

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

Analisi di Prototipi di Superfici Riflettenti Intelligenti

Relatore

Prof. Magarotto Mirko

Laureando

Filippin Federico

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Data di laurea 12/11/2024

Alla mia famiglia...

Sommario

La comunicazione mobile di quinta generazione (5G) è utilizzata non solo per fornire agli utenti esperienze aziendali più coinvolgenti, ma anche per risolvere il problema della comunicazione tra persone e oggetti, oggetti e oggetti. Per far fronte a queste necessità emergono alcuni candidati dominanti attualmente utilizzati, come il massive multi-input multi-output (MIMO), le onde millimetriche (mmWave) e l'aggregazione di portanti. Sebbene i candidati possano soddisfare i requisiti del 5G in una certa misura, presentano ancora alcuni limiti. Il segnale mmWave è facilmente bloccato dagli edifici ed è vulnerabile alle intemperie. L'hardware del massive MIMO è difficile da implementare a causa delle catene di radiofrequenza (RF) dedicate. Inoltre, l'aumento di utenti e servizi si tradurrà in un elevato consumo di energia. Tutto ciò comporta nuove sfide per i sistemi 5G.

Questa tesi si pone l'obiettivo di studiare un approccio innovativo alla comunicazione wireless per apportarne delle migliorie tramite la presentazione dei principali hardware utilizzati per l'implementazione pratica delle Intelligent Reflecting Surfaces (IRS).

Protagoniste di questo documento saranno le superfici riflettenti intelligenti (IRS), una tecnologia emergente che mira a soddisfare requisiti ancora più rigorosi rispetto alle reti wireless di quinta generazione (5G), come: scambi di dati ultra elevati, efficienza energetica, copertura globale e connettività, nonché affidabilità alta e bassa latenza [1].

Queste esigenze non vengono infatti soddisfatte con le tecnologie esistenti, progettate per supportare i servizi 5G, che implicherebbero di:

- Distribuire più nodi attivi come stazioni base (BS), punti di accesso (AP), relè e antenne remote per ridurre la distanza di comunicazione e migliorare la copertura e la capacità di rete, comportando però costi energetici, di distribuzione e manutenzione più elevati, oltre a problemi di interferenza più complicati.
- Aumentare il numero di antenne nelle stazioni base e nei punti di accesso per sfruttare i guadagni del massive MIMO, che richiede maggiori costi hardware ed energetici, nonché una complessità di elaborazione del segnale più elevata.

- Migrare verso frequenze più alte come le onde millimetriche (mmWave) o frequenze di terahertz (THz), per sfruttare la loro ampia larghezza di banda, cosa che richiede l'installazione di più nodi attivi e antenne.

Risulta quindi essenziale, per far fronte a queste problematiche e limitazioni, sviluppare tecnologie innovative per garantire una crescita sostenibile della capacità delle reti wireless future con costi contenuti e complessità ridotte.

L'obiettivo di questa tesi è quello di esaminare i principali aspetti hardware necessari per l'implementazione pratica delle Intelligent Reflecting Surfaces (IRS), concentrandosi sulle componenti e sulle tecnologie chiave che rendono possibile il controllo dinamico delle onde elettromagnetiche. In particolare, la tesi esplorerà l'uso di diodi PIN, varactor e altre componenti elettroniche, che consentono di modulare fase e ampiezza dei segnali riflessi, creando pattern di radiazione ottimizzati per varie applicazioni di rete. Verranno analizzate le strutture di alimentazione e i meccanismi di controllo che permettono una gestione efficiente degli elementi riflettenti. Inoltre, saranno presentati i diversi approcci all'integrazione di IRS attive e passive, con un'attenzione particolare ai prototipi hardware sviluppati per migliorare le prestazioni nelle reti 6G, come le metasuperfici programmabili e le IRS trasmissive.

Indice

1	Introduzione alle Superfici Riflettenti Intelligenti	1
1.1	Definizione e principi di funzionamento delle IRS	1
1.1.1	Funzioni svolte nella riconfigurazione del canale	2
1.2	Confronto con tecnologie tradizionali (M-MIMO e relè attivi)	3
1.3	Vantaggi e sfide principali nell'adozione delle IRS	5
1.4	Hardware per l'implementazione pratica di IRS	6
2	Fondamenti dell'IRS	7
2.1	Modello di canale	7
2.1.1	Potenza media	9
2.2	Miglioramenti per il modello di canale e direzioni future	9
3	Aspetti hardware e prototipi di IRS	11
3.1	Metamateriali e Metasuperfici	11
3.2	Progettazione Hardware delle IRS	13
3.2.1	Architettura dell'IRS	13
3.2.2	Progettazione degli elementi IRS	18
3.2.3	Progettazione di array IRS	19
3.3	Coefficiente di riflessione delle IRS	20
3.3.1	Modellazione del coefficiente di riflessione	20
3.3.2	Controllo digitale e shift di fase	21
3.3.3	Ottimizzazione del coefficiente di riflessione tramite algoritmi AI	22
3.4	Pattern di Radiazione e Controllo del Fascio	23
3.4.1	Progettazione del pattern di radiazione delle IRS	23
3.4.2	Ottimizzazione del beamforming passivo	24
4	Prototipi Sperimentali di IRS	25
4.1	Prototipo IRS passivo (Tsinghua University)	25
4.2	Prototipo IRS attivo (Tsinghua University)	27

4.3	Prototipo IRS trasmissivo (MIT)	28
4.4	Prototipo IRS di China Mobile	31
4.5	Prototipo IRS trasparente (DOCOMO)	32
5	Sviluppi Futuri e Conclusioni	35
	Bibliografia	39

Capitolo 1

Introduzione alle Superfici Riflettenti Intelligenti

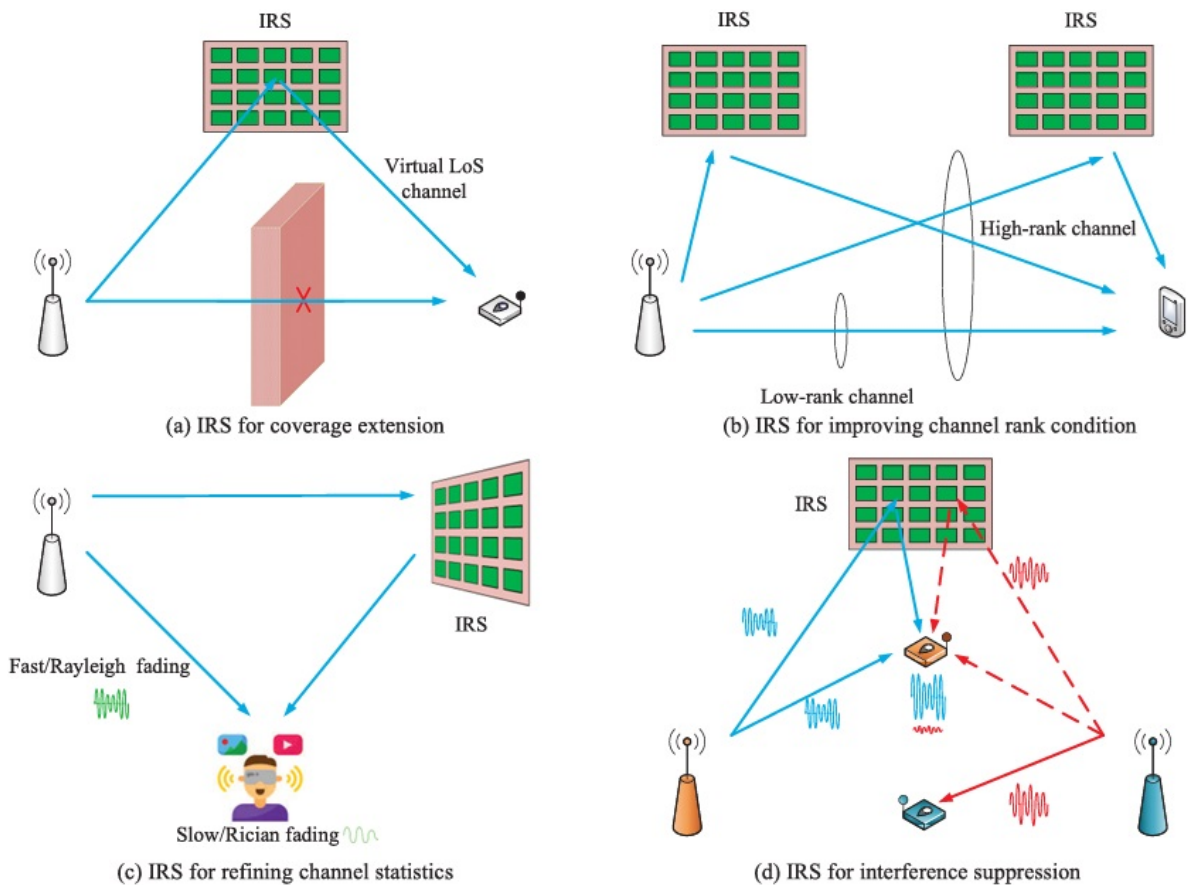
1.1 Definizione e principi di funzionamento delle IRS

In generale l'IRS è una superficie planare che comprende un gran numero di elementi riflettenti passivi, ognuno dei quali è in grado di introdurre una modifica all'ampiezza o alla fase del segnale incidente in modo indipendente. Distribuendo densamente gli IRS nella rete wireless e coordinando in modo intelligente le loro riflessioni, la propagazione dei segnali tra trasmettitore e ricevitore può essere riconfigurata in modo flessibile per ottenere le realizzazioni o distribuzioni desiderate. Questo fornisce un nuovo mezzo per affrontare il problema del deterioramento del canale wireless ed ottenere un miglioramento per la capacità e l'affidabilità della comunicazione wireless [2]. Sebbene l'IRS possa essere considerato una metasuperficie riconfigurabile, estende le applicazioni tradizionali della metasuperficie tramite il controllo delle onde elettromagnetiche (EM) come l'occultamento dell'invisibilità, l'imaging, il rilevamento radar e l'ologramma[3]. Pertanto, la progettazione di sistemi/reti wireless assistiti da IRS affronta nuove sfide che emergono da un punto di vista della comunicazione, elaborate come segue.

In primo luogo, le riflessioni passive di tutti gli elementi riflettenti in ogni IRS devono essere progettate correttamente per ottenere una focalizzazione cooperativa del segnale e/o la cancellazione delle interferenze nella sua prossimità locale. Contemporaneamente per servire tutti gli utenti della rete indipendentemente dal fatto che vi sia un IRS associato nelle vicinanze di ogni utente, le riflessioni passive dell'IRS devono anche essere progettate congiuntamente con le trasmissioni delle BS degli utenti in modo da ottimizzare le loro comunicazioni end-to end sui canali wireless riconfigurati dagli IRS. In secondo luogo, poiché l'IRS in generale non possiede catene RF, acquisire le informazioni sullo stato del canale tra IRS e la BS/utenti diventa un compito particolarmente difficile, soprattutto considerando che IRS in generale ha un gran nu-

mero di elementi riflettenti e quindi di coefficienti di canale associati da stimare. In terzo luogo, la strategia di distribuzione ottimale degli IRS nella rete wireless, per massimizzare la capacità della rete, dovrebbe essere significativamente diversa da quella per le reti wireless convenzionali (BS/AP attivi e relè) a causa delle loro diverse architetture di array e meccanismi operativi (riflettere rispetto a trasmettere/ricevere), che quindi devono essere riesaminati [2].

1.1.1 Funzioni svolte nella riconfigurazione del canale



Principali funzioni dell'IRS per la riconfigurazione del canale [2]

Come mostrato in Fig. 1, IRS è in grado di realizzare diverse funzioni interessanti nella riconfigurazione del canale wireless, come la creazione di un collegamento in vista (LoS) per aggirare ostacoli tra i ricetrasmittitori tramite una riflessione intelligente, aggiungendo percorsi di canale verso la direzione desiderata per migliorarne le condizioni.

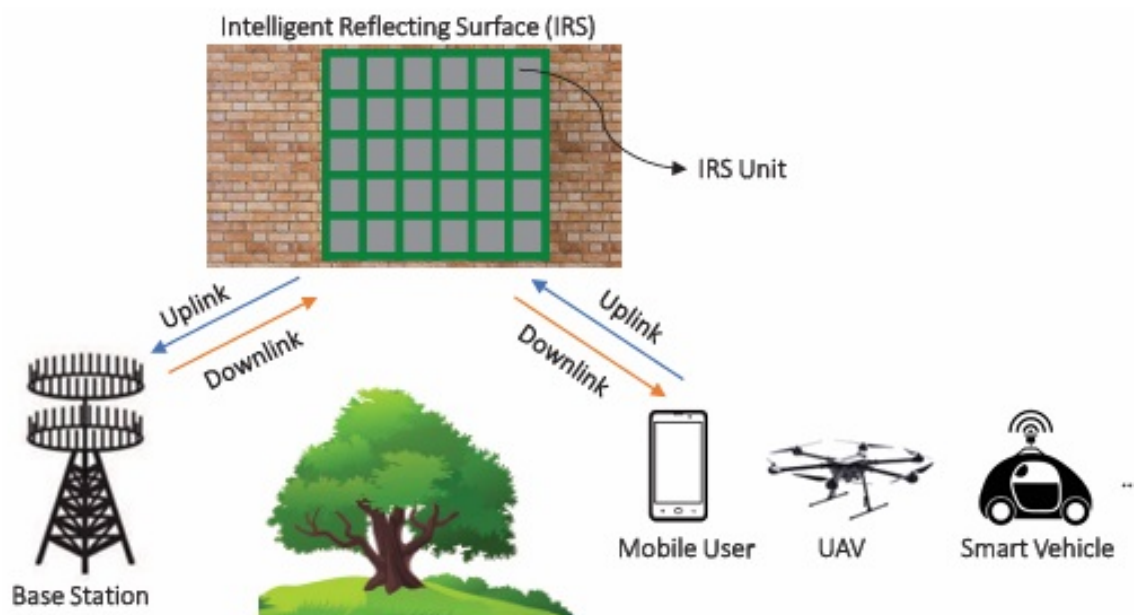


Figura 1.1: Principali funzioni dell'IRS per la riconfigurazione del canale [4]

1.2 Confronto con tecnologie tradizionali (M-MIMO e relè attivi)

Il concetto di IRS può essere relazionato alla tecnologia del massive multiple-input multiple-output (MIMO) [5], in cui vengono utilizzati un gran numero di array di antenne per migliorare l'efficienza spettrale ed energetica. Un sistema MIMO assistito da IRS consente alla BS (base station) di essere dotata di meno antenne senza compromettere la qualità del servizio (QoS) degli utenti. In quest'ottica IRS può essere sfruttato per realizzare M-MIMO 2.0 [6], riducendo in questo modo il costo dell'hardware del sistema e il consumo energetico, specialmente per sistemi wireless che migrano verso bande di frequenze più elevate in futuro. Pertanto è possibile immaginare che IRS svolga un ruolo cruciale nelle reti di comunicazione 6G simile a quello del M-MIMO nelle reti 5G.

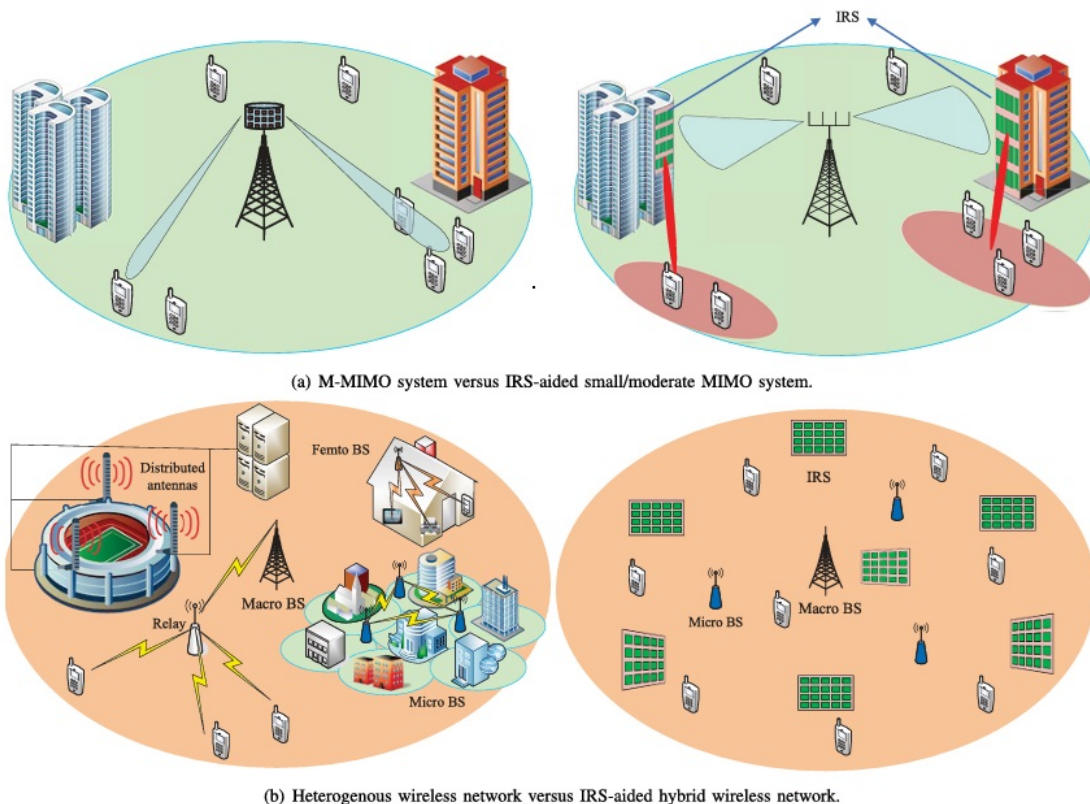


Fig. 3 Potenziali modifiche dell'ambiente wireless assistendo IRS al M-MIMO

Hu et al.[7] presentano la prima analisi sulle capacità di trasferimento delle informazioni sfruttando la tecnologia IRS. Viene dimostrato che la capacità che può essere raccolta per metro quadro di superficie ha una relazione lineare con la potenza di trasmissione media, invece di essere logaritmica come nel caso di un'implementazione M-MIMO.

Le attuali reti di comunicazione wireless si basano su un'architettura multilivello eterogenea composta da macro e piccole BS/AP, relè, antenne distribuite, tutti nodi attivi che generano nuovi segnali nella rete, richiedendo un coordinamento sofisticato e una gestione delle interferenze, problemi risolvibili distribuendo più nodi attivi nella rete. Tuttavia questo approccio aggrava il sovraccarico operativo della rete che potrebbe non essere capace di sostenere la crescita della capacità in modo economicamente conveniente in futuro. Al contrario, integrare IRS nella rete wireless comporterà un passaggio ad una nuova architettura ibrida comprendente componenti attivi e passivi che collaborano in modo intelligente. Poiché gli IRS hanno un costo molto più basso rispetto alle loro controparti attive, possono essere distribuiti più densamente nella rete wireless, senza la necessità di una sofisticata gestione delle interferenze tra gli IRS, data la loro riflessione passiva e alla conseguente copertura locale. Impostando in modo ottimale i rapporti tra BS e IRS, distribuiti nella rete ibrida, è possibile ottenere una scalabilità della capacità di rete sostenibile con i costi [8].

In Fig.3 si può vedere una possibile futura rete wireless supportata da IRS, con una varietà di applicazioni promettenti:

- Estensione della copertura nelle comunicazioni mmWave e THz, che sono altamente vulnerabili al blocco da oggetti fisici.
- L'ampia apertura di IRS può essere sfruttata per compensare la significativa perdita di potenza su lunghe distanze tramite beamforming di riflessione su dispositivi vicini.
- In ambienti interni IRS può anche essere attaccato ai soffitti, alle pareti, ai mobili e persino dietro i dipinti/decorazioni, per aiutare ad ottenere una copertura migliorata e un hot-spot ad alta capacità. Mentre in ambiente esterno, IRS può essere rivestito sulla facciata dell'edificio, sul lampione, sul pannello pubblicitario e persino sulla superficie di veicoli in movimento ad alta velocità.

1.3 Vantaggi e sfide principali nell'adozione delle IRS

Oltre ad essere concettualmente interessante, IRS possiede vari vantaggi pratici dal punto di vista implementativo:

- I suoi elementi riflettenti riflettono solo passivamente i segnali incidenti senza richiedere alcuna catena di trasmissione a radiofrequenza, quindi può essere implementato/azionato con costi hardware/energetici inferiori di ordini di grandezza rispetto ai tradizionali array di antenne attive attualmente in uso [5].
- Funziona in modalità full-duplex(FD) ed è privo di qualsiasi amplificazione del rumore dell'antenna e di autointerferenza, offrendo in questo modo vantaggi competitivi rispetto ai tradizionali relè attivi. Ad esempio i relè half-duplex(HD) soffrono di bassa efficienza spettrale, mentre quelli FD necessitano di tecniche sofisticate per la cancellazione dell'autointerferenza.
- Risulta facilmente montabile o rimovibile da oggetti ambientali per l'implementazione o sostituzione, grazie alle sue geometrie conformi e leggere.
- Può essere integrato in modo trasparente all'interno delle reti wireless, garantendo così grande flessibilità e compatibilità con i sistemi wireless esistenti (ad esempio, cellulari o WiFi).

Grazie a questi promettenti vantaggi, l'IRS è adatto ad essere distribuito massicciamente nelle reti wireless per migliorarne significativamente l'efficienza spettrale ed energetica in modo

economicamente conveniente. Pertanto si prevede che l'IRS porterà a cambiamenti di paradigma fondamentali nei progetti di sistemi e reti wireless, vale a dire rispetto all'attuale sistema M-MIMO.

1.4 Hardware per l'implementazione pratica di IRS

Questa tesi ha l'obiettivo di concentrarsi principalmente sugli aspetti hardware delle IRS con una particolare attenzione verso le applicazioni pratiche, trattando prototipi sperimentali di IRS realizzati e testati da varie Università e Istituti di ricerca. In particolare verranno analizzati i prototipi di IRS passivo e attivo (Tsinghua University) illustrandone le differenze, i punti di forza e i principi di funzionamento. Inoltre saranno anche presentati i risultati di alcune simulazioni software, effettuate tramite server ad alte prestazioni HP Xeon E5-2697 e MATLAB. Verranno sviluppati due prototipi passivi di comunicazione wireless basati su IRS e uno attivo. Successivamente si introdurrà il prototipo IRS trasmissivo, costruito dai ricercatori del Massachusetts Institute of Technology (MIT) in grado di trasmettere e riflettere simultaneamente segnali. Si esporranno le differenze con i normali prototipi e il principio di funzionamento. Viene considerato anche il prototipo di China Mobile, che tramite lo sviluppo di tre tipi diversi di IRS che interagiscono tra loro, migliora le attuali prestazioni relative alla qualità di trasferimento dell'informazione. Infine si tratta anche il prototipo IRS trasparente (DOCOMO), discutendo della sua realizzazione e composizione, della sua capacità di riflessione tramite regolazione del substrato di vetro, procedendo poi con dei test di sistema.

Capitolo 2

Fondamenti dell'IRS

In questo capitolo viene trattata la comunicazione wireless assistita da IRS, andando a considerare il segnale trasmesso dall'IRS e la modellazione del canale. Successivamente si parlerà di architettura hardware e di vincoli pratici.

2.1 Modello di canale

Per semplicità di esposizione si considera il sistema di comunicazione punto-punto in cui un elemento IRS comprendente N elementi riflessivi passivi di superficie planare è distribuito per assistere nella comunicazione tra un trasmettitore e un ricevitore. Come ipotesi semplificative si considera una sola antenna in trasmissione e in ricezione, inoltre il sistema di comunicazione è in banda stretta B in hertz (Hz) ad una data frequenza portante f_c , con $B \ll f_c$. Esprimiamo con $x(t)$ il segnale di trasmissione dal trasmettitore al ricevitore tramite un particolare elemento riflettente dell'IRS, espresso tramite n , con $n \in \{1, \dots, N\}$. Esprimiamo tramite

$$\alpha_{1,n} e^{-j\epsilon_{1,n}}$$

il coefficiente di canale complesso dal trasmettitore all'elemento n dell'IRS dove

$$\alpha_{1,n} \text{ e } \epsilon_{1,n}$$

rappresentano rispettivamente l'attenuazione e lo sfasamento introdotti. Dunque il segnale passabanda incidente sull'elemento n dell'IRS è dato da:

$$y_{in,n}(t) = \text{Re}\{\alpha_{1,n} e^{-j\epsilon_{1,n}} x(t) e^{j2\pi f_c t}\} \quad (2.1)$$

Denominiamo l'attenuazione in ampiezza e il ritardo introdotto dall'elemento n tramite

$$\beta_n \text{ e } t_n$$

rispettivamente. Ignorando le imperfezioni hardware, come la non linearità del circuito e il rumore di fase, il segnale riflesso dell'elemento n dell'IRS è espresso come:

$$\begin{aligned} y_{out,n}(t) &= \beta_n y_{in,n}(t - t_n) \\ &= Re \{ \beta_n \alpha_{1,n} e^{-j\epsilon_{1,n}} x(t - t_n) e^{j2\pi f_c(t-t_n)} \} \\ &\approx Re \{ \beta_n e^{-j\Theta_n} \alpha_{1,n} e^{-j\epsilon_{1,n}} x(t - t_n) e^{j2\pi f_c(t-t_n)} \} \end{aligned} \quad (2.2)$$

dove è stato considerato $x(t - t_n) \approx x(t)$ dato che $x(t_n) < 1/f_c \ll 1/B$ e $\Theta'_n = -2\pi f_c t_n \in \{-2\pi, 0\}$ è lo sfasamento introdotto dall'elemento n. Ora indichiamo con $s_{in,n}(t) = \alpha_{1,n} e^{-j\epsilon_{1,n}} x(t)$ e $s_{in,n}(t) = \beta_n e^{-j\Theta'_n} \alpha_{1,n} e^{-j\epsilon_{1,n}} x(t)$ il segnale equivalente in banda base di $y_{in,n}(t)$ e $y_{out,n}(t)$ rispettivamente. Allora il modello di riflessione del segnale IRS in banda base è dato quindi da

$$s_{out,n}(t) = \beta_n e^{-j\Theta'_n} s_{in,n}(t) = \beta_n e^{j\Theta_n} s_{in,n}(t) \quad (2.3)$$

dove $\theta_n \in [0, 2\pi]$ e l'ultimo passaggio è dovuto al fatto che lo sfasamento è periodico di periodo 2π . Da 2.3 si osserva che nel modello del segnale in banda base, il segnale in uscita, quello riflesso dell'elemento IRS n, è dato moltiplicando il corrispondente segnale di ingresso, ovvero quello incidente, per un coefficiente di riflessione complesso: $\beta_n e^{j\theta_n}$. Il segnale passabanda che arriva al ricevitore tramite la riflessione dell'elemento IRS n è espresso come:

$$y_{r,n}(t) = Re \{ [\alpha_{1,n} e^{-j\epsilon_{1,n}} \beta_n e^{j\theta_n} \alpha_{2,n} e^{-j\epsilon_{2,n}} x(t)] e^{j2\pi f_c t} \} \quad (2.4)$$

Il canale a cascata dal trasmettitore al ricevitore tramite l'elemento IRS è dunque modellabile in questo modo. Da 2.4 si osserva che il canale è una moltiplicazione di tre termini, vale a dire, canale trasmettitore-elemento n, riflessione IRS e canale elemento n-ricevitore. Per semplicità si considerano gli n elementi dell'IRS indipendenti l'uno dall'altro, in modo che non vi sia alcun accoppiamento del segnale nella riflessione. Si considerano inoltre solamente i segnali riflessi dall'IRS per la prima volta e si ignorano quelli riflessi due o più volte. Dunque, il segnale totale ricevuto da tutti gli N elementi dell'IRS può essere modellato come una sovrapposizione dei segnali riflessi. Il modello del segnale in banda base che tiene conto di tutti gli N elementi è dato da:

$$y(t) = \left(\sum_{n=1}^N \beta_n e^{j\theta_n} h_{r,n}^* g_n \right) x(t) \quad (2.5)$$

Dove $h_{r,n}^* = \alpha_{1,n} e^{-j\epsilon_{1,n}}$ e $g_n = \alpha_{2,n} e^{-j\epsilon_{2,n}}$ [9]-[10]-[11]. Da notare è che in generale i coefficienti di canale $h_{r,n}^*$ e g_n dipendono la perdite legate alla distanza del percorso, all'ombreggiatura su larga scala e all'affievolimento su più cammini.

2.1.1 Potenza media

Le perdite dovute alla distanza percorsa dal segnale influenzano la potenza media, è quindi essenziale considerarle per l'analisi del link budget e per la valutazione delle prestazioni assistite da IRS.

Si consideri l'elemento n supposto sufficientemente lontano sia dal ricevitore che dal trasmettitore, con distanze $d_{1,n}$ e $d_{2,n}$ come mostrato in Fig. 2.1. Sotto le condizioni di propagazione in campo lontano è possibile supporre che $d_{1,n} = d_1$ e $d_{2,n} = d_2$, $\forall n$. Questo comporta che $E(|h_{r,n}|^2) \propto c_1(d_1/d_0)^{-\alpha_1}$ e $E(|g_n|^2) \propto c_2(d_2/d_0)^{-\alpha_2}$ dove $c_1(c_2)$ denota la corrispondente perdita di percorso alla distanza di riferimento d_0 , mentre $a_1(a_2)$ denota l'esponente di perdita di percorso corrispondente con valori tipici da 2 a 6 [12]. Da 2.4 ne consegue che la potenza media del segnale ricevuto tramite la riflessione dell'elemento n dell'IRS, denotata da $P_{r,n}$ è inversamente proporzionale a $d_1^{\alpha_1} d_2^{\alpha_2}$:

$$P_{r,n} \propto \frac{1}{d_1^{\alpha_1} d_2^{\alpha_2}} \quad (2.6)$$

In altre parole il canale IRS dell'elemento n soffre di una perdita di percorso doppio, definita quindi "modello di perdita di percorso distanza prodotto". Pertanto è necessario un gran numero di elementi riflettenti IRS per compensare la grave perdita di potenza dovuta alla doppia attenuazione, progettando congiuntamente le loro ampiezze e/o fasi di riflessione per ottenere elevati guadagni di beamforming passivo.

2.2 Miglioramenti per il modello di canale e direzioni future

La ricerca sulla modellazione della riflessione IRS e sulla progettazione hardware è ancora in una fase iniziale e deve affrontare molti problemi interessanti e importanti che sono aperti.

Un presupposto cruciale per il modello di canale lineare di IRS fornito in 2.4 è l'assenza di qualsiasi accoppiamento di segnale riflesso tra elementi IRS adiacenti. In pratica, aumentare il numero di elementi riflettenti a parità di dimensioni di IRS è generalmente utile per ottenere un beamforming passivo più fine e quindi prestazioni migliorate. Ciò tuttavia ridurrà la spaziatura degli elementi e potrebbe rendere l'accoppiamento reciproco più impattante e quindi non più trascurabile, poiché gli elementi riflettenti vicini interagiranno tra loro attraverso accoppiamento di circuito, dando luogo a coefficienti di riflessione accoppiati. Pertanto, il modello di canale

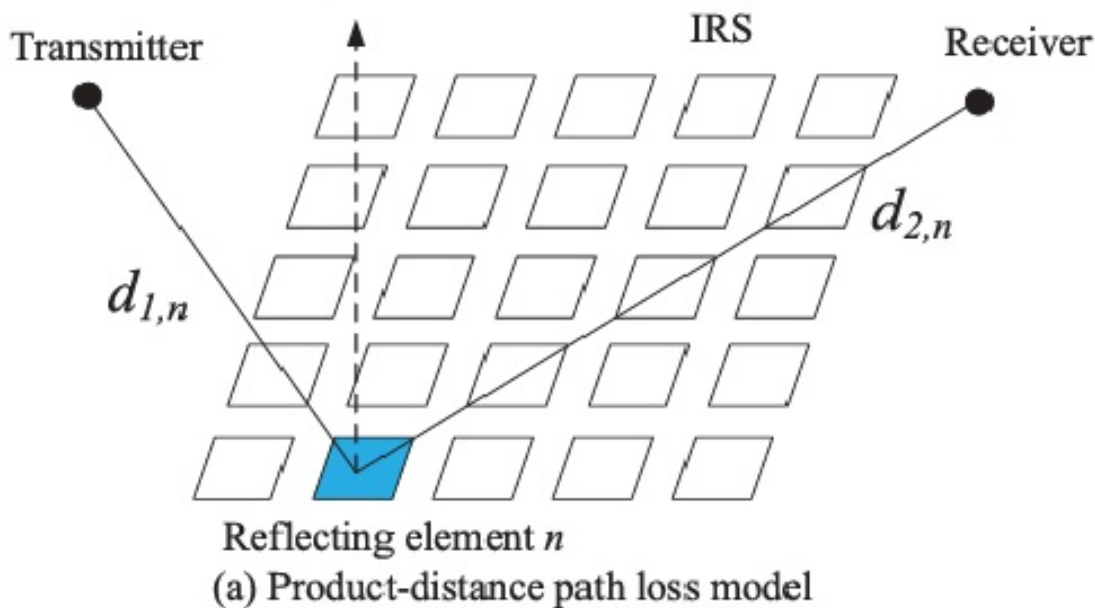


Figura 2.1: Illustrazione per i modelli di perdita di percorso del canale riflesso dall'IRS

lineare di IRS fornito 2.4 diventerà impreciso e potrebbe essere necessaria una modellazione non lineare più complessa per caratterizzare l'effetto di accoppiamento reciproco, che è un problema interessante da affrontare in lavori futuri.

Un'altra ipotesi adottata nel modello di canale IRS fornito in 2.4 è che il coefficiente di riflessione è insensibile all'angolo di incidenza del segnale che colpisce IRS. Tuttavia, recenti studi sperimentali in [13] hanno rivelato che il coefficiente di riflessione di IRS, in particolare lo sfasamento, può essere altamente sensibile all'angolo di incidenza. Un tale modello di riflessione dipendente dall'angolo pone nuova sfida nell'ottimizzazione della riflessione IRS, specialmente in un ambiente di propagazione multi-percorso poiché la risposta di riflessione dipende dall'angolo di arrivo di ogni percorso del segnale verso IRS. Inoltre il modello di canale IRS in 2.4 ha assunto che lo sfasamento di ciascun elemento riflettente sia costante sulla larghezza di banda del segnale B . Sebbene questa ipotesi sia valida per il sistema banda stretta, con $B \ll f_c$, potrebbe diventare imprecisa e per sistemi a banda larga quando B è molto più grande e quindi diventa comparabile con f_c . Come mostrato in 2.1 lo sfasamento di IRS è causato dal ritardo del segnale di ingresso di una certa quantità di tempo, che causerà una deriva di fase lineare che aumenta con la frequenza del segnale f_c . Tale sfasamento non uniforme sulla frequenza può causare errori di fase indesiderati per il segnale modulato, che quindi dovrebbe essere compensato dall'hardware o dall'elaborazione del segnale.

Capitolo 3

Aspetti hardware e prototipi di IRS

3.1 Metamateriali e Metasuperfici

In senso lato, l'IRS è una branca dei metamateriali elettromagnetici. Negli ultimi decenni, i metamateriali elettromagnetici hanno sperimentato sviluppi esponenziali grazie alle loro proprietà uniche e finemente personalizzabili che non sono necessariamente accessibili in natura. I metamateriali sono strutture progettate artificialmente che sono state ampiamente utilizzate per manipolare le onde elettromagnetiche in modi non convenzionali, dando origine a molti fenomeni entusiasmanti e nuovi dispositivi [14]. Le metasuperfici, in quanto equivalenza bidimensionale (2D) dei metamateriali (3D), stanno attirando un interesse costantemente crescente da parte dei ricercatori sia nelle comunità scientifiche che ingegneristiche, grazie alla loro capacità di fornire uno sfasamento brusco, una modulazione di ampiezza e una conversione della polarizzazione delle onde elettromagnetiche[15]-[16]. Rispetto ai metamateriali tridimensionali (3D), le metasuperfici presentano uno spessore elettrico trascurabile, offrendo così un'integrabilità molto migliore e perdite di inserzione inferiori. Poiché queste metasuperfici non supportano regolazioni dinamiche, la flessibilità delle loro applicazioni è limitata. Tramite le metasuperfici digitalmente programmabili è invece possibile ottenere la riflessione altamente controllabile dell'IRS[17] e la metasuperficie programmabile è diventata una tendenza principale delle ricerche. Vari metamateriali sintonizzabili sono stati utilizzati per implementare metasuperfici programmabili, come mostrato nella Fig. 3.5. In particolare, come realizzazione rappresentativa, i componenti attivi (come diodi di commutazione e varactor) o materiali regolabili (come il grafene) sono ampiamente integrati nelle metasuperfici programmabili.

La metasuperficie è una matrice planare composta da elementi riflettenti, il cui spessore elettrico è tipicamente nell'ordine della lunghezza d'onda del segnale d'interesse. Progettando la loro forma geometrica (e.g., quadrata o ad anello diviso), dimensione, orientamento, disposizione e così via, è possibile realizzare la risposta del segnale desiderata (e.g. ampiezza di riflessione e/o

sfasamento) di ciascun elemento.

Tuttavia, nelle comunicazioni wireless, il canale è generalmente variabile nel tempo a causa della mobilità del trasmettitore/ricevitore e degli oggetti circostanti, richiedendo quindi una risposta sintonizzabile in tempo reale dell'IRS in base alla variazione del canale. A tal fine, gli elementi IRS devono essere realizzati con coefficienti di riflessione regolabili dinamicamente ed è necessario che l'IRS possa connettersi alla rete wireless per conoscere l'ambiente di comunicazione esterno e abilitare la sua riflessione adattiva in tempo reale.

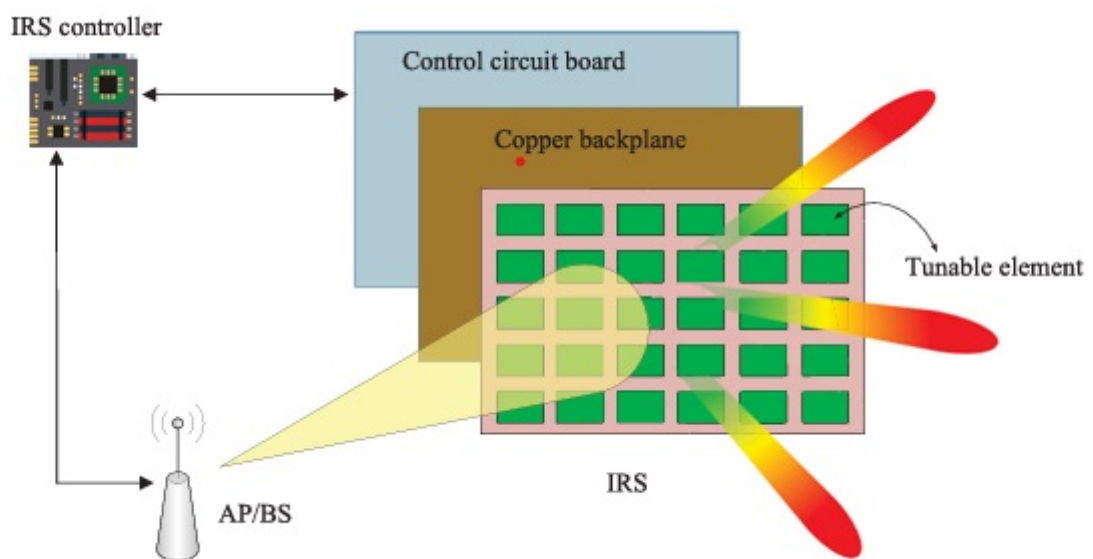


Figura 3.1: Architettura IRS

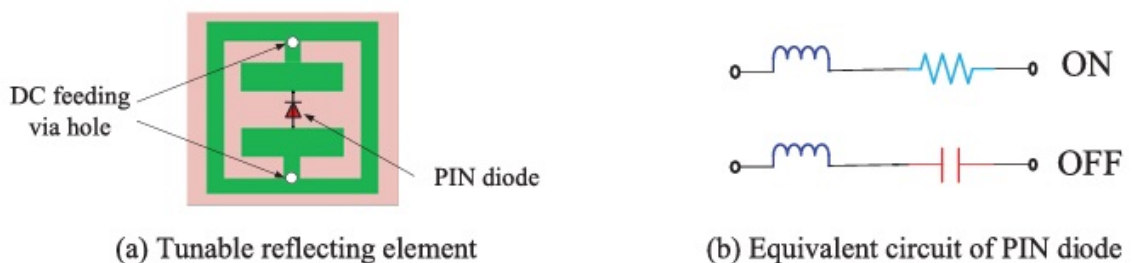


Figura 3.2: esempio di elemento riflettente sintonizzabile basato su diodo PIN

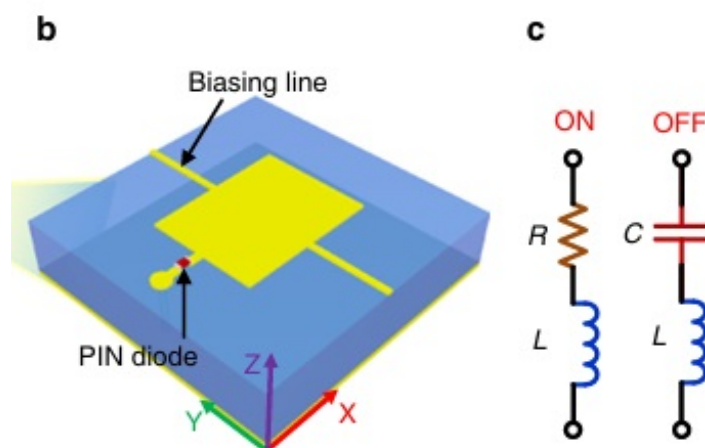


Figura 3.3: geometria dell'elemento con diodo PIN

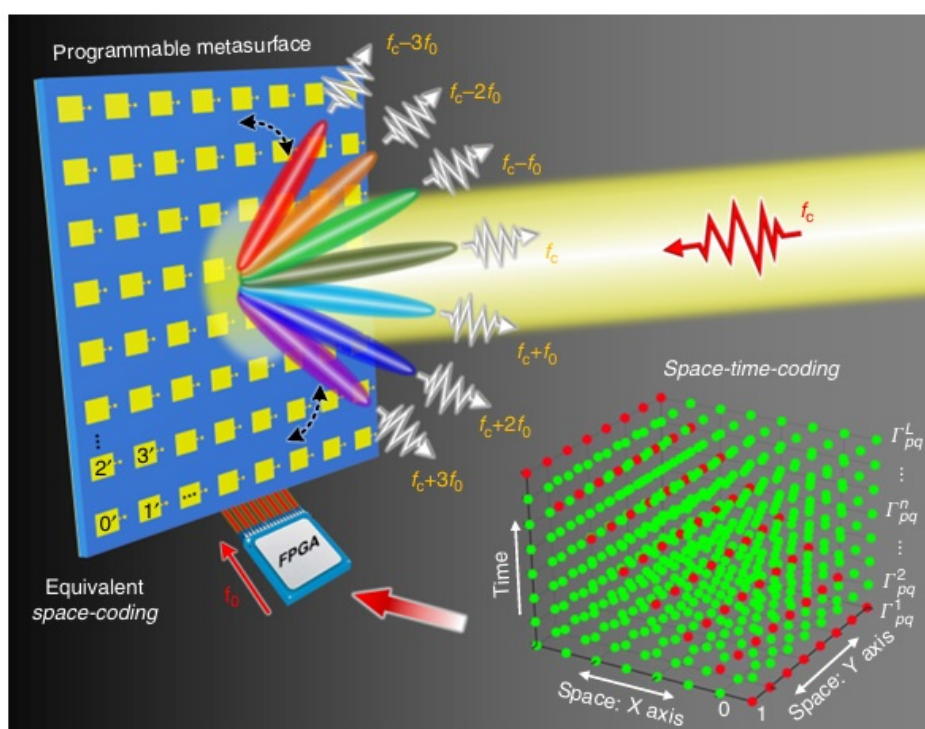


Figura 3.4: illustrazione concettuale di una metasuperficie controllabile digitalmente

3.2 Progettazione Hardware delle IRS

3.2.1 Architettura dell'IRS

Che venga utilizzata come antenna terminale o come dispositivo di controllo per un canale, l'architettura hardware di una metasuperficie intelligente è composta da tre parti principali: una

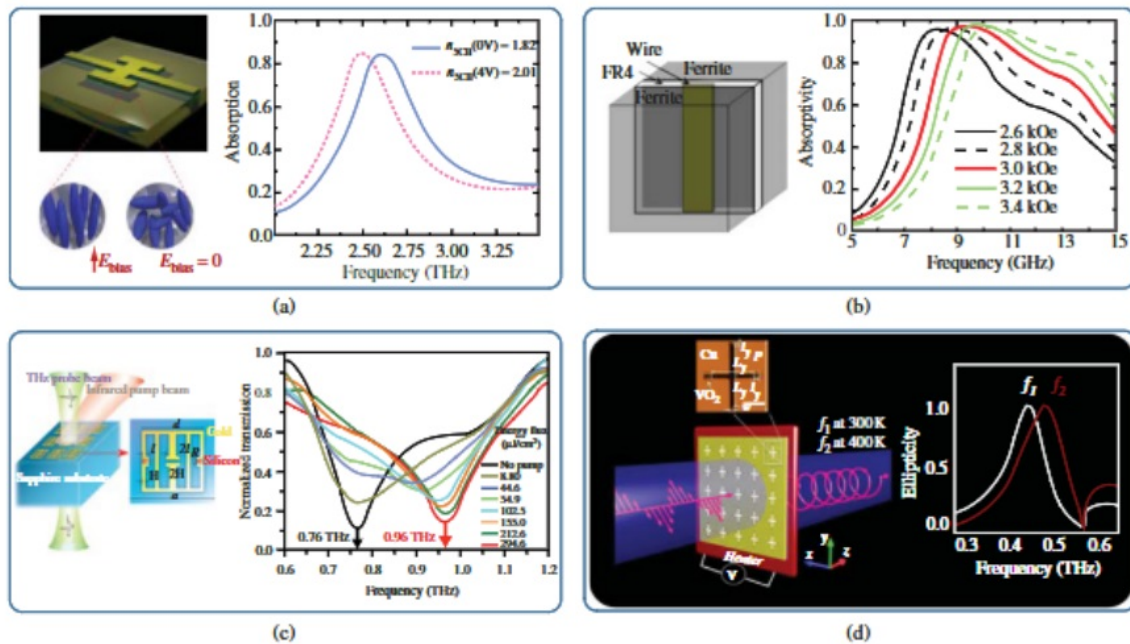


Figura 3.5: Metasuperfici programmabili realizzate con diversi metamateriali sensibili agli stimoli. (a) Metasuperficie basata su cristalli liquidi sensibili all'elettricità. (b) Metasuperficie basata su ferrite sensibile al magnetismo. (c) Metasuperficie basata su semiconduttori sensibili alla luce. (d) Metasuperficie basata su VO 2 sensibile alla temperatura. Fonte: Fu Liu et al. 2018/Riprodotta da IEEE.

superficie elettromagnetica riconfigurabile, un sistema di alimentazione e un sistema di controllo

Nella Fig.3.1 è illustrata una tipica architettura dell'IRS, che è costituito da tre strati e da un controller intelligente.

- Il primo strato è composto da un gran numero di piastre metalliche riconfigurabili stampate su un substrato dielettrico per manipolare direttamente i segnali incidenti
- Nel secondo strato solitamente si utilizza una piastra di rame per minimizzare le perdite durante la riflessione dell'IRS.
- Il terzo stadio è un circuito di controllo per eccitare gli elementi riflettenti e per sintonizzare ampiezze di riflessione e/o spostamenti di fase in tempo reale.

Inoltre l'adattamento della riflessione viene attivato e determinato da un controller intelligente collegato a ciascun IRS, che può essere implementato tramite FPGA(Field Programmable Gate Array). Il controller IRS funge anche da gateway per comunicare con altri componenti di rete tramite collegamenti di controllo cablati o wireless.

Per riconfigurare gli elementi IRS in modo da ottenere una riflessione altamente controllabile, in letteratura sono proposti tre approcci principali, vale a dire:

- attuazione meccanica (tramite rotazione e traslazione meccanica)
- materiali funzionali (ad esempio cristalli liquidi e grafene)
- dispositivi elettronici (ad esempio diodi positivo-intrinseco-negativo (PIN), transistor a effetto di campo (FET) o interruttori di sistema microelettronico (MEMS))[18].

In particolare, il terzo approccio è stato ampiamente adottato nell'implementazione pratica grazie al suo rapido tempo di risposta, alla bassa perdita di riflessione di consumo energetico e di costo hardware.

Ogni elemento integra dispositivi non lineari come diodi PIN, varactor o interruttori MEMS. In generale, questi dispositivi non lineari rispondono ai segnali di controllo a bassa frequenza forniti dal sistema di controllo, modificando le proprietà elettromagnetiche degli elementi locali, regolando così i segnali ad alta frequenza dal sistema di alimentazione.

In Fig. 3.2 si può vedere un esempio di progettazione dell'elemento riflettente e del suo circuito equivalente basato sul diodo PIN inserito al centro dell'elemento.

Applicando diverse tensioni di polarizzazione al diodo PIN tramite una linea di alimentazione in corrente continua, il diodo può essere commutato in stato "ON" o "OFF", il che consente all'elemento di generare una differenza di sfasamento di π nel segnale incidente. Un'osservazione che può essere fatta in accordo all'articolo [19] è che la frequenza di commutazione del diodo può essere aumentata fino a 5 megahertz (MHz), che corrisponde ad un tempo di commutazione di 0,2 microsecondi. Questo è molto più piccolo del tipico tempo di coerenza del canale, che è dell'ordine dei millisecondi e quindi adatto per applicazioni mobili con canali variabili nel tempo.

Oltre alla messa a punto dello sfasamento, un controllo aggiuntivo dell'ampiezza del segnale riflesso da ciascun elemento IRS fornisce maggiore flessibilità nel rimodellare il segnale riflesso per raggiungere efficacemente vari obiettivi di comunicazione. Siccome il costo associato al controllo dell'ampiezza è generalmente inferiore rispetto a quello della fase, viene di conseguenza bilanciato anche il costo dell'hardware e le prestazioni di riflessione.

Esistono vari modi per ottenere la regolazione dell'ampiezza per IRS. Un modo comune è regolando l'impedenza di carico di ciascun elemento [20]. Ad esempio, modificando la resistenza di ciascun elemento, una certa porzione dell'energia del segnale incidente viene dissipata sotto forma di calore, ottenendo così un intervallo dinamico dell'ampiezza di riflessione in $[0,1]$. In pratica è auspicabile avere un controllo indipendente dell'ampiezza e dello sfasamento di ciascun elemento IRS per ottimizzare la progettazione della riflessione, che, tuttavia richiede

progetti hardware più sofisticati.

Idealmente, l'ampiezza della riflessione IRS e lo spostamento di fase per elemento possono essere regolati in modo indipendente e continuo, realizzando in questo modo i due possibili set:

$$\mathcal{F}_\beta = \{\beta \mid \beta \in [0,1]\} \quad (3.1)$$

$$\mathcal{F}_\theta = \{\theta \mid \theta \in [0,2\pi]\} \quad (3.2)$$

Risulta importante da notare che questi insiemi riguardanti gli elementi riflettenti dell'IRS esprimono implicitamente dei limiti teorici delle prestazioni dei sistemi wireless assistiti da IRS rispetto ai modelli pratici, che vengono introdotti di seguito.

Ampiezza di riflessione e sfasamento discreti

Nonostante la messa a punto continua del coefficiente di riflessione sia vantaggiosa per ottimizzare le prestazioni di comunicazione, risulta molto difficile da implementare, poiché gli elementi riflettenti a risoluzione più elevata richiedono non solo un costo maggiore, ma anche una progettazione hardware più complessa. Pertanto, dal punto di vista pratico è più conveniente implementare solo livelli di ampiezza/sfasamento discreti e finiti che richiedono solo un piccolo numero di bit di controllo per ciascun elemento, ad esempio, controllo di ampiezza a due livelli (riflettente o assorbente) e controllo di sfasamento a due livelli (0 o π)[17].

In generale è possibile indicare con b_β e b_θ il numero di bit per controllare il corrispondente numero di livelli di ampiezza di riflessione e sfasamento, indicati invece con K_β e K_θ , dove $K_\beta = 2^{b_\beta}$ e $K_\theta = 2^{b_\theta}$. In questo modo è possibile esprimere gli insiemi di ampiezze di riflessione discrete e sfasamento di ciascun IRS come:

$$\mathcal{F}'_\beta = \{\beta_1, \dots, \beta_{K_\beta}\} \quad (3.3)$$

$$\mathcal{F}'_\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_{K_\theta}\} \quad (3.4)$$

i cui valori sono compresi rispettivamente tra 0 e 1 per \mathcal{F}'_β e tra 0 e 2π per \mathcal{F}'_θ . Ad esempio supponendo che i valori discreti di ampiezza e sfasamento siano ottenuti quantizzando uniformemente l'intervallo $[0,1]$ e $[0,2\pi]$ abbiamo:

$$\mathcal{F}'_\beta = \{0, \Delta\beta, \dots, (K_\beta - 1)\Delta\beta\} \quad (3.5)$$

$$\mathcal{F}'_\theta = \{0, \Delta\theta, \dots, (K_\theta - 1)\Delta\theta\} \quad (3.6)$$

dove $\Delta\beta = \frac{1}{(K_\beta-1)}$ e $\Delta\theta = \frac{2\pi}{(K_\theta)}$.

Rispetto ai modelli ideali di ampiezza e sfasamento di riflessione continua in 3.3 e 3.4, la loro versione quantizzata in 3.5 e 3.6 determinano inevitabilmente un controllo più grossolano della fase e dell'ampiezza del segnale riflesso, portando a prestazioni di comunicazione degradate.

Nella pratica, per ridurre ulteriormente il costo dell'hardware e la complessità della progettazione, può essere implementato solo il controllo discreto dello sfasamento o il controllo discreto dell'ampiezza, portando così a due casi particolari dei modelli descritti sopra:

- IRS con controllo discreto della fase, dove per ogni elemento riflettente solo lo sfasamento può essere modificato mentre l'ampiezza riflessa è fissata al valore massimo, ovvero $\mathcal{F}'_{\beta} = \{\beta \mid \beta = 1\}$ e $\mathcal{F}'_{\theta} = \{0, \Delta\theta, \dots, (K_{\theta} - 1)\Delta\theta\}$
- IRS con controllo discreto dell'ampiezza, dove per ogni elemento riflettente solo l'ampiezza può essere modificata mentre lo sfasamento è fissato ad un valore costante, ovvero $\mathcal{F}'_{\beta} = \{0, \Delta\beta, \dots, (K_{\beta} - 1)\Delta\beta\}$ e $\mathcal{F}'_{\theta} = \{\theta \mid \theta = 0\}$.

Ampiezza di riflessione accoppiata e sfasamento

Sebbene il controllo indipendente dell'ampiezza di riflessione e dello sfasamento simultanei fornisca al massima flessibilità di progettazione, impone delle sfide nella progettazione degli elementi. Recentemente è stato proposto un modello di riflessione pratico per IRS in [13],[21], modellando ogni elemento riflettente come un circuito risonante con una certa induttanza, capacità e resistenza. Sulla base di questo modello, è stato rivelato che la risposta in ampiezza dell'elemento riflettente è in genere accoppiata in modo non lineare con il suo sfasamento, che quindi non sono regolabili indipendentemente.

Nello specifico, come mostrato in Fig. 3.6, l'ampiezza di riflessione raggiunge il valore minimo allo sfasamento zero, ma aumenta monotonicamente e si avvicina asintoticamente al valore massimo di 1 quando lo sfasamento tende 0 o π . Ciò è dovuto al fatto che in ogni elemento riflettente, qualsiasi sfasamento viene ottenuto regolando la sua capacità o resistenza effettiva, che inevitabilmente modifica l'ampiezza di riflessione. L'ampiezza di riflessione e l'accoppiamento dello sfasamento hanno un grande impatto sulla progettazione ottimale del coefficiente di riflessione degli elementi riflettenti dell'IRS, poichè deve raggiungere un equilibrio ottimale tra l'ampiezza del segnale e la fase riflessa di ciascun elemento in modo che i segnali riflessi da tutti gli elementi IRS vengano combinati nel ricevitore con la massima potenza o raggiungendo il massimo rapporto segnale/rumore(SNR).

L'IRS è un componente teoricamente passivo, ma che in pratica consuma energia. Sebbene l'IRS rifletta solo il segnale senza applicazione di potenza, necessita comunque di un alimentatore per sostenere l'operazione di riconfigurazione degli elementi riflettenti e del suo controller

intelligente. Ad esempio, se i diodi PIN vengono utilizzati per regolare gli sfasamenti degli elementi riflettenti IRS, quando il diodo PIN è SPENTO, l'elemento non consuma energia, mentre quando è ACCESO, consuma una certa quantità di energia, possibili valori sono 0,33 milliwatt (mW) o 50 microWatt[21]. Tuttavia rispetto al consumo delle antenne attive (ad esempio M-MIMO e relè multiantenna), tale consumo di energia è molto più basso e quindi può essere praticamente ignorato per il confronto. Invece il consumo energetico del controller intelligente dipenderà dall'implementazione del circuito del controller (es. FPGA) e dal modulo di comunicazione utilizzato. Ad esempio il consumo energetico di un controller IRS con 256 elementi riflettenti è di soli circa 0,72W[21], che è significativamente inferiore a quello della stazione base o relè attivo in pratica. Pertanto l'IRS consuma generalmente una quantità di energia inferiore rispetto ai relè attivi esistenti nella rete wireless.

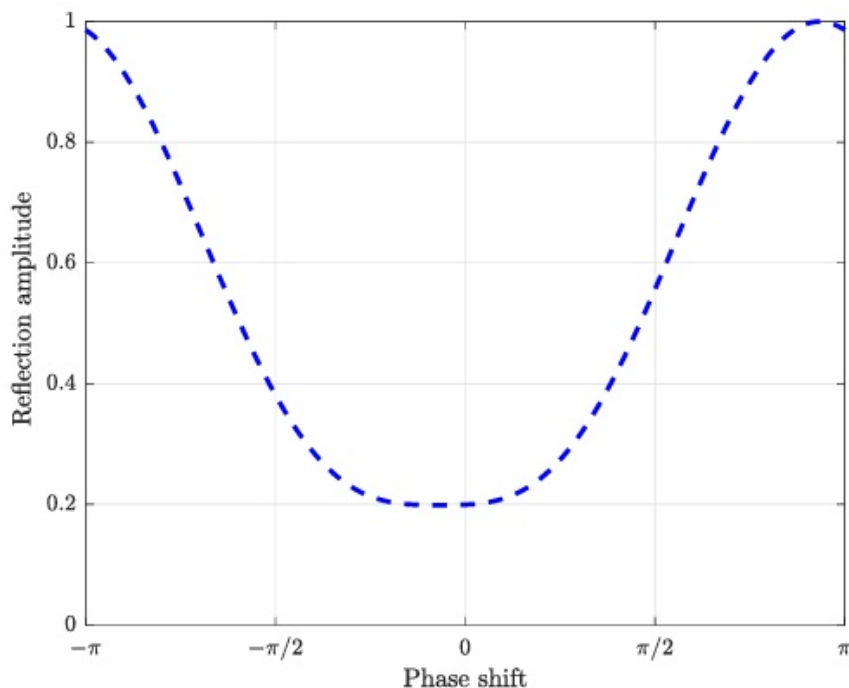


Figura 3.6: Riflessione dell'ampiezza vs sfasamento per elemento IRS

3.2.2 Progettazione degli elementi IRS

La parte principale nella progettazione IRS è la progettazione dell'elemento IRS. Gli obiettivi di progettazione devono essere determinati in base ai requisiti effettivi dell'applicazione. La parte principale dell'elemento e il circuito di polarizzazione vengono quindi attentamente progettati e ottimizzati. La procedura di progettazione dell'elemento IRS è la seguente. Innanzitutto, un modello principale dovrebbe essere stabilito nel software di simulazione elettromagnetica

e vengono impostate le condizioni al contorno periodiche, l'eccitazione della porta Floquet e il modello RLC equivalente dei componenti non lineari. Quindi viene selezionata la geometria dell'elemento appropriata per l'ottimizzazione della progettazione in modo da soddisfare i requisiti di progettazione preimpostati nella banda di frequenza richiesta, come l'elemento di riflessione a 1 bit che richiede che l'ampiezza di riflessione sia vicina a 0 dB e la differenza di fase di riflessione sia di 180° . Infine, vengono prese in considerazione strutture come il circuito di polarizzazione utilizzato per connettersi al sistema di controllo per verificarne l'impatto sulle prestazioni dell'elemento.

Gli autori di [22] hanno fornito un esempio di progettazione di un elemento a fase controllata digitale a 1 bit, che ottiene una modulazione di fase digitale a 1 bit intorno a 14,5 GHz. Nell'implementazione specifica, viene selezionato un classico elemento risonante rettangolare e la proprietà risonante dell'elemento viene modificata accendendo e spegnendo il diodo PIN come si è visto nei paragrafi precedenti, modificando così il punto di frequenza risonante, in modo che vi sia una differenza di fase di 180° tra i due punti di frequenza risonante. Infine, sono stati aggiunti una linea di polarizzazione per il controllo del diodo PIN e uno stub a ventaglio per l'isolamento AC-DC, verificando che abbia scarso effetto sulle caratteristiche elettriche all'interno della banda di frequenza operativa dell'elemento.

3.2.3 Progettazione di array IRS

A partire da una corretta progettazione dell'elemento IRS, l'array IRS è progettato e fabbricato utilizzando la tecnologia del circuito stampato (PCB).

Tradizionalmente, gli elementi sono disposti periodicamente con una distanza di mezza lunghezza d'onda, mentre alcuni progetti irregolari sono proposti per ottenere una larghezza del lobo principale stretta e bassi livelli del lobo laterale con meno elementi [22]. Inoltre, il circuito dovrebbe essere progettato per collegare il sistema di controllo e gli elementi IRS. Grazie al basso costo e alla proprietà quasi passiva dell'elemento IRS, l'IRS può essere progettato come un array con dimensioni estremamente grandi per realizzare un guadagno di beamforming più elevato. La Fig. 3.7 mostra un esempio di array IRS con 2304 elementi. L'array è costituito da 9 schede PCB, ciascuna delle quali è costituita da un subarray con 16×16 elementi IRS e un chip FPGA come controller. I subarray funzionano indipendentemente l'uno dall'altro, quindi l'array può essere esteso per raggiungere dimensioni maggiori semplicemente aumentando il numero di subarray. Ogni elemento IRS è collegato a un pin di uscita dell'FPGA in modo che la fase degli elementi IRS possa essere commutata contemporaneamente e la frequenza di commutazione possa raggiungere idealmente oltre 100 kHz. L'FPGA può essere sostituito da un'unità microcontrollore (MCU) per ridurre il consumo energetico e il costo del sistema. Tuttavia, il numero limitato di pin di uscita dell'MCU renderà difficile realizzare IRS su larga scala.

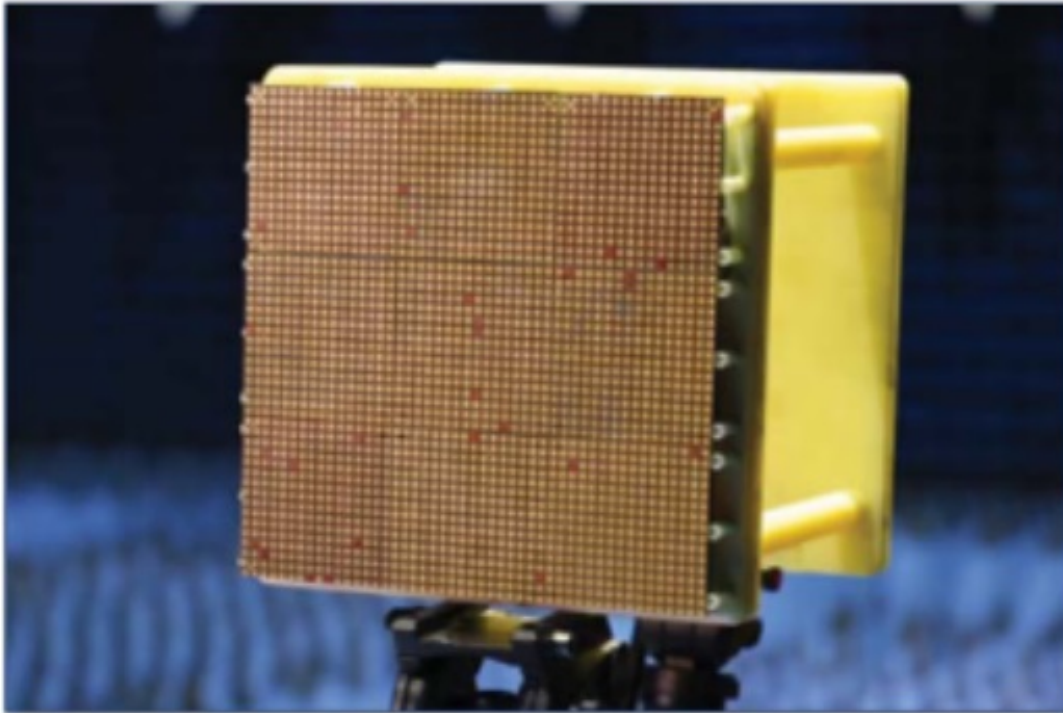


Figura 3.7: Un esempio di array IRS con 2304 elementi. Fonte: Linglong Dai, IEEE Fellow e professore associato presso il Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Tsinghua University.

3.3 Coefficiente di riflessione delle IRS

Le *Intelligent Reflecting Surfaces* (IRS) sono progettate per manipolare attivamente la propagazione delle onde elettromagnetiche (EM) riflettendo i segnali incidenti in direzioni desiderate, ottimizzando così le comunicazioni wireless. Un elemento chiave che determina l'efficacia di una IRS è il **coefficiente di riflessione**, il quale misura il comportamento della superficie riflettente in termini di ampiezza e fase delle onde riflesse. In questo capitolo, si analizzano i modelli matematici per il coefficiente di riflessione, il controllo digitale della fase e l'ottimizzazione delle IRS tramite algoritmi avanzati.

3.3.1 Modellazione del coefficiente di riflessione

Il **coefficiente di riflessione** di una IRS si riferisce alla capacità di ciascun elemento della superficie di riflettere un'onda incidente con un controllo preciso sulla fase e sull'ampiezza del segnale riflesso. Questo coefficiente è generalmente rappresentato come un numero complesso Γ , che definisce sia la variazione di fase che l'attenuazione del segnale riflesso:

$$\Gamma = A \cdot e^{j\phi}$$

dove:

- A è l'ampiezza del segnale riflesso, che può variare tra 0 e 1 (a seconda di quanto il segnale è attenuato),
- ϕ è la fase del segnale riflesso, che viene controllata per dirigere il segnale verso una direzione desiderata.

Modello a due livelli (0 o π)

Nella pratica, un IRS spesso impiega un controllo di fase limitato. Un modello molto comune è quello **a due livelli di fase** (0 o π), in cui ogni elemento riflettente può riflettere il segnale con una fase di 0° o 180° :

$$\Gamma = \begin{cases} 1 & \text{se la fase è } 0^\circ, \\ -1 & \text{se la fase è } 180^\circ. \end{cases}$$

Questo semplice controllo a due stati è più facile da implementare, riducendo la complessità hardware e il consumo energetico. Tuttavia, modelli più complessi, come i sistemi a **più livelli di fase**, sono stati proposti per migliorare la risoluzione del beamforming e ottimizzare la riflessione del segnale.

Modello a più livelli di fase

Per migliorare ulteriormente l'efficacia delle IRS, è possibile utilizzare un controllo di fase con **più livelli**. In questo caso, ogni elemento può riflettere con una fase regolabile in più passi, ad esempio $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$:

$$\Gamma = A \cdot e^{j\phi}, \quad \phi \in \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ\}$$

Questo approccio consente un controllo più fine del fascio riflesso, migliorando la direzionalità del segnale riflesso e aumentando l'efficienza della IRS nelle comunicazioni wireless.[2]

3.3.2 Controllo digitale e shift di fase

Le IRS implementano il controllo digitale del coefficiente di riflessione attraverso la regolazione della **fase del segnale riflesso**. Questa regolazione è effettuata attraverso elementi controllabili elettronicamente, che possono modificare la fase delle onde EM in tempo reale. Nella maggior parte dei casi, il controllo della fase viene realizzato tramite l'uso di **switch di stato solido** o di **diodi varicap** che, attraverso il cambiamento della capacità, alterano la fase del segnale riflesso.

Tecnologie per il controllo della fase

- **Switch di stato solido:** Questi switch, come i *diodi PIN*, possono accendere o spegnere elementi riflettenti, permettendo un controllo rapido della fase (es. cambiamenti tra 0° e 180°).
- **Diodi varicap:** Attraverso la variazione della capacità, questi diodi consentono un controllo più fine sulla fase, offrendo una maggiore flessibilità rispetto agli switch di stato solido.
- **FPGA per il controllo dinamico:** Le IRS spesso utilizzano **FPGA** (Field-Programmable Gate Array) per gestire il controllo digitale della fase in tempo reale. L'FPGA può inviare segnali di controllo ai diodi o agli switch in base alle condizioni del canale wireless.

3.3.3 Ottimizzazione del coefficiente di riflessione tramite algoritmi AI

Per sfruttare al meglio le capacità delle IRS, vengono impiegati algoritmi di ottimizzazione avanzata, tra cui tecniche di **intelligenza artificiale (AI)** e **machine learning (ML)**. Questi algoritmi possono ottimizzare il coefficiente di riflessione di ogni elemento della IRS in modo dinamico, in risposta ai cambiamenti nell'ambiente circostante o alle variazioni delle condizioni del canale [2].

Tecniche di ottimizzazione AI

- **Apprendimento supervisionato:** Gli algoritmi di machine learning supervisionati possono essere addestrati su dataset che rappresentano diversi scenari di propagazione. Il sistema può quindi prevedere le configurazioni ottimali della IRS per migliorare la qualità del segnale riflesso.
- **Apprendimento rinforzato:** Questo metodo permette all'IRS di adattarsi dinamicamente all'ambiente, esplorando diverse configurazioni di riflessione e imparando quali strategie massimizzano la qualità della comunicazione.
- **Ottimizzazione congiunta attiva e passiva:** Gli algoritmi possono ottimizzare sia le IRS che gli altri componenti attivi della rete (ad esempio, le antenne della stazione base), creando un sistema coesivo e altamente efficiente.

Risultati delle simulazioni

Studi basati su simulazioni **full-wave** e modelli di canale hanno dimostrato che le IRS ottimizzate con algoritmi AI possono ridurre significativamente le interferenze e migliorare il rapporto

segnale-rumore (SNR) nelle comunicazioni wireless. I risultati evidenziano che l'ottimizzazione dinamica del coefficiente di riflessione può portare a guadagni significativi in termini di copertura e qualità del segnale, anche in ambienti complessi come le aree urbane.[23]

3.4 Pattern di Radiazione e Controllo del Fascio

Un ulteriore aspetto cruciale delle *Intelligent Reflecting Surfaces* (IRS) è la capacità di manipolare e controllare il **pattern di radiazione** delle onde elettromagnetiche riflesse. Questo controllo consente di ottimizzare la direzione e l'intensità dei segnali riflessi verso i ricevitori desiderati. In questo capitolo, verranno trattati i concetti fondamentali relativi alla progettazione del pattern di radiazione, il **beamforming passivo**, e i risultati delle simulazioni full-wave per ottimizzare l'efficacia delle IRS.

3.4.1 Progettazione del pattern di radiazione delle IRS

Il **pattern di radiazione** di una IRS si riferisce alla distribuzione angolare della potenza riflessa da una superficie, che determina la direzione verso cui viene inviato il segnale riflesso. La progettazione del pattern di radiazione è cruciale per massimizzare la copertura e la qualità del segnale. Il pattern di radiazione dipende da vari fattori, tra cui:

- la geometria dell'IRS (ad esempio, configurazioni planari o curvilinee);
- le proprietà elettromagnetiche degli elementi riflettenti (capacità di variare la fase e l'ampiezza);
- il posizionamento e l'orientamento dell'IRS rispetto al trasmettitore e al ricevitore;

In un'implementazione tipica, ogni elemento riflettente sulla IRS è responsabile della riflessione di una piccola porzione del segnale incidente, e il pattern complessivo può essere ottimizzato attraverso una precisa regolazione della fase del segnale riflesso.

Esempio di pattern di radiazione direttivo

La capacità di un IRS di creare un **pattern di radiazione direttivo** è una delle sue caratteristiche distintive. In una configurazione direttiva, l'IRS riflette il segnale in una direzione specifica, massimizzando la potenza ricevuta in quel punto. Questo è particolarmente utile nelle comunicazioni wireless, dove un fascio focalizzato può migliorare significativamente il rapporto segnale-rumore (SNR).

$$G(\theta, \phi) = \frac{\text{Potenza riflessa nella direzione } (\theta, \phi)}{\text{Potenza totale riflessa}}$$

dove $G(\theta, \phi)$ rappresenta il guadagno del fascio nella direzione specificata dagli angoli azimutali e zenitali.

3.4.2 Ottimizzazione del beamforming passivo

Il **beamforming passivo** è la tecnica attraverso cui un IRS dirige il segnale riflesso verso un determinato ricevitore, ottimizzando così la qualità della comunicazione. Questo si ottiene regolando le fasi di ciascun elemento riflettente per creare interferenza costruttiva nella direzione desiderata e interferenza distruttiva in altre direzioni.

Controllo della fase per il beamforming

Il beamforming passivo richiede un preciso controllo della fase su ciascun elemento dell'IRS. Per una direzione specifica, la fase di ciascun elemento deve essere regolata in modo che le onde riflesse si sommino costruttivamente nel punto desiderato. La fase ottimale ϕ_n per ogni elemento n può essere calcolata come:

$$\phi_n = -k \cdot d_n + \phi_0$$

dove:

- k è il numero d'onda,
- d_n è la distanza tra l'elemento n e il ricevitore,
- ϕ_0 è la fase iniziale del segnale incidente.

Ottimizzazione multiutente

In un ambiente multiutente, un IRS può essere configurato per dirigere fasci multipli verso diversi ricevitori, massimizzando l'efficienza spettrale e riducendo le interferenze. Questa configurazione può essere ottenuta ottimizzando congiuntamente le fasi degli elementi in modo da creare più fasci simultanei, ciascuno indirizzato verso un utente specifico.

Capitolo 4

Prototipi Sperimentali di IRS

In questo capitolo verranno introdotti una serie di prototipi sperimentali di IRS per considerarne il funzionamento pratico.

4.1 Prototipo IRS passivo (Tsinghua University)

Il prototipo basato su IRS sviluppato dai ricercatori della Tsinghua University (THU) in Cina integra apparecchiature elettroniche in tempo reale e metamateriali sintonizzabili. I ricercatori utilizzano il diodo PIN per progettare elementi riflettenti riconfigurabili con diverse risoluzioni di sfasamento e bande di frequenza di lavoro, come mostrato nella Fig. 4.1.

L'IRS sviluppato è costituito da 16×16 elementi e la modalità di riflessione di ciascun elemento è determinata dallo stato on-off del suo diodo PIN integrato. Lo stato on-off del diodo PIN è equivalente a un circuito di feedback a porta singola ad alta frequenza con un'impedenza di diverso valore e può realizzare lo sfasamento riconfigurabile dei segnali riflessi. Riconfigurando lo stato di controllo di ciascun elemento, l'IRS regola l'angolo in uscita dei segnali incidenti nel modo desiderato. In particolare, lo stato del diodo su ciascun elemento IRS è controllato indipendentemente dal circuito logico distribuito dietro la patch. Il segnale di controllo dell'intero array di 256 elementi viene inviato dalla scheda FPGA a ciascun componente. Sulla base di questa idea di progettazione, la Tsinghua University ha progettato e realizzato IRS che funzionano rispettivamente a 2,3 e 28,5 GHz.

Nelle simulazioni software, il server ad alte prestazioni HP Xeon E5-2697, e MATLAB, vengono utilizzati per eseguire la verifica a livello di sistema delle comunicazioni wireless assistite da IRS, che fornisce importanti riferimenti e benchmark per la progettazione della piattaforma hardware. Nel sistema hardware online, prima, il computer host può realizzare l'impostazione RF, la ricezione e la trasmissione dei dati e l'elaborazione del segnale in banda base in tempo reale, quindi USRP viene utilizzato per ottenere l'elaborazione e la trasmissione del segnale

analogico e l'IRS progettato viene distribuito per riflettere i segnali RF. I componenti del ricevitore sono gli stessi di quelli del trasmettitore. I segnali RF ricevuti dall'antenna del ricevitore vengono amplificati, convertiti in basso, quantizzati e desampling (utilizzando ADC) dall'USRP. Quindi, i segnali elaborati vengono convogliati al modulo di controllo tramite la scatola di commutazione PCI e i segnali in banda base vengono analizzati ed elaborati dall'FPGA e dal processore incorporato nel modulo di controllo, in modo che i simboli decodificati possano essere visualizzati come video ad alta definizione.

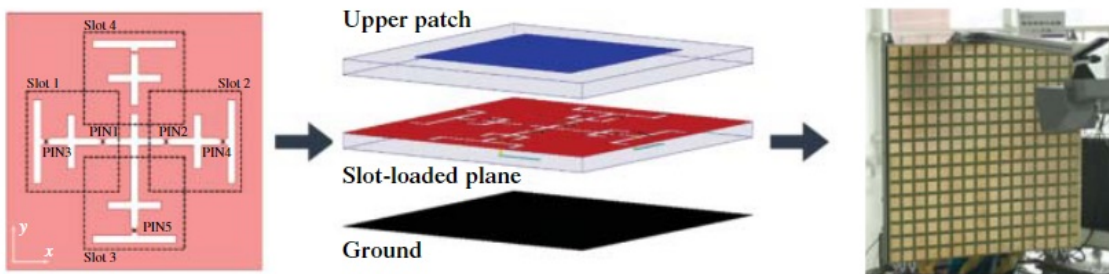


Figura 4.1: IRS basato su diodo PIN. Fonte: Tsinghua University Press Ltd

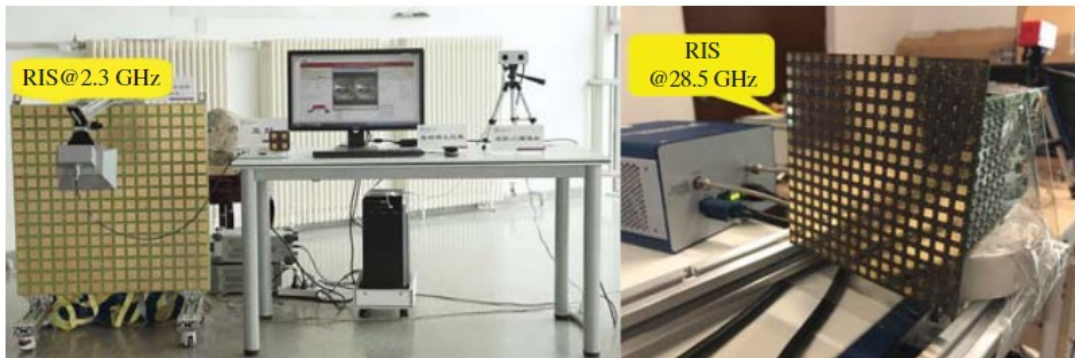


Figura 4.2: Due prototipi IRS (256 elementi). Fonte: Tsinghua University Press Ltd.

Seguendo l'idea di cui sopra, vengono sviluppati due prototipi di comunicazione wireless basati su IRS, come mostrato nella Fig. 4.2. Quindi, nel 2022, un prototipo IRS a bassa potenza con un numero maggiore di elementi (2304 elementi), che combina anche una rete neurale end-to-end per la decodifica, viene progettato e realizzato dagli autori di [22], come mostrato nella Fig. 4.3. Sulla base dei prototipi nella Fig. 4.2, la Tsinghua University ha quindi completato la verifica della trasmissione rispettivamente nell'ambiente interno ed esterno. Ad esempio, il guadagno di array misurato dell'IRS a 2304 elementi da 28,5 GHz, è di circa 30 dB e la larghezza di banda di lavoro del sistema di comunicazione è di 800 MHz. Il prototipo di comunicazione

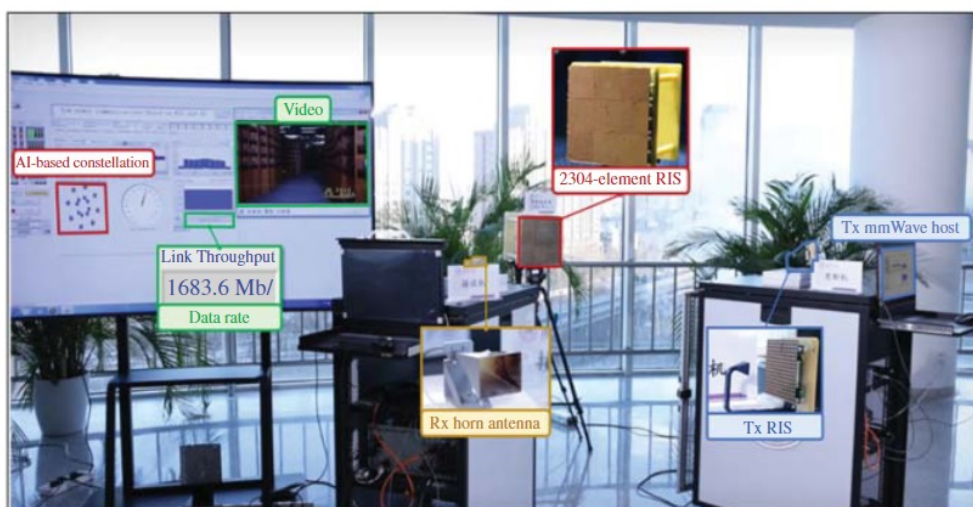


Figura 4.3: I prototipi dell'IRS (2304 elementi). Fonte: Tsinghua University Press Ltd.

può supportare la trasmissione wireless su una distanza di 5 m nell'ambiente interno, con una velocità di trasmissione di 1,683 Gbps. [22].

4.2 Prototipo IRS attivo (Tsinghua University)

Per superare l'effetto "multiplicative fading" introdotto dagli IRS, per il quale il segnale risultante è influenzato dalla moltiplicazione delle variazioni di ampiezza e fase dei segnali lungo il percorso, i ricercatori della Tsinghua University hanno proposto un IRS attivo. A differenza dei tradizionali IRS passivi, che riflettono passivamente i segnali, l'IRS attivo può amplificare i segnali riflessi. Come mostrato nella Fig. 4.4, oltre al circuito di sfasamento, ogni elemento IRS attivo integra anche un amplificatore di tipo a riflessione, che può migliorare i segnali riflessi e la capacità degli IRS di controllare attivamente l'ambiente wireless. Sulla base del principio di antenna degli IRS attivi, i ricercatori hanno progettato e realizzato un IRS attivo a 64 elementi, come mostrato nella Fig. 4.5. Il punto di frequenza centrale dell'IRS attivo progettato è 3,5 GHz e ogni elemento può realizzare uno sfasamento di 2 bit. La parte di sfasamento di ogni unità antenna utilizza due diodi PIN a bassa potenza e due SPDT per sostituire gli sfasatori tradizionali ad alta precisione, il che può ridurre notevolmente il consumo di energia dell'hardware. Quindi, i ricercatori forniscono un prototipo di comunicazione IRS-assistita attiva, come mostrato in Fig. 4.6.

Sulla base del prototipo sviluppato, viene stabilito un ambiente sperimentale per un'ulteriore convalida. La frequenza operativa dell'IRS attivo è impostata a $f = 3,5$ GHz e la larghezza di banda a 40 MHz, modificabile regolando l'impedenza del circuito degli elementi attivi. La polarizzazione dell'antenna presso la BS e quella presso l'utente vengono selezionate rispettivamente

come verticale e orizzontale. La potenza di trasmissione è impostata a -10 mW. Le altezze della BS, dell'IRS e dell'utente sono fissate a 1 m. La distanza orizzontale del collegamento BS-IRS e quella del collegamento IRS-utente sono impostate rispettivamente a 2 e 3,5 m. L'angolo di arrivo (AoA) presso l'IRS attivo è fissato a zero e l'angolo di partenza (AoD) verrà specificato per valutare il guadagno di prestazioni degli IRS attivi a diversi orientamenti. Per osservare il guadagno di riflessione dell'IRS attivo, una piastra metallica con le stesse dimensioni di apertura viene utilizzata come IRS attivo per il confronto delle prestazioni. Spostando l'utente a diversi AoD e configurando lo sfasamento dell'IRS attivo con il codebook della trasformata di Fourier discreta (DFT), i risultati sperimentali sono mostrati nella Fig. 4.6. Si può osservare che, rispetto alla potenza ricevuta per la piastra metallica, l'IRS attivo può sempre ottenere un guadagno di circa 10 dB. La velocità dei dati per l'IRS attivo può attestarsi a circa 30 Mbps, mentre quella per la piastra metallica varia solo da 1 a 2 Mbps. Il motivo è che il beamforming all'IRS attivo può creare un raggio riflesso con un elevato guadagno di array e guadagno di riflessione, mentre la piastra metallica può solo riflettere i segnali incidenti in modo casuale senza combinazione o amplificazione in fase, il che convalida il guadagno significativo degli IRS attivi.

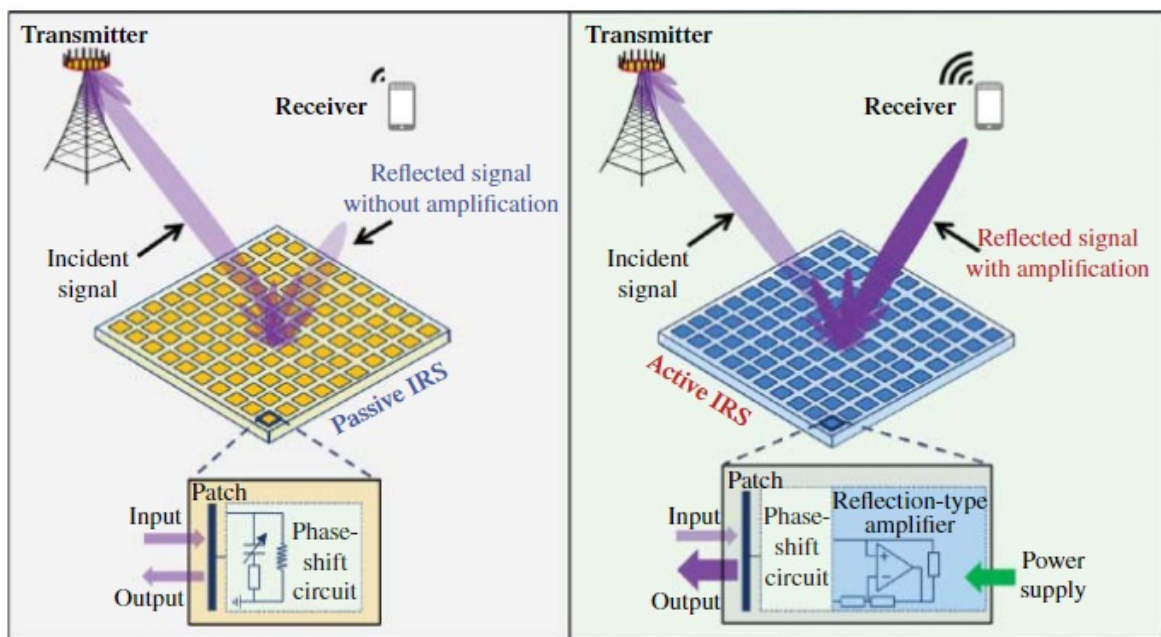


Figura 4.4: Un confronto tra IRS passivi e IRS attivi

4.3 Prototipo IRS trasmissivo (MIT)

I ricercatori del Massachusetts Institute of Technology (MIT) hanno costruito un prototipo IRS in grado di trasmettere e riflettere simultaneamente segnali. In questo prototipo, ogni elemento

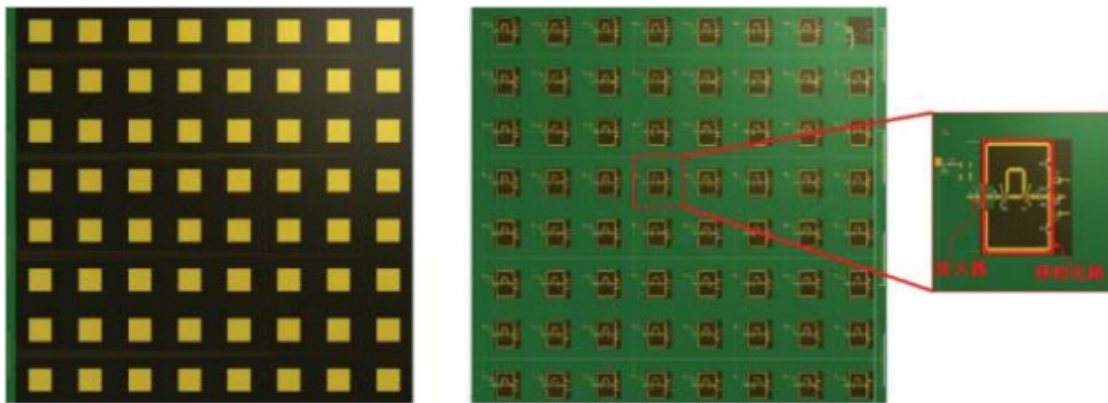


Figura 4.5: Un IRS attivo a 64 elementi. Fonte: Tsinghua University Press Ltd.

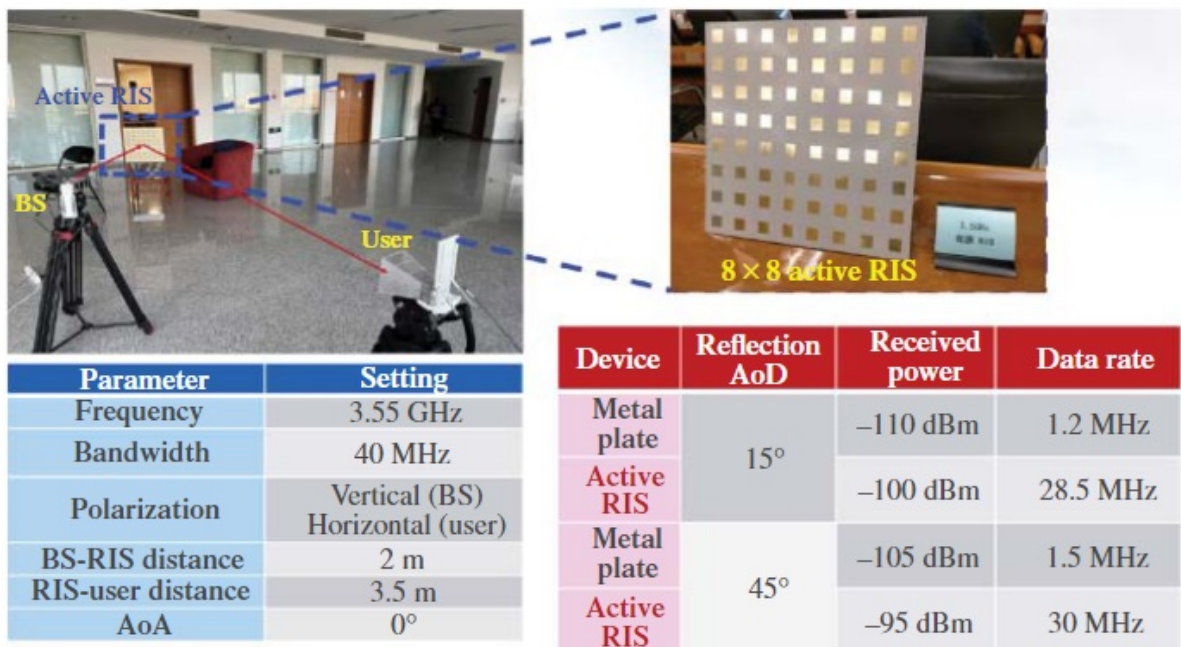


Figura 4.6: Prototipo IRS attivo e risultati delle misurazioni sperimentali. Fonte: Tsinghua University Press Ltd.

ricongfigurabile è suddiviso in diverse sotto-unità ed è collegato a un commutatore RF a 1 bit. I commutatori RF possono controllare lo stato di connessione di diverse sotto-unità, controllando così lo stato di trasmissione e riflessione di ciascun elemento. L'IRS viene configurato e integrato in seguito, come illustrato nella Fig.4.7. Vale la pena notare che l'IRS, nel prototipo del MIT, è diverso da quelli normali, poiché le unità non possono realizzare lo sfasamento. Invece, può solo commutare tra segnali di trasmissione e segnali di riflessione. Nello specifico, ogni elemento è suddiviso in diverse sotto-unità indipendenti. Quando il commutatore RF è acceso, l'elemento può essere visualizzato come una piastra metallica e può riflettere i segnali incidenti.

Quando l'interruttore RF è spento, l'elemento può essere visualizzato come diversi fili metallici, che non possono riflettere i segnali incidenti e il segnale può essere trasmesso completamente attraverso l'IRS, come mostrato in Fig. 4.8.

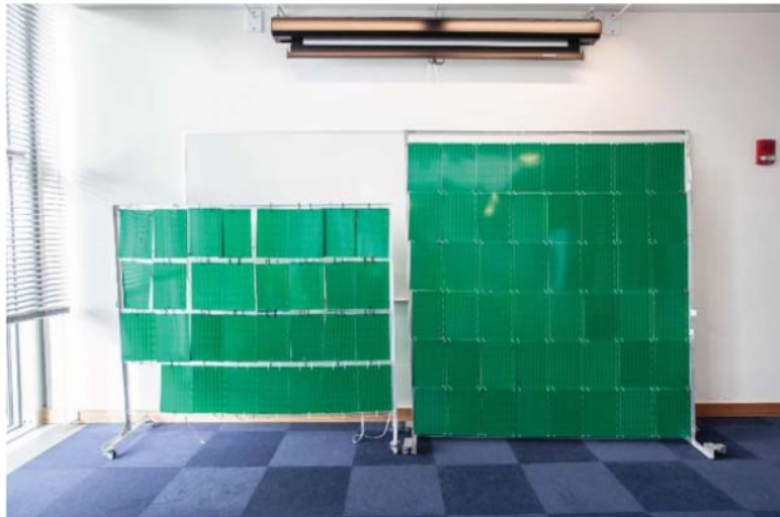


Figura 4.7: Il prototipo dell'IRS sviluppato dal MIT. Fonte: Jason Dorfman, MIT CSAIL.

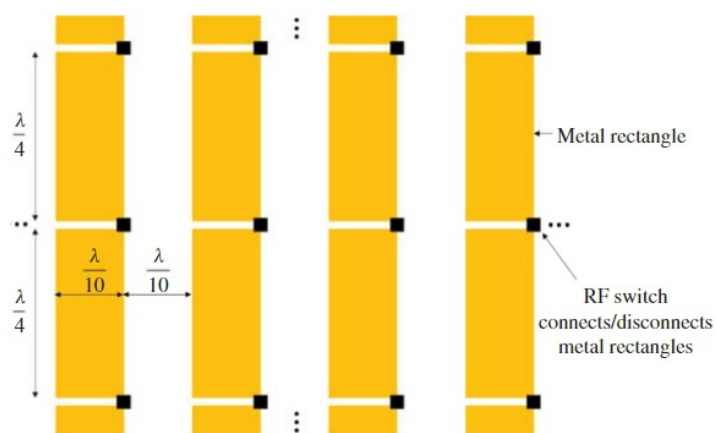


Figura 4.8: La struttura degli elementi dell'IRS sviluppata dal MIT

Inoltre, integrando un gran numero di unità, l'IRS può ottimizzare sia i segnali di trasmissione sia quelli di riflessione per servire gli utenti su entrambi i lati. Il principio di progettazione del coefficiente di radiazione di questo IRS è mostrato nella Fig.4.9. La linea tratteggiata rappresenta l'IRS, le aree bianche e grigie rappresentano i due spazi separati dall'IRS e la freccia nera rappresenta l'ampiezza e la fase dell'onda incidente. L'obiettivo è progettare la permeabilità di ogni elemento IRS in modo che il maggior numero possibile di segnali possa essere riflesso e aggiunto in modo coerente al ricevitore, mentre i segnali dannosi per la potenza del segnale ricevuto, possono passare attraverso l'IRS. I ricercatori del MIT hanno anche eseguito alcuni

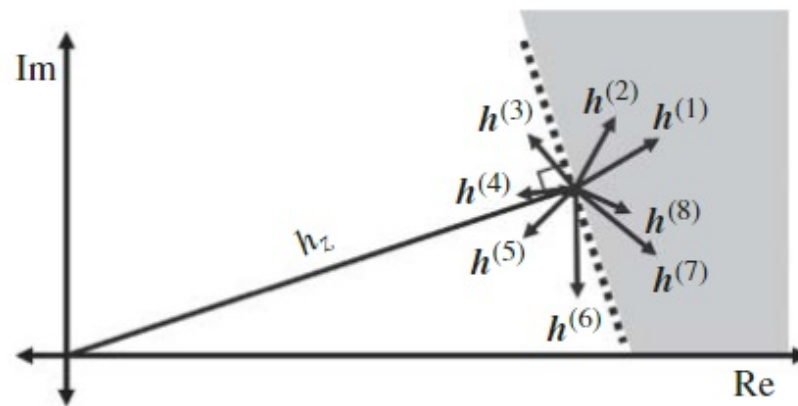


Figura 4.9: Il principio di progettazione del coefficiente di radiazione IRS proposto dal MIT

test di sistema nei sistemi di comunicazione. La frequenza centrale era di 2,4 GHz e il test è stato eseguito nello scenario di un ufficio interno. I risultati del test hanno mostrato che l'IRS può migliorare la potenza dei segnali di comunicazione in un intervallo di 3,8-20,0 dB

4.4 Prototipo IRS di China Mobile

I ricercatori di China Mobile hanno proposto tre passi per uno sviluppo efficiente dell'IRS. Il primo è la realizzazione dell'IRS passivo, che può essere distribuito in modo efficace ed estendere la copertura dei segnali di comunicazione, in particolare nelle posizioni in cui i segnali originali sono deboli o addirittura assenti. Il secondo passaggio è lo sviluppo dell'IRS semi-statico, che può realizzare la selezione del raggio tramite diverse configurazioni degli elementi IRS. Con l'implementazione dell'IRS semi-statico, la velocità di somma delle celle può essere ulteriormente migliorata. Nel terzo passaggio, viene realizzato l'IRS dinamico, in cui la posizione degli utenti può essere tracciata dagli algoritmi progettati per i sistemi assistiti da IRS (Fig. 4.10). Per convalidare le prestazioni dell'IRS, i ricercatori di China Mobile hanno anche costruito un prototipo basato sulla stazione base industriale e sull'IRS e hanno condotto diversi test di sistema. Nel primo test, sono stati selezionati tre punti fissi per valutare le prestazioni della velocità dei dati, Fig.4.11. I risultati hanno mostrato che l'IRS può migliorare la velocità dei dati dei punti selezionati. Nello specifico, la potenza di ricezione del segnale di riferimento (RSRP) è stata migliorata di 27 dB e la velocità di trasmissione dati dell'utente è stata migliorata di 5,4 volte, dopo aver distribuito l'IRS nel sistema di comunicazione. Nel secondo test, i ricercatori hanno valutato le prestazioni di copertura degli utenti in movimento, Fig. 4.11. I risultati hanno mostrato che l'IRS può migliorare l'RSRP di 23 dB e la velocità di trasmissione dati dell'utente è stata migliorata di 5 volte nell'intero campo di prova.[22]

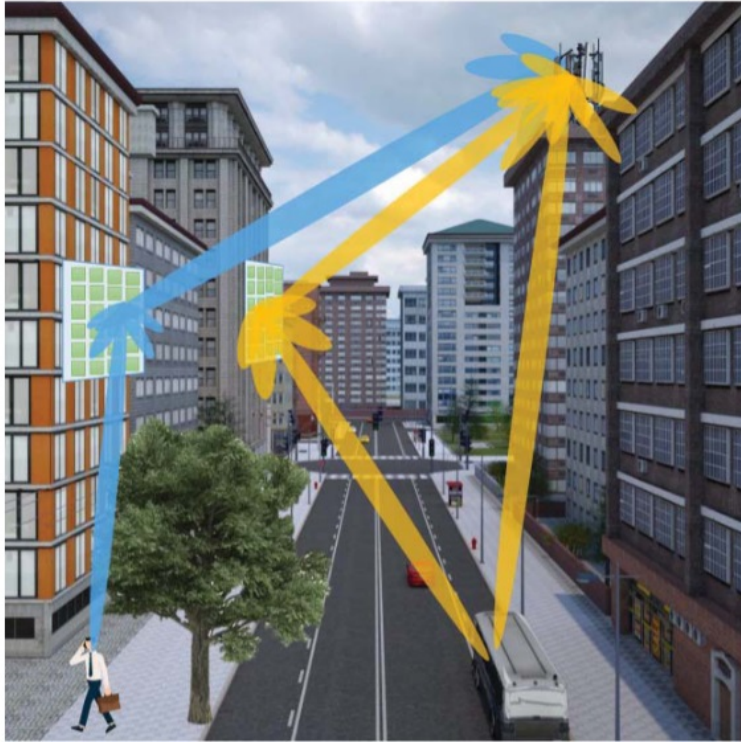


Figura 4.10: Lo scenario in cui l'IRS può estendere la copertura dei segnali



Figura 4.11: Lo scenario di prova di China Mobile: punti fissi

4.5 Prototipo IRS trasparente (DOCOMO)

I ricercatori della NTT DOCOMO in Giappone hanno costruito un prototipo basato sull'IRS, composto da un gran numero di elementi di sub-lunghezza d'onda, che sono stati posizionati in

una disposizione periodica su una superficie bidimensionale ricoperta da un substrato di vetro (DOCOMO 2018). Le unità IRS avevano tre modalità, che possono essere controllate spostando leggermente il substrato di vetro:

- (i) penetrazione completa dei segnali incidenti;
- (ii) riflessione parziale dei segnali incidenti;
- (iii) riflessione completa di tutti i segnali.

Questo IRS è altamente trasparente e non interferisce esteticamente o fisicamente con l'ambiente circostante o con la linea di vista delle persone, quindi è adatto per l'uso all'interno di edifici o su veicoli. Nei sistemi di comunicazione pratici, l'IRS progettato può manipolare le onde radio in base all'ambiente di installazione specifico. Ad esempio, in luoghi non adatti all'installazione di stazioni base, come in aree edificate o in aree interne in cui la ricezione dei segnali deve essere bloccata selettivamente, l'IRS proposto è altamente adattabile (Fig.4.12). I ricercatori di DOCOMO hanno anche condotto alcuni test di sistema (Fig. 4.13). In particolare, la comunicazione dati 5G, utilizzando la banda a 28 GHz, è stata misurata tra la stazione base 5G, situata sul tetto e la stazione mobile 5G che esegue il veicolo sperimentale. L'IRS basato sulla metastruttura utilizzata nel test, la direzione di riflessione e la forma del fascio dell'onda riflessa sono determinate in modo che l'area del sito 5G sia stata ampliata utilizzando queste piccole strutture, per formare il fascio disposto nel piano della matrice di riflessione. Distribuendo un IRS basato sulla metastruttura, la qualità della comunicazione è stata notevolmente migliorata nell'area in cui la comunicazione dati 5G era precedentemente impossibile, con un'estensione della portata di circa 35 m. Utilizzando l'IRS, la velocità di comunicazione è migliorata di 500 Mbps per il veicolo dotato di stazione mobile 5G.[22]

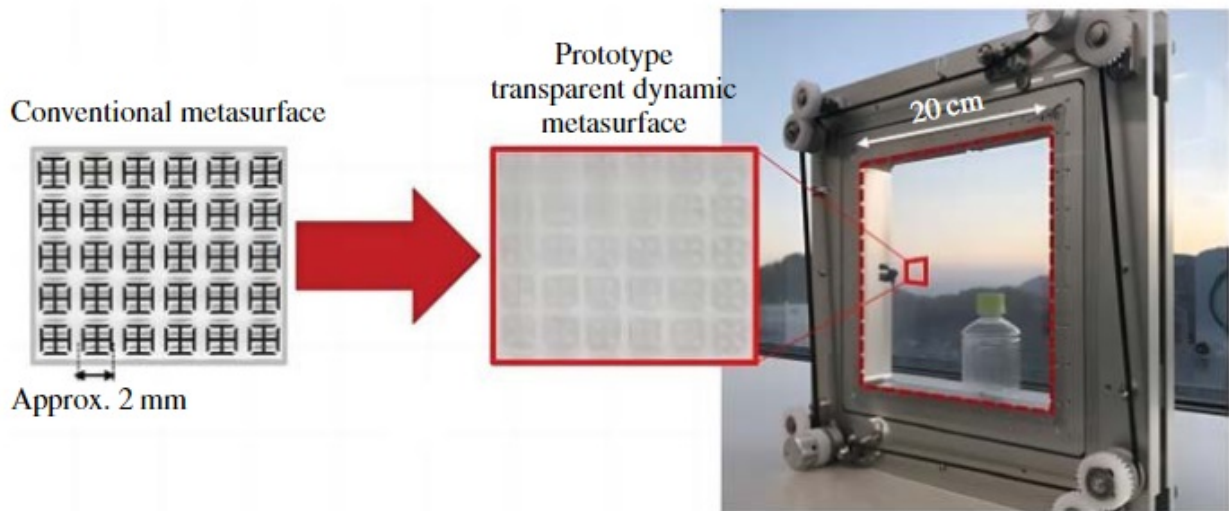


Figura 4.12: Il prototipo. Fonte: NTT DOCOMO.



Figura 4.13: The test scenario. Source: Metawave Corporation.

Capitolo 5

Sviluppi Futuri e Conclusioni

Le *Intelligent Reflecting Surfaces* (IRS) rappresentano quindi una delle tecnologie più promettenti per la prossima generazione di reti wireless, in particolare per l'evoluzione verso le reti 6G. Attraverso il controllo passivo delle onde elettromagnetiche, le IRS sono in grado di migliorare, in modo significativo, la qualità delle comunicazioni wireless, fornendo una maggiore flessibilità nella gestione delle risorse spettrali e nella direzione del segnale. In questo capitolo, discuteremo i principali risultati ottenuti e le prospettive per lo sviluppo futuro delle IRS.

7.1 Limiti Attuali delle IRS

Nonostante i significativi progressi nella progettazione e nell'implementazione delle IRS, esistono ancora diverse sfide tecniche da affrontare per una diffusione su larga scala. Alcuni dei principali limiti includono:

- **Efficienza energetica:** Sebbene le IRS siano passive e consumino meno energia rispetto alle tecnologie tradizionali come le antenne attive, esiste ancora la necessità di sviluppare metodi più efficienti per il controllo delle IRS in modo da ridurre ulteriormente i consumi energetici.
- **Stima del canale IRS:** Una delle sfide maggiori per l'implementazione pratica delle IRS è la stima accurata del canale. Le IRS interagiscono con segnali multipli riflessi e trasmessi, e la stima del canale diventa complessa quando gli elementi riflettenti sono molti.
- **Ottimizzazione in tempo reale:** Le IRS richiedono algoritmi di ottimizzazione rapidi per adattarsi dinamicamente ai cambiamenti delle condizioni del canale. Lo sviluppo di tecniche di intelligenza artificiale e machine learning è fondamentale per garantire un'ottimizzazione efficiente e in tempo reale.

- **Scalabilità:** La scalabilità delle IRS in reti su larga scala rimane una sfida aperta. Con l'aumento del numero di elementi riflettenti, cresce la complessità del controllo e della gestione delle risorse.

7.2 Prospettive per le Comunicazioni 6G

Le reti 6G si baseranno su un'infrastruttura estremamente densa e su una gamma di frequenze molto più ampia rispetto alle reti 5G. In questo contesto, le IRS sono destinate a svolgere un ruolo centrale per ottimizzare l'efficienza spettrale e migliorare la qualità del servizio. Alcune delle principali prospettive per le IRS nelle reti 6G includono:

Maggiore utilizzo delle frequenze millimetriche e terahertz (THz)

Le reti 6G sfrutteranno le bande di frequenza millimetrica e terahertz (THz) per offrire velocità di trasmissione dati estremamente elevate. Tuttavia, queste bande di frequenza sono particolarmente suscettibili alle perdite di percorso e agli ostacoli fisici. Le IRS possono mitigare queste problematiche riflettendo il segnale in modo ottimale e riducendo l'effetto delle barriere fisiche.

Reti intelligenti e riconfigurabili

Le reti 6G prevedono l'integrazione di IRS in ambienti riconfigurabili, dove gli utenti possono beneficiare di una connessione wireless ottimale in base alla posizione e alle condizioni ambientali. Le IRS possono essere programmate per adattarsi in tempo reale e dirigere i segnali verso gli utenti mobili, migliorando la copertura e riducendo le interferenze.

Sicurezza e privacy nelle comunicazioni

Le IRS possono anche contribuire a migliorare la sicurezza delle comunicazioni nelle reti 6G. Attraverso il controllo del pattern di radiazione, è possibile evitare che segnali sensibili vengano intercettati da dispositivi non autorizzati. Inoltre, le IRS possono essere configurate per riflettere i segnali in modo da impedire il rilevamento da parte di potenziali intercettatori.

7.3 Direzioni Future di Ricerca

Le future ricerche sulle IRS si concentreranno su diversi aspetti chiave per migliorare l'efficienza e l'efficacia delle superfici riflettenti intelligenti. Alcune delle principali aree di sviluppo includono:

- **Sviluppo di hardware avanzato:** La progettazione di elementi riflettenti a basso costo e ad alte prestazioni è essenziale per rendere le IRS una soluzione commercialmente

praticabile. Sono necessari materiali innovativi che possano migliorare l'efficienza delle riflessioni e ridurre i costi di produzione.

- **Tecniche di stima del canale avanzate:** La stima del canale IRS richiede tecniche avanzate per gestire la complessità della riflessione multipla e l'interazione con l'ambiente circostante. L'uso di algoritmi basati sull'intelligenza artificiale e sulle reti neurali può aiutare a migliorare l'accuratezza della stima del canale.
- **Integrazione con altre tecnologie emergenti:** Le IRS possono essere combinate con altre tecnologie come il *massive MIMO*, le comunicazioni a onde millimetriche e le reti di sensori IoT, per creare un'infrastruttura di rete integrata e altamente efficiente.
- **Applicazioni in nuovi settori:** Le IRS possono trovare applicazioni in altri settori, oltre alle comunicazioni wireless, come nei sistemi radar, nelle auto autonome e nelle città intelligenti, dove è necessario un controllo preciso delle onde elettromagnetiche.

Conclusioni

Le **Intelligent Reflecting Surfaces** offrono una nuova dimensione nella progettazione delle reti wireless, fornendo un mezzo per controllare le onde elettromagnetiche in modo flessibile ed efficiente. Sebbene esistano ancora numerose sfide tecniche, il potenziale delle IRS, per migliorare la copertura, l'efficienza spettrale e la sicurezza nelle reti 6G, è enorme. La ricerca futura si concentrerà su soluzioni hardware innovative, algoritmi di ottimizzazione in tempo reale e l'integrazione con altre tecnologie emergenti, aprendo la strada a una nuova generazione di comunicazioni wireless altamente performanti.[2],[4].

Le diverse configurazioni hardware delle Intelligent Reflecting Surfaces (IRS) mostrano un potenziale significativo per migliorare l'efficienza delle comunicazioni wireless. L'utilizzo di componenti come i diodi PIN e i varactor ha dimostrato di essere particolarmente efficace nel controllo della fase e dell'ampiezza dei segnali riflessi, riducendo i costi e la complessità rispetto alle alternative tradizionali. Tuttavia, la progettazione di IRS attive introduce nuove sfide legate al consumo energetico e alla gestione della complessità di controllo, richiedendo ulteriori ottimizzazioni per essere implementata su larga scala.

I prototipi trasmissivi, che combinano la riflessione con la trasmissione direzionale, rappresentano una promettente direzione di ricerca per applicazioni in reti dense e dinamiche. L'integrazione di tecnologie, come FPGA per la gestione del controllo in tempo reale, può garantire una gestione più efficiente, adattandosi dinamicamente alle condizioni del canale. Quindi l'hardware delle IRS offre molti vantaggi per le reti future, ma richiede un'ottimizzazione avanzata per essere competitivo nelle implementazioni 6G.

Bibliografia

- [1] N. Rajatheva, «Scoring the Terabits/s goal: Broadband connectivity in 6G,» *None*, 2020.
- [2] Q. Wu e S. Zhang, «Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communications: A Tutorial,» *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, n. 5, pp. 3313–3351, 2021.
- [3] Q. He, «Tunable/Reconfigurable Metasurfaces: Physics and Applications,» *Research*, 2019.
- [4] J. Zhao e Y. Liu, «A Survey of Intelligent Reflecting Surfaces (IRSs): Towards 6G Wireless Communication Networks,» *None*, 2019.
- [5] S. Hu e R. Zhang, «Beyond Massive MIMO: The Potential of Data Transmission with Large Intelligent Surfaces,» *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018.
- [6] L. Sanguinetti, E. Bjornson e J. Hoydis, «Towards Massive MIMO 2.0: Understanding Spatial Correlation, Interference Suppression, and Pilot Contamination,» *arXiv preprint arXiv:1904.03406*, 2019.
- [7] S. Hu, F. Rusek e O. Edfors, «The Potential of Using Large Antenna Arrays on Intelligent Surfaces,» in *IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2017.
- [8] J. Lyu e R. Zhang, «Hybrid Active/Passive Wireless Network Aided by Intelligent Reflecting Surface: System Modeling and Performance Analysis,» *arXiv:2004.13318*, 2020.
- [9] Q. Wu e R. Zhang, «Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network: Joint Active and Passive Beamforming Design,» *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2019.
- [10] Q. Wu e R. Zhang, «Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming,» *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, n. 11, pp. 5394–5409, 2020.
- [11] Q. Wu e R. Zhang, «Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, n. 1, pp. 106–112, 2018.

- [12] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2005.
- [13] S. Abeywickrama, R. Zhang e C. Yuen, «Intelligent Reflecting Surface: Practical Phase Shift Model and Beamforming Optimization,» in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2020, pp. 1–6.
- [14] N. I. Zheludev e Y. S. Kivshar, «From Metamaterials to Metadevices,» *Nature Materials*, vol. 11, pp. 917–924, 2012.
- [15] N. F. Yu et al., «Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction,» *Science*, vol. 334, pp. 333–337, 2011.
- [16] A. V. Kildishev, A. Boltasseva e V. M. Shalaev, «Planar Photonics with Metasurfaces,» *Science*, vol. 339, p. 1 232 009, 2013.
- [17] T. J. Cui e M. Q. Qi, «Coding Metamaterials, Digital Metamaterials and Programmable Metamaterials,» *Light: Science & Applications*, 2014.
- [18] P. Nayeri, F. Yang e A. Z. Elsherbeni, *Reflectarray Antennas: Theory, Designs, and Applications*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.
- [19] L. Zhang, «Nature Communications, vol. 9, no. 1, p. 4334,» *Nature Communications*, vol. 9, n. 1, p. 4334, 2018.
- [20] H. Yang, «Design of Resistor-Loaded Reflectarray Elements for Both Amplitude and Phase Control,» *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1159–1162, 2017.
- [21] S. Abeywickrama, R. Zhang, Q. Wu e C. Yuen, «Intelligent Reflecting Surface: Practical Phase Shift Model and Beamforming Optimization,» *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, n. 9, pp. 5849–5863, 2020.
- [22] Z. Zhang, Y. Chen, Q. Yu e L. Dai, *Intelligent Surfaces Empowered 6G Wireless Network Fundamentals of IRS*. John Wiley Sons, Inc., 2024.
- [23] F. Naeem, G. Kaddoum, S. Khan, K. S. Khan e N. Adam, «IRS-Empowered 6G Networks: Deployment Strategies, Performance Optimization, and Future Research Directions,» *IEEE*, 2024.