

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE (DINFO) CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA INFORMATICA

SIMULATION OF RECONFIGURABLE INTELLIGENT SURFACES

Autori Alessio Bugetti Francesco Orlandi Giacomo Magistrato Relatore
Prof. Francesco Chiti

Anno Accademico 2024-2025

Indice

[n	dice		i
1	Introduzione		1
	1.1	Riconfigurable Intelligent Surfaces	5
	1.2	Le componenti del segnale trasmissivo	6
2	Simulatori analizzati		9
	2.1	Simulatore RIS con modello di canale deterministico	9
	2.2	Simulatore RIS con modello di canale Clusterd Delay Line	15
Bi	Bibliografia		

ii INDICE

Capitolo 1

Introduzione

I servizi di comunicazione 5G, che sono stati implementati commercialmente per la prima volta nel 2019, vanno oltre le applicazioni incentrate sull'uomo, concentrandosi sulla connettività delle macchine e dell'industria, superando le limitazioni delle generazioni precedenti. Si prevede che queste reti di comunicazione forniranno connettività a un gran numero di settori con diversi requisiti prestazionali, funzionali e operativi, come la sanità, l'agricoltura, quello automobilistico, l'industria, la pubblica sicurezza, la finanza e molti altri. Si prevede che la rapida evoluzione delle reti wireless trasformeranno la nostra società sempre più connessa.

I servizi di comunicazione 5G sono classificabili in cinque categorie: banda larga mobile potenziata (eMBB), comunicazione ultra-affidabile e a bassa latenza (URLLC), Internet di massa degli oggetti (mIoT), Vehicle-to-Everything (V2X) e comunicazione di tipo macchina ad alte prestazioni (HMTC).

Queste categorie di servizi di comunicazione sono standardizzate per consentire a un operatore di rete di fornire connettività alle apparecchiature utente (UE) con requisiti prestazionali rigorosi, utilizzando un'infrastruttura di telecomunicazioni unica ma condivisa.

Altre tecnologie rivoluzionarie sono state integrate nell'infrastruttura di comunicazione 5G, come la virtualizzazione delle funzioni di rete (NFV), software defined network (SDN) e molte altre.

L'NFV nell'ambito delle reti di telecomunicazioni indica un approccio architetturale che sfrutta le tecnologie IT per virtualizzare intere classi di funzioni dei nodi di rete come blocchi elementari che possono essere interconnessi per implementare servizi di comunicazione.

2 Introduzione

L'SDN costituisce un nuovo approccio in ottica cloud computing alle architetture di rete, che ne facilita l'amministrazione e la configurazione al fine di migliorarne le performance e facilitarne il monitoring.

con l'avvento del 5G, l'enfasi dei benefici che apporta è quindi definibile in termini della qualità del servizio (QoS). Si ha un enfasi sulla massimizzazione della velocità di picco, minimizzazione della latenza e2e, massimizzazione dela connettività di rete e capacità di servizio agli utenti.

In seguito all'introduzione di questi sistemi di comunicazione, è diventato evidente che esistono molti nuovi casi d'uso in cui le reti 5G non sono in grado di soddisfare i requisiti tecnici e commerciali estremamente severi, al fine di fornire connettività e soddisfare le esigenze sociali delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) entro il 2030, è già stata attivata la ricerca e lo sviluppo sull'ecosistema delle telecomunicazioni 6G.

I casi d'uso del 6G includono: realtà estesa (XR), realtà aumentata (AR), realtà virtuale (VR), Machine e Deep learning, telepresenza olografica, robot collaborativi (Cobot), telemedicina, esperienza multisensoriale, Internet tattile, intelligenza pervasiva, non terrestrial networks, artifical intelligence (AI) e THz communication. Ma non solo questo, si cerca di spostare l'attenzione alla globalizzazione di Internet, fornendo a tutti gli utenti il suo accesso, specialmente per quanto riguarda scenari come: comunicazioni basate su eventi, in caso di disastri, in caso di servizi periodici e per aree isolate scarsamente raggiungibili, attraverso l'impiego delle Aerial Radio Access Networks (ARAN). Le ARAN offrono una vasta copertura spaziale per utenti dinamici e mobili (IoT o persone), inclusi servizi di infotainment in volo, sorveglianza aerea e controllo di veivoli volanti.

La comunicazione mobile 6G è complessa e richiede prestazioni radio estreme per quanto riguarda i parametri di comunicazione, come copertura e throughput, parametri di localizzazione/rilevamento o parametri congiunti, inclusa l'efficienza energetica e la latenza. Fornisce un data rate nell'ordine delle centinaia di Gbps. Per ottenere ciò la banda del segnale deve aumentare la propria frequenza e di conseguenza la sua efficienza spettrale! Ad esempio, la telepresenza immersiva con applicazioni AR/VR richiede velocità dati fino a circa 20 Gbps, mentre le comunicazioni olografiche completamente immersive richiedono circa 1 Tbps. La precisione di localizzazione inferiore a 1 cm con una latenza inferiore a 1 ms soddisfano condizioni rigorose sul feedback tattile e visivo. Il modo ideale per soddisfare queste esigenze è utilizzare larghezze di banda maggiori (dell'ordine di 2-20 GHz), che sono

abbondanti solo a frequenze più elevate. Dal punto di vista della copertura e delle prestazioni, si prevede che il 6G non operi solo a frequenze più elevate ma utilizzi una combinazione di diverse bande di frequenza. I segnali LOS, ovvero un segnale caratterizzato da un percorso ottico in linea retta fra un dispositivo trasmettitore ed uno ricevitore, sono soggetti a riflessioni da parte di oggetti metallici e ciò influenza notevolmente la potenza ricevuta a queste gamme di frequenza.

La rete 6G propone di fornire servizi di rete affidabili, ad alta velocità e a bassa latenza, ma la gestione e l'ottimizzazione delle risorse di rete in tempo reale, rimane complessa e richiede tempo: gestirle soddisfacendo i diversi requisiti di QoS delle applicazioni su larga scala potrebbe essere estremamente impegnativo.

Da un lato, l'architettura delle reti 6G è diventata estremamente complessa a causa della continua densificazione della rete, del drammatico aumento del numero di stazioni base a micro celle, della coesistenza del 5G/6G con le reti preesistenti, nonché del massiccio ma non uniforme traffico dati distribuito. D'altra parte, i requisiti sempre più diversificati di QoS inerenti alle applicazioni e ai dispositivi eterogenei, ad esempio le comunicazioni miste uomo-macchina, la coesistenza di sensori a basso costo, aggraveranno ulteriormente le sfide operative del 6G.

Fornire una QoS dinamica per un gran numero di dispositivi distribuiti può facilmente provocare traffico distribuito in modo non uniforme, portando ad una potenziale congestione di rete a causa della mancata corrispondenza tra richieste e capacità. Questo si aggrava prevalentemente in ambiente urbano, dove la stazione radio base (BS) che gestisce una cella, fornendo segnale e servizio agli utenti presenti nell'area geografica di competenza, non riesce a distribuire in modo uniforme il segnale ai vari utenti finali, a causa dell'enorme attenuazione, quindi la degradazione del rapporto segnale rumore (SNR), che il segnale subisce per colpa degli edifici, che varia in base ai materiali costruttivi. Gli edifici in cemento armato e metallo provocano un'attenuazione significativa, che può superare i 20-30 dB, mentre il vetro con rivestimenti metallici può ridurre il segnale di 10-15 dB. Anche il legno e il vetro non trattato influiscono, ma in misura minore (2-5 dB). Inoltre, l'assenza di una linea di vista diretta (non line of sight, NLOS) tra la BS e l'utente aggrava ulteriormente le perdite, rendendo più difficile garantire una qualità di servizio costante.

Questo per i telecomunicazionisti è una sifda continua, dato che dal pun-

4 Introduzione

to di vista fisico, segnali ad alte frequenze soffrono enormente l'attenuazione dell'ambiente naturale e non, a differenza di segnali a bassa frequenza caratterizzati dalle loro lunghezze d'onda molto lunghe. Il 5G difatti lavora su frequenze dell'ordine del sub-6GHz (tipicamente 3.5GHz) e le frequenze millimetriche (mmWave) 24 - 100GHz. Il 6G lavora a frequenze ancora più alte (in combinazione con quelle del 5G) per garantire i promessi servizi futuristici ad alte prestazioni, ci troviamo nell'ordine delle sub-THz e THz vere e proprie, 100GHz - 1THz.

La banda Terahertz è abilitata da tecnologie come diodi schottky, circuiti integrati a microonde monolotici (MMIC), transistor biolari a eterogiunzione (HBT), transistor ad alta mobilità elettronica (HEMT) e diodi a risonanza di tunnelling (RTD). Il primo standard per le comunicazioni wireless a 300GHz è stato definito dall'IEEE 802.15.3d-2017. L'uso della banda THz ha diversi requisiti: una larghezza di banda continua necessaria per soddisfare i requisiti di capacità e raggiungere velocità di comunicazione elevate, l'impiego di antenne direttive con alto guadagno per combattere l'elevata perdita di percorso (Path Loss) a causa dell'assorbimento atmosferico (calcolabile mediante il modello ITU-R). Per PL si intende l'attenuazione inevitabile subita da un'onda che si propaga nello spazio libero tra due antenne isotropiche e di solito si utilizza la formula di Friss per il calcolo della potenza ricevuta:

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L}$$

Di conseguenza, l'ottimizzazione del funzionamento della rete 6G, il controllo della congestionee la creazione di un canale trasmissivo corretto, richiedono l'implementazione di adeguate strategie di ingegneria del traffico, come predilire ambienti distribuiti rispetto a quelli centralizzati per gestire e ridurre la latenza comunicativa del servizio, come l'impiego del mobile edge computing (MEC), implementare nuove tecnologie di distribuzione del segnale sul territorio come la reconfigurable intelligent surface (RIS), l'utilizzo di modellazione di canali in modo deterministico (Ray Tracing) o stocastico.

Il solo impiego di metodi tradizionali, per caratterizzare il canale di comunicazione 6G, non sarà adeguato alla progettazione e la valutazione del sistema 6G, perchè a frequenze così elevate, il canale è soggetto ad assorbimento molecolare a causa degli agenti atmosferici! (per cui non solo ambiente urbano e naturale, perchè a così alte frequenze, la lunghezza d'onda del segnale è talmente corta da essere paragonabile alle dimensioni di una molecola), che ha un impatto negativo sul collegamento di comunicazione. Diventa quindi cruciale studiare attentamente gli aspetti della propagazione e modellazione del canale, per esempio attraverso le tecniche di multiple input multiple output (MIMO) o MIMO ultramassivi (UM-MIMO), perchè migliora la propagazione e la copertura del segnale. Infine, dato che i segnali THz richiedono la propagazione del segnale in LOS per ottenere un rapporto segnale rumore adeguato a sostenere un collegamento di comunicazione affidabile, le superfici intelligenti riconfigurabili (RIS) sono proposte come mezzo pratico per sostenere tali criteri.

1.1 Riconfigurable Intelligent Surfaces

La tecnologia RIS è una tecnologia di comunicazione e gestione avanzata del segnale. Appartiene al campo delle tecnologie di ingegneria delle comunicazioni e delle telecomunicazioni wireless. La RIS sfrutta superfici riflettenti riconfigurabili per ottimizzare la propagazione del segnale, migliorando la copertura, la capacità e l'efficienza energetica delle reti in ambienti complessi come quelli urbani (Non LOS). E' una tecnologia fondamentale per il futuro delle reti wireless, che sfruttano le altissime frequenze per fornire servizi sempre più sofisticati e prestazionali, manipolando le onde elettromagnetiche in modo intelligente. La superficie RIS è un pannello di dimensioni che variano da pochi centimetri a pochi metri, essendo ancora una tecnologia in via di test e sviluppo. Questo pannello è caratterizzato da altri elementi, divisi in ordine regolare, posti e collegati tra loro formando una vera e propria matrice. La RIS è utilizzata quindi come ripetitore, ma anche da "manipolatore" (sostanziale differenza di un relè classico) di segnali della base station a cui è stata associata, nella cella di sua gestione. La loro comunicazione avviene in via teorica mediante controllore SDN. La RIS ripete il segnale dopo averlo manipolato in modo tale da aumentare la copertura sulla cella di sua competenza. Questo è possibile perchè è una tecnologia che va oltre la legge di snell:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

la quale garantisce che quando un segnale viene riflesso da una superficie, l'angolo di riflessione è congruente all'angolo di incidenza. Il singolo elemento può variare "al volo" le proprietà elettromagnetiche del materiale di cui è costituito, ciò ha la conseguenza di riprogrammare l'onda elettromagnetica del segnale incidente, sia in ampiezza che in fase, permettendo di ottenere un

6 Introduzione

angolo di riflessione diverso da quello di incidenza, focalizzare o disperdere il segnale in punti specifici e migliorare la qualità del segnale. Parliamo di "metamateriale". Questo è fondamentale in ambiente urbano dove la LOS non è garantita. Gli elementi della RIS possono essere utilizzati anche in modo asincrono, ovvero che alcuni elementi si occupano di riflettere segnali "principali", mentre gli altri riflettono segnali che possono essere utilizzati, per esempio, per fare attacchi jamming di difesa contro malintenzionati (Man In the Middle) per difendere i segnali principali riflessi dall'altra sezione della RIS. Ricapitolando, queste superfici uniche e dinamiche, possono essere riconfigurate per riflettere o reindirizzare i raggi del trasmettitore secondo necessità. Questa proprietà è essenziale per stabilire una connessione wireless tra la sorgente e il destinatario evitando ostacoli che causano l'attenuazione dei segnali.

1.2 Le componenti del segnale trasmissivo

Per comprendere al meglio il nostro studio sulla RIS, è di fondamentale importanza andare a "rinfrescare" la teoria dei segnali, specialmente le varie terminologie che utilizzeremo per definire e descrivere il modello da noi analizzato.

Componenti del segnale:

- Ampiezza: La massima intensità di un segnale;
- Frequenza: Numero di cicli (oscillazioni comolete) del segnale per secondo, espressa in Hz;
- Fase: Posizione iniziale del ciclo del segnale in un dato istante;
- Lunghezza d'onda: Distanza tra due punti di cicli successivi, espressa come il rapporto tra la velocità della luce e la frequenza di lavoro;
- Periodo: Il tempo necessario per completare un ciclo al segnale;
- *Potenza*: quantità di energia trasportata dal segnale per unità di tempo, misurata in watt.

Caratteristiche del segnale:

- *Portante*: Un segnale sinusoidale ad alta frequenza utilizzato per trasportare informazione tramite la modulazione;
- *Modulazione*: Processo di variazione delle componenti di un segnale (di solito ampiezza, frequenza e fase) per codificare le informazioni. (AM, FM, PM);
- Spettro: Distribuzione delle frequenze contenute nel segnale, mostra la sua composizione;
- Larghezza di banda: Intervallo di frequenze che il segnale occupa o necessita per essere trasmesso;
- Rumore: Distrubo indesiderato che degrada la qualità del segnale.

Di nostro interesse sono anche le seguenti definizioni:

- Il rapporto segnale rumore (SNR) è il rapporto tra la potenza del segnale utile e la potenza del rumore di fondo in un canale di comunicazione. Viene espresso in decibel (dB) e indica la qualità del segnale rispetto al rumore;
- Il guadagno di un segnale misura l'aumento della potenza o intensità di un segnale in un sistema. Può riferirsi a diversi aspetti:
 - 1. guadagno di un'antenna: È la misura dell'efficienza di un'antenna nell'emettere o ricevere segnali in una direzione specifica, rispetto a un'antenna isotropica. Viene espresso in decibel (dBi) e dipende dalla direzionalità dell'antenna;
 - 2. guadagno di potenza: È l'aumento della potenza del segnale fornito da un amplificatore o dispositivo di trasmissione, espresso in decibel (dB) e calcolato come il rapporto tra la potenza in uscita e quella in ingresso;
- Lo scattering gain rappresenta l'incremento di potenza ricevuta grazie alla dispersione di un segnale tramite riflessione, rifrazione o diffusione su superfici, come pareti o altri oggetti. È un effetto sfruttato nelle comunicazioni wireless per migliorare la copertura del segnale in ambienti complessi.
- L'efficienza spettrale indica la quantità di dati trasmessi su una data banda di frequenza e viene espressa in bit/s/Hz. È un parametro fondamentale per valutare la capacità di trasmissione di un canale, poiché

8 Introduzione

misura quanto efficacemente la banda disponibile viene utilizzata per la trasmissione delle informazioni.

Capitolo 2

Simulatori analizzati

2.1 Simulatore RIS con modello di canale deterministico

Il simulatore considerato permette di sperimentare le superfici RIS tramite un modello di canale deterministico [8]. Si propone, a tal proposito, uno scenario di esempio per dimostrare i benefici delle RIS, con una configurazione che include una base station, una RIS e un dispositivo utente (UE) posizionati nel piano xy. La base station è collocata all'origine del piano, la RIS a una distanza d_{br} lungo l'asse x, e l'UE a d_u metri lungo l'asse x e d_v metri lungo l'asse y, come illustrato in Figura 2.1.

Per la simulazione, è stata definita una RIS di dimensioni 10×20 , costituita da elementi omnidirezionali con spaziatura pari a metà della lunghezza d'onda. La frequenza portante è fissata a 28 GHz e la lunghezza d'onda λ è calcolata tramite la velocità della luce c e la frequenza portante f_c secondo:

$$\lambda = \frac{c}{f_c}$$

I principali parametri della superficie RIS includono:

- Il numero di elementi in riga (N_r) e in colonna (N_c) , rispettivamente impostati su 10 e 20;
- La spaziatura tra gli elementi $(d_r e d_c)$, pari a $0, 5 \times \lambda$, per ottimizzare l'interazione con il segnale RF.

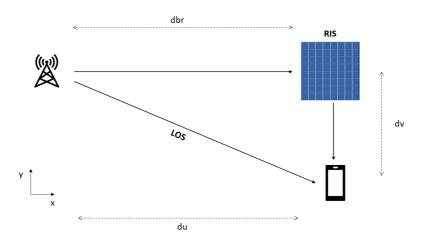


Figura 2.1: Schema del setup realizzato nello scenario di esempio di utilizzo del simulatore che utilizza un modello di canale deterministico.

Per costruire la RIS, viene utilizzata la funzione helperRISSurface come illustrato nel codice:

Si considera una configurazione Single-Input-Single-Output (SISO), con una singola antenna trasmittente e una ricevente. La potenza di trasmissione è assunta essere di 50 mW, mentre il rumore del ricevitore è fissato a -60 dBm. Il segnale trasmesso è modulato in BPSK con un rate di campionamento di 10 MHz.

```
% signal
fs = 10e6;
x = 2*randi(2,[100 1])-3;
tx = phased.Transmitter('PeakPower',50e-3,'Gain'
   ,0);
xt = tx(x);
NOdB = -60-30;
% channel
chanAPToRIS = phased.FreeSpace('SampleRate',fs,'
   PropagationSpeed',c,'MaximumDistanceSource','
   Property','MaximumDistance',500);
chanRISToUE = phased.FreeSpace('SampleRate',fs,'
   PropagationSpeed',c,'MaximumDistanceSource','
   Property', 'MaximumDistance', 500);
chanAPToUE = phased.FreeSpace('SampleRate',fs,'
   PropagationSpeed',c,'MaximumDistanceSource','
   Property','MaximumDistance',500);
Come riferimento, si è calcolato il SNR per il percorso diretto LOS:
% Percorso di propagazione LOS
yref = chanAPToUE(xt, pos_ap, pos_ue, v, v);
SNRref = pow2db(bandpower(yref)) - NOdB;
```

Questo risulta essere pari a 18.5972 dB. Successivamente, viene introdotta la RIS nell'ambiente: il segnale giunge al ricevitore sia tramite il percorso LOS che tramite il percorso riflesso dalla RIS. Inizialmente si considera il caso senza controllo di fase ottimale, in cui ciascun elemento della RIS riflette semplicemente il segnale:

```
rcoeff_ris = ones(Nr*Nc,1);
x_ris_in = chanAPToRIS(xt,pos_ap,pos_ris,v,v);
x_ris_out = ris(x_ris_in,ang_ap_ris,ang_ue_ris,
    rcoeff_ris);
```

```
ylosris = chanRISToUE(x_ris_out,pos_ris,pos_ue,v,v
)+chanAPToUE(xt,pos_ap,pos_ue,v,v);
SNRlosris = pow2db(bandpower(ylosris))-NOdB
```

Si osserva che il miglioramento dell'SNR è minimo, ovvero è pari a 18.6079 dB, indicando che senza un controllo di fase adeguato, il segnale riflesso dalla RIS può interferire con il segnale diretto. Per ottimizzare la fase, si applica una stima del canale, regolando la fase di ciascun elemento in modo che i riflessi giungano al ricevitore in fase con il segnale diretto.

```
% channel estimation
stv = getSteeringVector(ris);
r_ue_ap = norm(pos_ap-pos_ue);
hd = db2mag(-fspl(r_ue_ap,lambda))*exp(1i*2*pi*
   r_ue_ap/c);
g = db2mag(-fspl(r_ap_ris,lambda))*exp(1i*2*pi*
   r_ap_ris/c)*stv(fc,ang_ap_ris);
hr = db2mag(-fspl(r_ue_ris,lambda))*exp(1i*2*pi*
   r_ue_ris/c)*stv(fc,ang_ue_ris);
% compute optimal phase control
rcoeff_ris = exp(1i*(angle(hd)-angle(hr)-angle(g))
   );
% rerun simulation
x_ris_in = chanAPToRIS(xt,pos_ap,pos_ris,v,v);
x_ris_out = ris(x_ris_in,ang_ap_ris,ang_ue_ris,
   rcoeff_ris);
ylosriso = chanRISToUE(x_ris_out,pos_ris,pos_ue,v,
   v)+chanAPToUE(xt,pos_ap,pos_ue,v,v);
SNRlosriso = pow2db(bandpower(ylosriso))-NOdB
```

In questo caso l'SNR risulta migliorato significativamente risultando essere 28.4933 dB. Sebbene l'utilizzo della RIS permetta di migliorare l'SNR, il beneficio di una RIS è ancora più evidente quando il collegamento LOS non è disponibile, come spesso accade in scenari urbani. Per simulare tale situazione, si rimuove il collegamento diretto dal ricevitore:

```
rcoeff_ris = exp(1i*(-angle(hr)-angle(g)));
x_ris_in = chanAPToRIS(xt,pos_ap,pos_ris,v,v);
```

```
x_ris_out = ris(x_ris_in,ang_ap_ris,ang_ue_ris,
    rcoeff_ris);
yriso = chanRISToUE(x_ris_out,pos_ris,pos_ue,v,v);
SNRriso = pow2db(bandpower(yriso))-NOdB
```

L'SNR è pari a 27.9490 dB, quindi si osserva che la qualità del collegamento si degrada solo di circa 0,5 dB, evidenziando come la RIS possa mantenere un collegamento anche in assenza del percorso LOS.

Successivamente, si valuta l'effetto della dimensione della RIS sulla qualità del collegamento:

```
Ncparam = 5:5:50;
[SNRlosris_param, SNRris_param, SNRlos_param] =
    helperRISSimulation(xt,
Ncparam, chanAPToUE, chanAPToRIS, chanRISToUE,
    pos_ap, pos_ris, pos_ue,
v, fc, c, SNRref);
plot(Ncparam.'*10, log2(1+db2pow([SNRlosris_param;
    SNRris_param;
SNRlos_param])));
legend('LOS+RIS', 'RIS', 'LOS');
xlabel('Numero di elementi della RIS');
ylabel('Data Rate (bps/Hz)');
```

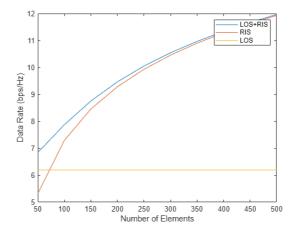


Figura 2.2: Influenza della dimensione della RIS sulla qualità del collegamento.

Si evidenzia che una RIS di dimensioni sufficienti garantisce un'ottima qualità del collegamento, riducendo la dipendenza dal collegamento diretto.

Infine, per analizzare il deployment ottimale della RIS, questa viene posizionata in varie posizioni lungo l'asse x e l'SNR all'UE viene tracciato:

```
dbrparam = 5:5:50;
SNRris_param = helperRISPlacementSimulation(xt,
    dbrparam, ris,
chanAPToUE, chanAPToRIS, chanRISToUE, pos_ap,
    pos_ue, v, fc, c);
plot(dbrparam, SNRris_param);
xlabel('Posizione della RIS lungo X (m)');
ylabel('SNR (dB)');
```

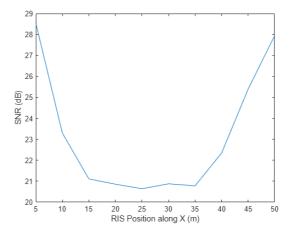


Figura 2.3: Grafico che analizza il deployment della RIS nello scenario d'esempio.

Il grafico mostra che la RIS ottimizza il collegamento posizionandosi vicino alla base station o all'utente.

2.2 Simulatore RIS con modello di canale Clusterd Delay Line

Un altro simulatore analizzato consente la sperimentazione delle RIS tramite un modello di canale stocastico [9]. Per mostrare un esempio di utilizzo di questo framework è stato considerato il setup mostrato in Figura 2.4.

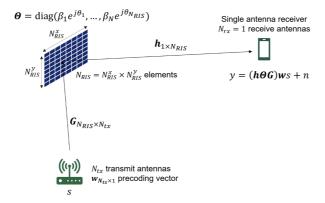


Figura 2.4: Schema del setup realizzato nello scenario di esempio di utilizzo del simulatore che utilizza un modello di canale stocastico.

Il sistema è modellato con due canali CDL (Clustered Delay Line) concatenati, uno tra trasmettitore e RIS, e l'altro tra RIS e ricevitore. Il canale CDL è un modello avanzato, utilizzato per rappresentare la propagazione del segnale in ambienti wireless complessi, come nel caso di simulazione reti 5G e 6G. E' un modello di canale che aiuta a valutare tecnologie avanzate come il MIMO, costituito da un cluster che consiste in raggruppamenti di percorsi multipath con caratteristiche simili. Ogni percorso ha un ritardo, un angolo specifico di arrivo e partenza (AoA/AoD) e una potenza relativa. Un algoritmo iterativo regola lo sfasamento degli elementi della RIS, ottimizzando l'angolo di riflessione per il segnale. Infine, vengono considerati anche l'attenuazione del segnale e le perdite di scattering.

L'obiettivo è osservare il segnale ricevuto dopo la riflessione, utilizzando parametri allineati con quelli definiti dall'ETSI [4]. In aggiunta abbiamo esplorato il modello cercando di lavorare su determinati ambiti:

- 1. Copertura ed Efficienza energetica;
- 2. Sicurezza del livello fisico;
- 3. Mobilità.

Nello scenario d'esempio si assume un ambiente MIMO: Un trasmettitore con N_t antenne invia un simbolo complesso s utilizzando un vettore di precodifica \mathbf{f} di dimensione $N_t \times 1$. L'esempio assume che non ci sia una line of signt (NLOS) diretta tra il trasmettitore e il ricevitore. Una superficie intelligente riconfigurabile (RIS) con N elementi riflette il segnale trasmesso verso un ricevitore a singola antenna. N_r e N_c sono rispettivamente il numero di elementi per riga e per colonna della RIS. Il segnale è influenzato dalla matrice di canale \mathbf{H} di dimensione $N \times N_t$, che modella il canale tra il trasmettitore e la RIS. L'elemento n-esimo della RIS provoca un cambiamento di ampiezza e fase sul segnale incidente, modellato dal numero complesso θ_n , calcolato in maniera iterativa dall'algoritmo. Il segnale riflesso quindi viaggia verso il ricevitore attraverso un canale modellato dalla matrice \mathbf{G} di dimensione $1 \times N$. Il segnale ricevuto y è influenzato dal rumore w.

Attraverso il seguente codice:

```
rng('default')
fc = 28e9; % Frequenza portante (Hz)
carrier = pre6GCarrierConfig("NSizeGrid",50,"
   SubcarrierSpacing", 120);
pdsch = pre6GPDSCHConfig("Modulation","16QAM","
   NumLayers",1,"PRBSet",0:carrier.NSizeGrid-1);
ofdmInfo = hpre6GOFDMInfo(carrier);
fs = ofdmInfo.SampleRate;
% Dimensione dell'array di trasmissione
txArraySize = [4 2 2 1 1]; % [M N P Mg Ng]
Ntx = prod(txArraySize(1:3)); % Numero totale di
   elementi nell'array di trasmissione
% Abilitazione dell'algoritmo di ottimizzazione
   delle fasi dell'elemento RIS
ris.Enable = true; % Se disabilitato, assegna
   spostamenti di fase casuali a ciascun elemento
   RIS
% Parametri RIS
ris.Size = [8 4 2]; % Dimensioni del RIS: [numero
   di righe, numero di colonne, numero di
   polarizzazioni]
numRISElements = prod(ris.Size); % Numero totale
   di elementi nel RIS
```

```
% Lunghezza d'onda
c = physconst("lightspeed");
lambda = c/fc;

% Dimensione dell'elemento RIS
ris.dx = lambda/5; % Dimensione dell'elemento in
    direzione x
ris.dy = lambda/5; % Dimensione dell'elemento in
    direzione y

ris.A = 0.8; % Ampiezza dei coefficienti di
    riflessione di ciascun elemento RIS
```

viene impostata la frequenza portante, l'oggetto di configurazione della portante (entità dato che serve per delineare tutti i parametri necessari per definire la portante del segnale in un sistema di comunicazione wireless), i parametri PDSCH e viene calcolata la frequenza di campionamento del segnale di interesse. il PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) è un canale utilizzato per trasmettere dati utente dal nodo base agli utenti, è responsabile della trasmissione dei dati principali e sfrutta risorse di frequenza e tempo assegnate dinamicamente per ottimizzare l'efficienza della rete.

La dimensione dell'array di antenne di trasmissione è definita utilizzando il formato $[M\ N\ P\ M_g\ N_g]$, dove $M\ e\ N$ rappresentano il numero di righe e colonne nell'array di antenne, rispettivamente, P è il numero di polarizzazioni $(1\ o\ 2)$, e $M_g\ e\ N_g$ rappresentano il numero di pannelli dell'array per riga e colonna, rispettivamente. Se setto polarizzazione 1, l'antenna trasmette o riceve solo in una direzione di polarizzazione (ad esempio solo orizzontale o verticale), mentre se setto a 2, l'antenna può trasmettere o ricevere in due direzioni tra di loro ortogonali (orizzontale e verticale), il che aumenta la capacità e la robustezza di trasmissione. Si utilizza la modulazione 16-QAM, dato che l'array è costituito da 16 antenne trasmissive: $M^*N^*P=16$, secondo i parametri scelti, per cui avrò 16 cluster in ricezione! (se ho riflesso bene) o una nube unica! (se ho riflesso male).

Inoltre, vengono specificati i parametri degli elementi RIS, inclusi il numero di elementi, le loro dimensioni e il guadagno dell'elemento. Le dimensioni della RIS sono date da [8 4 2] per cui ho una RIS costituita da 64 elementi. 8 e 4 sono il numero di righe e colonne, mentre 2 è il numero di polarizzazioni per elemento RIS (1 o 2). La dimensione di ciascun elemento RIS è

determinata in base alla lunghezza d'onda e alla specifica delle dimensioni dell'elemento in entrambe le direzioni, dx e dy.

In questa simulazione, la classe hpre6GRISChannel è responsabile della gestione di entrambi i canali CDL e dello sfasamento di ogni singolo elemento. È importante evidenziare che questa classe non include il path loss, il quale deve essere considerato in un passaggio successivo.

Il codice seguente esegue la configurazione del sistema:

```
risCh = hpre6GRISChannel("SampleRate", ofdmInfo.
   SampleRate, "RISSize", ris. Size, "CarrierFrequency
   ",fc);
risCh.TransmitAntennaArray.Size = txArraySize;
risCh.ReceiveAntennaArray.Size = [1 1 1 1 1]; %
   Receive array must be a single antenna in this
   example
risCh.Seed = randi([0,(2^32)-1]);
                                                %
   Random seed
% Calculate the overall channel delay
chInfo = risCh.info;
channelDelay = chInfo.TxRISChInfo.
   MaximumChannelDelay + chInfo.RISRXChInfo.
   MaximumChannelDelay;
txPower = 20;
                                               % dBm
   . Average transmit power per antenna
% Noise and interference parameters
noiseFigure = 7;
                                               % dB
thermalNoiseDensity = -174;
                                               % dBm
rxInterfDensity = -165.7;
                                               % dBm
   / Hz
% Calculate the corresponding noise power
totalNoiseDensity = 10*log10(10^((noiseFigure+
   thermalNoiseDensity)/10)+10^(rxInterfDensity
   /10));
BW = 12*carrier.NSizeGrid*carrier.
   SubcarrierSpacing *1e3;
noisePower = totalNoiseDensity+10*log10(BW); % dBm
N = 10^{((noisePower-30)/10)};
                                               %
```

Linear

La densità di rumore termico è una misura del rumore generato dalla radiazione termica in un sistema di comunicazione. E' espressa in dBm/Hz e rappresenta la potenza del rumore termico per unità di larghezza di banda. Il suo valore tipico è appunto -174dBm/Hz. Nel codice si fornisce una stima accurata della potenza del rumore totale del sistema, che è essenziale per calcolare l'SNR e ottimizzare le configurazioni di sistema.

La perdita di percorso è definita nel report dell'ETSI [4] come segue:

$$PL_{RIS} = \frac{64\pi^{3}(d_{t}d_{r})^{2}}{G_{t}G_{r}G_{s}N_{RIS}^{2}d_{x}d_{y}\lambda^{2}F(\theta_{t},\phi_{t})F(\theta_{r},\phi_{r})A^{2}}$$

Dove:

- G_t e G_r sono i guadagni delle antenne di trasmissione e ricezione;
- G_s è il guadagno di scattering di un singolo elemento RIS, molto importante perchè si riferisce alla capacità dell'antenna di riflettere o diffondere onde elettromagnetiche che la colpiscono;
- d_x e d_y rappresentano la larghezza e la lunghezza di ciascun elemento RIS:
- λ è la lunghezza d'onda;
- $F(\theta_t, \phi_t)$ e $F(\theta_r, \phi_r)$ rappresentano il pattern di radiazione normalizzato di ciascun elemento nella direzione del trasmettitore e del ricevitore, rispettivamente. Serve per delineare come l'antenna distribuisce la potenza irradiata nello spazio ed evidenzia la direzione di massima irradiazione;
- θ_t e ϕ_t sono gli angoli di elevazione e azimutale dal centro del RIS al trasmettitore;
- A rappresenta l'ampiezza dei coefficienti di riflessione di ciascun elemento RIS, assumendo che sia la stessa per tutti gli elementi.

Una comune assunzione per il guadagno di scattering degli elementi RIS

$$G_s = \frac{4\pi d_x d_y}{\lambda^2}$$

Questo esempio assume $G_t = G_r = F(\theta_t, \phi_t) = F(\theta_r, \phi_r) = 1$. Pertanto il path loss viene calcolato come:

$$PL_{RIS} = \frac{64\pi^{3}(d_{t}d_{r})^{2}}{G_{s}N_{RIS}^{2}d_{x}d_{y}\lambda^{2}A^{2}} = \left(\frac{4\pi d_{t}d_{r}}{N_{RIS}d_{x}d_{y}A}\right)^{2}$$

```
Distanza tra Tx e RIS e tra RIS e Rx:
dt = 105; % metri
dr = 7; % metri

Calcolo della perdita di percorso (guadagno di potenza):
PL = ((4 * pi * dt * dr) / (prod(ris.Size(1:3)) * ris.dx * ris.dy * ris.A)).^2;

disp("RIS link path loss " + 10 * log10(PL) + " dB ")
```

e viene riscontrata una perdita di percorso pari a 151.8968 dB.

In questa parte di codice è iniziato il nostro lavoro riguardo l'ambito della Copertura ed Efficienza energetica:

Un aumento dello scattering gain può migliorare la copertura e la capacità del sistema, riducendo le zone d'ombra e migliorando la robustezza del segnale. Il path loss è direttamente correlato all'efficienza energetica: minore è la perdita, maggiore è l'efficienza energetica, poichè si richiede meno potenza per mantenere una comunicazione affidibile per evitare le attenuazioni del segnale. Per definizione, la potenza di segnale in ambiente ideale, si attenua proporzionalmente all'inverso del quadrato della distanza. Il valore di 151 dB per un collegamento Tx-RIS-Rx è piuttosto elevato, il che indica che una notevole quantità di potenza viene persa nel trasferimento del segnale. In termini di efficienza energetica, questo valore suggerisce che il sistema richiede molta potenza per mantenere un segnale affidabile, questo non è sicuramente efficiente. La soglia di efficienza dipende dal contesto e dalle specifiche dell'applicazione, ma generalmente, un path loss inferiore di 120 dB è considerato accettabile per buone prestazioni in sistemi wireless.

Per ridurre il path loss riscontrato in questo modello possiamo agire su vari parametri:

- Possiamo ridurre la distanza tra il trasmettitore e la RIS, o quella dal ricevitore;
- Aumentare il numero degli elementi che costituiscono la RIS, per aumentare l'efficienza del segnale riflesso;
- Aumentare le dimensioni degli elementi che costituiscono la RIS, aumentando di conseguenza il valore dello scattering gain;
- Aumentare la potenza del segnale trasmesso (soluzione non modificabile perchè standardizzato dall'ETSI).

Nello scenario implementato viene impiegato un approccio iterativo subottimale per calcolare il vettore di precoding \mathbf{w} e i valori di fase ϕ .

Il vettore di precoding è molto utilizzato nei sistemi MIMO per preelaborare il segnale trasmesso, ottimizzando la trasmissione del segnale in presenza di canali multipath: si va a migliorare l'efficienza dello spettro e la qualità del segnale, riducendo l'interferenza inter-canale e massimizzando il troughput del sistema.

Questo modello si ispira a un algoritmo iterativo simile a quello descritto da Tao Zhou e Kui Xu [15]. Inizialmente, si stabiliscono i valori di fase $\phi^{(0)}$; l'algoritmo quindi determina il set di pesi di precoding \mathbf{w} utilizzando la MRT. Con i pesi di precoding calcolati, l'algoritmo procede a ricalcolare il set di fasi ϕ affinché le variazioni di fase combinate dei due canali h_{Tx-RIS} e h_{RIS-Rx} , insieme alla RIS, rimangano costanti. Questo procedimento viene ripetuto iterativamente fino a quando i valori non convergono verso una soluzione. Questo algoritmo assicura almeno una soluzione localmente ottimale.

Per calcolare i valori di \mathbf{w} e ϕ , l'esempio esegue una media delle condizioni del canale su tutti i subcarriers e simboli OFDM. L'OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) è una tecnica di modulazione digitale che divide un canale di comunicazione in diverse sottoportanti ortogonali, ogni sottoportante trasmette una parte del segnale complessivo, migliorando l'efficienza spettrale (massimizzando l'uso della larghezza di banda disponibile) e la robustezza contro interferenze multipath. Il codice utilizzato è il seguente:

```
[risElementCoeff,w,overallChannel] =
  calculateRISCoeff(ris.Enable,risCh,carrier);
```

È possibile controllare la convergenza dell'algoritmo di calcolo delle fasi della RIS e visualizzare l'SNR raggiungibile per ogni iterazione eseguendo il seguente codice:

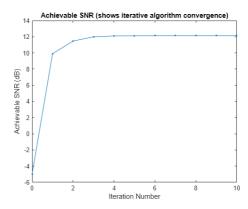


Figura 2.5: SNR raggiungibile all'aumentare delle iterazioni.

che produce il plot visibile in Figura 2.5. Possiamo notare che a poche iterazioni l'SNR raggiungibile è decisamente basso per cui, il segnale ricevente è dominato dal rumore, questo spiega che l'algoritmo non ha calcolato una fase corretta. Mano a mano che le iterazioni aumentano, notiamo che l'SNR inizia a crescere fino a stabilizzarsi a dei valori ottimali in termini comunicativi e di pulizia del segnale ricevuto.

Ora delineiamo la parte di codice inerente al segnale trasmesso e ricevuto. Si crea un singolo intervallo di tempo (slot) di una trasmissione dati in stile 6G e si trasmette utilizzando un canale che sfrutta una RIS per migliorare la propagazione del segnale. Questo esempio utilizza i bit PDSCH non codificati, il che significa che non viene applicata alcuna codifica di canale. È possibile modificare la larghezza di banda e lo spaziamento dei subcarrier del segnale per esplorare l'effetto della RIS sui segnali simili a 6G.

In questa parte di codice abbiamo lavorato riguardo l'ambito della Sicurezza del livello fisico:

La sicurezza PLS rende difficile ai malintenzionati l'accesso alle informazioni trasmesse e riflesse. Abbiamo deciso di implementare una tecnica di attacco jamming utilizzato come difesa, definito Artificial Noise (AN). Questa tecnica consiste di inviare un rumore artificiale assieme al segnale utile, gli utenti legittimi possono filtrare il rumore, conoscendo la chiave (scambiata in precedenza), ma per gli intercettatori, il segnale assomiglierà a rumore puro. E' una tecnica efficiente perchè è pssibile aggiungere rumore artificiale direttamente al segnale trasmesso nell'algoritmo di precoding definito dal modello. Poichè le RIS consentono il controllo dinamico delle riflessioni, è possibile adattare il livello e la direzione del rumore artificiale in tempo reale, rendendo il jamming flessibile e difficile da contrastare. Bisogna però fare attenzione a determinati aspetti:

- La potenza del rumore deve essere sufficientemente alta da confondere gli intrcettatori, ma non troppo alta da degradare la qualità del segnale per il ricevitore corretto;
- Il ricevitore deve essere perfettamente sincronizzato con la trasmissione per filtrare correttamente il rumore artificiale

Tutta questa sezione sottostante è stata intermente modificata da noi per implementare la sicurezza del livello fisico, rispettanto le norme standardizzate dall'ETSI riguardo il modello da cui abbiamo preso spunto.

Si noti che il vettore **w** deve essere trasposto per conformarsi al formato richiesto dal trasmettitore, ovvero serve ad allineare le dimensioni per permettere la corretta moltiplicazione con la matrice di canale CDL, assicurando che il segnale venga propagato correttamente attraverso il canale RIS.

$$w = w.';$$

Successivamente, viene generato il segnale di trasmissione:

```
[txWaveform,pdschSym,pdschInd,dmrsSym,dmrsInd,~,
    pdschGrid] = generateTxWaveform(carrier,pdsch,w
,txPower);
```

Il segnale viene inviato attraverso il canale e viene aggiunto rumore. Per garantire che l'intero slot venga trasmesso attraverso il canale, si aggiungono zeri per riempire eventuali ritardi di trasmissione.

Dopo aver applicato la perdita di percorso, il segnale ricevuto senza rumore viene scalato:

```
rxWaveformNoisless = (1/sqrt(PL)) *
rxWaveformNoisless;
```

risElementCoeff);

Il rumore di canale (ideale) viene quindi aggiunto:

```
noise = sqrt(N)*randn(size(rxWaveformNoiseless)
    ,"like",rxWaveformNoiseless);
rxWaveform = rxWaveformNoiseless + noise;
rxWaveformReal = txWaveform + noise; %filtraggio
    effettuato in maniera teorica
```

Per le misurazioni di potenza, calcoliamo la potenza media di trasmissione per antenna:

```
Ptx = mean(rms(txWaveform).^2);
```

La potenza media di trasmissione per antenna risulta essere circa 19.9955 dBm.

Allo stesso modo, calcoliamo la potenza media ricevuta non filtrata:

```
Prx = mean(rms(rxWaveform).^2);
```

La potenza media ricevuta per antenna è -71.8528 dBm. calcoliamo la potenza media ricevuta filtrata:

```
PrxFiltered = mean(rms(rxWaveformReal).^2);
```

La potenza media ricevuta filtrata per antenna è 19.9955 dBm. Come ci si aspettava.

Successivamente, si calcola il rapporto segnale rumore prima del filtraggio (SNR) nel dominio del tempo:

```
snrBefore = 10*log10(mean(rms(rxWaveform).^2) /
    mean(rms(noise + an_noise).^2));
```

Il valore dell' SNR prima del filtraggio risulta essere di -94.86 dB. Abbiamo un SNR molto degradato dal rumore, questo è un bene per evitare attacchi da parte dei malintenzionati!

il rapporto segnale rumore dopo il filtraggio effettuato sulla ricevente, sempre nel dominio del tempo:

```
snrAfter = 10*log10(mean(rms(rxWaveformReal).^2) /
    mean(rms(noise).^2));
```

Il valore dell' SNR dopo il filtraggio risulta essere di 104.6776 dB. Ottimo lavoro!

Dopo aver decodificato il segnale ricevuto, è possibile tracciare la costellazione equalizzata. La tracciamo sia prima del filtraggio che dopo il filtraggio dell'artifical noise (rispettivamente visibili in Figura 2.6 e in Figura 2.7), per comprendere meglio il risultato ottenuto. Per ottenere una perfetta sincronizzazione, si esegue il seguente passaggio:

```
[~,~,offsetTxRIS,offsetRISRx] = risCh.
    channelResponse(carrier);
rxWaveformReal = rxWaveformReal(1+offsetTxRIS+
    offsetRISRx:end,:);
```

La decodifica PDSCH viene effettuata tramite:

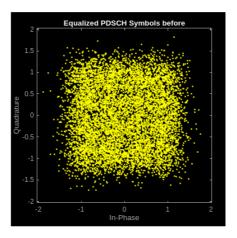


Figura 2.6: Diagramma di dispersione generato prima del filtraggio. Il malintenzionato non distinguerà il segnale utile dal rumore!

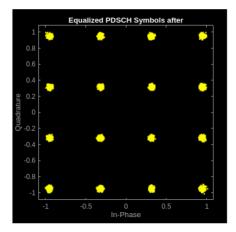


Figura 2.7: Diagramma di dispersione generato dopo il filtraggio.

Per concludere, calcoliamo l'error vector magnitude (EVM) del segnale ricevuto. Questo parametro è molto descrittivo, perchè è una metrica chiave per valutare la qualità del segnale ricevuto, essenziale per l'analisi del sistema di comunicazione. Un EVM elevato indica problemi al sistema, come interferenze, rumore o imperfezioni nella modulazione/demodulazione, permettendo di identificare e risolvere eventuali problemi.

```
evm = comm.EVM();
symbolsEVM = evm(pdschSym, pdschEq2);
```

L'EVM dei simboli PDSCH è di 2.1859%. Un valore ottimale, che afferma la qualità del modello da noi variato.

Ora deliniamo un importante aspetto non preso in considerazione dal modello originale [9]. La mobilità è un aspetto cruciale ai giorni d'oggi, l'idea è quella che la RIS deve fornire copertura anche ad utenti mobili, come un cellulare che si sposta nell'ambiente urbano da un punto A ad un punto B. La RIS sarà capace quindi di calcolare il nuovo angolo di riflessione in modo iterativo per ogni spostamento dell'utente. Questo concetto può essere applicato anche a eventi come il tracking di un drone, per fornire il segnale durante tutta la sua applicazione. Il modello che abbiamo preso in considerazione non modella niente di ciò, per cui bisognerebbe scrivere una libreria da capo per implementare una mobilità così ragionata. Abbiamo escluso questa opzione, anche perchè il modello non delinea il posizionamento spaziale dell'asse Tx-RIS-Rx in 2/3 dimensioni, ma in una. Non implementa nemmeno il concetto di lobo principale, secondario e di back lobe di un antenna (trasmissiva), per cui non si ha il concetto di solido di radiazione dell'antenna da poter giostrare per renderla il più possibile direttiva, in modo tale da poter direzionare il lobo principale, in modo iterativo, verso l'utente mobile, qualsiasi sia, per fornire l'applicazione e il servizio da lui richiesto.

Per cui l'idea di mobilità che abbiamo implementato è quella di delineare una mappa di calore che si basa sulla metrica *Capacità di Shannon* così calcolata:

$$C_{\mathrm{Shannon}} = \mathrm{BW} \cdot \log_2 \left(1 + 10^{\frac{\mathrm{SNR}}{10}} \right)$$

Rappresenta il massimo tasso di trasmissione dell'informazione (in bit al secondo) che può essere raggiunto attraverso un canale di comunicazione senza errori, in presenza di rumore. La capacità di shannon stabilisce il limite teorico alla quantità di dati che si possono trasmettere in modo affidabile sul canale, tendendo conto del rumore presente. L'SNR nella formula si riferisce al rapporto segnale rumore del segnale filtrato ricevuto dall'artifical noise da noi precedentemente introdotto al segnale utile. In questo modo si delinea una mappa di calore che descrive in due dimensioni questa metrica nell'area attorno alla RIS, come se stessimo spostando la ricevente in tutti i punti dello spazio (x,y) simulando un' utente in movimento.

Il codice che viene visualizzato qua sotto riguarda il nostro lavoro sull'ambito della *Mobilità*, si va a modificare il codice originale del modello da noi preso in considerazione: Innanzitutto si crea una griglia di punti in due dimensioni, essi rappresentano le diverse posizioni attorno alla RIS e viene inizializzata la matrice per memorizzare i valori della capacità di shannon in ogni punto della griglia

```
d_max = 50; % Distanza massima dal RIS
grid_size = 20; % Numero di punti della griglia (
    grid_size x grid_size)
x = linspace(-d_max, d_max, grid_size);
y = linspace(-d_max, d_max, grid_size);
[X, Y] = meshgrid(x, y); % Creazione della griglia
Z = zeros(grid_size); % Matrice per memorizzare la
    capacita di Shannon
```

Si mantiene la distanza tra trasmettitore e RIS fissa, e facciamo spostare il ricevitore in tutte le posizioni attorno alla RIS. Per quanto riguarda il segnale che casca sul ricevitore, ne calcoliamo tutti i parametri di nostro interesse, per poi memorizzare il valore della capacità di shannon in un punto specifico della griglia e lo eseguo in modo iterativo per riempirla tutta.

```
% Distanza tra RIS e Tx
dt = 105; % distanza fissa tra RIS e Tx

for i = 1:grid_size
    for j = 1:grid_size
        % Distanza tra RIS e Rx
        dr = sqrt(X(i,j)^2 + Y(i,j)^2);

        % Path loss (power gain)
        PL = ((4*pi*dt*dr)/(prod(ris.Size(1:3))*
            ris.dx*ris.dy*ris.A)).^2;

        [risElementCoeff,w,overallChannel] =
            calculateRISCoeff(ris.Enable,risCh,carrier);

        w = w.'; % transmitter requires w to be of the form number of layers by number of transmit antennas
```

```
[txWaveform, pdschSym, pdschInd, dmrsSym,
           dmrsInd,~,pdschGrid] =
           generateTxWaveform(carrier,pdsch,w,
           txPower);
        % Pad with zeros to flush full slot from
           the channel
        txWaveform = [txWaveform; zeros(
           channelDelay, size(txWaveform, 2))];
        % Send signal through RIS assisted channel
        rxWaveformNoisless = risCh(txWaveform,
           risElementCoeff);
        % Apply path loss
        rxWaveformNoisless = (1/sqrt(PL))*
           rxWaveformNoisless;
        % Add noise
        noise = sqrt(N)*randn(size(
           rxWaveformNoisless), "like",
           rxWaveformNoisless);
        % SNR
        SNR = 10*log10(mean(rms(rxWaveformNoisless
           ).^2)/mean(rms(noise).^2));
        % Capacita di Shannon (bit/s/Hz)
        Z(i,j) = BW * log2(1 + 10^(SNR / 10)); %
           Conversione da dB in scala lineare,
           grazie al prodotto con la larghezza di
           banda.
    end
end
Infine creo la mappa di calore:
y = flip(y);
figure;
```

```
h = heatmap(x, y, Z);
h.Colormap = jet;
h.ColorbarVisible = 'on';
xlabel('Distanza X (m)');
ylabel('Distanza Y (m)');
title('Capacita di Shannon nel territorio');
```

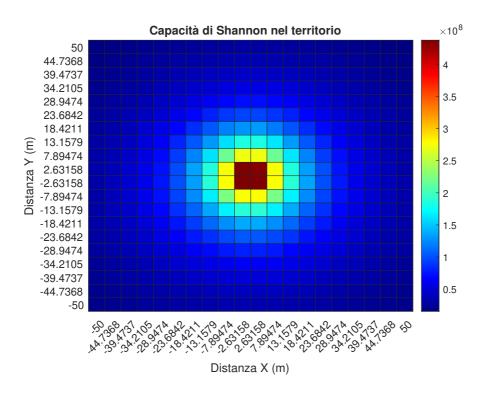


Figura 2.8: Mappa di calore realizzata.

Viene così prodotta una mappa di colore interattiva nella quale spostando il cursore è possibile vedere il preciso valore assegnato ad ogni cella di cui è composta. Una sua rappresentazione grafica è visibile in Figura 2.8.

Bibliografia

- [1] J. Adler, T. Kronauer, and A. N. Barreto, "Hermespy: An open-source link-level evaluator for 6g," *IEEE*, 2021.
- [2] H. Choi, J. Oh, J. Chung, G. C. Alexandropoulos, and J. Choi, "6g system level simulators: Computational complexity challenges and future directions," *IEEE*, 2021.
- [3] N.-N. Dao, Q.-V. Pham, N. H. Tu, T. T. Thanh, V. N. Q. Bao, D. S. Lakew, and S. Cho, "Survey on aerial radio access networks: Toward a comprehensive 6g access infrastructure," *IEEE*, 2021.
- [4] ETSI, "Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS); Communication Models, Channel Models, Channel Estimation and Evaluation Methodology," European Telecommunications Standards Institute (ETSI), GR 003 V1.1.1, 2023. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/RIS/001_ 099/003/01.01.01 60/gr RIS003v010101p.pdf
- [5] W. Jiang, Q. Zhou, J. He, M. A. Habibi, S. Melnyk, M. El-Absi, B. Han, M. D. Renzo, H. D. Schotten, F.-L. Luo, T. S. El-Bawab, M. Juntti, M. Debbah, and V. C. M. Leung, "Terahertz communications and sensing for 6g and beyond: A comprehensive review," *IEEE*, 2021.
- [6] M. Manalastas, M. U. bin Farooq, S. M. A. Zaidi, and A. Imran, "Toward the development of 6g system level simulators: Addressing the computational complexity challenge," *IEEE*, 2021.
- [7] B. Mao, J. Liu, Y. Wu, and N. Kato, "Security and privacy on 6g network edge: A survey," *IEEE*, 2021.
- [8] MathWorks, Introduction to Reconfigurable Intelligent Surfaces, 2023, accessed: October 29, 2024. [Online]. Available: https://mathworks.com/help/phased/ug/introduction-to-reconfigurable-intelligent-surfaces.html
- [9] —, Model Reconfigurable Intelligent Surfaces with CDL Channels, 2023, accessed: September 22, 2024. [Online]. Available: https://mathworks.com/ help/5g/ug/model-reconfigurable-intelligent-surfaces-with-cdl-channels.html

- [10] V.-L. Nguyen, P.-C. Lin, B.-C. Cheng, R.-H. Hwang, and Y.-D. Lin, "Security and privacy for 6g: A survey on prospective technologies and challenges," *IEEE*, 2021.
- [11] H. Poddar, S. Ju, D. Shakya, and T. S. Rappaport, "A tutorial on nyusim: Sub-terahertz and millimeter-wave channel simulator for 5g, 6g, and beyond," *IEEE*, 2021.
- [12] D. Serghiou, M. Khalily, T. W. C. Brown, and R. Tafazolli, "Terahertz channel propagation phenomena, measurement techniques and modeling for 6g wireless communication applications: A survey, open challenges and future research directions," *IEEE*, 2021.
- [13] S. Tarboush, H. Sarieddeen, H. Chen, M. H. Loukil, H. Jemaa, M.-S. Alouini, and T. Y. Al-Naffouri, "Teramimo: A channel simulator for wideband ultramassive mimo terahertz communications," *IEEE*, 2021.
- [14] C.-X. Wang, X. You, X. Gao, X. Zhu, Z. Li, C. Zhang, H. Wang, Y. Huang, Y. Chen, H. Haas, J. S. Thompson, E. G. Larsson, M. D. Renzo, W. Tong, P. Zhu, X. Shen, H. V. Poor, and L. Hanzo, "On the road to 6g: Visions, requirements, key technologies, and testbeds," *IEEE*, 2021.
- [15] T. Zhou and K. Xu, "Multi-intelligent reflecting surface-aided wireless network with achievable rate maximization," in 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2020, pp. 1–6.