



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

**METASUPERFICI INTELLIGENTI:
UNA TECNOLOGIA PER LE
COMUNICAZIONI DI NUOVA
GENERAZIONE**

Relatore: Leonardo Badia

Tesi di Laurea di:
Daniele Pio Colletti, 1195773

ANNO ACCADEMICO 2020-2021
Sessione di laurea 23 Settembre 2021

*Ai miei Genitori
e ad Alessia
che mi hanno sostenuto in questo percorso,
da vicino e da lontano,
ma sempre presenti.*

Abstract

Viviamo in una società sempre più connessa; il numero di dispositivi wireless è previsto raggiungere la soglia dei 50 miliardi a partire dal 2020. In questo contesto assume progressivamente maggiore priorità la necessità di comunicazioni più efficienti e veloci. Le tecnologie chiave proposte per il 6G, la prossima generazione di sistemi di telecomunicazione mobile, sembrano essere l'uso dello spettro delle frequenze nel terahertz e dei sistemi massive-MIMO, tuttavia siamo ancora lontani dalla loro reale implementazione. Una tecnologia sviluppata negli ultimi anni e che potrebbe segnare una svolta nelle telecomunicazioni è rappresentata dalle superfici intelligenti riflettenti (IRS). Attraverso queste potremo rendere controllabile l'ambiente di propagazione dei segnali elettromagnetici, fino ad adesso fattore avverso alla comunicazione, per aumentare l'efficienza dei sistemi wireless. La maggior parte degli studi condotti fino ad ora riguardano collegamenti punto-punto, vale a dire due dispositivi che comunicano tra loro. Questa tesi si concentra sulle possibili strade verso cui indirizzare la ricerca relativa alla gestione di più utenti in un sistema wireless integrato di una IRS: tre diverse strategie vengono proposte e analizzate, facendo riferimento ai risultati già ottenuti su sistemi di comunicazione simili.

Indice

Introduzione	1
Stato dell'arte	4
Sistemi di trasmissione	4
Sistemi di comunicazione MIMO	5
IRS	7
Related works	13
Analisi delle possibili strategie	16
Modello matematico	16
TDMA	18
FDMA	20
SDMA	21
Risultati e grafici	24
Conclusioni	33

1. Introduzione

Viviamo in una società dove è difficile trovare una attività che non richieda una connessione ad una rete. Negli ultimi anni il numero di dispositivi wireless connessi a Internet è cresciuto continuamente, prevedendo di raggiungere la soglia dei 50 miliardi a partire dal 2020, con la conseguente necessità di reti di comunicazione dotate di una velocità di trasmissione pari a 1000 volte quella offerta della tecnologia presente adesso [1].

La continua richiesta per connessioni più veloci e più efficienti ha portato a mettere a punto il 5G, la quinta generazione dei sistemi di telecomunicazione mobile. La sua diffusione a livello mondiale è iniziata nel 2019 e sta proseguendo, tuttavia mettendo già in mostra i suoi limiti rispetto alle sue originali promesse. Ciò sta spingendo numerosi studiosi a gettare le basi per la sesta generazione di sistemi di comunicazione [2].

Per far fronte a queste necessità, il paradigma seguito fino ad ora è stato “*more data needs more power and more emission on radio waves*” [3]. Dunque, tra le numerose nuove tecnologie che sono state proposte per i nuovi sistemi di comunicazione, quelle che hanno attirato maggior attenzione sono state due: introduzione di trasmettitori con un elevato numero di antenne (ultra-massive MIMO), uso dello spettro di frequenze nel terahertz. Tuttavia, entrambe le proposte si stanno scontrando con numerosi problemi riguardo la loro effettiva implementazione: trasmettitori a radiofrequenza che emettono nel terahertz hanno hardware i cui costi di produzione ad oggi sono proibitivi e lo stesso vale per il dispiegamento dell'elevato numero di antenne nei sistemi UM-MIMO [4].

Da qui nasce l'esigenza di cambiare paradigma, adottare un approccio che miri ad un utilizzo più efficace ed efficiente delle risorse già impiegate

adesso. Una possibile tecnologia che potrebbe segnare una svolta nel mondo delle telecomunicazioni sono le *superfici riflettenti intelligenti* (IRS) [5], [6], [7].

Le IRS sono delle superfici bidimensionali, chiamate *metasuperfici*, costituite di materiali artificiali passivi che presentano caratteristiche elettromagnetiche inusuali; in particolare, rappresentano un'evoluzione delle prime metasuperfici, essendo una versione di queste riprogrammabili. Quando un'onda elettromagnetica incide su una metasuperficie, l'onda riflessa assume diverse caratteristiche a seconda delle proprietà fisiche con cui è stata realizzata. In una IRS, applicando opportuni stimoli esterni alla superficie, è possibile modificarne la configurazione fisica e quindi controllare la propagazione dell'onda riflessa [8].

Le IRS possono essere installate sulle facciate degli edifici, sopra mezzi di trasporto o su piattaforme aeree per poter controllare l'ambiente di propagazione. Configurando in modo opportuno la IRS è possibile direzionare il fascio riflesso verso una determinata direzione. Inoltre, essendo costituita da materiali passivi, non richiede ulteriore consumo di potenza. Attraverso l'utilizzo di superfici riflettenti intelligenti è quindi possibile migliorare le prestazioni degli odierni sistemi di comunicazione senza la necessità di maggiore potenza o banda di larghezza maggiore, aumentando così l'efficienza energetica e spettrale.

Numerosi studi sono stati intrapresi sull'integrazione delle IRS nei sistemi già presenti e su come sfruttare al meglio questa nuova tecnologia [15], [20], [22], [27]. Essendo ancora nella fase iniziale dello sviluppo tuttavia, la maggior parte di questi riguardano collegamenti punto-punto, ovvero sistemi con due dispositivi che comunicano. L'obiettivo di questa tesi è quello di indagare quelle che possono essere le direzioni da prendere riguardo la gestione di più utenti in un sistema di comunicazione wireless integrato di IRS.

Il resto della tesi è così organizzato:

Nel capitolo 2 viene fatta una breve introduzione ai sistemi di comunicazione wireless, in particolare, ai sistemi MIMO. Quindi vengono introdotte le IRS, illustrando brevemente il loro funzionamento e le loro possibili realizzazioni. Vengono infine mostrate alcune delle loro possibili applicazioni negli

odierni sistemi di comunicazione vengono mostrate.

Nel capitolo 3 viene presentato il modello matematico con cui è possibile rappresentare un sistema di comunicazione wireless integrato di una IRS nel caso multi utente. Le possibili strade riguardo la gestione di questi vengono proposte e analizzate.

Nel capitolo 4 risultati sperimentali e grafici vengono riportati per mostrare l'effettivo miglioramento delle prestazioni grazie all'utilizzo di IRS e confrontare le prestazioni delle varie strategie proposte.

Nel capitolo 5 vengono tratte le conclusioni e analizzate le strade verso cui indirizzare la ricerca ingegneristica riguardo le IRS.

2. Stato dell'arte

2.1 Sistemi di trasmissione

Un sistema di trasmissione è un insieme di dispositivi elettronici e software che permettono a diversi utenti (non necessariamente umani, anche computer o macchine) collegati ad una rete di scambiare informazioni. Questo scambio avviene mediante il trasferimento di opportuni segnali, quali tensione elettrica se la comunicazione avviene attraverso cavi metallici, o onde elettromagnetiche se invece il mezzo di trasmissione (ovvero il mezzo su cui si propaga il segnale) è l'aria. Tale tesi riguarda quest'ultimo caso, ovvero quello dei sistemi wireless. Lo scenario di una comunicazione attraverso sistema wireless può essere così modellato [9], [10]:

1. Una sorgente genera un messaggio; questo è dapprima codificato e successivamente trasformato in una sequenza di segnali da trasmettere. Ciascuno di essi viene inviato da un trasmettitore, ossia un'antenna nel caso di sistemi wireless.
2. Il segnale si propaga sottoforma di onda elettromagnetica attraverso l'aria subendo, a causa di diversi fenomeni fisici, un'attenuazione della sua potenza. Il canale può essere modellato con un sistema a due porte e descritto mediante il suo *guadagno di canale*, ovvero il rapporto tra la potenza del segnale all'inizio e alla fine di esso.
3. Il segnale viene captato dal ricevitore che tenta di ricostruire il messaggio trasmesso.

Oltre al segnale trasmesso, il ricevitore è soggetto a rumore, vale a dire l'insieme di tutti i segnali privi di informazione presenti indipendentemente dal segnale utile, e che, interferendo con questo, ne degradano la qualità. Anche il rumore ha una potenza e a partire da questa possiamo definire un importante fattore descrittivo di un sistema di comunicazione: il *Signal-to-Noise-Ratio* (SNR), il rapporto tra potenza del segnale utile e rumore.

L'SNR è un fattore molto importante perché, come dimostrato da Shannon, a partire da questo è possibile definire la *capacità di canale*, ovvero il massimo bitrate con cui si può trasmettere. Questa è data da:

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (1)$$

dove B corrisponde alla banda disponibile e si misura in *bit* mentre il risultato di C si misura in *bit/s* [9].

2.2 Sistemi di comunicazione MIMO

L'acronimo MIMO sta per *Multiple-Input-Multiple-Output*. In questi sistemi trasmettitore (Tx) e ricevitore (Rc) sono implementati con schiere di antenne o *antenna-array*, ovvero un numero N di antenne disposte vicine tra loro solitamente in configurazione lineare o matriciale (a formare una griglia rettangolare). Le schiere di antenne permettono di ottenere elevata direttività, bassi lobi laterali e la possibilità di orientare il lobo principale lungo diverse direzioni [11].

Il collegamento tra ogni coppia di antenne Tx-Rc può essere modellato come un canale *Single-Input-Single-Output* (SISO). Attraverso l'utilizzo di sistemi MIMO è possibile comunicare a una velocità di trasmissione maggiore; la capacità di canale di questi, infatti, è data dalla somma delle capacità dei singoli canali SISO tra trasmettitore e ricevitore.

L'insieme di tutti i guadagni di canale forma la matrice di canale; questa fornisce una descrizione delle proprietà del collegamento tra trasmettitore e ricevitore. Essere a conoscenza della Channel-State-Information (CSI)

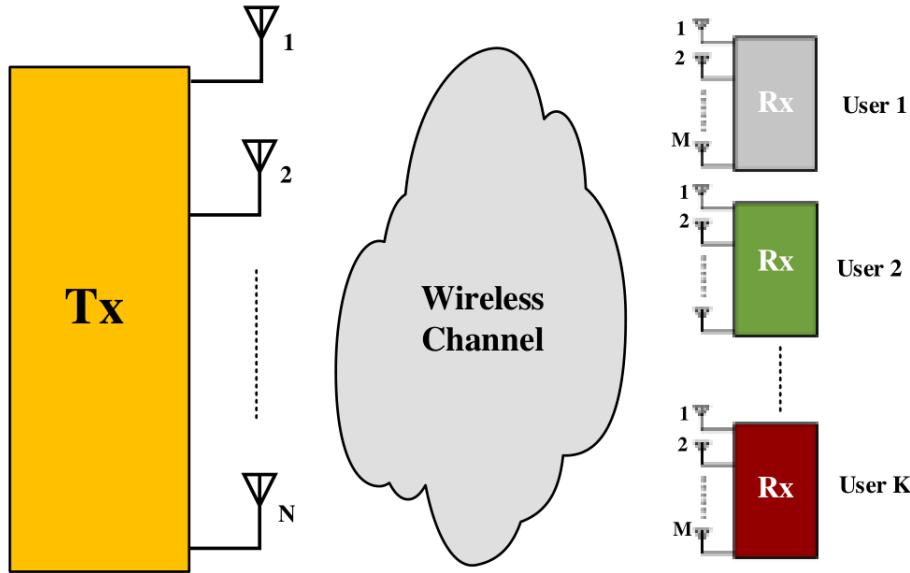


Figura 1: Modello di un sistema di trasmissione wireless MIMO. In questo caso, il trasmettitore è costituito da N antenne mentre ogni ricevitore da M

per i sistemi MIMO corrisponde all'essere a conoscenza di questa matrice, condizione necessaria per sfruttare a pieno le potenzialità offerte [12].

Una tecnologia che permette di sfruttare le potenzialità delle schiere di antenne dei sistemi MIMO è la tecnica del *beamforming* (BF); essa consente di ottenere comunicazioni simultanee tra diversi utenti con prestazioni subbottimali ma con costi computazionali decisamente inferiori rispetto ad altri algoritmi [13]. L'obiettivo di questa tecnica infatti è quello di instaurare dei collegamenti paralleli tra le antenne al Tx e al Rx che, essendo indipendenti, non interferiscono tra di loro, aumentando così l'SNR e quindi la capacità del sistema. Per fare ciò è necessario essere a conoscenza delle caratteristiche del canale, ovvero della CSI.

Il beamforming prevede di realizzare dei pattern di trasmissione ottimali e pre-processare i segnali da trasmettere in modo tale da adattarli a questi. Questa tecnica ha i seguenti vantaggi: aumenta l'efficienza energetica, migliora l'efficienza spettrale, aumenta la sicurezza del sistema [14].

2.3 IRS

Una metasuperficie è una superficie bidimensionale (spessore trascurabile) costituita da *metamateriali*, materiali artificiali che si comportano da diffusori ottici e presentano proprietà elettromagnetiche inedite rispetto a quelli disponibili in natura, come permittività e permeabilità negative [15].

Una *superficie riflettente intelligente* (IRS) è ottenuta a partire da una metasuperficie composta da un elevato numero di diffusori passivi a basso costo di produzione. Ciascuno di questi, in una IRS, può essere controllato attraverso un apposito software in modo tale da cambiare le proprietà dell'onda riflessa generata dall'incidenza di un'onda elettromagnetica su ogni diffusore. Attraverso un controllo di tutti gli elementi della metasuperficie, la fase e l'angolazione dell'onda riflessa possono essere arbitrariamente regolate per fornire nuove direzioni di propagazione al fascio. Installando le IRS nell'ambiente, per esempio sulle facciate dei palazzi, sui mezzi di trasporto o collocate su piattaforme aeree, è possibile trasformare lo spazio trasmisivo dei segnali a radiofrequenza in modo intelligente così da poter favorire comunicazioni wireless, minimizzare il consumo di potenza e migliorarne l'efficienza [8].

Quando un'onda elettromagnetica attraversa una discontinuità tra due mezzi diversi, il fascio incidente si divide in: una componente rifratta che attraversa il secondo mezzo e un riflessa nel primo. La direzione e polarizzazione dei due fasci dipende dai coefficienti di Fresnel e dalle leggi di Snell

$$\sin \theta_i = \sin \theta_r \quad n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (2)$$

dove $\theta_i, \theta_r, \theta_t$ sono rispettivamente l'angolo dell'onda incidente, riflessa e trasmessa e n_i e n_t gli indici di rifrazione del primo e del secondo mezzo [16]. Nel caso di una metasuperficie, è possibile applicare la legge di Snell generalizzata [17]

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \frac{d\Phi}{dx} \quad n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx} \quad (3)$$

Una volta che una metasuperficie è fabbricata con una specifica struttura fisica, le sue proprietà elettromagnetiche vengono fissate e di conseguenza essa

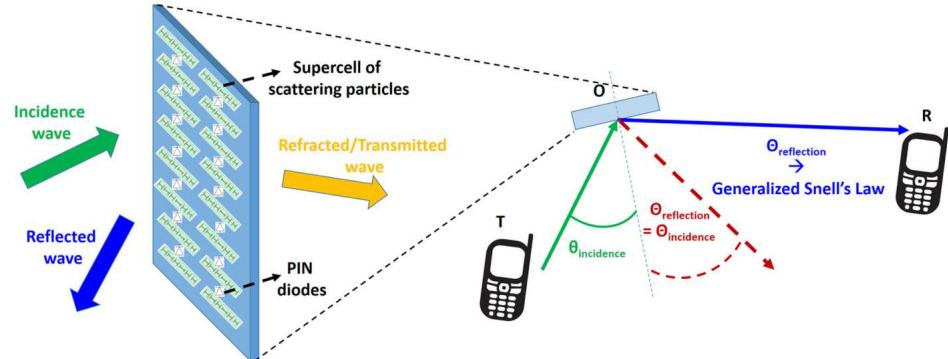


Fig. 1 Working principle of reconfigurable meta-surfaces

Figura 2: Modello di una comunicazione in un sistema di trasmissione wireless con e senza IRS [3]

può essere utilizzata con un determinato scopo, e. g. un assorbitore perfetto ad una certa frequenza [8]. È possibile realizzare una IRS a partire da una metasuperficie introducendo dei materiali sensibili a stimoli esterni in grado di subire cambiamenti, relativamente significativi e veloci, nelle loro proprietà fisiche [18]. Applicando un opportuno stimolo esterno agli elementi della superficie, si produce una modifica al gradiente $\frac{d\Phi}{dx}$ nelle leggi di Snell generalizzate e quindi direzione arbitrariamente i due fasci. Tali stimoli possono essere di varia natura:

- regolazione elettrica;
- regolazione magnetica;
- regolazione luminosa;
- regolazione termica.

Quando questi vengono applicati all'intera metasuperficie si parla di *regolazione globale*. Una IRS è organizzata in matrici, dove ogni cella è costituita da un diffusore. Con opportuni circuiti, è possibile applicare una *regolazione locale*, ovvero differente per ogni elemento, fornendo ulteriori funzionalità [19], come riflessioni anomale, diffusione, concentrazione e creazione di fasci [15].

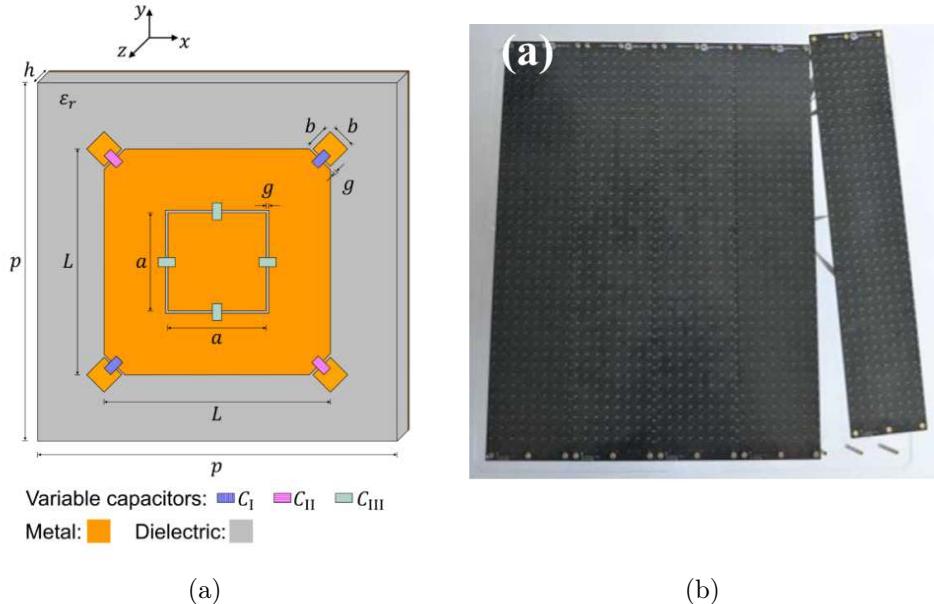


Figura 3: A sinistra il modello del prototipo di IRS costruito in [20]. A destra invece l'immagine della IRS progettata e realizzata da [15].

Prototipi

Sebbene ancora non siano stati messi a punto reali implementazioni di sistemi wireless integrati di IRS, vari prototipi di superfici intelligenti sono stati progettati per testarne l'attuabilità.

In [20] è stata progettata una metasuperficie le cui celle sono costituite da 8 condensatori con capacità variabile; attraverso la modifica di quest'ultima (range 1pF-100pF), è possibile ottenere un controllo congiunto della direzione e della polarizzazione del fascio riflesso.

In [15], è stata realizzata una superficie riprogrammabile con una struttura matriciale 40×40 , dove in ogni cella è stato inserito un diodo PIN del quale, mediante un circuito integrato e un controllore (FPGA in questo caso), è possibile modificare la tensione di base, rendendolo così “acceso” o “spento”. Viene creata una matrice di codice delle stesse dimensioni della IRS, in cui ogni cella può assumere il valore 0 o 1 e indicano lo stato del diodo corrispondente. Manipolando la matrice, grazie anche all’impiego di algoritmi di ingegneria genetica e della FFT, è poi possibile fornire la IRS

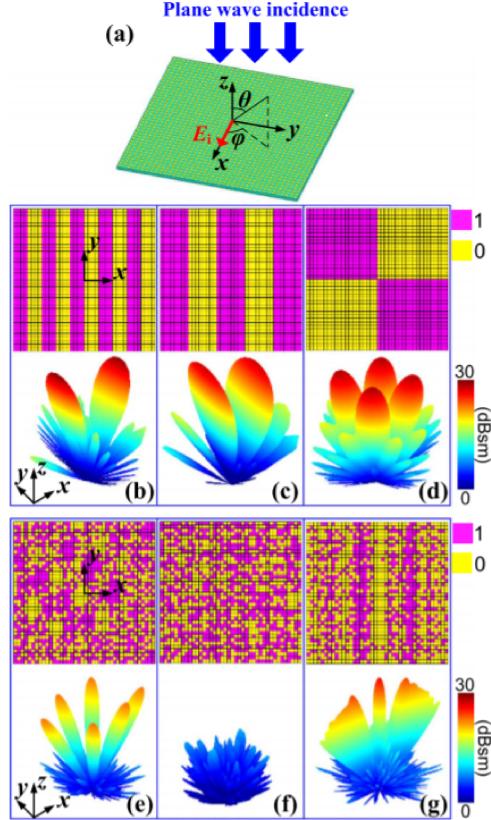


Figura 4: risultati delle simulazioni condotte sulla IRS progettata in [15]. In (a) il modello dell'ambiente di sperimentazione, in (b)-(g) la matrice di codice dei diodi e il corrispondente comportamento del fascio riflesso

di diverse funzioni. Sono state testate due diversi situazioni: una con una sorgente di onde piane (Figura 4) e l'altra con una sorgente punti forme. Nel primo caso è stato possibile rilevare sia riflessioni multidirezionali, sia elevato assorbimento; nel secondo, invece, sono stati ottenuti significativi risultati in merito le possibilità di focalizzare il fascio riflesso con diverse angolazioni e di ottenere riflessioni multiple lungo differenti direzioni.

In [21], invece, è stato realizzato il prototipo di un assorbitore regolabile mediante una IRS che lavora nel range del terahertz. In particolare, la meta-superficie è stata prodotta con l'introduzione al livello delle celle di cristalli liquidi nematici (gli stessi impiegati per la realizzazione di schermi di diversi dispositivi elettronici).

Possibili impieghi

Una IRS può essere implementata per aumentare il guadagno di canale. Quando una comunicazione avviene in *Non-Line-Of-Sight* (NLOS) (ossia senza che sia presente un collegamento diretto tra i dispositivi privo di ostacoli), il guadagno di canale diminuisce, comportando la necessità di maggiore energia per ottenere un SNR sufficientemente elevato. Questo fenomeno diventa ancor più evidente nel caso di comunicazioni con microonde nelle quali anche le particelle presenti nell'aria diventano causa di fenomeni di diffusione e diffrazione. Utilizzando una metasuperficie in grado di riflettere il segnale in modo intelligente e direzionarlo verso l'utente, è possibile creare un canale in LOS “virtuale” [22], ottenendo un guadagno più alto e minore consumo di potenza.

Grazie alla grande capacità delle IRS di modificare la direzione del fascio elettromagnetico, sono state avviate numerose sperimentazioni nel campo delle comunicazioni sicure. Si consideri, ad esempio, lo scenario di una comunicazione tra due dispositivi che si vuole mantenere nascosta ad un terzo in ascolto sul canale. Utilizzando una IRS, è possibile controllare il fascio riflesso in modo tale da creare una interferenza costruttiva tra il canale diretto e quello riflesso nel ricevitore, e al contempo originarne una distruttiva nel dispositivo minaccia. A tal punto, quest'ultimo non è più in grado di distinguere se i due dispositivi stanno trasmettendo o meno [25], [26].

Durante la loro propagazione, le onde elettromagnetiche subiscono una serie di alterazioni quali: attenuazione in spazio libero, assorbimento, riflessioni e rifrazioni; queste sono dovute alla presenza di ostacoli fisici nell'ambiente che compromettono le prestazioni dei sistemi di comunicazione wireless. Fino a questo momento infatti lo spazio di propagazione influenza solo passivamente la comunicazione che sta avvenendo; invece, con l'introduzione delle metasuperficie riprogrammabili sarà possibile trasformare l'ambiente da fattore probabilistico a deterministico [27]. Questo obiettivo è portato avanti dal progetto Europeo VISORSURF [28]: il gruppo sta lavorando a HyperSurfaces, una piattaforma hardware-software che integra metasuperficie e dispositivi elettronici di controllo. Lo scopo del progetto è quello di

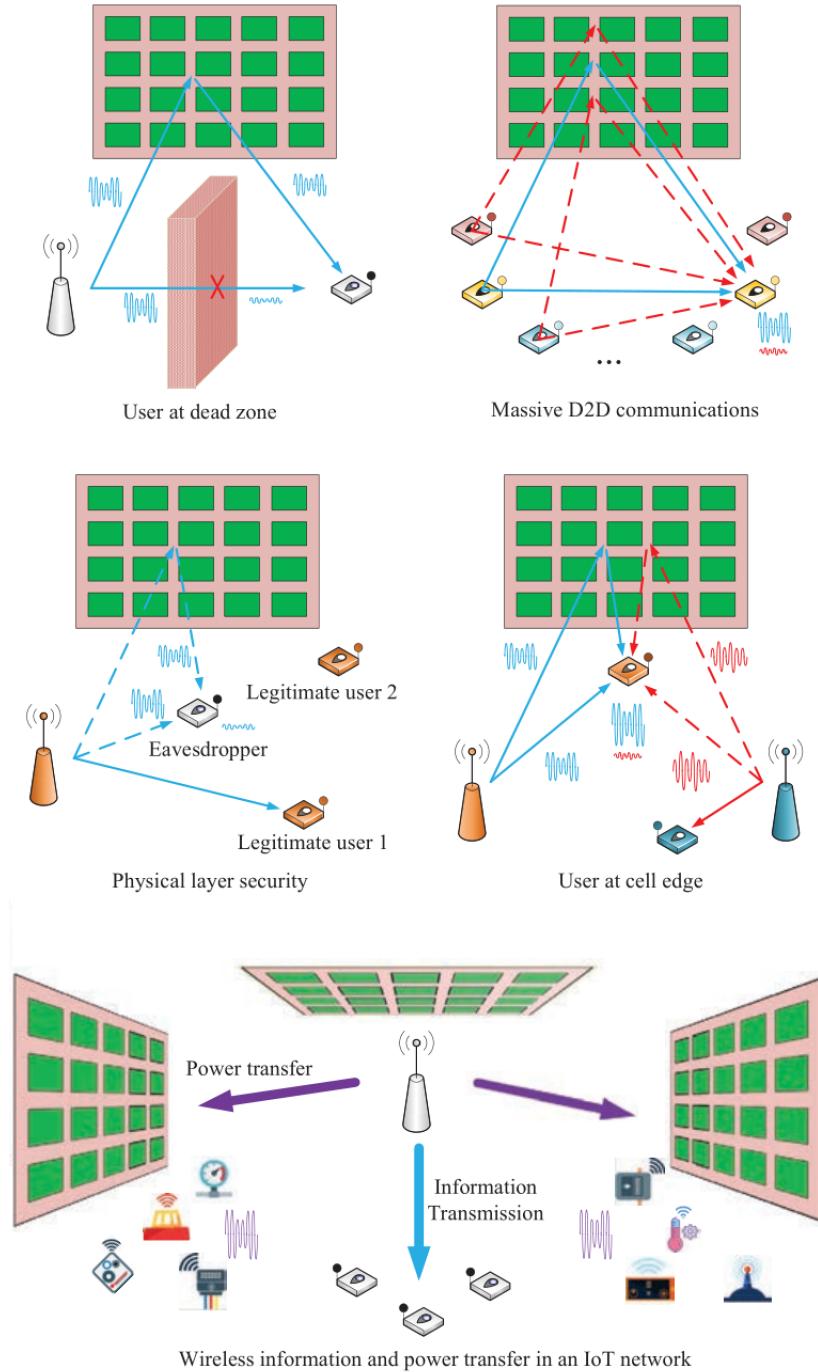


Figura 5: riassunto di alcune delle possibili applicazioni delle IRS nei sistemi di comunicazione wireless [15].

realizzare spazi di propagazione intelligenti, mettendo a disposizione meta-superfici riprogrammabili e fornendo un insieme di interfacce software con cui sfruttarne le funzionalità. Rendere l’ambiente riprogrammabile permetterà di personalizzare la propagazione dei segnali elettromagnetici per ottenere sistemi wireless avanzati, con maggiori efficienza energetica e sicurezza.

2.4 Related works

Questa tesi nasce dalla constatazione del numero ridotto di articoli riguardanti l’applicazione dei sistemi wireless integrati di IRS al caso multi utente e alla gestione di questi. L’obiettivo è quello di tentare di analizzare quelle che possono essere le strade da intraprendere. Già negli anni passati, molti ricercatori si sono impegnati nel tentativo di trovare possibili soluzioni da adottare in scenari simili a quelli presenti oggi.

In [13] gli autori hanno studiato il caso di un sistema MIMO multi utente (MU) in cui una stazione base trasmette contemporaneamente a K utenti; il flusso elettromagnetico dei segnali trasmessi verso ogni utente viene separato imponendo diverse direzioni con la tecnica del beamforming. La strategia proposta consta di due fasi: la prima prevede di ottenere, a partire dalla matrice di canale, un sottoinsieme di utenti “semi-ortogonali”, ovvero per i quali le direzioni dei canali sono quasi ortogonali tra loro, quindi soggetti ad una minore interferenza inter-utente. La seconda fase prevede invece di determinare il vettore dei pesi del beamforming con la tecnica dello *Zero Forcing Beam Forming* (ZFBF), una delle più usate per la determinazione del vettore di BF [23], [24]. La combinazione dei due passaggi precedenti permette di ottenere buone limitazioni all’interferenza tra gli utenti verso cui si sta trasmettendo contemporaneamente. Infatti, al crescere del numero degli utenti nel sistema i risultati dimostrano di ottenere una soluzione subottimale ma ad un costo computazionale minore. L’articolo viene ripreso poi in [29], dove si tenta di sfruttare più efficientemente la distribuzione spaziale degli utenti: la soluzione suggerita è di selezionare un insieme di “direzioni di riferimento” ortogonali tra loro e per ognuna di esse individuare un cono di utenti i cui fasci sono “quasi ottimali”, basandosi solo su feedback riguardanti

la qualità dei canali. A questo punto la strategia continua come quella dell'articolo precedente basandosi, però, sulla matrice di canale ristretta ai soli utenti appena selezionati. Con questo passaggio preliminare in più, dunque, la quantità di informazione necessaria diminuisce, e di conseguenza anche il costo computazionale. Anche in [30] e in [31] viene affrontato lo stesso problema.

In tutti i casi precedenti, dunque, la gestione degli utenti avviene tramite Space-Division-Multiple-Access (SDMA): sfruttando la distribuzione spaziale di questi e trasmettitori multi antenna, insieme alla tecnica del beamforming, è possibile comunicare con più dispositivi attraverso flussi di segnale orientati lungo direzioni distinte. Questa sembra essere la strategia più promettente per questo tipo di sistema di comunicazione.

In [32], invece, viene analizzata la proposta di utilizzare la tecnica *Non-Orthogonal-Spectrum-Sharing* (NOSS), ovvero condividere lo spettro delle frequenze con più utenti contemporaneamente con conseguente degradazione del SINR ai ricevitori dovuta alla maggiore interferenza; questa deve essere quindi controllata attraverso l'uso di antenne-array alla stazione base e tecniche di mitigazione, tra cui, ad esempio, beamforming. In particolare, lo studio si concentra sui criteri con cui scegliere i clienti da servire contemporaneamente. Ne vengono proposti 3: Max-SNR, che prevede di selezionare gli utenti con SNR più alto non considerando la condivisione dello spettro; Max-ISR, in cui gli utenti sono individuati in base al loro livello di ortogonalità; Priority Scheduler, in cui ad ogni utente si associa un livello di priorità e in base a questa si opera la scelta.

In [33], invece, viene presentato uno scenario più simile a quello indagato in tale tesi: un sistema MIMO MU integrato di un ripetitore. Una IRS ricorda, infatti, la funzione di un ripetitore ma a differenza di quest'ultimo, essendo costituita da elementi passivi, la superficie intelligente può svolgere le funzioni di indirizzamento del fascio senza ulteriore consumo di potenza o sofisticati circuiti per la stima delle condizioni di canale. Un ripetitore riceve il segnale dalla stazione base, lo elabora e successivamente lo invia verso la direzione desiderata; una IRS, invece, si limita a riflettere i segnali elettromagnetici presenti nell'ambiente [8]. Lo studio prevede di utilizzare

uno schema TDD (Time Division Duplex), vale a dire la comunicazione avviene per slot temporali e per completare una trasmissione ne occorrono due consecutivi: nel primo il messaggio viene trasmesso dalla BS agli utenti e al ripetitore, nel secondo da ripetitore a utenti. Un simile schema di trasmissione è quasi necessario per sistemi di questo tipo perché trasmissione e ricezione contemporanee al ripetitore causerebbe elevata interferenza tra i due flussi.

La scelta degli utenti da schedulare viene fatto in funzione della massima capacità di canale ottenibile, imponendo però una condizione minima al SINR di ogni ricevitore permettendo così maggiore equità tra questi.

Lo stesso scenario viene ripreso in [34] ed esteso al caso di ripetitori multipli con l'obiettivo di aumentare il throughput nelle zone distanti dalla stazione base. Anche qui gli autori considerano una comunicazione TDD tuttavia, a differenza dello studio precedente, nel primo slot i ripetitori vengono visti dalla stazione base come nodi della rete, nel secondo invece insieme formano un trasmettitore multi-antenna virtuale.

3. Analisi delle possibili strategie

Modello matematico

Consideriamo un sistema di comunicazione MIMO in downlink. In particolare, esso è costituito da una stazione base (BS) fornita di M antenne e deve trasmettere a K utenti, ognuno modellato come un ricevitore a singola antenna.

Il sistema è integrato di una superficie riflettente intelligente (IRS) costituita da N elementi riflettenti passivi per migliorare le prestazioni del sistema di comunicazione: ogni elemento della IRS è in grado di modificare la fase dell'onda riflessa generata dall'incidenza del segnale trasmesso dalla BS alla superficie; questa variazione di fase viene modellata attraverso una moltiplicazione per un valore complesso chiamato coefficiente di riflessione.

Definiamo il vettore $\mathbf{h}_j^d = (h_{j1}, \dots, h_{jM})$, $j = 1, \dots, K$, con $\mathbf{h}_j^d \in \mathbb{C}^M$, il vettore che descrive il canale diretto tra la BS e l'utente j -esimo. In particolare la componente h_{ji} corrisponde al guadagno di canale tra il j -esimo ricevitore e l' i -esima antenna del trasmettitore.

Definiamo la matrice $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ la matrice che raccoglie i guadagni di canale di ciascun collegamento tra antenne della BS e elementi della IRS, che in generale sono termini complessi. La componente G_{ij} corrisponde al guadagno di canale tra la i -esima antenna e l' n -esimo elemento della IRS. I coefficienti di riflessione di ciascun diffusore della superficie possono essere raggruppati in una matrice $\Phi \in \mathbb{C}^{N \times N}$, con $\Phi = \text{diag}(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N})$, $\theta_j \in [0, 2\pi[$, $j = 1, \dots, N$. In particolare stiamo considerando una superficie riflettente ideale, ovvero i coefficienti sono a modulo costante e unitario e l'argomento può

essere scelto arbitrariamente all'interno dell'intervallo di definizione [35].

Infine, sia $\mathbf{h}_j^r = (h_{j1}, \dots, h_{jN})$, $j = 1, \dots, K$ il vettore complesso che descrive il canale tra la IRS e l'utente j -esimo. In particolare, la componente h_{ji} , con $j = 1, \dots, K; i = 1, \dots, N$ corrisponde al guadagno di canale tra il j -esimo ricevitore e l' i -esimo elemento della superficie [36].

Sia s_k il simbolo di codice da trasmettere all'utente k -esimo. Questo viene pre-processato moltiplicandolo per un vettore di pesi $\mathbf{w}_k = (w_1, \dots, w_M)$ attraverso il quale applichiamo la tecnica del beamforming del capitolo 2. Dunque il segnale trasmesso dalla BS all'utente k -esimo è rappresentato dal vettore:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{w}_k s_k \quad (4)$$

Facciamo le seguenti ipotesi [37]:

1. siamo in una condizione di Non Line-Of-Sight (NLOS), per cui trascuriamo il canale diretto tra trasmettitore e utenti;
2. Completa conoscenza della CSI sia al trasmettitore che ai ricevitori, rappresentata dalla conoscenza della matrice \mathbf{G} e del vettore \mathbf{h}_j^r , con $j = 1, \dots, K$;
3. Ogni canale può essere modellato come un canale AWGN con rumore rappresentato da una variabile aleatoria gaussiana a media nulla e varianza σ_k^2 .

Dunque, il segnale ricevuto dall'utente k -esimo è

$$y_k = (\mathbf{h}_k^r \Phi \mathbf{G}) \mathbf{x}_k + z_k \quad (5)$$

dove $z_k \sim \mathcal{N}(0, \sigma_k^2)$ è il rumore al ricevitore [38].

Sotto le condizioni considerate sopra, possiamo definire la capacità di canale secondo Shannon all'utente k -esimo:

$$C_k = \max \log_2(1 + SNR_k) \quad (6)$$

Ricordando che la potenza del segnale utile ricevuto y può essere espressa come

$$\mathbb{E}[yy^H] = \mathbb{E}[\mathbf{H}\mathbf{x}(\mathbf{H}\mathbf{x})^H] = \mathbb{E}[\mathbf{H}\mathbf{x}\mathbf{x}^H\mathbf{H}^H] \quad (7)$$

dove \mathbb{E} indica valore atteso, l'apice H il trasposto coniugato, e $\mathbf{H} = \mathbf{h}^r \boldsymbol{\Phi} \mathbf{G}$ [9], la massima capacità di canale secondo Shannon per l'utente k diventa

$$C_k = \max_{\boldsymbol{\Phi}, \mathbf{x}} \log_2 \left(1 + \frac{\mathbb{E}[\mathbf{H}\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H \mathbf{H}^H]}{\sigma_k^2} \right) \quad (8)$$

Trovando opportuni valori per la matrice $\boldsymbol{\Phi}$ dei coefficienti di riflessione della IRS si può dunque aumentare il valore dell'SNR e, di conseguenza, la capacità di canale, migliorando le prestazioni del sistema. Il problema di ottimizzazione formulato sopra non è di semplice risoluzione perché problema di ottimizzazione non-convesso e limitato dalla condizione imposta ai coefficienti di avere argomento nell'intervallo $[0, 2\pi]$. Tuttavia, vari algoritmi con soluzione ottimale o subottimale sono stati proposti in diversi studi [37], [39].

Lo scheduling degli utenti consiste nel gestire in modo efficiente le risorse del sistema, quali lo spettro di frequenze o l'IRS appunto, per massimizzarne la capacità totale, data dalla somma delle capacità di canale di ogni utente, scegliendo a quanti e quali clienti trasmettere nei vari istanti di tempo. In particolare, nel caso del sistema preso in esame sopra, occorre determinare con quale strategia selezionare gli utenti e adattare ad essi la matrice dei coefficienti $\boldsymbol{\Phi}$.

TDMA

La soluzione più semplice e in questo momento la più avallata dai numerosi ricercatori che si stanno impegnando in questo tema è un *Time Division Multiple Access* (TDMA) [40], [41].

Questa strategia prevede di dividere l'asse temporale in slot, ognuno della durata necessaria per completare una trasmissione, e di assegnarne ciascuno di essi ad un utente diverso. Durante ogni slot, viene calcolata la matrice dei

coefficienti di riflessione ottimale per il cliente selezionato e successivamente avviata la trasmissione [9].

Tuttavia questo è solo un caso ideale. Nel caso reale, infatti, non è possibile riconfigurare la IRS ad ogni trasmissione, anzi si auspica a mantenere un assetto costante per un determinato numero di trasmissioni successive.

Consideriamo il caso in cui la IRS debba mantenere costante la matrice dei coefficienti per un numero di slot consecutivi L una volta configurata. Una semplice implementazione prevede di determinare la matrice ottimale per un utente; a questo punto rimane da considerare come scegliere i restanti $L - 1$ clienti da schedulare. Una soluzione semplice potrebbe essere quella di basare tale scelta sulla qualità del servizio con la nuova configurazione della IRS: possiamo scegliere quelli con il valore di SNR più alto.

Tale approccio risulta semplice ma molto inefficace: vi è la possibilità che gli utenti selezionati siano i più vicini alla IRS o comunque con guadagno di canale maggiore, quindi il loro SNR è il più alto indipendentemente dalla configurazione della IRS. Dopo aver schedulato questi, i rimanenti sarebbero coloro i quali soggetti a condizioni di canale più avverse, e dunque ciascuno di essi avrebbe bisogno di una configurazione adatta della IRS per poter ricevere il messaggio dal trasmettitore senza perdite. Oltretutto, stiamo sfruttando le potenzialità della superficie riflettente per un solo utente, risultando così in una gestione poco proficua della risorsa.

Un'implementazione più efficiente del TDMA potrebbe essere quella di individuare un insieme di utenti per cui è possibile comunicare con una configurazione comune della IRS. La sfida diventa dunque trovare un criterio con cui raggruppare un certo numero di clienti e implementare un algoritmo in grado di determinare la matrice dei coefficienti di riflessione adatta a questi.

La scelta potrebbe essere fatta mediante un criterio spaziale: determiniamo un insieme di dispositivi distribuiti spazialmente in una regione piccola; così facendo si può orientare la IRS per riflettere in una direzione comune e determinare la corrispondente configurazione agevole per più utenti [42].

Usando questo approccio, tuttavia, dovremmo continuare a effettuare una trasmissione alla volta: avendo scelto di associare gli utenti vicini tra loro, la direzione del fascio riflesso dalla IRS sarebbe comune a tutti. Nel caso in

cui la stazione base trasmettesse contemporaneamente verso più dispositivi l'effetto dell'interferenza dovuta al segnale inviato a quelli vicini diventerebbe significativa, portando ad una degradazione dell'SNR e quindi della qualità della comunicazione.

La strategia TDMA è la più facile da implementare e per questo la più quotata ad essere utilizzata per i primi sistemi di comunicazione con IRS multi utente. Tuttavia limita notevolmente la possibilità di sfruttare le potenzialità di questa nuova tecnologia. Potrebbe essere una buona soluzione se ci limitassimo a considerare il caso di un sistema in *low-traffic*, vale a dire in cui le richieste di trasmissione siano basse. Allora potremmo considerare di riconfigurare la IRS ad ogni richiesta di trasmissione che arriva alla stazione base. In questo caso l'utilizzo di una IRS potrebbe favorire le prestazioni del sistema dal punto di vista energetico, ma sarebbe comunque un caso dalle applicazioni limitate per cui non sarebbe necessario sviluppare questo nuovo dispositivo.

FDMA

Il duale del TDMA è il protocollo *Frequency-Division-Multiple-Access* (FDMA). Tale protocollo di accesso al mezzo prevede di dividere lo spettro di frequenze disponibile in *sottobande* di larghezza minore e associare ognuna di esse a un utente diverso. Ovviamente il numero di sottobande ricavabili dallo spettro è limitato dalle condizioni imposte dalla trasmissione (la velocità di trasmissione è infatti proporzionale alla banda del segnale trasmesso e spesso viene fissato un valore minimo) [43].

Col protocollo FDMA è possibile comunicare con più utenti contemporaneamente trasmettendo segnali a frequenze diverse e, dunque, potrebbe essere usato per lo scheduling in un sistema integrato di IRS. In particolare, potremmo adottare un protocollo che sfrutta congiuntamente la suddivisione dello spettro in sottobande e l'asse temporale in slot, ovvero FDMA/TDMA.

Riprendendo il ragionamento del paragrafo precedente, è possibile individuare un sottoinsieme di utenti che condividono una direzione comune; per questi è possibile determinare una configurazione della IRS per favorire la co-

municazione di tutti. A questo punto, i segnali da trasmettere ad ogni utente vengono elaborati dalla stazione base e trasmessi contemporaneamente attraverso segnali a diverse frequenze; al ricevitore di ogni utente saranno poi implementati appositi filtri passa-banda per selezionare il segnale desiderato.

Se le sottobande sono scelte ortogonalmente tra loro, non si verificano fenomeni di interferenza, o per lo meno sono molto limitati. Questo è possibile appunto perché, a differenza dei ripetitori, le superfici riflettenti si limitano a riflettere il segnale lungo una direzione privilegiata determinata dalla loro configurazione. I ripetitori, invece, devono codificare il segnale che ricevono dal trasmettitore per poi inviarlo agli utenti desiderati; quindi coesistono due flussi di segnale alla stessa frequenza al ripetitore che possono interferire tra di loro [44].

Questa soluzione, tuttavia, presenta delle limitazioni notevoli: diminuendo la larghezza della banda assegnata ad ogni utente la velocità di trasmissione di ogni collegamento diminuisce, perciò non si hanno significativi miglioramenti nelle prestazioni rispetto all'implementazione del TDMA del paragrafo precedente. Da un lato abbiamo infatti una trasmissione veloce, dall'altro più trasmissioni contemporanee ma con velocità di trasferimento minore; dunque la quantità di informazione inviata non cambia. Inoltre, è necessario implementare dei filtri ad ogni ricevitore in modo da selezionare il segnale alla frequenza concordata per ogni utente, operazione che “appesantisce” l'implementazione complessiva del sistema [9].

SDMA

L'elevata capacità di direzionare il fascio riflesso permette di integrare la IRS in un sistema di comunicazione che implementa un SDMA come protocollo di accesso al mezzo. L'acronimo sta per *Space-Division-Multiple-Access* ed è un protocollo molto utilizzato per i sistemi MIMO: per sfruttarne le potenzialità è necessario infatti che trasmettitori e ricevitori siano dotati di antenne con alta direttività, condizione soddisfatta dalle antenne-array utilizzate nei sistemi MIMO.

Un protocollo di accesso al mezzo di tipo SDMA permette la comunicazione contemporanea di più utenti sfruttando la loro distribuzione spaziale; è possibile individuare un sottoinsieme di questi le cui direzioni siano ortogonali o quasi-ortogonali tra loro. Grazie alla tecnica del beamforming, successivamente, è possibile modellare il segnale da trasmettere per allineararlo alle direzioni degli utenti selezionati. La separazione spaziale dei flussi orientati lungo direzioni diverse permette quindi di limitare notevolmente l'interferenza ai ricevitori verso cui si sta trasmettendo [45].

Questo approccio può essere adottato anche nei sistemi wireless integrati di IRS: determinando l'insieme di utenti ortogonali, e configurando la superficie in modo tale da riflettere lungo direzioni diverse il fascio, possiamo sfruttare maggiormente le potenzialità di questa nuova tecnologia.

I risultati ottenuti finora dagli studi condotti sulle metasuperfici riprogrammabili dimostrano che è possibile configurare la IRS in modo da riflettere il flusso elettromagnetico incidente lungo differenti direzioni contemporaneamente [15], [20].

Dopo aver determinato l'insieme di utenti ortogonali e la conseguente matrice dei coefficienti necessaria, è possibile organizzare le antenne del trasmettitore in modo tale da associare una o più di esse ad un ricevitore diverso. Questa soluzione permetterebbe quindi di creare dei collegamenti paralleli tra il trasmettitore e gli utenti che, essendo orientati lungo diverse direzioni spaziali, non interferiscono tra di loro, permettendo più trasmissioni contemporanee.

Un'altra possibile strategia per ottimizzare la trasmissione in un sistema di comunicazione multi-utente con protocollo SDMA potrebbe essere quella di individuare delle *sottosuperfici* nella IRS partizionando il numero gli elementi che la compongono. Ad ogni superficie assegniamo poi un utente tra quelli ortogonali scelti in precedenza [46].

Importanti vantaggi potrebbero essere ottenuti da questa soluzione: da un lato, considerando delle superfici più piccole, il numero di coefficienti di riflessione da determinare diminuisce, diminuendo di conseguenza la complessità dell'algoritmo che svolge questa operazione; inoltre, all'aumentare degli utenti nel sistema, aumenta la probabilità che la configurazione di una

sottosuperficie sia compatibile con un altro utente (magari uno posto nelle vicinanze). Ulteriori miglioramenti potrebbero essere ottenuti da una gestione dinamica delle sottosuperfici: la partizione in sottosuperfici avviene mediante software, per cui non è una divisione fisica bensì virtuale. Dunque, dopo aver terminato la trasmissione di un insieme di utenti, gli elementi della metasuperficie potrebbero essere riorganizzati in nuove sottosuperfici per avviare una nuova trasmissione, diminuendo quindi il numero di riconfigurazioni della IRS necessarie [47].

Il protocollo SDMA sembra il più promettente: all'aumentare degli utenti infatti aumenta il numero di direzioni ortogonali verso cui è possibile trasmettere. La potenzialità delle metasuperfici riprogrammabili di orientare il fascio riflesso, insieme alle antenne-array, permette di sfruttare al meglio la distribuzione spaziale degli utenti e quindi di aumentare il numero trasmissioni contemporanee possibili. Ovviamente questo può essere ottenuto al costo di una maggiore complessità computazionale nel determinare l'insieme di clienti ortogonali e soprattutto la forma della matrice dei coefficienti di riflessione, problema tutt'altro che di semplice risoluzione.

4. Risultati e grafici

Le metasuperfici riprogrammabili sono in grado di controllare arbitrariamente la riflessione di un'onda elettromagnetica incidente modificandone la fase. Di seguito vengono analizzati alcuni risultati ottenuti in [20]: lo studio è stato condotto da Sugiura et al. con l'obiettivo di testare le capacità di ridirezionare il fascio incidente e modificarne la polarizzazione.

Gli autori hanno realizzato un prototipo di IRS costituito da una griglia rettangolare di 11×3 celle che può essere installata su una parete e regolata attraverso l'azione di un controllore esterno. Ogni elemento della superficie è costituito da 8 condensatori a capacità variabile nel range di 10-100pF e organizzati nel seguente modo: 2 a formare la coppia di condensatori C1, 2 la coppia C2 e i restanti a formare il gruppo C3. Facendo variare il valore delle capacità di C1, C2 e C3 è possibile modificare le caratteristiche elettromagnetiche del fascio riflesso. Due diversi scenari sono stati considerati: il primo a singolo ricevitore e il secondo con doppio ricevitore. In entrambi i casi è presente un trasmettitore che emette onde sferiche alla frequenza di 1GHz polarizzate verticalmente mentre i ricevitori sono polarizzati orizzontalmente; i risultati sono stati ottenuti mediante simulazione attraverso il programma CST Studio [49].

In Figura 6 vengono riportati i risultati ottenuti dallo scenario a singolo ricevitore; in particolare, sono stati condotti due differenti test: nel primo la IRS è configurata in modo da polarizzare orizzontalmente e orientare verso il ricevitore il fascio riflesso; nel secondo, invece, viene modificata la direzione mantenendo la polarizzazione verticale. In (a) è rappresentato il piano verticale del campo elettrico relativo al primo test, mentre in (c) il piano orizzontale. Come si nota dai grafici, la IRS riesce a indirizzare il fascio ver-

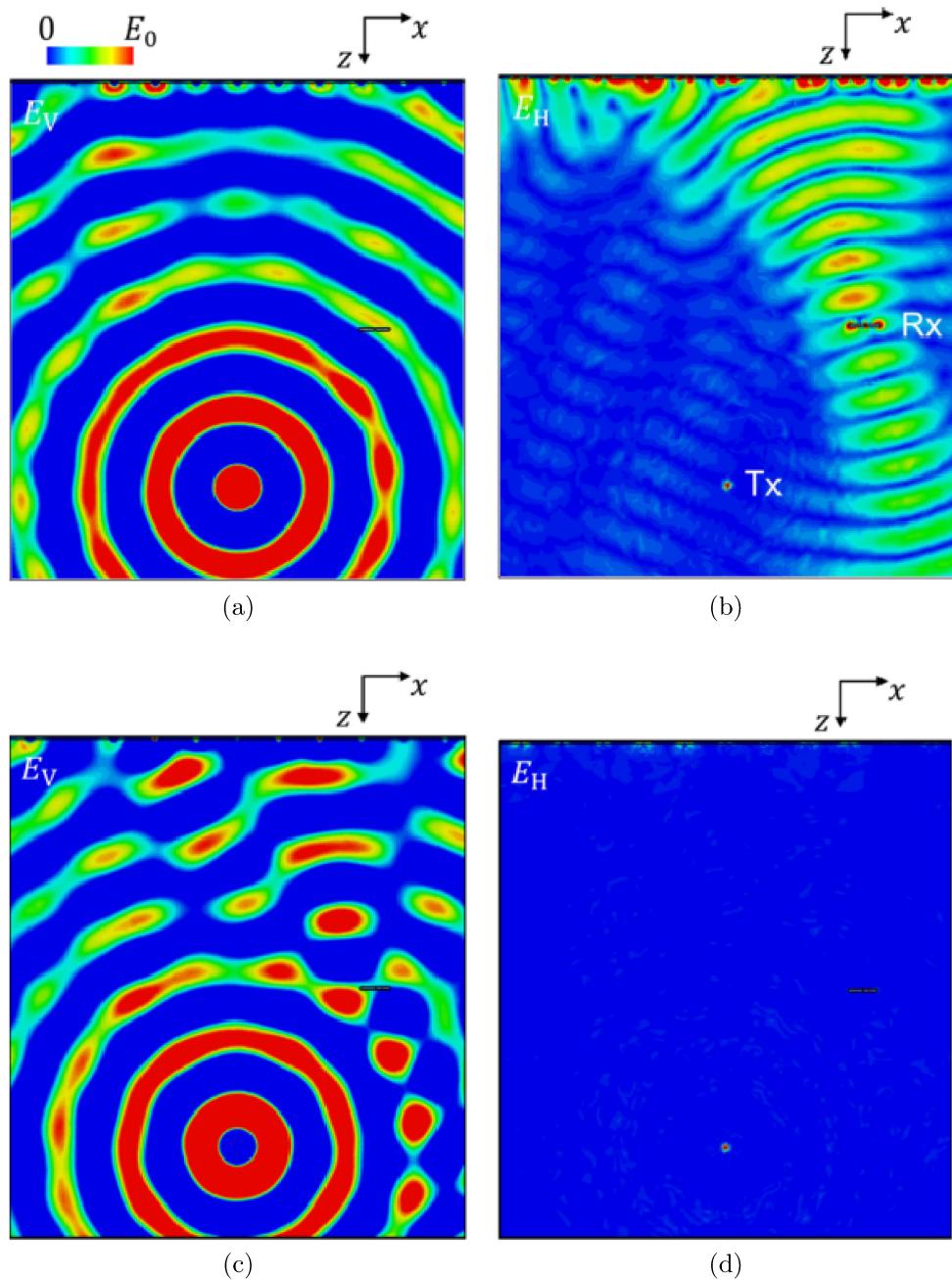


Figura 6: Risultati ottenuti dalla simulazione del prototipo di IRS realizzato in [20] per testarne la capacità di direzionamento e polarizzazione del fascio riflesso.

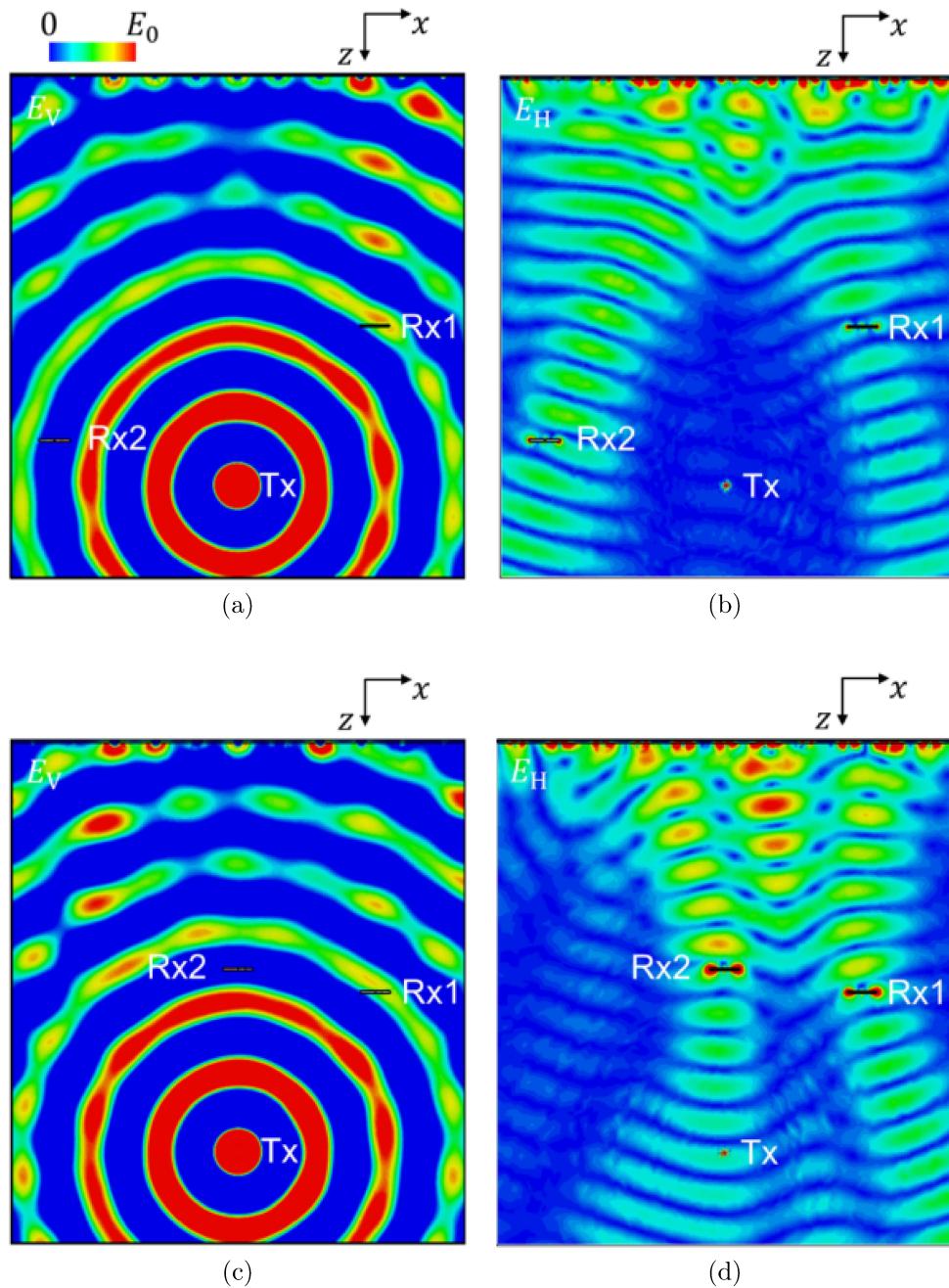


Figura 7: Stessi test condotti nella figura precedente estesi al caso di due utenti.

so il ricevitore e polarizzarlo correttamente; infatti, questo non è presente nel piano verticale ma unicamente in quello orizzontale. In (b) e (d), invece, sono raffigurati rispettivamente il piano verticale e orizzontale corrispondenti al secondo test. Anche in questo caso sono ottenuti buoni risultati: la IRS riesce a dirigere il fascio verso il ricevitore; inoltre, mantenendo invariata la polarizzazione, non è presente campo elettrico sul piano orizzontale bensì l'onda riflessa interferisce con quella trasmessa sul piano verticale.

Il risultato riguardo al secondo scenario sono riportati in Figura 7. Due diverse configurazioni delle posizioni dei ricevitori sono stati testati riuscendo in entrambi i casi a polarizzare e ridirezionare il fascio riflesso contemporaneamente verso i due dispositivi, si vedano i grafici (b) e (d).

Integrare una IRS in un sistema di comunicazione wireless promette di migliorare notevolmente le prestazioni dello stesso e aumentarne l'efficienza. I risultati riscontrati in [48] ci forniscono un'idea dell'effettivo guadagno che è possibile ottenere. Per sfruttare a pieno le potenzialità delle metasuperficie intelligenti è necessaria la conoscenza totale della CSI; questa può essere ricavata attraverso varie tecniche di stima dei parametri di canale tuttavia, talvolta, si riesce a ottenere solo una versione parziale di questi. Gli autori, nello studio, suggeriscono un nuovo protocollo di stima della matrice di canale confrontando le prestazioni ottenute con quelle ricavabili attraverso un altro metodo proposto in articoli precedenti. Il sistema testato è costituito da un trasmettitore con $M = 4$ antenne, una IRS costituita da $N = 10$ elementi riflettenti e un solo ricevitore a singola antenna; per trasmettere viene utilizzata una modulazione BPSK.

Nel grafico in Figura 8 si riportano alcuni risultati ottenuti nello studio appena citato; in particolare, si confrontano le probabilità di errore sul bit al ricevitore al variare dell'SNR in quattro diverse condizioni del sistema: una senza ausilio di IRS, due con parziale conoscenza dei parametri di canale ottenuta con i due protocolli di stima, una con conoscenza completa della CSI.

Dal grafico è evidente il miglioramento delle prestazioni del sistema con IRS rispetto a quello tradizionale: considerando ottimale una probabilità di errore pari a 10^{-5} , questa viene ottenuta con un SNR minore di circa

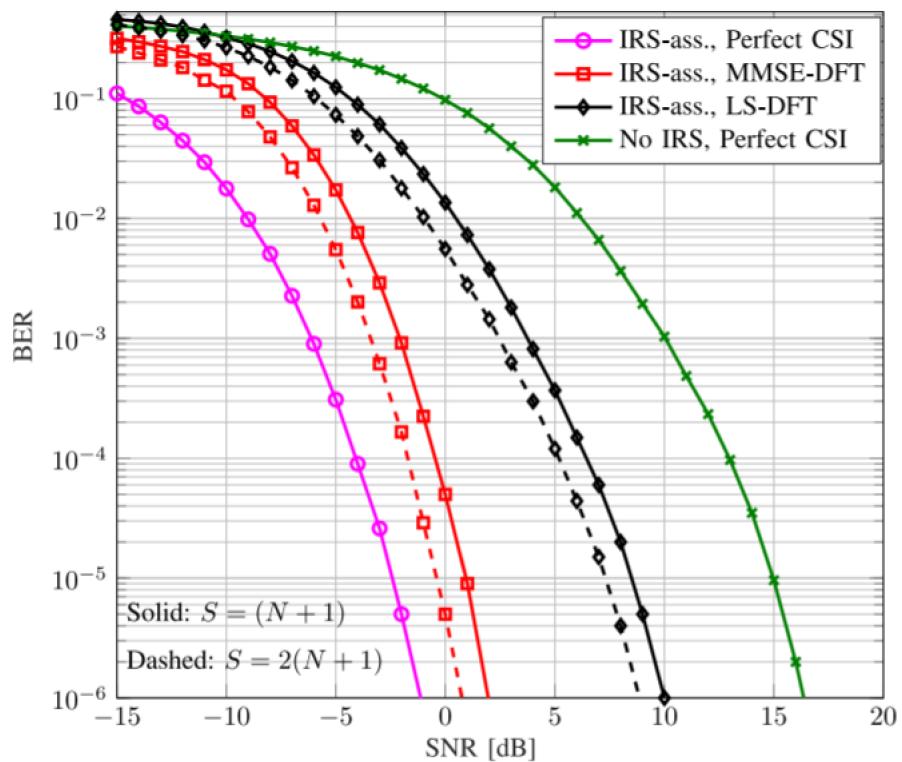


Figura 8: Confronto prestazioni di un sistema con e senza IRS e con parziale o totale conoscenza della IRS in termini di probabilità di errore al ricevitore [48].

17dB rispetto a quello necessario in un sistema tradizionale; una probabilità di errore pari a 10^{-6} è raggiunta con un valore negativo di SNR, ovvero è possibile ottenere ottime prestazioni anche considerando il caso in cui la potenza del segnale utile è inferiore alla potenza del rumore al ricevitore.

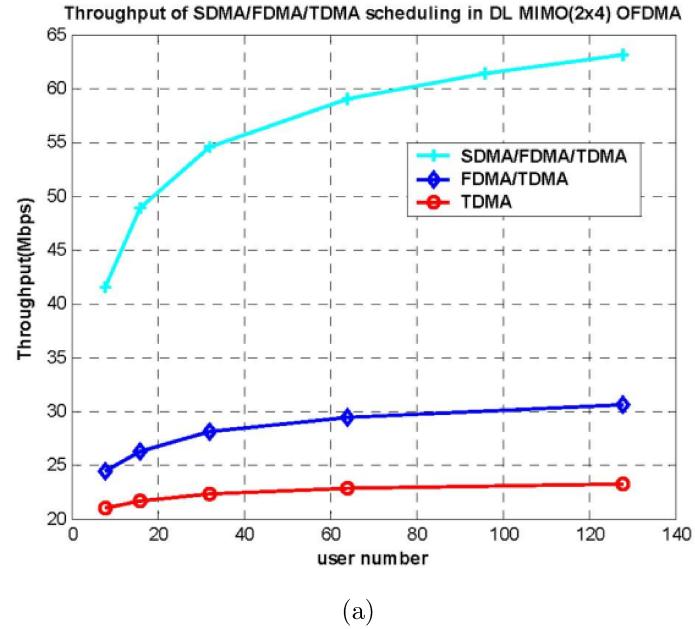
Miglioramenti, seppur minori, sono rilevati anche nel caso di conoscenza parziale della CSI.

In questa tesi sono state indagate le possibili strade da seguire riguardo la gestione degli utenti in un sistema di comunicazione wireless integrato di una IRS. In particolare la strategia più promettente sembra essere un protocollo SDMA che, oltre a sfruttare i vantaggi del TDMA e FDMA, riesce a usufruire anche della risorsa spazio, ovvero della distribuzione spaziale degli utenti.

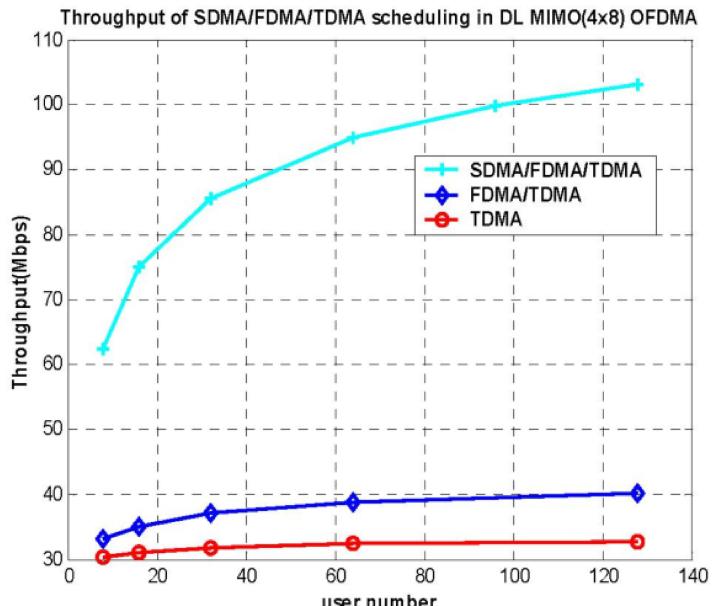
Questi protocolli sono stati testati in un sistema di comunicazione wireless MIMO multi-utente tradizionale in [50]. Nello studio vengono analizzate le prestazioni di un sistema formato da una stazione base che trasmette verso diversi utenti attraverso un numero elevato di antenne; in particolare, per sfruttare la diversità spaziale, queste vengono raggruppate e associate ad ogni ricevitore secondo lo schema scelto. Sono stati considerati due scenari: nel primo ogni ricevitore è costituito da 4 antenne e ad esso vengono assegnate 2 antenne, nel secondo invece questi valori vengono raddoppiati. Utilizzare un ricevitore con un numero di antenne superiore rispetto a quelle impiegate per trasmettere permette di mitigare l'interferenza dovuta al rumore.

La Figura 9 mostra i risultati ottenuti: entrambi i grafici mostrano il throughput (velocità media di trasmissione) totale del sistema al variare del numero di utenti. Come si nota dal grafico (a), il protocollo TDMA è il meno efficiente, tuttavia rimane il più semplice da implementare e da gestire; per questo, al momento, è considerato il più adatto da adottare in un sistema con IRS. Un lieve miglioramento viene ottenuto utilizzando un protocollo FDMA/TDMA congiunto in cui la divisione in sottobande e assegnazione agli utenti avviene per slot temporali.

Evidente miglioramento delle prestazioni è ottenuto invece considerando il protocollo SDMA: il valore medio del throughput viene raddoppiato; inoltre, a differenza dei due protocolli precedenti in cui raggiunge velocemente un valore di saturazione, con l'SDMA il throughput presenta un andamento sub-



(a)



(b)

Figura 9: Confronto prestazioni TDMA, FDMA e SDMA in un sistema MISO multi utente [50].

lineare all'aumentare del numero degli utenti. Questo perché, incrementando il numero di utenti, aumenta il grado di diversità del sistema; sebbene TDMA e FDMA non risentano di questa diversità, il protocollo SDMA, invece, si basa proprio su di essa: aumentando il numero di dispositivi, infatti, aumentano le possibili direzioni ortogonali verso cui trasmettere e, di conseguenza, il numero di trasmissioni parallele che possiamo mantenere senza che queste interferiscano tra di loro.

Nel grafico (b) lo stesso scenario viene considerato raddoppiando il numero di antenne: come si nota dal grafico, il protocollo SDMA continua ad essere il migliore tra i tre; inoltre, è quello che risente maggiormente di questo incremento. L'andamento del throughput cresce più velocemente a differenza degli altri due protocolli: aumentando il numero di antenne aumenta la capacità di direzionamento del trasmettitore e il numero di comunicazioni parallele che possono essere sostenute contemporaneamente.

I risultati ottenuti sono relativi ad un sistema MIMO senza IRS, tuttavia analoghi risultati possono essere ottenuti in un sistema integrato di una superficie riprogrammabile. La diversità spaziale nei sistemi tradizionali viene sfruttata attraverso l'utilizzo di antenne multiple al trasmettitore. Integrando il sistema di una IRS, grazie alla sua possibilità di controllare la riflessione dell'onda elettromagnetica, la capacità di direzionare i segnali trasmessi aumenta e, di conseguenza, anche la possibilità di sfruttare maggiormente la distribuzione degli utenti.

Uno scenario simile a quello considerato in questa tesi è analizzato in [51]. Gli autori considerano un sistema di comunicazioni wireless costituito da un trasmettitore, una IRS, e due ricevitori. Lo studio è stato condotto per verificare il guadagno in prestazioni ottenibile sfruttando un protocollo NOMA, vale a dire trasmettendo con lo stesso spettro di frequenze contemporaneamente a entrambi gli utenti.

Il grafico in Figura 10 mostra la capacità media del sistema al variare della potenza del segnale trasmesso. I risultati sembrerebbero confermare quanto sostenuto in questa tesi. Considerando un sistema tradizionale, senza IRS, le prestazioni sono nettamente inferiori. Inoltre, non vi è differenza tra l'utilizzo del TDMA e del FDMA.

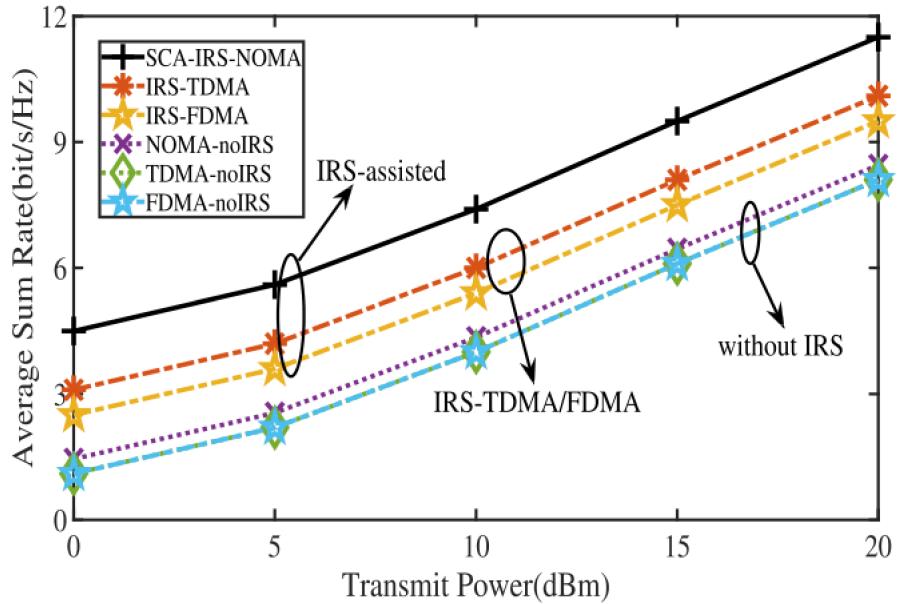


Figura 10: Confronto delle prestazioni di diverse tecniche di accesso al mezzo in un sistema con e senza IRS [51]

Un netto miglioramento è ottenuto invece utilizzando una metasuperficie riprogrammabile. Utilizzando gli stessi protocolli, il valore della capacità media del sistema raddoppia. Le prestazioni ottenute utilizzando un protocollo TDMA sono leggermente superiori rispetto a quelle del protocollo FDMA: considerando il caso di solo due utenti a cui trasmettere, lo spettro è stato diviso in due sottobande e ognuna assegnata ad un utente; dunque, anche se a dover trasmettere è un solo utente, questo avrà a disposizione metà della banda disponibile, da cui la capacità leggermente inferiore. Per questo motivo, infatti, in questa tesi è stato proposto il protocollo TDMA/FDMA (lo stesso dello studio analizzato nella pagina precedente) che, appunto, prevede una gestione dinamica delle sottobande in cui suddividere lo spettro.

5. Conclusioni

Le superfici intelligenti riflettenti sembrano essere una tecnologia che promette di migliorare le prestazioni dei sistemi di comunicazione wireless. Con la loro applicazione sarà possibile controllare l'ambiente di propagazione, e quindi riuscire a contenere molti effetti indesiderati che originano dalla casualità di questo.

I risultati ottenuti dagli studi condotti fino ad adesso sono incoraggianti: moltissime applicazioni possono risentire positivamente dell'integrazione di una IRS, dagli ambienti intelligenti alle comunicazioni sicure.

In questa tesi è stato considerato un sistema wireless multi utente, e più in particolare la gestione di questi; sono state proposte e analizzate tre diverse strategie: TDMA, FDMA e SDMA. Il protocollo SDMA mostra prestazioni migliori rispetto agli altri: grazie all'elevata direzionalità dei trasmettitori multi antenna e alla capacità di orientamento del fascio riflesso delle IRS è possibile sfruttare la distribuzione spaziale dei vari utenti per comunicare attraverso canali indipendenti con ridotta interferenza. Sebbene questa sembri essere la strada più promettente, si è ancora lontani da una sua reale applicazione. Infatti, per poter applicare la tecnica del beamforming è necessaria la conoscenza totale della CSI, assunta per ipotesi in questa tesi ma non sempre ottenibile; per questo, essendo ancora nelle prime fasi di sperimentazione delle IRS, è stato preferito un protocollo TDMA meno efficiente ma decisamente più semplice da implementare.

Al fine di riuscire a usufruire pienamente di questa nuova tecnologia è, dunque, necessario condurre ulteriori studi riguardo le tecniche di stima dei parametri di canale; inoltre, rimane ancora di difficile risoluzione il problema di ottimizzazione della matrice dei coefficienti di riflessione per più dispo-

sitivi lungo direzioni diverse, dalla cui soluzione dipendono le prestazioni del sistema di comunicazione. Per questo motivo occorre mettere a punto nuovi algoritmi con cui riconfigurare la IRS in tempi minori e con maggiore risoluzione.

Sebbene lo sviluppo di sistemi wireless integrati di IRS presenti ancora numerose difficoltà, la promessa di migliori prestazioni senza la necessità di ulteriore consumo di energia o maggiore banda è sufficiente a giustificare lo sforzo fatto al fine di mettere a punto questa nuova tecnologia. Una maggiore efficienza energetica e spettrale può essere la chiave tecnologica per i prossimi sistemi di comunicazione wireless.

Bibliografia

- [1] C. Huang, A. Zappone, M. Debbah and C. Yuen, "Achievable Rate Maximization by Passive Intelligent Mirrors", 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 3714-3718, 2018.
- [2] W. Saad, M. Bennis and M. Chen, "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems", in IEEE Network, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, May/June 2020.
- [3] M.D. Renzo, M. Debbah, DT. Phan-Huy et al. "Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: an idea whose time has come", J Wireless Com Network 2019.
- [4] W. Tang et al., "Wireless Communications with Programmable Metasurface: New Paradigms, Opportunities, and Challenges on Transceiver Design", in IEEE Wireless Communications, vol. 27, no. 2, pp. 180-187, April 2020.
- [5] W. Tang et al., "Wireless communications with programmable metasurface: Transceiver design and experimental results", in China Communications, vol. 16, no. 5, pp. 46-61, May 2019.
- [6] N. Shlezinger, G. C. Alexandropoulos, M. F. Imani, Y. C. Eldar and D. R. Smith, "Dynamic Metasurface Antennas for 6G Extreme Massive MIMO Communications", in IEEE Wireless Communications, vol. 28, no. 2, pp. 106-113, April 2021.
- [7] J. Zhao, "A survey of intelligent reflecting surfaces (irss): Towards 6G wireless communication networks", arXiv, 2019

- [8] S. Gong et al., “Toward Smart Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces: A Contemporary Survey,” in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 4, pp. 2283–2314, Fourthquarter 2020.
- [9] L. Badia, M. Levorato, F. Librino, and M. Zorzi. Cooperation techniques for wireless systems from a networking perspective. IEEE Wireless Communications Magazine, vol. 17, no. 2, pp. 89–96, 2010.
- [10] L. Badia. “On the impact of correlated arrivals and errors on ARQ delay terms,” IEEE Transactions on Communications, vol. 57, no. 2, pp. 334–338, 2009.
- [11] F. T. Ulaby, “Fondamenti di campi elettromagnetici. Teoria ed applicazioni”, McGraw-Hill, 2006.
- [12] B. Clerckx, C. Oestges, “Mimo Wireless Networks,” (2nd Edition), ch. 1 — Introduction to Multi-Antenna Communications, Academic Press, pp. 1-27, 2013.
- [13] T. Yoo and A. Goldsmith, “On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming”, in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 24, no. 3, pp. 528-541, March 2006.
- [14] E. Ali, M. Ismail, R. Nordin et al., “Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: overview, classification, and trends for future research”, Frontiers Inf Technol Electronic Eng 18, 753–772, 2017.
- [15] H. Yang et al., “A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control”, Sci. Rep., vol. 6, Art. no. 35692, Oct. 2016.
- [16] E. Jorswieck, L. Badia, T. Fahldieck, et al. “Resource sharing in wireless networks: the SAPHYRE approach,” Future Network & Mobile Summit, 2010..
- [17] N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, and Z. Gaburro, “Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction”, Science 334, 333, 2011.
- [18] L. Badia. “A Markov analysis of selective repeat ARQ with variable round trip time,” IEEE Commun. Lett., vol. 17, no. 11, pp. 2184–2187, 2013.
- [19] F. Liu et al., “Programmable Metasurfaces: State of the Art and Prospects”, 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1-5, 2018.

- [20] S. Sugiura, Y. Kawai, T. Matsui, T. Lee and H. Iizuka, “Joint Beam and Polarization Forming of Intelligent Reflecting Surfaces for Wireless Communications”, in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 2, pp. 1648-1657, Feb. 2021.
- [21] L. Anchora, M. Mezzavilla, L. Badia, and M. Zorzi. “Simulation models for the performance evaluation of spectrum sharing techniques in OFDMA networks,” Proceedings ACM MSWiM, November 2011.
- [22] Q. Wu and R. Zhang, “Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network”, in IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 1, pp. 106-112, January 2020.
- [23] H. Yang and T. L. Marzetta, “Performance of Conjugate and Zero-Forcing Beamforming in Large-Scale Antenna Systems”, in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 31, no. 2, pp. 172-179, February 2013.
- [24] L. Canzian, L. Badia, and M. Zorzi. Promoting cooperation in wireless relay networks through Stackelberg dynamic scheduling. IEEE Transactions on Commun., vol. 61, no. 2, pp. 700–711, 2012.
- [25] M. Cui, G. Zhang, and R. Zhang, “Secure wireless communication via intelligent reflecting surface”, IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 8, no. 5, pp. 1410–1414, Oct. 2019
- [26] X. Lu, E. Hossain, T. Shafique, S. Feng, H. Jiang and D. Niyato, “Intelligent Reflecting Surface Enabled Covert Communications in Wireless Networks”, in IEEE Network, vol. 34, no. 5, pp. 148-155, September/October 2020.
- [27] C. Liaskos, S. Nie, A. Tsoliaridou, A. Pitsillides, S. Ioannidis and I. Akyildiz, “A New Wireless Communication Paradigm through Software-Controlled Metasurfaces”, in IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 9, pp. 162-169, Sept. 2018.
- [28] Scheda informativa del progetto Europeo, “VisorSurf - A Hardware Platform for Software-driven Functional Metasurfaces”, disponibile a: <https://cordis.europa.eu/project/id/736876/it>

- [29] G. Lee and Y. Sung, "A New Approach to User Scheduling in Massive Multi-User MIMO Broadcast Channels", in IEEE Transactions on Communications, vol. 66, no. 4, pp. 1481-1495, April 2018.
- [30] M. Schubert and H. Boche, "Solution of the multiuser downlink beamforming problem with individual SINR constraints", in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 53, no. 1, pp. 18-28, Jan. 2004.
- [31] N. -D. Dao and Y. Sun, "User-Selection Algorithms for Multiuser Precoding", in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, no. 7, pp. 3617-3622, 2010.
- [32] F. Guidolin, A. Orsino, L. Badia and M. Zorzi, "Statistical analysis of non orthogonal spectrum sharing and scheduling strategies in next generation mobile networks", International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), pp. 680-685, 2013.
- [33] L. Anchora, L. Badia, E. Karipidis, M. Zorzi, "Capacity gains due to orthogonal spectrum sharing in multi-operator LTE cellular networks," Proc. ISWCS, 2012.
- [34] A. Wolfgang, N. Seifi and T. Ottosson, "Resource allocation and linear precoding for relay assisted multiuser MIMO systems", International ITG Workshop on Smart Antennas, pp. 162-168, 2008.
- [35] E. Gindullina, L. Badia, and X. Vilajosana, "Energy modeling and adaptive sampling algorithms for energy-harvesting powered nodes with sampling rate limitations," *Trans. Emerg. Telecommun. Techn.*, vol. 31, no. 3, e3754, 2020.
- [36] S. Zhang and R. Zhang, "Capacity Characterization for Intelligent Reflecting Surface Aided MIMO Communication", in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 38, no. 8, pp. 1823-1838, Aug. 2020.
- [37] Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming", in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 18, no. 11, pp. 5394-5409, Nov. 2019.
- [38] Y. Gao, J. Xu, W. Xu, D. W. K. Ng and M.-S. Alouini, "Distributed IRS With Statistical Passive Beamforming for MISO Communications", in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 2, pp. 221-225, Feb. 2021.

- [39] Q. Wu and R. Zhang. “Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts.” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 3, pp. 1838–1851, 2019.
- [40] C. K. Sheemar, L. Badia, and S. Tomasin. “Game-theoretic mode scheduling for dynamic TDD in 5G systems.” *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 7, pp. 2425–2429, 2021.
- [41] E. Gindullina and L. Badia, “Towards self-control of service rate for battery management in energy harvesting devices.” *Proc. IEEE ICC Workshops*: pp. 355–360, 2017.
- [42] X. Yu, D. Xu, D. Wing, K. Ng, and R. Schober. “IRS-assisted green communication systems: Provable convergence and robust optimization”, *IEEE Transactions on Communications*, 2021.
- [43] L. Prospero, R. Costa, and L. Badia, “Resource sharing in the Internet of things and selfish behaviors of the agents”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 68, no. 12, pp. 3488–3492, 2021.
- [44] P. Wang, J. Fang, X. Yuan, Z. Chen, and H. Li. “Intelligent reflecting surface-assisted millimeter wave communications: Joint active and passive precoding design.” *IEEE Transactions on Vehicular Technology* vol. 69, no. 12, pp. 14960–14973, 2020.
- [45] L. Badia and F. Gringoli. “A game of one/two strategic friendly jammers versus a malicious strategic node.” *IEEE Networking Lett.*, vol. 1, no. 1, pp. 6–9, 2019.
- [46] D. Kudathanthirige, D. Gunasinghe, and G. Amarasuriya. “Performance analysis of intelligent reflective surfaces for wireless communication.” In *2020 International Conference on Communications (ICC)*: 1–6. IEEE, 2020.
- [47] E. Björnson and L. Sanguinetti. “Power scaling laws and near-field behaviors of massive MIMO and intelligent reflecting surfaces.” *IEEE Open J. Communications Society*, vol. 1: 1306–1324, 2020.
- [48] C. You, B. Zheng and R. Zhang, “Fast Beam Training for IRS-Assisted Multiuser Communications”, in *IEEE Wireless Communications Lett.*, vol. 9, no. 11, pp. 1845–1849, Nov. 2020.

- [49] Pacchetto software di analisi elettromagnetica 3D ad alte prestazioni, disponibile a: <https://www.3ds.com/it/prodotti-e-servizi/simulia/prodotti/cst-studio-suiter/>
- [50] G. Liu, F. Jiang, B. Zhou, Y. Wang, P. Zhang and H. Cui, “Multiple Access of MIMO OFDMA: TDMA, FDMA/TDMA, or SDMA/FDMA/TDMA”, International Conference on Communications, Circuits and Systems, pp. 1367-1371, 2006.
- [51] F. Guidolin, L. Badia, and M. Zorzi, “A distributed clustering algorithm for coordinated multipoint in LTE networks”, IEEE Wirel. Commun. Lett., vol. 3, no. 5, pp. 517–520, 2014.
- [52] M. Lopez-Martinez, J. J. Alcaraz, L. Badia, and M. Zorzi, “A superprocess with upper confidence bounds for cooperative spectrum sharing” IEEE Transactions on Mobile Computing, December 2016.
- [53] E. G. Larsson and E. A. Jorswieck, “Competition versus collaboration on the MISO interference channel,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 26, no. 7, pp. 1059-1069, Sep. 2008.
- [54] R. Mochaourab and E. A. Jorswieck, “Optimal beamforming in interference networks with perfect local channel information,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 59, no. 3, pp. 1128–1141, Mar. 2011.
- [55] D. Chiarotto, L. Badia, and M. Zorzi, “Soft capacity of OFDMA networks is suitable for soft QoS multimedia traffic,” Proceedings IEEE ICC, 2013.
- [56] Y. Guo, Z. Qin, Y. Liu and N. Al-Dhahir, “Intelligent Reflecting Surface Aided Multiple Access Over Fading Channels”, in IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 3, pp. 2015-2027, March 2021.