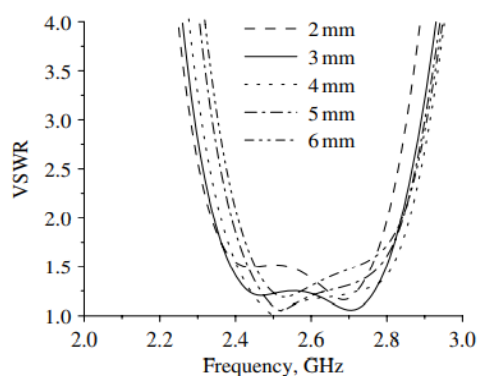


Figure 2.20: VSWR al variare delle dimensioni degli elementi parassiti

La figura 2.28 mostra il VSWR misurato per la configurazione ottimizzata dell'antenna, vediamo che la larghezza di banda si aggira attorno al 16% con frequenza centrale a 2,45 GHz, ricoprendo quindi la banda ISM (che va da 2,4 GHz a 2,5 GHz), ovvero quella riservata ad applicazioni industriali

Figure 2.21: VSWR al variare della distanza h Figure 2.22: VSWR al variare delle distanze d_t

scientifiche e mediche.

I pattern di radiazione sono poi misurati rispetto a tre diverse frequenze primarie, ovvero 2,40 GHz, 2,45 GHz e 2,50 GHz. Le figure 2.29 e 2.30 mostrano i pattern di radiazione rispettivamente sui piani $x - z$ e $y - z$. In tali piani, i pattern delle componenti E_θ ed E_ϕ risultano piuttosto stabili e simmetrici, senza lobi laterali nella metà superiore dello spazio. Sul piano $x - z$ la larghezza media del raggio per le componenti E_θ/E_ϕ sono $54^\circ/61^\circ$ e $54^\circ/61^\circ$ sul piano $y - z$. A causa del piano di massa di dimensioni finite utilizzato nelle misurazioni, il rapporto fronte-retro è generalmente inferiore a

-20 dB su entrambi i piani. Inoltre, il guadagno medio misurato su entrambi i piani è approssimativamente 9,5 dBi.

Di conseguenza, un'antenna di questo tipo ricopre e supera tranquillamente le specifiche della rete WLAN descritta inizialmente, ed è utilizzabile in una grande varietà di ambienti e situazioni.

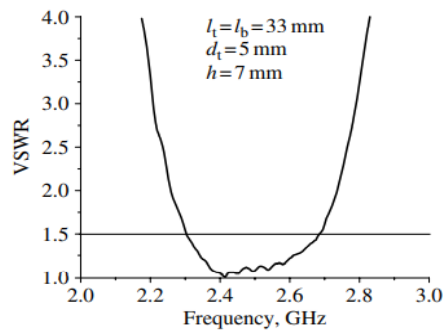


Figure 2.23: VSWR dell'antenna con design ottimale

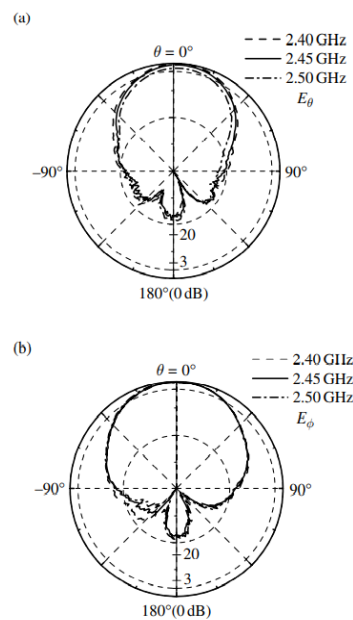
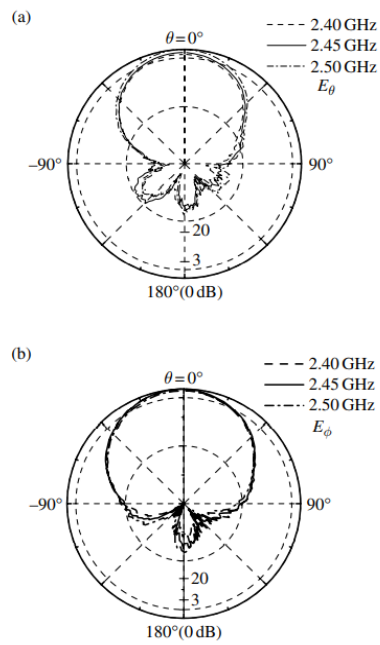


Figure 2.24: Pattern di radiazione del design ottimale sul piano $y - z$

Figure 2.25: Pattern di radiazione del design ottimale sul piano $x - z$

Capitolo 3

Antenne a monopolo planare

3.1 Caratteristiche generali

Dipoli e monopoli sono le antenne più semplici e basilari e sono state ampiamente utilizzate fin dalla fine dell' '800, quando Guglielmo Marconi le utilizzò per i suoi esperimenti. Un'antenna monopolo installata verticalmente sopra un piano di massa ha una struttura molto semplice, ma ha polarizzazione verticale pura ed irradia lateralmente in tutte le direzioni. Nelle antenne a monopolo la banda in cui l'impedenza risulta ottima può essere accresciuta semplicemente modificando la geometria dell'antenna, ad esempio ingrossando o ripiegando il filo che la compone.

A causa della facilità con cui è possibile aumentarne la banda, queste antenne stanno diventando molto promettenti per applicazioni in via di sviluppo, ad esempio sistemi radio gestiti via software, sistemi di comunicazione wireless riconfigurabili e sistemi Ultra-Wide-Band(UWB) .

3.2 Il monopolo planare

In figura 3.1 sono rappresentate alcune delle forme che il radiatore di un monopolo planare può assumere. La maggior parte di essi possiede una banda molto larga in cui l'impedenza è ottima, ad esempio i modelli con radiatore di forma circolare hanno una banda passa-alto. Inoltre, se si ha un buon

adattamento delle impedenze a più frequenze risonanti in contemporanea la banda può essere allargata ulteriormente.

Di conseguenza bisogna fare attenzione al limite inferiore della banda (Lower edge frequency of bandwidth, LEFBW) e all'omnidirezionalità della radiazione.

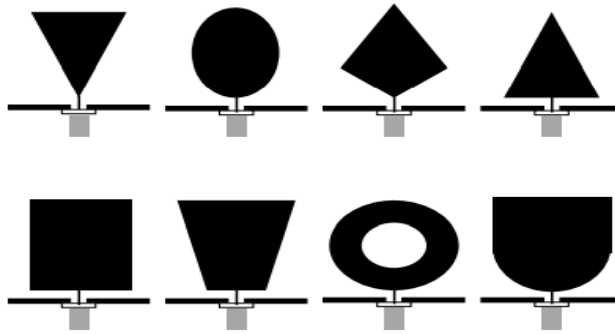


Figure 3.1: Le varie forme che il radiatore di un monopolo planare può assumere

LEFBW

La frequenza operativa è una delle specifiche più importanti nella progettazione di antenne. Per antenne con una sola risonanza può essere calcolata facilmente. Ad esempio, la frequenza operativa di un monopolo a filo può essere ricavata da $c/(4L_0)$, dove c è la velocità della luce ed L_0 è la lunghezza del filo sottile che costituisce il monopolo. Di conseguenza, in questi casi, la banda e la frequenza operativa sono sufficienti per descrivere il funzionamento dell'antenna che si sta progettando.

Invece, per progettare e studiare un'antenna a banda larga con molteplici risonanze, utilizziamo la LEFBW e la banda, poiché il calcolo della risonanza diventa complesso a causa delle varie forme che il radiatore può assumere. Ad esempio, la figura 3.2 illustra due tipi di monopolo trapezoidale planare, per i quali possiamo calcolare la LEFBW utilizzando la formula 3.1 o 3.2:

$$F(\text{GHz}) = \frac{0,25 \times 300}{H + h + \frac{W_u + W_b}{4\pi}} \quad (3.1)$$

$$F(GHz) = \frac{0,25 \times 300}{\{H^2 + [\frac{2\max(W_u, W_b) - W_u - W_b}{2}]^2\} + h + \frac{W_u}{2\pi}} \quad (3.2)$$

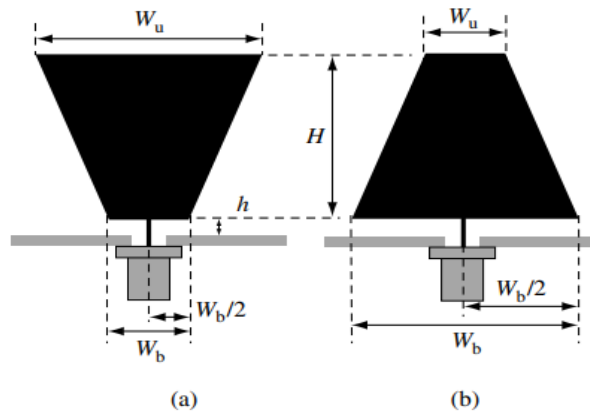


Figure 3.2: Monopolo planare trapezoidale

Se $W_u > W_b$, la LEFBW calcolata dall'equazione 3.2 può risultare molto più accurata di quella calcolata con 3.1 perché considera più precisamente le effettive dimensioni del radiatore planare.

3.3 Applicazioni UWB(Ultra Wide Band)

3.3.1 La tecnologia UWB

La tecnologia UWB funziona attraverso la trasmissione di impulsi brevi nel dominio del tempo (solitamente di durata inferiore al nanosecondo), che di conseguenza occupano una banda vastissima (Tipicamente più grande di 500 MHz). I dispositivi UWB attualmente in commercio sono utilizzati in moltissimi campi, in particolare sistemi di imaging, sistemi di sorveglianza, radar per veicoli, comunicazioni e misurazioni. Essi hanno inoltre un costo contenuto e sono semplici da progettare, a causa del minor numero di componenti richiesti rispetto ai tradizionali sistemi a banda larga.

D'altro canto, dato l'enorme intervallo di frequenze da essi occupato, i sistemi UWB possono interferire con altri apparecchi elettronici. Per fare

in modo che questa eventualità non si verifichi sono stati posti dei limiti alla potenza ed alla banda di questi dispositivi, di cui bisogna tenere conto durante la progettazione.

3.3.2 Considerazioni su antenne e impulsi sorgente

Antenne per sistemi UWB

Consideriamo un tipico sistema di trasmissione/ricezione in un sistema radio UWB, come illustrato nella figura 3.3, e mettiamo in relazione la potenza in output del ricevitore con la potenza in input dell'emettitore, supponendo che ciascuna antenna sia nella zona di campo lontano dell'altra:

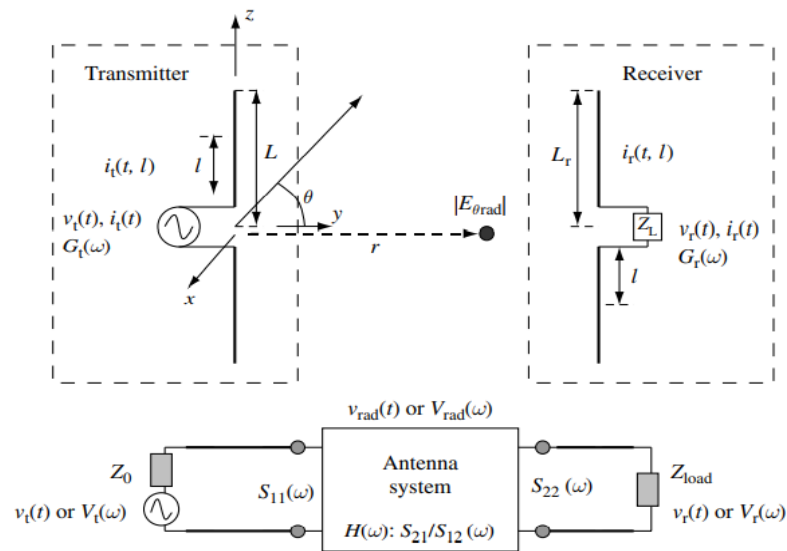


Figure 3.3: Sistema di trasmissione/ricezione

$$\frac{P_r}{P_t} = (1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2)G_t G_r |\hat{\rho}_t \cdot \hat{\rho}_r|^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \quad (3.3)$$

dove P_t e P_r sono, rispettivamente, le medie sule tempo della potenza di input del trasmettitore e della potenza di output del ricevitore; Γ_t e Γ_r sono le perdite all'ingresso del trasmettitore e all'uscita del ricevitore; G_t e G_r sono i guadagni delle due antenne; $\hat{\rho}_t$ e $\hat{\rho}_r$ sono i versori di polarizzazione di trasmettitore e ricevitore; λ è la lunghezza d'onda e r è la distanza tra le antenne. I guadagni delle due antenne sono funzioni dell'orientazione (θ, Φ) .

La formula 3.3 è valida solo se i parametri rimangono invariati su tutto l'intervallo delle frequenze, altrimenti vanno scritti in funzione della frequenza ω :

$$\frac{P_r(\omega)}{P_t(\omega)} = (1 - |\Gamma_t(\omega)|^2)(1 - |\Gamma_r(\omega)|^2)G_t(\omega)G_r(\omega)|\hat{\rho}_t(\omega) \cdot \hat{\rho}_r(\omega)|^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \quad (3.4)$$

Se è nota la funzione di trasferimento $H(\omega)$ che descrive la relazione tra i segnali di ingresso ed uscita (voltage) $[V_t(\omega)/2]^2/2 (= P_t(\omega)Z_0)$ e $[V_r(\omega)/2]^2/2 (= P_r(\omega)Z_{load})$, allora possiamo descrivere l'antenna attraverso le equazioni 3.5 e 3.6:

$$H(\omega) = \frac{V_r(\omega)}{V_t(\omega)} = \left| \sqrt{\frac{P_r(\omega)Z_{load}}{P_t(\omega)4Z_0}} \right| = |H(\omega)| e^{-j\Phi(\omega)} \quad (3.5)$$

$$\Phi(\omega) = \Phi_t(\omega) + \Phi_r(\omega) + \frac{\omega r}{c} \quad (3.6)$$

dove $\Phi_t(\omega)$ e $\Phi_r(\omega)$ indicano le variazioni di fase causate dalle due antenne. La funzione di trasferimento è determinata da caratteristiche come l'adattamento delle impedenze, il guadagno, la distanza tra le antenne, la frequenza e l'orientazione. Di conseguenza $H(\omega)$ può essere utilizzato per descrivere il sistema.

Impulsi sorgente

Per trasmettere segnali UWB utilizziamo impulsi che possono essere generate e controllate facilmente e con un basso consumo di potenza. In particolare, si utilizzano spesso impulsi appartenenti alla famiglia degli "Impulsi di Rayleigh", descritti dalle seguenti equazioni:

$$v_n(t) = \frac{d^n}{dt^n} \left[e^{-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^2} \right] \quad (3.7)$$

$$v_n(\omega) = (j\omega)^n \sigma \sqrt{\pi} e^{-\left(\frac{\omega\sigma}{2}\right)^2} \quad (3.8)$$

dove il parametro σ rappresenta il tempo tale che $v_0(\sigma) = 1/e$.

La figura 3.4 mostra l'impulso Gaussiano $v_0(t)$ e l'impulso di Rayleigh di primo ordine $v_1(t)$ per $\sigma = 20, 50, 80$ e 110 ps.

3.4 Caso di studio: antenna planare UWB integrata in un laptop

Al giorno d'oggi, con lo sviluppo della tecnologia WLAN (Wireless Local Area Network), la maggior parte dei laptop offre la possibilità di connettersi in maniera wireless. Al momento, la tecnologia WLAN basata sullo standard IEEE 802.11 può fornire dati a velocità che vanno dagli 11 Mbps fino ai 108 Mbps, operando nelle bande 2,4–2,4835 GHz, 5,150–5,250 GHz, 5,250–5,350 GHz, e 5,725–5,825 GHz. Vi sono già molte antenne in grado di creare questo tipo di connessioni, ma la tecnologia UWB sembrerebbe particolarmente adatta per essere applicata a questo genere di connessioni, WLAN a breve distanza e WPAN (Wireless Personal Area Network).

Una delle sfide che si incontra nella progettazione di sistemi UWB è quella di riuscire a costruire antenne molto piccole ed in grado di ricoprire larghissimi intervalli di frequenze 3,1–10,6 GHz, che abbiano una forma tale da consentirne l'inserzione in dispositivi portatili. Bisogna inoltre considerare la vicinanza tra l'antenna, il display (al di sotto del quale viene solitamente inserita) e tutti gli oggetti metallici che la circondano, i quali rendono difficile il adattamento delle impedenze e assorbono una parte dell'energia che

3.4. CASO DI STUDIO: ANTENNA PLANARE UWB INTEGRATA IN UN LAPTOP35

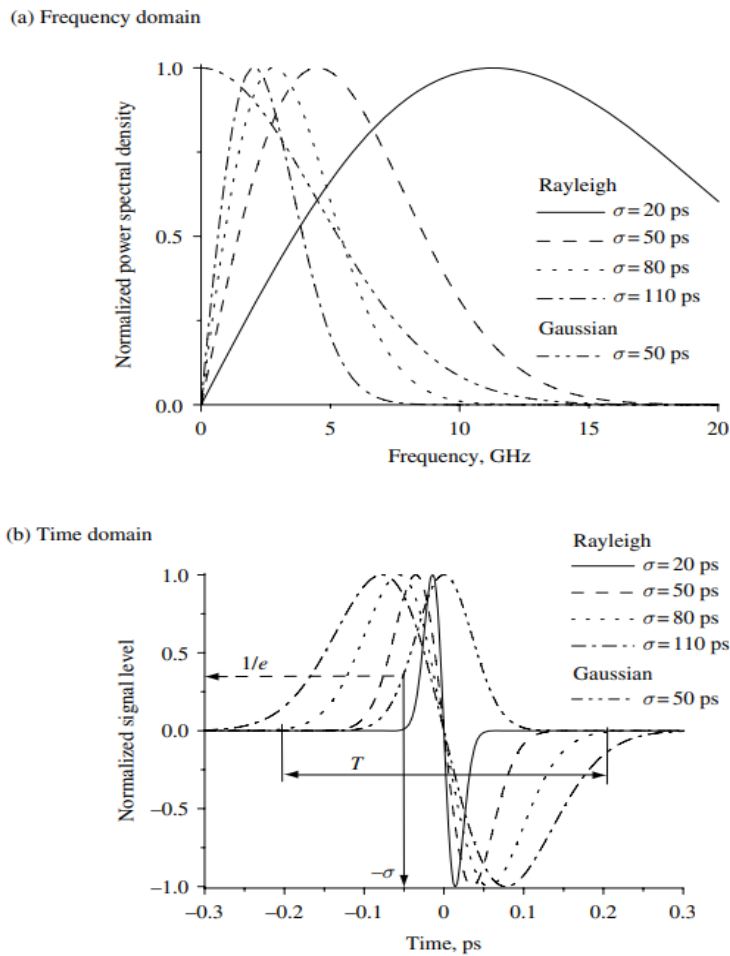


Figure 3.4: Tipi di impulsi e loro spettro

dovrebbe andare all'antenna.

Per rimediare a questi inconvenienti si può utilizzare l'antenna illustrata alla figura 3.5, formata da un semicerchio di raggio 5mm ed un rettangolo di dimensioni 5mm x 10mm ed attaccata al centro di una PCB (Roger4003, $\epsilon_r = 3,38$) di dimensioni 36mm x 11mm x 0,81mm. Tale antenna ha dimensioni contenute e si può installare facilmente al di sotto dello schermo di un laptop.

La PCB viene connessa elettricamente ad un foglio di rame quadrato con lati di lunghezza 46mm, utilizzato come massa. Un cavo coassiale da 50 Ω eccita il campo nella parte sottostante del semicerchio. Nel complesso la nostra antenna ha uno spessore inferiore ad 11mm.

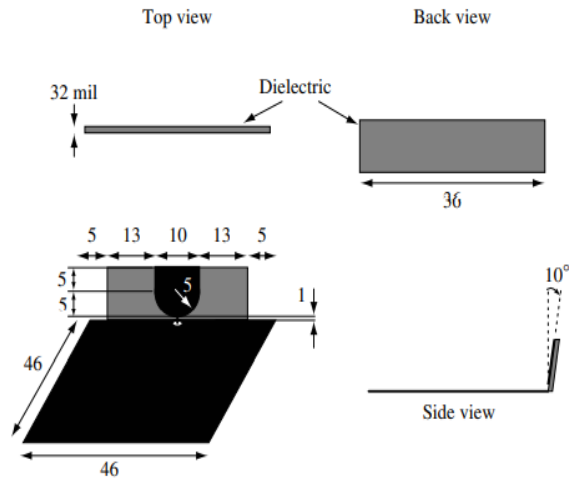


Figure 3.5: Geometria di un'antenna UWB planare installata in un laptop

L'antenna viene poi installata sul bordo superiore del display, come mostrato in figura 3.6, all'interno di un piccolo scompartimento 50mm x 8mm, in modo da tenerla ad una minima distanza dal display, la cui interazione causerebbe perdite indesiderate.

Anche se non a contatto con l'antenna, la vicinanza dello schermo rende più difficoltoso il bilanciamento delle impedenze, soprattutto quando l'antenna lavora a basse frequenze. Inoltre il foglio di rame che funge da massa si trova sotto l'LCD ed è elettricamente connesso alla cover, causando così grosse perdite per quanto riguarda l'adattamento delle impedenze e l'efficienza dell'antenna.

Comparando le misurazioni fatte sull'antenna in spazio libero e quelle fatte dopo l'installazione, si nota che una volta inserita all'interno del laptop ha una banda più larga. Questo è dovuto al fatto che lo schermo LCD e la cover del computer riducono il Q dell'antenna, allargando la banda, ma riducendo drasticamente l'efficienza dell'antenna.

Il grafico 3.8 mostra il VSWR dell'antenna dopo l'installazione. Essa ha un buon bilanciamento delle impedenza per $VSWR = 2,5$ nella banda 3,1-10,6 GHz. Ciò implica anche che più risonanze sono state eccitate all'interno della banda.

3.4. CASO DI STUDIO: ANTENNA PLANARE UWB INTEGRATA IN UN LAPTOP37

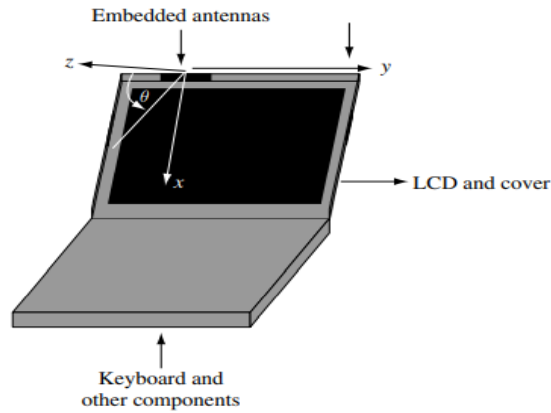


Figure 3.6: Posizione di installazione dell'antenna

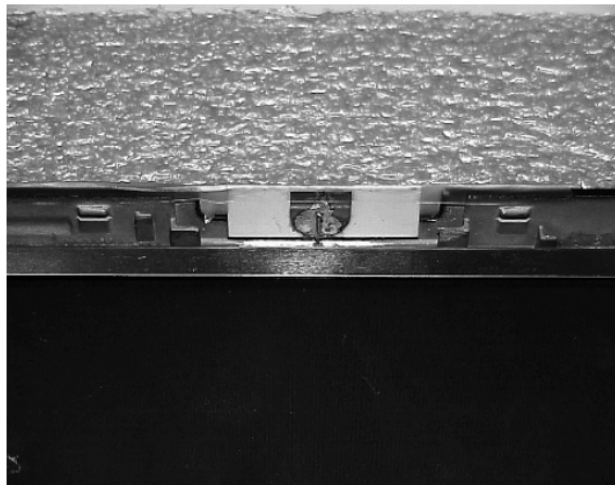


Figure 3.7: Foto dell'antenna installata nella cover del computer

Il grafico 3.9 mostra il guadagno medio ed il guadagno massimo misurati rispetto alla frequenza, da 3GHz a 12GHz, includendo i contributi delle componenti polarizzate sia verticalmente che orizzontalmente. Le misurazioni vanno dal piano con $\theta = -30^\circ$ fino a 30° con incrementi di 10° .

Guardando il grafico (a) si nota che il guadagno medio dell'antenna si trova tra i -4 e gli 0 dBi nelle frequenze utilizzate dai dispositivi UWB, e che il guadagno medio per $\theta = 30^\circ$ è più basso di quello misurato sugli altri

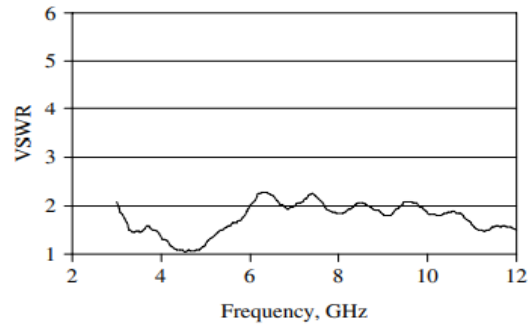


Figure 3.8: VSWR dell'antenna installata nel laptop

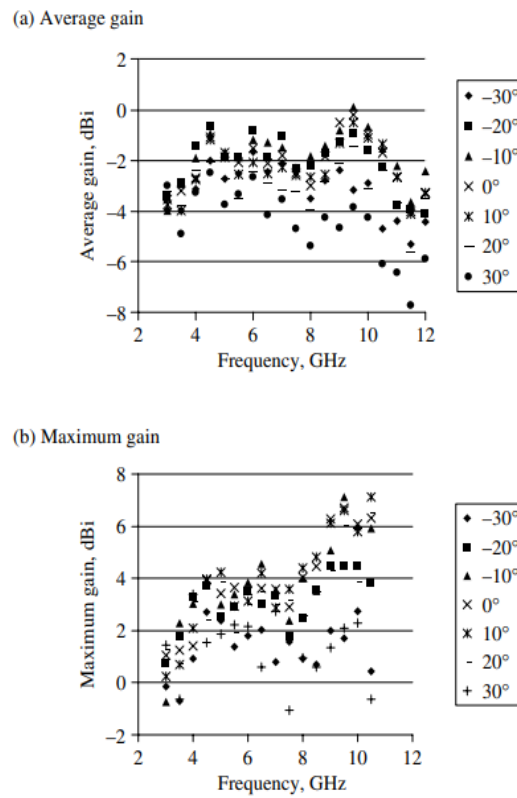


Figure 3.9: Guadagno medio e guadagno massimo misurati per l'antenna installata nel laptop

piani.

Il grafico (b) evidenzia come il guadagno massimo dipenda fortemente

3.4. CASO DI STUDIO: ANTENNA PLANARE UWB INTEGRATA IN UN LAPTOP39

dalla frequenza, si hanno infatti circa 0dBi attorno ai 3GHz per arrivare a circa 7dBi alle frequenze più elevate dello spettro. Questa dipendenza dalla frequenza è probabilmente dovuta alle interazioni tra l'antenna e l'elettronica circostante, che ne peggiora le prestazioni a basse frequenze. Si nota inoltre che per $\theta = 30^\circ$ e $\theta = -30^\circ$ il guadagno massimo risulta più basso rispetto agli altri valori di θ , ciò è probabilmente dovuto alla copertura ed al LCD che schermano le radiazioni dell'antenna compromettendone il funzionamento.

Infine, il grafico 3.11 illustra i pattern di radiazione in campo lontano sul piano orizzontale a 3, 7 e 10 GHz. I risultati dimostrano che tale antenna è sostanzialmente una variazione di un monopolo planare e possiede buoni pattern di radiazione su tutto lo spettro UWB. Si hanno dei decrementi nel pattern di radiazione in direzione $\theta = 0^\circ$ ed all'aumentare della frequenza aumenta il guadagno dell'antenna.

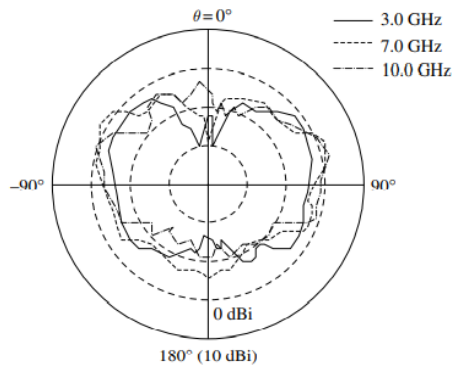


Figure 3.10: Pattern di radiazione sul piano orizzontale dell'antenna installata all'interno del laptop

Capitolo 4

Conclusioni

In questa tesi ho illustrato l'implementazione ed il funzionamento di antenne e dispositivi in grado di operare in banda larga e che incontriamo nella nostra vita quotidiana. Le antenne a microstriscia, ad esempio, sono implementate in moltissimi dispositivi cellulari ed i metodi, spiegati al Capitolo 2, che permettono di farle operare in banda larga ci consentono ogni giorno un libero e rapido accesso alle reti cellulari.

Anche i monopoli planari trovano grande utilizzo per impieghi commerciali e non, ed hanno un ruolo centrale nello sviluppo della tecnologia UWB discussa al Capitolo 3. Essa trova già largo impiego nei sistemi di sicurezza e misurazione, nella produzione di immagini in campo medico ed edile e nella progettazione di sistemi anti-collisione per veicoli, e sta iniziando ad essere utilizzata anche all'interno di dispositivi portatili, come nel caso del laptop sopra descritto.

Bibliografia

- *Antenna theory : analysis and design*, Constantine A. Balanis, ©2005, 3^a ediz, John Wiley & Sons.
- *Broadband planar antennas design and applications*, Zhi Ning Chen, Michael Y.W. Chia, ©2006, 1^a ediz. , John Wiley & Sons.
- *Fondamenti di campi elettromagnetici*, Fawwaz Ulaby, Umberto Ravaioli, ©2021, 8^a ediz., Pearson.
- *Principles of Coomunications Networks and Systems*, Nevio Benvenuto, Michele Zorzi, ©2011, John Wiley & Sons.