

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
SEDE DI CESENA

Scuola di Ingegneria ed Architettura
Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica e Telecomunicazioni per
l'Energia

RETI RADIO DI TIPO CELL-FREE

Elaborato in
Sistemi di Telecomunicazioni (LM)

Tesi di Laurea di:
ELENA BERNARDI

Relatore:
Prof. Ing.
DAVIDE DARDARI

SESSIONE II
ANNO ACCADEMICO 2021–2022

Ai miei genitori

Indice

Introduzione	1
1 Sistemi cell-free massive MIMO	5
1.1 Vantaggi e benefici dei sistemi cell-free massive MIMO	7
1.2 Architettura e funzionamento sistemi cell-free massive MIMO	10
1.3 Radio-stripes per l'implementazione di un sistema cell-free massive MIMO	17
2 Channel hardening e propagazione favorevole	20
2.1 Channel-hardening in reti cellulari massive MIMO	20
2.2 Channel-hardening in reti cell-free massive MIMO	26
2.3 Propagazione favorevole in reti cellulari massive MIMO	35
2.4 Propagazione favorevole in reti cell-free massive MIMO	39
3 Channel-hardening in diverse tipologie di scenari cell-free massive MIMO	46
3.1 Channel-hardening rete cell-free massive MIMO in una regione circolare	47
3.2 Channel-hardening rete cell-free massive MIMO in un ambiente di forma quadrata	66
3.3 Channel-hardening con AP situati all'interno della regione	79

4	Propagazione favorevole in diverse tipologie di scenari cell-free massive MIMO	91
4.1	Propagazione favorevole di una rete cell-free massive MIMO in una regione circolare	94
4.2	Propagazione favorevole di reti cell-free massive MIMO in un ambiente di forma quadrata	107
4.3	Propagazione favorevole con AP situati all'interno della regione	119
5	Channel-hardening e propagazione favorevole in uno scenario realistico tipo stadio	128
5.1	Channel-hardening relativo allo scenario dello stadio	132
5.2	Propagazione favorevole relativa allo scenario dello stadio . . .	134
	Conclusioni	137
	Elenco Figure	146
	Elenco Tabelle	152

Introduzione

Data l'esponenziale evoluzione delle reti cellulari di tipo digitale e la continua crescita della richiesta di connessione da parte di innumerevoli dispositivi, ci sono molti studi che hanno come obiettivo quello di ottenere, in futuro, nuove generazioni di reti in grado di soddisfare requisiti molto ambiziosi, come: data rate > 1 Gbps, latenze inferiori al millisecondo, gestione di elevate densità spaziali di dispositivi (massive communication), il tutto mantenendo un'elevata efficienza spettrale ed energetica [1].

Considerati alcuni dei requisiti sopra menzionati, in questo elaborato sono stati approfonditi studi relativi ad alcuni aspetti di una tecnologia che potrebbe assumere un ruolo da protagonista per le future generazioni di rete mobili. Si tratta della tecnologia cell-free massive MIMO. Essa è considerata una tecnologia molto promettente per i futuri sistemi wireless 6G in grado di garantire la coesistenza di un numero elevato di utenti che insistono sulla medesima risorsa radio, ottenendo quindi un'elevata efficienza spettrale d'area. Nello specifico, in questo elaborato, dopo una descrizione dell'architettura e funzionamento dei sistemi cell-free massive MIMO, sono stati analizzate le differenze ed i vantaggi rispetto a sistemi MIMO tradizionali. Molto importante è stato anche studiare, descrivere ed analizzare una possibile soluzione di implementazione pratica per la tecnologia cell-free: il sistema a radio-stripes.

L'attenzione maggiore, però, è stata posta su due principali aspetti chiave: caratteristiche di channel-hardening e propagazione favorevole per sistemi cell-free massive MIMO. Si è deciso di studiare su una rete cell-free massive MIMO queste due proprietà importantissime ed utilissime, appartenenti ai sistemi cellulari massive MIMO. La presenza, in un sistema, di queste due proprietà conduce ad avere determinati vantaggi, tra cui: combattere il fa-

ding di canale, migliorare l'efficienza spettrale d'area (quanti utenti per m^3 per Hz possono essere gestiti), ridurre il problema e la complessità dell'acquisizione delle informazioni dello stato del canale, mitigare e gestire al meglio le interferenze, semplificare le tecniche di elaborazione lineare e semplificare le tecniche di precodifica. Per questi motivi, di grande importanza è la valutazione di queste due caratteristiche quando si decide di implementare una tipologia di rete.

Una volta studiate e descritte le due proprietà per il sistema cellulare massive MIMO, sono stati riportati alcuni studi, basati sulla geometria stocastica, che hanno permesso di ricavare definizioni matematiche e grazie alle quali è stato possibile valutare le due proprietà per un sistema cell-free massive MIMO. Attraverso queste formulazioni matematiche, infatti, è stato possibile determinare le funzioni di distribuzioni cumulative delle misure di channel-hardening e di propagazione favorevole. Utilizzando queste formulazioni, si è potuto analizzare se in una tecnologia cell-free, applicata a determinate regioni, sono valide le due caratteristiche, se quest'ultime sono influenzate e da quali parametri, come: numero di access-points presenti nella regione, numero di antenne per ciascun access-point, numero di antenne totali presenti nella regione, ambiente di propagazione, modalità di distribuzione delle antenne all'interno dell'area, forma e dimensioni della regione dove si applica la rete cell-free.

La valutazione e lo studio del channel-hardening e della propagazione favorevole sono state fatte, per avere un quadro il più completo e approfondito possibile, su diverse tipologie di scenari, con caratteristiche differenti, che rappresentano ambienti reali in cui vi è la possibilità di sfruttare una tecnologia di tipo cell-free massive MIMO.

L'obiettivo dell'elaborato, difatti, è stato quello di poter giungere a determinate conclusioni, sulle proprietà di channel-hardening e di propagazione favorevole per reti cell-free massive MIMO applicate a diversi scenari, mediante l'esecuzione di simulazioni implementate attraverso *Matlab*. Le simulazioni hanno prodotto, così, risultati utili ai fini della valutazione dei due fenomeni in una tecnologia cell-free.

Una tipologia di scenario scelta tra quelle da analizzare, che rappresenta un caso che può essere implementato nella realtà, è quella di uno stadio che

rappresenta sicuramente uno degli scenari dove i sistemi di comunicazione wireless sono maggiormente “stressati” in termini di efficienza spettrale d’area richiesta.

Capitolo 1

Sistemi cell-free massive MIMO

Al giorno d'oggi si può osservare la continua crescita esponenziale dell'utilizzo della rete cellulare da parte dei dispositivi e l'elevata crescita del traffico dati che è avvenuto negli ultimi decenni. Esaminando possibili scenari futuri ci si rende conto di come aumenterà sempre di più il traffico dati e le continue interazioni tra dispositivi connessi alla rete. Si potrebbe, quindi, ricorrere ad un aumento delle densità di celle creando delle reti ultra dense di celle (ultra-dense-network UDN) oppure si potrebbe procedere con un incremento sostanziale di antenne per ciascun access-point (AP), realizzando reti massive MIMO (mMIMO).

Le soluzioni di reti con elevata densità di celle e di reti massive MIMO presentano una problematica, ovvero la presenza delle interferenze tra celle. Le reti di quinta generazione, basate su tecnologia cellulare massive MIMO, inoltre, presentano degradazioni evidenti di rapporto segnale rumore (signal-to-noise ratio - SNR) soprattutto a bordo cella. Non si riuscirà, con queste tecnologie, a garantire una qualità ed un servizio uniformi per tutta la rete cellulare. Le velocità di dati delle comunicazioni wireless di sesta generazione (6G), inoltre, non riescono ad essere raggiunte nè da reti UDN, nè da reti massive MIMO.

L'obiettivo futuro per la nuova generazione è quello di ottenere una rete in grado di garantire una qualità ed un servizio uniformi su tutta la rete, mitigare le interferenze, ridurre le variazioni del rapporto segnale rumore all'interno dell'area coperta ed avere maggiore copertura uniforme in tutta l'area. Si dovranno anche soddisfare i requisiti, richiesti dalla rete della ge-

nerazione futura, in termini di velocità di trasmissione dei dati e densità di utenti. La soluzione potrebbe essere quella di ricorrere all'utilizzo di una rete cell-free massive MIMO. Essa rappresenta l'evoluzione delle reti con elevata densità di celle e delle reti massive MIMO e cerca di sfruttare quelli che sono i vantaggi appartenenti a queste reti.

Come mostrato in figura 1.1, la rete cell-free massive MIMO può essere definita come l'intersezione di tre aspetti di tre tecnologie differenti [2]:

1. il primo aspetto è il livello fisico della tecnologia cellulare massive MIMO;
2. il secondo aspetto è il concetto di trasmissione congiunta per gli AP della tecnologia coordinated multipoint (CoMP). Il sistema CoMP si basa su più elementi antenna indipendenti e geograficamente separati, di diverse stazioni radio-base, che si coordinano dinamicamente tra loro al fine di migliorare le prestazioni sia per la trasmissione, che per la ricezione con un utente. Il segnale ricevuto dall'utente è frutto della sommatoria di tutti i segnali inviati dalle diverse stazioni radio-base, già pre-elaborati. Questo sistema permette anche un gestione migliore delle interferenze;
3. il terzo aspetto è la distribuzione delle reti UDN.

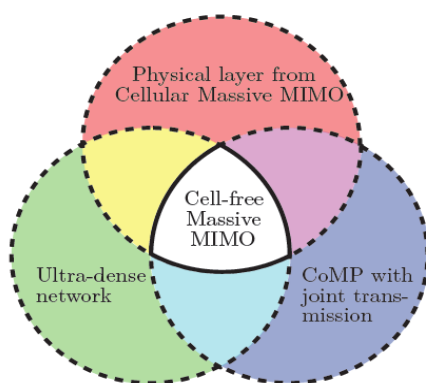


Figura 1.1: Tecnologia cell-free massive MIMO formata dall'intersezione di tre vantaggi appartenenti a tre tecnologie differenti [2].

1.1 Vantaggi e benefici dei sistemi cell-free massive MIMO

I sistemi cell-free massive MIMO, come già detto, si dimostrano essere quindi molto promettenti per una futura generazione di rete mobile, anche grazie ad alcuni vantaggi e benefici che essi sono in grado di apportare, rispetto ad un sistema cellulare massive MIMO.

I sistemi cell-free massive MIMO, sfruttando la tecnologia massive MIMO, hanno la caratteristica di supportare implementazioni scalabili e, l'elevato numero di antenne presenti, per la legge dei grandi numeri, consente la mediazione di rumore, interferenze inter-utente e di fading. La differenza principale della rete cell-free massive MIMO, rispetto a quella cellulare massive MIMO, è quella di non essere costituita da celle, come mostrato in figura 1.2. Grazie a questa caratteristica si ottiene la soppressione delle problematiche legate alla gestione delle risorse fra le varie celle e la capacità di mitigare maggiormente le interferenze. La gestione delle interferenze può essere migliorata anche grazie alla cooperazione di access-points. In assenza di celle, infatti, non vi sono più le problematiche legate all'utente situato a bordo cella, in quanto gli utenti si trovano al centro dei propri clusters di AP da cui sono serviti.

Grazie ad una tecnologia cell-free massive MIMO, inoltre, si riesce ad avere una rete in grado di garantire servizio e qualità uniformi su tutta la rete cellulare, avendo così, minori variazioni di qualità e di servizio. Solamente una tecnologia cell-free può fornire una velocità dati elevata ed uniforme in tutta la regione. In figura 1.3, infatti, viene mostrato il confronto tra una griglia di un'area di copertura, in cui vi sono distribuiti 64 AP con antenne omnidirezionali che trasmettono congiuntamente all'utente, di una rete cell-free e quella di una rete cellulare. Da questo confronto si evince come la rete cell-free riesce a fornire un'elevata velocità di trasmissione per l'intera area di copertura. Un'altra caratteristica di questa tecnologia è anche quella di fornire una miglior efficienza spettrale (spectral efficiency - SE).

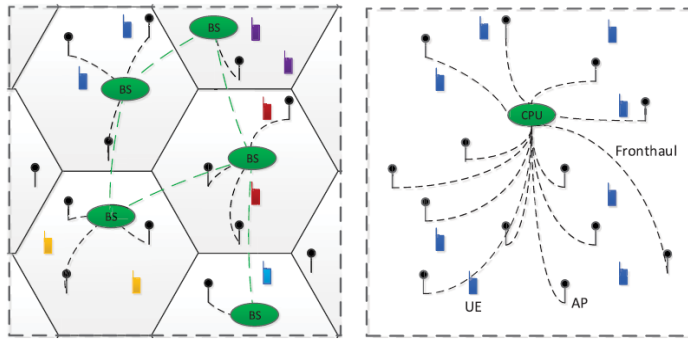


Figura 1.2: Illustrazione che mostra il confronto di una rete cellulare MIMO con una rete cell-free massive MIMO [3].

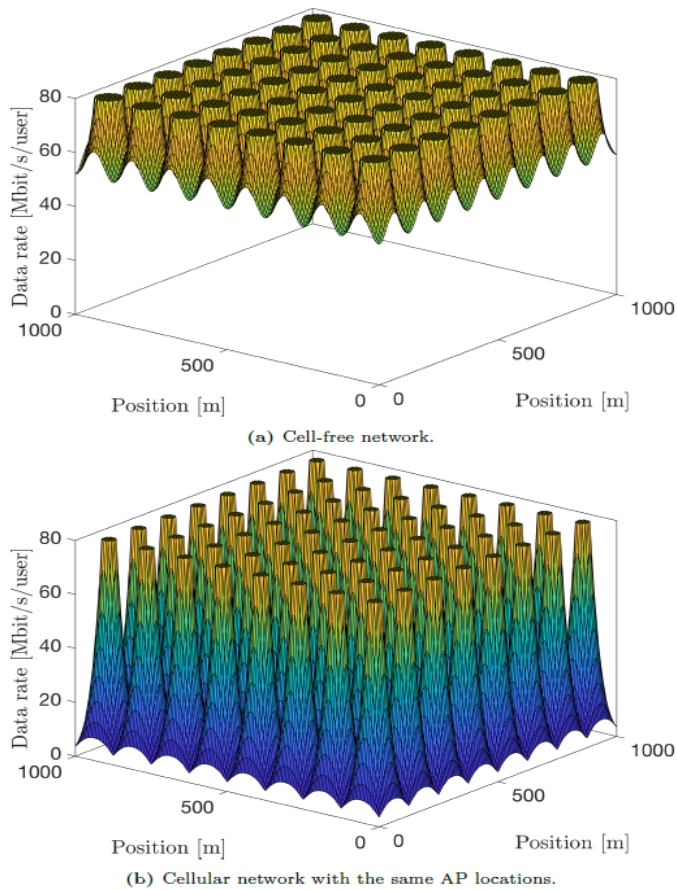


Figura 1.3: Confronto tra data rate di una rete cell-free e di una rete cellulare con 64 AP con antenne omnidirezionali [2].

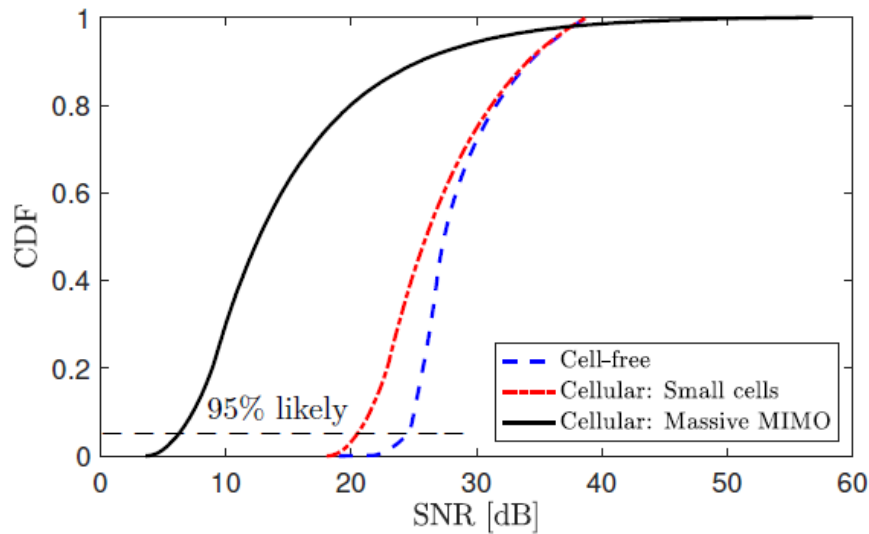


Figura 1.4: Confronto tra tre differenti CDF del rapporto segnale rumore di tre configurazioni: configurazione sistema massive MIMO cellulare, configurazione con small-cells e configurazione cell-free massive MIMO [2].

Un'altro beneficio della tecnologia cell-free massive MIMO, molto importante, è legato al rapporto segnale rumore. Questa tecnologia, infatti, risulta essere capace di ottenere un rapporto segnale rumore più alto e di mitigare le variazioni spaziali di SNR, quindi di avere un rapporto segnale rumore più uniforme in tutta l'area di copertura rispetto ai sistemi cellulari massive MIMO. La capacità dei sistemi cell-free massive MIMO di mitigare le variazioni di SNR e di avere un SNR più alto si può osservare dal grafico in figura 1.4, che si riferisce allo scenario rappresentato in figura 1.3 dove vi sono 64AP distribuiti, in cui vengono messi a confronto i risultati delle simulazioni delle funzioni di distribuzione cumulative (CDF), per il rapporto segnale rumore per tre diverse configurazioni, ovvero:

- CDF del rapporto segnale rumore di una configurazione di un sistema massive MIMO cellulare;
- CDF del rapporto segnale rumore di una configurazione cellulare con small-cells;

- CDF del rapporto segnale rumore di una configurazione cell-free massive MIMO.

Un vantaggio notevole di una rete cell-free massive MIMO è che essa ha una grande efficienza energetica (energy efficiency - EE), quest'ultima risulta essere maggiore rispetto ad una rete MIMO e quindi viene richiesta anche meno potenza per ottenere una buona efficienza spettrale. La rete cell-free massive MIMO gode di una grande efficienza energetica, perchè vi è la possibilità di selezionare un certo cluster di AP che ha il compito di servire un utente ed in questo modo si vanno a ridurre le distanze tra trasmettitori ed utenti riducendo, così, il consumo di potenza. L'efficienza energetica, inoltre, nei sistemi cell-free massive MIMO, può essere migliorata anche mediante la scelta ottimale di algoritmi del controllo di potenza. È stato dimostrato che un sistema cell-free massive MIMO, basato su un controllo di potenza max-min, è in grado di raddoppiare l'efficienza energetica di un sistema cellulare massive MIMO [4].

Altri vantaggi dei sistemi cell-free massive MIMO sono i bassi costi di implementazione, l'occupazione di spazio ridotta, in quanto gli AP richiedono poche antenne e quindi possono essere disposti tranquillamente in ambienti indoor ristretti e la buona affidabilità che hanno grazie alla presenza di forte macro-diversità.

1.2 Architettura e funzionamento sistemi cell-free massive MIMO

L'architettura, la struttura di un sistema cell-free massive MIMO, è descritta in letteratura [2][3][4]. Una rete cell-free presenta una regione senza celle, caratteristica rilevante e principale. All'interno di un sistema cell-free massive MIMO si distinguono tre componenti:

- unità di processamento centrali (CPU);
 - AP;
 - utenti (UE).
-

Le CPU, quando sono multiple, sono interconnesse tra di loro e sono collegate alla rete centrale e ai vari access-points. Le CPU ricevono ed inviano i dati alla rete centrale e sono interconnesse tra di loro attraverso connessioni di backhaul che permettono, appunto, il trasferimento dati da internet alle CPU. Le CPU, inoltre, dialogano anche con gli AP e possono, infatti, grazie alle connessioni di fronthaul, ricevere i dati di up-link dagli AP da cui sono circondate ed elaborarli e processarli. Hanno, inoltre, il compito di condividere informazioni riguardanti lo stato del canale (channel state information - CSI) e di inoltrare i dati durante la trasmissione dati di down-link.

Gli access-points, che sono distribuiti all'interno della regione, possono essere costituiti da una o più antenne ed hanno la funzione di servire congiuntamente gli utenti presenti, che hanno una sola antenna. Non si esclude, ovviamente, di avere la possibilità di utilizzare anche utenti con più antenne, per contribuire alla soppressione delle interferenze. La struttura ed i componenti appena descritti di un sistema cell-free massive MIMO si possono osservare in figura 1.5.

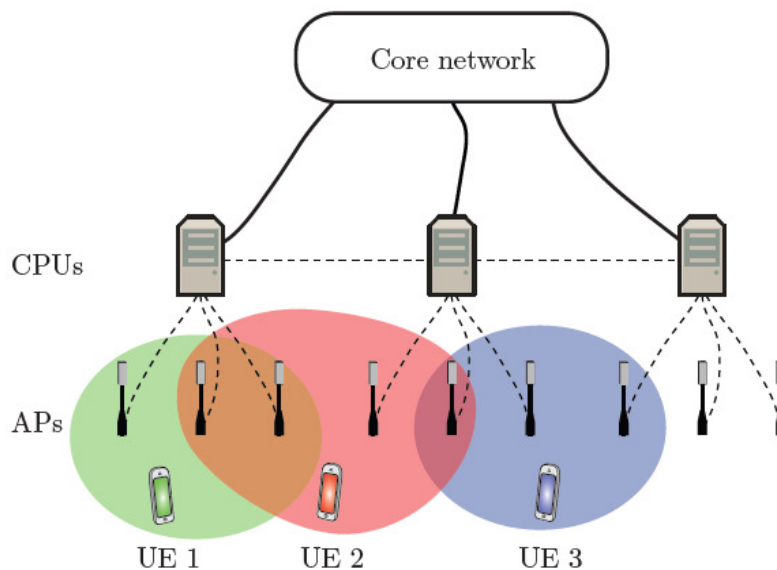


Figura 1.5: Architettura e componenti di un sistema cell-free massive MIMO [2].

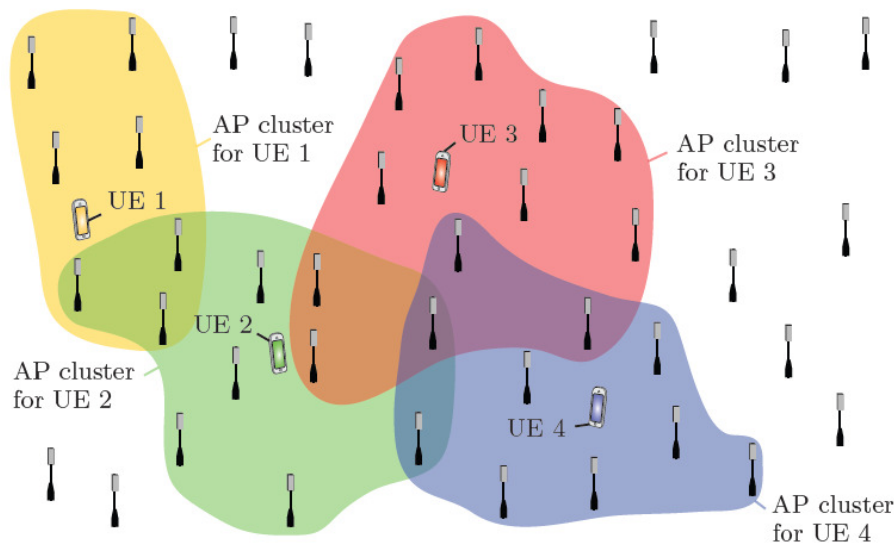


Figura 1.6: Illustrazione sistema cell-free massive MIMO con suddivisione in clusters degli AP [2].

Per limitare la complessità computazionale dei sistemi cell-free massive MIMO, soprattutto per grandi regioni, gli utenti non vengono serviti da tutti gli AP presenti in maniera simultanea, ma ciascun utente viene servito da un numero limitato di AP che sono vicini ad esso. Si formano, così, dei sottoinsiemi, dei clusters di AP che servono un utente. Questi AP devono avere la caratteristica di avere una potenza di segnale che raggiunge l'utente non trascurabile rispetto al rumore. Per la costruzione dei clusters di AP che servono gli utenti si utilizza un approccio user-centric. Questo tipo di approccio, in grado di ottenere il fatto che ogni AP sia responsabile di un numero limitato di utenti, è un passo anche verso la scalabilità, che è una questione essenziale per l'attuazione pratica della tecnologia di rete. Per la scelta di quali AP vanno a servire i diversi UE si utilizza il processo dinamico cooperativo di clustering (dynamic cooperation clusters - DCC), in cui ogni utente viene servito solamente da un sottoinsieme di AP, come si può osservare in figura 1.6. Esistono due tipologie di schemi di selezione di AP che servono gli utenti:

1. schema *large-scale-based*;
2. schema *competition-based*.

Gli utenti, per iniziare la comunicazione, devono accedere alla rete e ad essi gli saranno assegnati le risorse per l'elaborazione del segnale, come i segnali pilota. Quest'ultimi sono delle opportune sequenze pilota che rappresentano segnali di riferimento che servono per poter effettuare la stima del canale. Il numero delle sequenze pilota mutuamente ortogonali è limitato dalla lunghezza delle stesse. Le sequenze pilota, infatti, per il contenimento dell'overhead, non possono essere troppo lunghe. Per questo motivo i segnali pilota non sono sufficienti per tutti gli UE e quindi si devono riutilizzare le stesse sequenze portando a delle contaminazioni dei segnali pilota, quindi ad una riduzione della qualità della stima del canale e ad una difficoltà maggiore a mitigare le interferenze. Il fatto che ogni AP serve solo un numero limitato di UE contribuisce ad evitare una forte contaminazione pilota.

Nei sistemi cell-free, sono state anche introdotte delle politiche di assegnamento delle sequenze pilota per cercare di mantenere il più lontano possibile gli UE che utilizzano gli stessi segnali pilota, sempre per ridurre il fenomeno della contaminazione pilota. Per ottenere buone prestazioni occorre utilizzare un algoritmo di assegnazione correttamente progettato ed efficiente. Alcune tipologie di algoritmi di assegnazione dei segnali pilota sono le seguenti [3][4]:

- Random;
- Greedy;
- algoritmo di assegnazione a riuso dinamico dei segnali pilota;
- Graph-coloring;
- Tabu-search;
- Hungarian;
- K-means.

Il sistema cell-free massive MIMO è caratterizzato da segnali che vengono ricevuti in ingresso e da segnali che vengono emessi in uscita. Per questo motivo si avranno due processi di trasmissione: la procedura di trasmissione per i dati nella fase di up-link e la procedura di trasmissione per i dati nella fase di down-link. Di solito viene utilizzato un protocollo time division duplex

(TDD) che sfrutta la proprietà di reciprocità di canale, quindi per entrambi le trasmissioni, sia quella in down-link, che quella in up-link si utilizza la stessa banda. Con questo tipo di protocollo, ciascun blocco di coerenza di canale, ovvero un blocco di canale costante nel tempo e piatto in frequenza, in quanto è caratterizzato da un tempo pari al tempo di coerenza e da una larghezza di frequenza pari alla larghezza di banda di coerenza, è utilizzato sia per la trasmissione in up-link che in down-link. Per questo il blocco di coerenza presenta una suddivisione in tre diversi usi del canale [2]:

1. τ_p usi di canale per i segnali pilota in up-link;
2. τ_u usi di canale per i segnali di dati in up-link;
3. τ_d usi di canale per i segnali di dati in down-link.

I sistemi cell-free massive MIMO, possono anche utilizzare un protocollo frequency division duplex (FDD). Molti sistemi massive MIMO, però, decidono di utilizzare il protocollo TDD per evitare lo scambio di CSI.

La fase di trasmissione può riguardare sia la trasmissione dei segnali pilota, che la trasmissione dei segnali dei dati [4]. Nella fase di trasmissione dei segnali pilota, gli AP ricevono le sequenze pilota che sono state assegnate agli UE. Con t_k si può identificare l'indice del tono pilota assegnato ad un determinato sottoinsieme di utenti S_k . L'utente i -esimo trasmetterà, così, il suo segnale pilota t_k e l'AP l -esimo riceverà il segnale pilota $y_{t_k,l}^{pilot} \in \mathbb{C}^N$ dopo despreading

$$y_{t_k,l}^{pilot} = \sum_{i \in S_k} \sqrt{\tau_p p_i} h_{il} + n_{t_k,l} \quad (1.1)$$

Nella formula (1.1) h_{il} è la stima del canale tra utente e AP l -esimo, τ_p è l'uso del canale per il tono pilota, p_i la potenza trasmessa dall'utente i -esimo, $n_{t_k,l}$ è il rumore termico.

Nella fase di trasmissione in up-link dei segnali di dati, l'AP l -esimo riceve il segnale $y_l^{ul} \in \mathbb{C}^N$

$$y_l^{ul} = \sum_{i \in S_k} h_{il} s_i + n_l \quad (1.2)$$

dove s_i è il segnale trasmesso dall'utente i -esimo con potenza p_i e dove n_l rappresenta il rumore.

La fase di trasmissione in down-link riguarda la trasmissione dei segnali di dati che vengono ricevuti dagli utenti. L'utente k -esimo riceve dall'AP l -esimo il segnale y_k^{dl}

$$y_k^{dl} = \mathbf{h}_k^H \sum_{i \in S_k} \mathbf{w}_i \zeta_i + n_k \quad (1.3)$$

dove \mathbf{h}_k^H è il vettore di canale, in cui ciascun elemento rappresenta il coefficiente di canale fra l'antenna n -esima dell'AP l -esimo e l'utente k -esimo e $\zeta_i \in \mathbb{C}$ rappresenta il segnale di dati indipendente e di potenza unitaria, in cui \mathbf{w}_i è il vettore collettivo precodificato definito come $\mathbf{w}_i = \sqrt{p_i} \bar{\mathbf{w}}_i$, con $\bar{\mathbf{w}}_i$ che identifica la direttività spaziale della trasmissione. $\bar{\mathbf{w}}_i$ è N -dimensionale, perché l'AP è costituito da un numero pari ad N di antenne.

Durante la trasmissione in up-link, gli UE devono controllare e selezionare le potenze di trasmissione mediante il controllo di potenza e durante il processo di trasmissione in down-link gli AP devono allocare appropriate potenze di trasmissione, attraverso l'allocazione di potenza. I processi di controllo di potenza e di allocazione di potenza servono per avere buone prestazioni del sistema e per gestire in modo efficiente le risorse radio. Il controllo di potenza è molto importante per gestire l'effetto near-far e per proteggere gli UE dalle interferenze [5]. Le CPU sono responsabili del controllo della potenza ed esse eseguono il controllo di potenza in modo ottimale, per poi comunicarlo, attraverso l'utilizzo di coefficienti di controllo di potenza, agli AP e agli UE. I coefficienti di potenza sono scelti per massimizzare determinati obiettivi di performance.

I sistemi cell-free massive MIMO presentano l'architettura a tre stadi [4], visualizzabile in figura 1.7. I tre stadi presentano le seguenti caratteristiche:

1. nel primo stadio vi è la trasmissione in up-link dei segnali pilota e, sulla base di questi toni pilota ricevuti, viene effettuata la stima del canale (CSI). La stima del canale risulta essere molto importante per l'efficienza di precodifica e di detection del segnale e per ridurre l'interferenza tra utenti. Lo sviluppo di tecniche di stima dei canali accurate ed efficienti, sotto il profilo delle risorse, è essenziale per ottenere buone prestazioni. Esistono diversi tipi di stimatori di canale, basati sui segnali pilota, per i sistemi cell-free massive MIMO, come [4]:

- stimatore least-square;
 - stimatore di tipo MMSE;
 - stimatore di tipo element-wise MMSE;
 - stimatore maximum-likelihood MMSE.
2. Il secondo stadio è caratterizzato dalla procedura di trasmissione in up-link dei segnali dei dati, dalla stima dei dati basata sui segnali ricevuti alla CPU e dalla combinazione di ricezione, che serve a rendere il segnale ricevuto più forte della somma dei segnali di interferenza e del rumore. Sono presenti diversi tipi di schemi di combinazione di ricezione, come [4]:
- maximum-ratio combining;
 - MMSE-like combining;
 - zero-forcing-like combining;
 - MMSE-SIC combining.
3. Nel terzo stadio vi è la fase di trasmissione in down-link dei dati e avviene la precodifica in trasmissione dei dati, basata sul CSI acquisito dalla stima del canale. La precodifica in trasmissione serve per associare il flusso di dati da inviare al generico utente alle N antenne dell'AP mediante un opportuno vettore di pesi (ampiezze e fasi) in modo da “puntare” o fare il “fuoco” dell'onda elettromagnetica verso la posizione dell'utente. Ci sono differenti tipologie di schemi di precodifica in trasmissione, come [4]:
- up-link e down-link duality;
 - utility maximization;
 - over-the-air-signaling.

L'architettura a tre stadi può essere strutturata in due differenti modalità:

- modalità centralizzata in cui nel primo livello la stima di canale avviene alla CPU, dopo che gli AP hanno inviato i toni pilota. Nel secondo
-

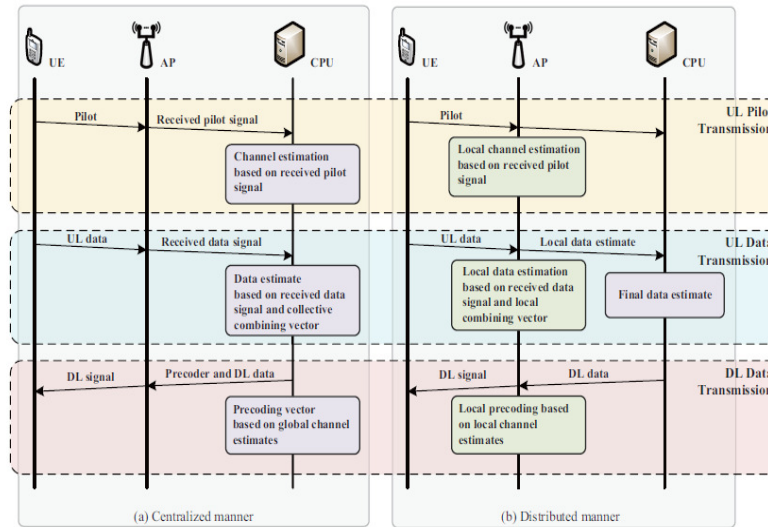


Figura 1.7: Illustrazione dell'architettura a tre stadi dei sistemi cell-free massive MIMO [4].

livello la combinazione di ricezione è centralizzata nella CPU e anche la precodifica in trasmissione nel terzo livello è centralizzata nella CPU e si basa su una stima globale del canale.

- modalità distribuita in cui la stima del canale basata sui segnali pilota è locale e avviene negli AP. In questa modalità si ha inoltre una combinazione di ricezione distribuita e locale che avviene, anch'essa, negli AP e anche una precodifica in trasmissione distribuita che si basa su una stima locale del canale.

Entrambe le modalità sono illustrate in figura 1.7.

1.3 Radio-stripes per l'implementazione di un sistema cell-free massive MIMO

Quando si pensa ad un'implementazione pratica dei sistemi cell-free massive MIMO, subentrano determinati problemi. Le principali difficoltà pratiche a cui i sistemi cell-free massive MIMO vanno incontro sono tre [5]:

1. problema del costo e della complessità di implementazione;

2. problema della limitata capacità delle connessioni di back-haul e di front-haul;
3. problema della sincronizzazione di rete.

Una possibile soluzione per risolvere queste problematiche è quella di utilizzare l'architettura radio-stripes [5], mostrata in figura 1.8. Questa tipologia di architettura, infatti, permette di ottenere un'implementazione della tecnologia cell-free massive MIMO meno complessa, più economica e più flessibile. Essa è caratterizzata da antenne e unità di processamento delle antenne (APU) che si trovano all'interno dello stesso cavo e sono disposte in serie. Il cavo fornisce sincronizzazione, trasferimento dati e alimentazione. All'interno di una radio-stripe vi sono incorporate più antenne ed ogni antenna è effettivamente un AP. Le antenne utilizzate sono piccole e hanno un basso guadagno. Una radio-stripe può costituire un AP multi-antenna. Ciascuna radio-stripe è connessa ad una o a più CPU. Nelle radio-stripes sono utilizzate antenne con potenza di trasmissione che può essere molto bassa e quindi vi è una bassa dissipazione di calore. Le antenne, inoltre, occupano un piccolo volume e hanno un basso peso, con conseguente riduzione del costo. La bassa dissipazione del calore consente, inoltre, di poter utilizzare sistemi di raffreddamento più semplici e meno costosi.

L'architettura della radio-stripe, necessita solo di una connessione alla rete front-haul o direttamente alla CPU. L'architettura compute and forward, inoltre, utilizzata per l'installazione della radio-stripe, non è influenzata dal numero di antenne. Queste caratteristiche permettono un'implementazione del sistema cell-free meno complessa e più flessibile. Per un sistema radio-stripes i cavi vengono usati in maniera più efficiente e sono ridotti i costi di manutenzione grazie alla robustezza che esso presenta.

Per quanto riguarda il trasferimento dati di un'implementazione del sistema cell-free massive MIMO tramite radio-stripes, la CPU riceve i dati dalla rete centrale, tramite collegamenti di backhaul e poi questi dati vengono inoltrati a ciascuna APU di ciascuna radio-stripe mediante connessioni di fronthaul. Le CPU, inoltre, ricevono da ciascuna radio-stripe i segnali cumulativi, sempre attraverso connessioni di fronthaul, li decodificano e poi li inviano alla rete centrale tramite collegamento di backhaul.

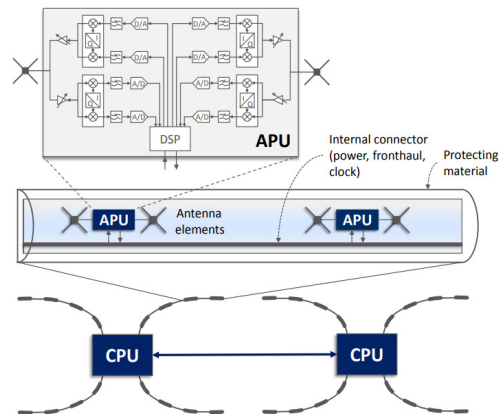


Figura 1.8: Illustrazione dell'architettura di un sistema a radio-stripes [5].

Per avere una trasmissione congiunta coerente da parte di più AP, che hanno il compito di servire un determinato UE, è necessario che ci sia sincronizzazione dell'infrastruttura. C'è il rischio, infatti, che gli AP non siano sincronizzati con la fase della rete centrale. La differenza a livello temporale tra trasmettitore e AP è definita come errore di sincronizzazione. Per mitigare e gestire gli errori di sincronizzazione, viene applicato un processo di sincronizzazione ad intervalli regolari. Nel sistema a radio-stripes, i gruppi di AP sono sequenziali, motivo per il quale è sufficiente che la sincronizzazione venga fatta solo tra un gruppo ed il gruppo vicino.

Il sistema a radio-stripes si rivela essere un'importante soluzione da prendere in considerazione per l'implementazione pratica dei sistemi cell-free massive MIMO anche per la capacità di poter essere utilizzato per ambienti densi, ad esempio in aree come stadi e centri commerciali, in cui vi sono molti AP per km^2 , grazie anche alla riduzione del cablaggio ottenuta mediante la condivisione di cavi per fronthaul, alimentazione e all'architettura a catena in cui gli AP sono collegati in sequenza. Per questo motivo, quando si analizza una tecnologia cell-free massive MIMO per diverse tipologie di scenario, si può considerare di effettuare un'implementazione a livello pratico mediante sistema a radio-stripes.

Capitolo 2

Channel hardening e propagazione favorevole

In questo elaborato è stato opportuno affrontare, per quanto riguarda lo scenario futuro cell-free massive MIMO, degli studi riguardanti due proprietà di estrema importanza che caratterizzano i sistemi massive MIMO: channel-hardening e propagazione favorevole. È infatti necessario analizzare e studiare queste due proprietà in relazione alla tecnologia cell-free, per un'implementazione pratica di quest'ultima.

2.1 Channel-hardening in reti cellulari massive MIMO

Il channel-hardening è un fenomeno noto fin dai primi studi relativi alla ricezione multiantenna, che si occupavano principalmente di combattere il fading di canale. Si evince, infatti, da questi studi che, sfruttando la diversità spaziale in presenza di un numero molto elevato di antenne (massive MIMO), mediante una combinazione ottimale dei segnali ricevuti in accordo alla tecnica maximal ratio combining (MRC), il canale equivalente a valle della combinazione tende a diventare deterministico (hard) anche se i singoli canali sono soggetti a fading.

Questo risultato deriva dalla legge dei grandi numeri. Il fenomeno del channel-hardening è stato analizzato, infatti, da studi precedenti, su scenari cellulari massive MIMO. Molti studi [6] dimostrano come lo scenario cellulari massive MIMO è soggetto alla proprietà importante del channel-hardening. Il fenomeno di channel-hardening permette di migliorare le prestazioni di stima del guadagno di canale in down-link in uno scenario cellulare massive MIMO, più precisamente di tipo MISO (di solito si considerano utenti con singola antenna). Consente, inoltre, di sviluppare formulazioni meno complesse e maggiormente intuitive per quanto riguarda l'efficienza spettrale.

In uno scenario cellulari massive MIMO, sono presenti un determinato numero di celle contenenti ciascuna una stazione radio-base (*Base-Station* BS) e un determinato numero di utenti. Il processo di up-link e di down-link in uno scenario con celle massive MIMO è illustrato dalla figura 2.1, per visualizzare al meglio la struttura dei sistemi cellulari massive MIMO durante le fasi di up-link e di down-link.

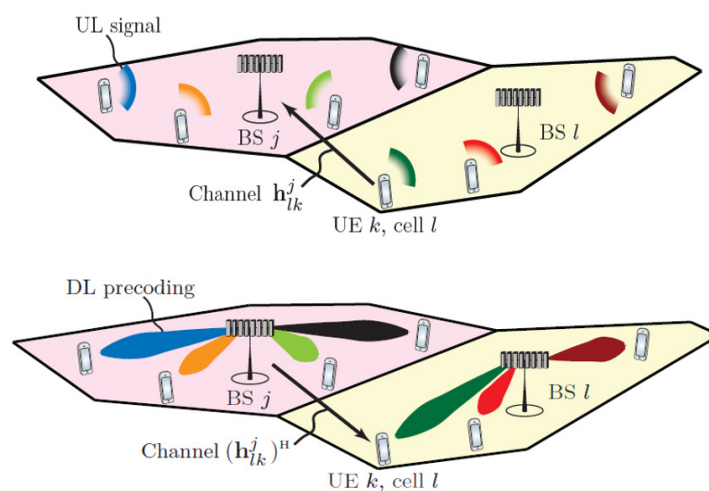


Figura 2.1: Processi di up-link e di down-link in uno scenario cellulari massive MIMO [6].

Si decide di concentrare l'attenzione su quello che è il vettore di canale formato da un singolo utente k -esimo appartenente ad una determinata cella l -esima e una stazione radio-base appartenente alla cella j -esima. Si avranno ovviamente direzioni opposte tra i due processi di up-link e down-link. Il vettore delle risposte di canale, su cui si pone l'attenzione per lo studio della proprietà di channel-hardening, $\mathbf{g}_{\text{lk}}^j \in C^{M_j}$ contiene gli elementi che indicano la risposta di canale tra l'utente k -esimo e una delle M_j antenne della stazione radio-base. La risposta \mathbf{g}_{lk}^j del canale è uguale sia nel processo di up-link, che nel processo di down-link. Le risposte di canale sono contenute nel vettore \mathbf{g}_{lk}^j , il quale presenta una norma al quadrato $\|\mathbf{g}_{\text{lk}}^j\|^2$ ed una direzione all'interno dello spazio vettoriale $\mathbf{g}_{\text{lk}}^j/\|\mathbf{g}_{\text{lk}}^j\|$. Si assume un canale narrow-band (esempio, un resource block) del quale \mathbf{g}_{lk}^j rappresenta il guadagno (equivalente passa basso).

Prendendo in considerazione un canale con fading, la norma e la direzione spaziale sono entrambe variabili aleatorie. Il canale con fading può risultare incorrelato o correlato nello spazio e nel primo caso la norma e la direzione sono variabili aleatorie indipendenti. La direzione del canale nello spazio, sempre in questo caso, è anche uniformemente distribuita. Un modello di canale incorrelato o correlato nello spazio può essere il canale con fading alla Rayleigh. Quando viene considerato un modello di canale correlato nello spazio con fading alla Rayleigh, il vettore di risposta di canale risulta essere [4]:

$$\mathbf{g}_{\text{lk}}^j \sim CN(0, \mathbf{R}_{\text{lk}}^j) \quad (2.1)$$

Si assume, quindi, che la risposta di canale nel caso di fading alla Rayleigh correlato presenta una distribuzione circolare simmetrica complessa gaussiana con valor medio nullo e varianza pari alla matrice di correlazione nello spazio $\mathbf{R}_{\text{lk}}^j \in C^{M_j \cdot M_j}$.

Il vettore delle risposte di canale è strettamente legato al concetto di channel-hardening, in quanto, come viene spiegato da diversi studi [4][6], la caratteristica del channel-hardening per quanto riguarda un sistema cellular massive MIMO, presenta la seguente definizione da un punto di vista matematico:

$$\frac{\|\mathbf{g}_{\mathbf{1}k}^j\|^2}{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_{\mathbf{1}k}^j\|^2]} \rightarrow 1 \text{ quando } M_j \rightarrow \infty \quad (2.2)$$

Dalla condizione (2.2) emerge che il rapporto tra la norma al quadrato del vettore delle risposte di canale e il valor medio di quest'ultima tende ad un valore unitario, quando il numero di antenne presenti sono talmente elevate da tendere ad infinito. Si dimostra, quindi, dalla precedente definizione matematica che il guadagno di un canale $\frac{\|\mathbf{g}_{\mathbf{1}k}^j\|^2}{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_{\mathbf{1}k}^j\|^2]}$, con fading casuale si avvicina al valor medio, grazie alla legge dei grandi numeri, quando si ha uno scenario massive MIMO, ovvero quando si ha un numero elevato di antenne, come si può osservare dalla figura 2.2 successiva. Quindi, sia $\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_{\mathbf{1}k}^j\|^2]$ che $\|\mathbf{g}_{\mathbf{1}k}^j\|^2$ di solito divergono se $M_j \rightarrow \infty$.

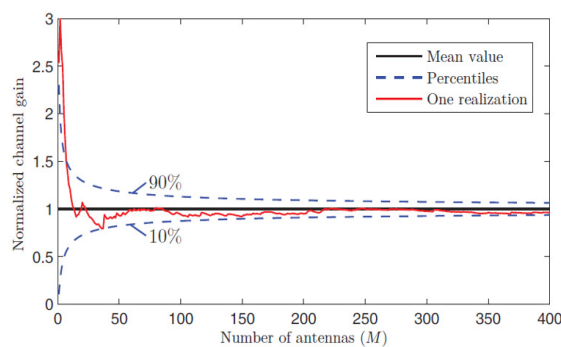


Figura 2.2: Grafico che mostra il fenomeno di channel-hardening in cui il guadagno di canale si avvicina al valor medio quando vi è un aumento di antenne [6].

Il channel-hardening è definito da un punto di vista teorico come la proprietà che permette di diminuire il fading di piccola scala, permettendo una riduzione del fading veloce. In questo modo il canale inizia ad assumere un comportamento deterministico.

In uno scenario massive MIMO l'aumento del numero di antenne contribuisce alla diminuzione delle variazioni, potendo così far avere al canale il comportamento deterministico, semplificando la stima del canale e l'allocazione della potenza. Si migliora, inoltre, anche la prestazione in quanto il canale tende ad essere AWGN (a meno del fading di larga scala). Grazie al channel-hardening il guadagno di canale tra la stazione radio-base ed utente viene caratterizzato solamente da fading di larga scala e per questo motivo la stima e la decodifica del canale sono molto meno complicate.

La proprietà channel-hardening contribuisce ad ottenere altri effetti, come il fatto che il fading nella frequenza decresce e diventa piccolo o addirittura trascurabile e che il fading nel tempo diminuisce grazie alla combinazione di segnali provenienti dalle antenne multiple presenti all'interno delle stazioni radio base [7].

Il channel-hardening, inoltre, è misurato attraverso la varianza del guadagno di canale [2][6][8], come mostrato dalla seguente formula:

$$\mathbb{V} \left[\frac{\|\mathbf{g}_{\mathbf{1}k}^j\|^2}{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_{\mathbf{1}k}^j\|^2]} \right] = \frac{\mathbb{V} [\|\mathbf{g}_{\mathbf{1}k}^j\|^2]}{\mathbb{E} [\|\mathbf{g}_{\mathbf{1}k}^j\|^2]^2} \rightarrow 0 \text{ quando } M_j \rightarrow \infty \quad (2.3)$$

È una condizione necessaria, ma non sufficiente che la varianza tenda a zero per ottenere channel-hardening. Come si nota dalla precedente formula matematica e dalla figura 2.3, la varianza diminuisce con l'incremento del numero di antenne presenti. Quindi l'espressione della varianza del guadagno del canale, ovvero $\frac{\mathbb{V}[\|\mathbf{g}_{\mathbf{1}k}^j\|^2]}{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_{\mathbf{1}k}^j\|^2]^2}$, si avvicina a zero quando si presenta il fenomeno del channel-hardening.

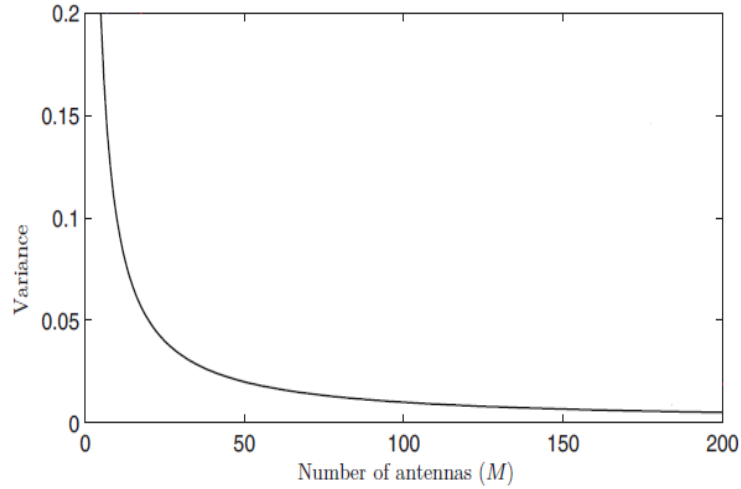


Figura 2.3: Grafico che mostra la varianza che si riduce quando vi è un aumento di antenne [6].

La definizione matematica $\frac{\mathbb{V}[\|\mathbf{g}_{\mathbf{1k}}^j\|^2]}{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_{\mathbf{1k}}^j\|^2]^2}$ si ottiene attraverso l'ineguaglianza di Chebyshev's [4][8]:

$$\begin{aligned}
 Pr \left\{ \left| \frac{\|\mathbf{g}_{\mathbf{1k}}^j\|^2}{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_{\mathbf{1k}}^j\|^2]} - 1 \right|^2 \leq \epsilon \right\} &= 1 - Pr \left\{ \left| \frac{\|\mathbf{g}_{\mathbf{1k}}^j\|^2}{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_{\mathbf{1k}}^j\|^2]} - 1 \right|^2 \geq \epsilon \right\} \\
 &\geq 1 - \frac{1}{\epsilon} \frac{\mathbb{V}[\|\mathbf{g}_{\mathbf{1k}}^j\|^2]}{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_{\mathbf{1k}}^j\|^2]^2} \text{ con } \epsilon \geq 0.
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

In conclusione si può quindi affermare, che il fenomeno del channel-hardening è estremamente importante grazie alla capacità di far convergere il comportamento del canale ad un comportamento deterministico.

Lo scenario cellular massive MIMO, grazie alla presenza di un numero elevato di antenne favorisce questo fenomeno. In generale, fissato uno specifico scenario, risulta essere interessante investigare con quale velocità la varianza tende a zero in funzione del numero di antenne.

2.2 Channel-hardening in reti cell-free massive MIMO

Come spiegato al capitolo precedente, il fenomeno del channel-hardening è estremamente importante per rendere meno complessa la stima del canale, per semplificare le formule dell'efficienza spettrale, semplificare l'allocation della potenza e la decodifica di canale. In una rete il channel-hardening, infatti, permette di alleviare gli effetti peggiori causati da fading. Per questo motivo è necessario studiare la caratteristica del channel-hardening riguardante la rete cell-free massive MIMO. Ha, appunto, un'elevata importanza lo studio per comprendere sotto quali condizioni il channel-hardening ha luogo e se si possono ottenere i vantaggi legati ad esso nelle reti cell-free massive MIMO.

Gli studi relativi all'analisi del channel-hardening in una tecnologia cell-free sono stati effettuati, appunto, su uno scenario tipico di una rete cell-free massive MIMO, illustrato in figura 2.4, in cui vi sono un certo numero di utenti, formati da una sola antenna, che sono serviti da un determinato numero di access-points distribuiti all'interno di un'area. Ciascun access-point è costituito da una o multiple antenne ed un determinato gruppo di AP serve in maniera congiunta gli utenti.

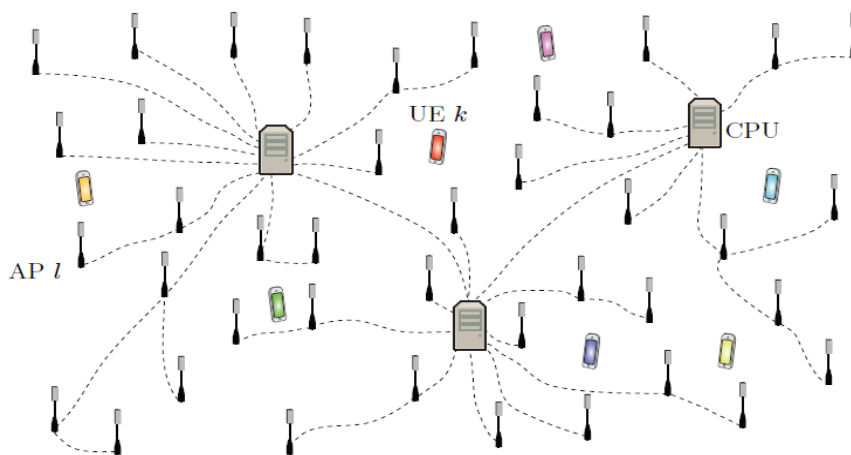


Figura 2.4: Scenario cell-free massive MIMO con AP distribuiti, utenti e CPU che processano i dati [2].

Nonostante le prove certe, riguardanti il fatto se il channel-hardening è una proprietà che riguarda anche le reti cell-free massive MIMO, che da un punto di vista pratico non si possono avere perché ancora non sono state implementate sul campo, sono stati fatti degli studi fondati sulla geometria stocastica [9][10], che hanno permesso di giungere a determinate conclusioni sul fenomeno channel-hardening per reti senza celle.

Lo scenario preso in considerazione nello studio sul channel-hardening su reti senza celle, presenta un numero (denominato con L) di AP distribuiti su una regione con una determinata area (A), in accordo con una processo puntuale di Poisson omogeneo. Ciascun AP può essere costituito da un certo numero di antenne che può essere maggiore o uguale ad uno (si decide di denominare N il numero di antenne per ciascun AP. Si avrà quindi $N \geq 1$). All'intero dell'area in cui sono distribuiti gli AP, sono presenti gli utenti che si trovano in posizioni casuali (si sceglie di utilizzare un numero pari a K di utenti). Ciascun AP, inoltre è collegato ad un'unità centrale che ha il compito di processare codificare e decodificare i dati.

Con lo scenario appena descritto è quindi possibile ottenere il numero totale di antenne presenti in tutta l'area, moltiplicando il numero di antenne di ciascun AP per il numero di access-points presenti: $M = LN$.

Per lo studio del channel-hardening, su questo specifico scenario cell-free, è opportuno identificare il vettore che contiene i canali che si formano tra i vari utenti e tutte le antenne degli AP. Per ogni utente k -esimo si formerà un vettore dei canali contenente un numero pari al numero totale di antenne presenti (M) di elementi, denominato \mathbf{g}_k . Gli elementi che costituiscono il vettore dei canali sono identificati con lo scalare $g_{m,k}$ che è modellato come segue:

$$g_{m,k} = \sqrt{l(d_{m,k})}h_{m,k} \text{ con } m = 1, \dots, M \quad (2.5)$$

L'elemento $d_{m,k}$, presente nella formula precedente (2.5), indica la distanza tra utente k -esimo e antenna m -esima, mentre la funzione deterministica $l(d_{m,k})$ denota il guadagno in potenza del canale (inverso del path-loss) scorporato dalle fluttuazioni del fading veloce modellate mediante $h_{m,k}$. Si considerano, infatti, le distanze tra k -esimo utente e tra ciascuna m -esima antenna di ciascun access-point. Queste distanze sono all'interno del vettore \mathbf{d}_k , il quale ha un numero di elementi pari al numero di antenne totali (M). In questa analisi si utilizza un modello di path-loss non singolare mediante la seguente formula:

$$l(\mathbf{d}_k) = \min(1, l(\mathbf{d}_k)^{-\alpha}) \quad (2.6)$$

L'elemento $h_{m,k}$ presente nella formula precedente rappresenta il fenomeno di fading di piccola scala. Nel caso preso in esame per studiare il channel-hardening viene considerato un fading alla Rayleigh indipendente tra utente e ciascun antenna, quindi gli elementi $h_{m,k}$ sono variabili aleatorie indipendenti, identicamente distribuite con una distribuzione gaussiana complessa circolare simmetrica con valor medio nullo e varianza pari a uno

$$h_{m,k} \sim CN(0, 1) \quad (2.7)$$

In questo caso preso in esame non viene considerato il fading causato dal fenomeno di shadowing, in quanto i coefficienti relativi al fenomeno di shadowing non inciderebbero su quanto analizzato.

Occorre fare una precisazione che riguarda il caso in cui all'interno degli AP ci fossero un numero di antenne maggiori di uno. In questo caso le distanze tra tutte le antenne presenti in un determinato access-point e un utente k -esimo sono considerate tutte uguali (ipotesi di campo lontano fra utente e AP) in accordo con la seguente formula:

$$d_{(i-1)N+1,k} = d_{(i-1)N+2,k} = \dots = d_{iN,k} \text{ con } i = 1, \dots, L \quad (2.8)$$

Se, ad esempio, si utilizzasse un caso preso in esame come quello raffigurato in figura 2.5, in cui si hanno cinque AP con un numero pari a due di antenne per ciascun AP, si avranno, infatti, le seguenti distanze:

$$d_{1,k} = d_{2,k} \text{ con } i = 1$$

$$d_{3,k} = d_{4,k} \text{ con } i = 2$$

$$d_{5,k} = d_{6,k} \text{ con } i = 3$$

$$d_{7,k} = d_{8,k} \text{ con } i = 4$$

$$d_{9,k} = d_{10,k} \text{ con } i = 5$$

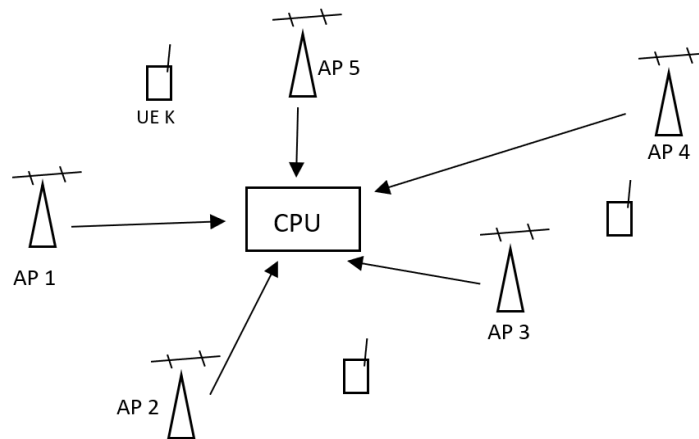


Figura 2.5: Scenario cell-free massive MIMO con 5 AP distribuiti, ciascuno costituito da due antenne, con utenti e CPU collegata agli AP che processa i dati.

Per valutare il channel-hardening nello scenario cell-free massive MIMO si utilizza un'estensione della definizione del channel-hardening delle reti cellulari massive MIMO [2][10][12], in quanto in quest'ultime un singolo access-point serve un singolo utente, mentre nelle reti cell-free il k -esimo utente è servito dalla combinazione di più access-points. Si può quindi affermare che la condizione per cui si verifica channel-hardening nel caso cell-free massive MIMO è la seguente:

$$\frac{\|\mathbf{g}_k\|^2}{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{r}_k]} \rightarrow 1 \text{ quando } M \rightarrow \infty \quad (2.9)$$

Si evince, dalla formula 2.9, che il rapporto tra la norma al quadrato del vettore \mathbf{g}_k e il valor medio della norma euclidea del vettore \mathbf{g}_k , condizionato dal vettore \mathbf{r}_k , che contiene le distanze tra utente e AP, tende ad un valore unitario quando il numero totale di antenne tende ad infinito.

È importante, quindi, definire i termini presenti nella condizione che deve essere valida per avere channel-hardening in reti cell-free massive MIMO. Al numeratore vi è il guadagno di canale che è rappresentato dalla norma euclidea al quadrato del vettore dei canali: $\|\mathbf{g}_k\|^2$. La norma euclidea al quadrato è definita come segue:

$$\|\mathbf{g}_k\|^2 = \sum_{m=1}^M |h_{m,k}|^2 l(d_{m,k}) \quad (2.10)$$

La norma euclidea al quadrato, che rappresenta il guadagno in potenza di canale, deriva dalla norma euclidea del vettore delle risposte di canale e risulta essere un elemento importante per la condizione per cui si verifica channel-hardening nei sistemi cell-free massive MIMO, come si evince dalla formula precedente. Per questo motivo, negli studi su channel-hardening basati sulla geometria stocastica è stata ricavata una formula alternativa per la norma euclidea al quadrato, che tiene conto del fatto che tutti gli AP sono equipaggiati da un numero (pari a N) di antenne e utilizza un vettore che contiene tutte le distanze tra il k -esimo utente e tra tutti gli AP. Il vettore delle distanze è il seguente:

$$\mathbf{r}_k = [r_{1,k}, \dots, r_{L,k}]^T \quad (2.11)$$

Considerando l'ipotesi di campo lontano tra AP e utenti ed il caso in cui all'interno degli AP ci siano un numero di antenne maggiori di uno, le distanze tra tutte le antenne presenti in un determinato access-point e un utente k -esimo sono le stesse, ottenendo quindi:

$$r_{i,k} = d_{(i-1)N+1,k} = d_{(i-1)N+2,k} = \dots = d_{iN,k} \text{ con } i = 1, \dots, L \quad (2.12)$$

In riferimento all'esempio pratico, preso in considerazione precedente, si avranno quindi i seguenti componenti del vettore $\mathbf{r}_k = [r_{1,k}, \dots, r_{L,k}]^T$:

$$r_{1,k} = d_{1,k} = d_{2,k} \text{ con } i = 1$$

$$r_{2,k} = d_{3,k} = d_{4,k} \text{ con } i = 2$$

$$r_{3,k} = d_{5,k} = d_{6,k} \text{ con } i = 3$$

$$r_{4,k} = d_{7,k} = d_{8,k} \text{ con } i = 4$$

$$r_{5,k} = d_{9,k} = d_{10,k} \text{ con } i = 5$$

Una volta definito il vettore \mathbf{r}_k , che contiene tutte le distanze tra il k -esimo utente e tra tutti gli AP, è possibile scrivere la formula alternativa per la norma euclidea al quadrato. Si ottiene infatti la seguente definizione matematica:

$$\|\mathbf{g}_k\|^2 = \sum_{m=1}^M |h_{m,k}|^2 \sum_{i=1}^L l(r_{i,k}) \quad (2.13)$$

Si considera, inoltre, come detto in precedenza, che tutti gli AP sono equipaggiati da un numero di antenne, ottenendo così la seguente uguaglianza:

$$\sum_{m=1}^M |h_{m,k}|^2 = \sum_{i=1}^L \sum_{m=(i-1)N+1}^{iN} |h_{m,k}|^2 \text{ con } i = 1, \dots, L \quad (2.14)$$

dove:

$$H_i = \sum_{m=(i-1)N+1}^{iN} |h_{m,k}|^2 \quad (2.15)$$

In conclusione si ottiene, quindi la seguente definizione matematica del guadagno di canale dato dagli L AP all'utente k -esimo $\|\mathbf{g}_k\|^2$:

$$\|\mathbf{g}_k\|^2 = \sum_{i=1}^L H_i l(r_{i,k}) \text{ con } i = 1, \dots, L \quad (2.16)$$

Data la precedente formulazione matematica del guadagno di canale (2.16), viene ricavata la distribuzione statistica di $\|\mathbf{g}_k\|^2$. Per stabilire questa distribuzione si tiene conto del fatto che la distribuzione di $H_i = \sum_{m=(i-1)N+1}^{iN} |h_{m,k}|^2$ è una distribuzione Gamma con valor medio pari al numero di antenne per access-points (ovvero pari a N) e varianza uguale a uno:

$$H_i \sim \Gamma(N, 1) \quad (2.17)$$

Di conseguenza si ha la seguente distribuzione del guadagno di canale dato dagli L AP all'utente k -esimo:

$$\|\mathbf{g}_k\|^2 = \sum_{i=1}^L H_i l(r_{i,k}) \text{ in cui } H_i l(r_{i,k}) \sim \Gamma(N, l(r_{i,k})) \quad (2.18)$$

Si stabilisce la distribuzione di $\|\mathbf{g}_k\|^2$, in quanto risulta essere un'informazione utile al fine di determinare l'espressione del denominatore della condizione di channel-hardening nei sistemi massive MIMO senza celle. Per quanto riguarda, infatti, il valor medio di $\|\mathbf{g}_k\|^2$ condizionato dal vettore delle distanze \mathbf{r}_k , ovvero $\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2 | \mathbf{r}_k]$, viene ricavato sapendo che il guadagno di canale si ottiene dalla somma di variabili aleatorie indipendenti Gamma. Di conseguenza si avrà il seguente valor medio di $\|\mathbf{g}_k\|^2$ condizionato dal vettore \mathbf{r}_k :

$$\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2 | \mathbf{r}_k] = N \sum_{i=1}^L l(r_{i,k}) \quad (2.19)$$

Una volta stabiliti $\|\mathbf{g}_k\|^2$ e $\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2 | \mathbf{r}_k]$, si può procedere quindi alla verifica della condizione per la quale si ha channel-hardening in sistemi cell-free massive MIMO.

La condizione $\frac{\|\mathbf{g}_k\|^2}{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{r}_k]} \rightarrow 1$ quando $M \rightarrow \infty$ non è sicuramente l'unico metodo per studiare, analizzare e verificare il channel-hardening. Come detto anche al capitolo precedente, infatti, vi è la possibilità di valutare channel-hardening attraverso la varianza dell'espressione (2.9). Quest'ultima è definita come segue:

$$\mathbb{V} \left[\frac{\|\mathbf{g}_k\|^2}{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{r}_k]} \right] = \frac{\mathbb{V}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{r}_k]}{(\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{r}_k])^2} \quad (2.20)$$

Si ha che la varianza di guadagno di canale tende a zero per un numero di antenne totali che tende ad infinito:

$$\frac{\mathbb{V}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{r}_k]}{(\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{r}_k])^2} \rightarrow 0 \text{ con } M \rightarrow \infty \quad (2.21)$$

Questa condizione è una condizione sufficiente per la condizione precedente (2.9) ed è estremamente utile, perché è proprio attraverso essa che si ricava l'espressione della misura di channel-hardening, che si può utilizzare per generalizzare il channel-hardening per più scenari.

È, infatti, di notevole importanza poter valutare il channel-hardening in scenari di grandi reti wireless dove gli utenti sono posizionati in modo aleatorio. Per svolgere questa valutazione occorre definire la funzione di distribuzione cumulativa della misura del channel-hardening quando gli utenti sono situati in posizioni arbitrarie. Essa risulta essere così definita:

$$p_\theta = \mathbb{P} \left(\frac{\mathbb{V}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{r}_k]}{(\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{r}_k])^2} \leq \theta \right) \quad (2.22)$$

Si può notare che l'equazione precedente rappresenta la funzione di distribuzione cumulativa della varianza del guadagno di canale. Questa CDF ci consente, pertanto, di analizzare il fenomeno di channel-hardening generalizzato a più scenari. La probabilità p_θ ci permette di ottenere la percentuale in cui il valore di varianza di guadagno di canale è minore o uguale a una certa soglia di riferimento θ , quando gli utenti sono distribuiti in modo aleatorio. Il valore della soglia di riferimento per far sì che lo scenario presenti la caratteristica del channel-hardening è impostato a 0.01 [12].

Si può, quindi, affermare in conclusione che la proprietà di channel-hardening risulta maggiormente presente quando si ha un valore di soglia sufficientemente piccolo, come 0.01, e quando il valore di p_θ è alto.

Una volta evidenziata l'importanza della funzione di distribuzione cumulativa della varianza del guadagno di canale, essa viene utilizzata per valutare il channel-hardening considerando uno scenario in cui vi sono un determinato numero di AP distribuiti, costituiti da un numero di antenne maggiore o pari a uno. Si procede, infatti, ricavando la formula della varianza di guadagno di canale condizionato al vettore delle distanze \mathbf{r}_k , tenendo conto del fatto che il guadagno di canale si ottiene dalla somma di variabili aleatorie indipendenti Gamma. La varianza di guadagno di canale condizionato al vettore delle distanze \mathbf{r}_k è così espressa:

$$\mathbb{V} [|\mathbf{g}_k|^2 | \mathbf{r}_k] = N \sum_{i=1}^L l^2(r_{i,k}) \quad (2.23)$$

Ottenendo, quindi, oltre alla definizione matematica di valor medio del guadagno di canale condizionato dal vettore delle distanze \mathbf{r}_k (2.19), la definizione matematica della varianza di guadagno di canale condizionata al vettore delle distanze \mathbf{r}_k (2.23), si può ricavare l'espressione per esaminare il channel-hardening in uno scenario in cui gli AP presentano da un numero di antenne maggiore o uguale a uno. L'espressione di p_θ per analizzare il channel-hardening, diventa la seguente:

$$p_\theta = \mathbb{P} [X_{ch} \leq \theta] \quad (2.24)$$

La misura di channel-hardening X_{ch} di una rete con un determinato numero di AP è l'argomento dell'equazione precedente (2.24). Date, quindi, le espressioni (2.19), (2.22), (2.23) e (2.24) p_θ è così definita:

$$p_\theta = \mathbb{P} \left[\frac{N \sum_{i=1}^L l^2(r_{i,k})}{\left(N \sum_{i=1}^L l(r_{i,k})\right)^2} = \frac{N \sum_{i=1}^L l^2(r_{i,k})}{N^2 \left(\sum_{i=1}^L l(r_{i,k})\right)^2} = \frac{\sum_{i=1}^L l^2(r_{i,k})}{N \left(\sum_{i=1}^L l(r_{i,k})\right)^2} \leq \theta \right] \quad (2.25)$$

Sulla base di questa definizione della misura del channel-hardening si è potuto procedere con l'analisi del fenomeno di channel-hardening in diversi scenari che possono rappresentare casi realistici di reti cell-free massive MIMO. Nei capitoli successivi, infatti, verrà descritto lo studio della proprietà di channel-hardening in specifici scenari e verranno analizzati e studiati alcuni parametri che influenzano il fenomeno di channel-hardening per reti cell-free massive MIMO.

2.3 Propagazione favorevole in reti cellulari massive MIMO

Un sistema cellular massive MIMO, come quello rappresentato in figura 2.6, può essere caratterizzato, oltre che dal channel-hardening, che semplifica, come detto ai capitoli precedenti, la stima del canale, l'elaborazione dei segnali, la codifica e la decodifica, da un'altra proprietà estremamente importante: la propagazione favorevole.

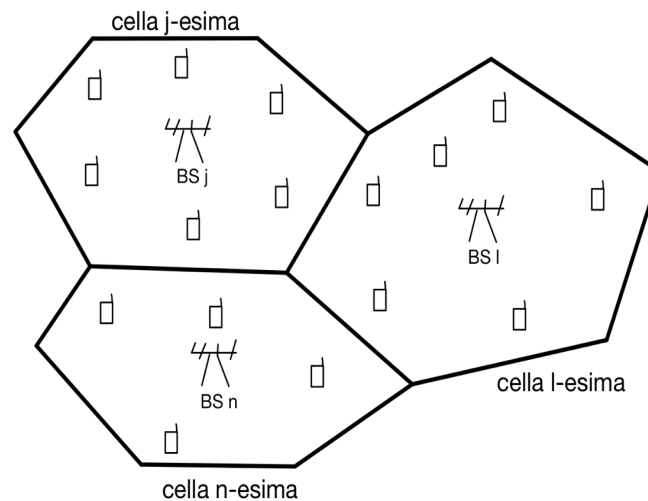


Figura 2.6: Rappresentazione scenario cellular massive MIMO.

Il fenomeno di propagazione favorevole, insieme al fenomeno di channel-hardening, contribuisce a ridurre il problema e la complessità dell'acquisizione delle informazioni dello stato del canale e consente di migliorare l'efficienza spettrale.

Per quanto riguarda la propagazione favorevole, vengono considerati due utenti diversi che trasmettono alla stazione radio-base, ad esempio utente k -esimo e utente j -esimo, rappresentati in figura 2.7. Tra i due utenti (k -esimo e j -esimo) e la stazione radio-base ci sono due canali. La propagazione favorevole è la proprietà dei due canali di essere asintoticamente ortogonali [6]. Grazie a questa proprietà e quindi all'ortogonalità asintotica, assunta dalle direzioni dei canali tra gli utenti e la BS, si riescono ad attenuare le interferenze tra gli utenti. Questa riduzione delle interferenze consente di utilizzare semplici elaborazioni lineari e sistemi di pre-codifica per ottenere prestazioni ottimali.

In uno scenario cellular massive MIMO, nella fase di up-link, mostrata in figura 2.7, infatti, un detector lineare (ad esempio un matched filter) è sufficiente, grazie alla propagazione favorevole, ad eliminare le interferenze e minimizzare il rumore. Va notato, infatti, che in generale un filtro adattato non è più ottimo in presenza di interferenza. Tuttavia, se quest'ultima viene pressochè annullata dalla proprietà di propagazione favorevole, il filtro adattato diventa ottimo anche in scenari multi-utente.

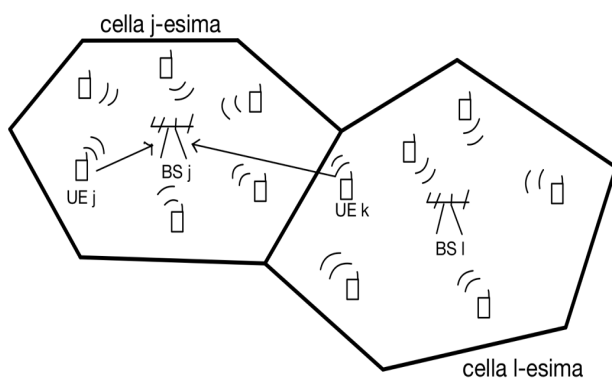


Figura 2.7: Rappresentazione scenario cellular massive MIMO durante il processo di up-link.

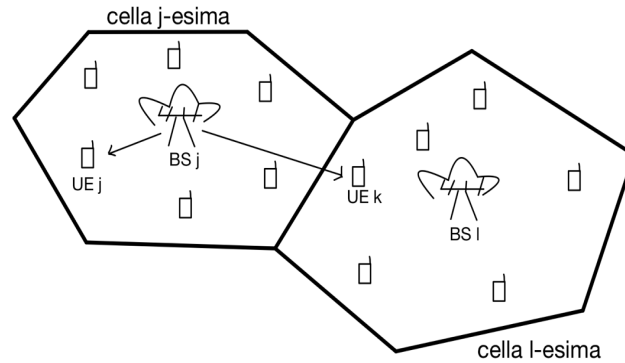


Figura 2.8: Rappresentazione scenario cellular massive MIMO durante il processo di down-link.

Nel processo di down-link, rappresentato in figura 2.8, di uno scenario massive MIMO, la propagazione favorevole permette alla BS, attraverso tecniche di beamforming lineare, di poter trasmettere dati in maniera simultanea senza avere interferenze [6][11].

Per spiegare il fenomeno di propagazione favorevole, che permette di avere ortogonalità tra due canali, si possono esaminare determinati risultati [11][14] riguardanti due vettori n -dimensionali, denominati, ad esempio \mathbf{p} e \mathbf{q} , che contengono come elementi variabili aleatorie indipendenti ed identicamente distribuite, che hanno valor medio nullo e varianze rispettivamente σ_p^2 e σ_q^2 . Un primo risultato è che per la legge dei grandi numeri, si ottiene che il prodotto tra i vettori \mathbf{p}^H e \mathbf{q} diviso per il numero degli elementi costituenti i due vettori (n) converge quasi certamente a zero se il numero di elementi n tende ad infinito, ovvero:

$$\frac{1}{n} \mathbf{p}^H \mathbf{q} \rightarrow 0 \text{ con } n \rightarrow \infty \quad (2.26)$$

Un secondo risultato utile è che dal teorema del limite centrale di Lindeberg-Levy si ricava che il prodotto dei due vettori \mathbf{p}^H e \mathbf{q} diviso per la radice del numero di elementi che caratterizza i due vettori (n) converge nella distribuzione $CN(0, \sigma_p^2 \sigma_q^2)$ con n che tende ad infinito, come descritto nell'espressione (2.27) successiva

$$\frac{1}{\sqrt{n}} \mathbf{p}^H \mathbf{q} \rightarrow CN(0, \sigma_p^2 \sigma_q^2) \text{ con } n \rightarrow \infty \quad (2.27)$$

Questi due risultati possono essere utilizzati per descrivere la condizione per avere propagazione favorevole. Se, infatti, i due vettori \mathbf{p} e \mathbf{q} corrispondono a due canali di due utenti qualsiasi ed n corrisponde al numero di antenne totali, quando n ha un valore molto elevato c'è ortogonalità tra i due canali e quindi si verifica il fenomeno della propagazione favorevole.

Considerando il vettore di canale tra BS ed utente k -esimo \mathbf{g}_k ed il vettore di canale tra BS ed utente j -esimo \mathbf{g}_j , due vettori M -dimensionali, dove M coincide con il numero di antenne totali, in cui gli elementi sono variabili aleatorie i.i.d., si raggiunge la seguente condizione matematica per la quale si ha la proprietà di propagazione favorevole [4][6][11]:

$$\frac{(\mathbf{g}_k)^H \mathbf{g}_j}{\sqrt{\mathbb{E}(\|\mathbf{g}_k\|^2) \mathbb{E}(\|\mathbf{g}_j\|^2)}} \rightarrow 0 \text{ con } M \rightarrow \infty \quad (2.28)$$

Si ha, quindi, propagazione favorevole in uno scenario cellular massive MIMO, quando il rapporto tra $\mathbf{g}_k^H \mathbf{g}_j$ e $\sqrt{\mathbb{E}(\|\mathbf{g}_k\|^2) \mathbb{E}(\|\mathbf{g}_j\|^2)}$ tende a zero con il numero di antenne totali (M) che tende ad infinito. L'espressione (2.28) indica, inoltre, che il prodotto tra i canali normalizzati, ovvero $\frac{g_k}{\sqrt{\mathbb{E}(\|\mathbf{g}_k\|^2)}}$ e $\frac{g_j}{\sqrt{\mathbb{E}(\|\mathbf{g}_j\|^2)}}$, tende in modo asintotico a zero. Dato che i valori di $\|\mathbf{g}_k\|^2$ e $\|\mathbf{g}_j\|^2$ aumentano con M , la propagazione favorevole non implica che il prodotto tra \mathbf{g}_k e \mathbf{g}_j tenda a zero. Per questo, risulta esserci ortogonalità tra le direzioni dei canali ma non tra le risposte dei canali [6]. Nelle reti massive MIMO esiste una procedura che consente di capire quanto si è vicini ad ottenere propagazione favorevole con un numero pratico di antenne di servizio totali.

Questa procedura si basa sul calcolo della varianza dell'espressione (2.28), riportata in seguito:

$$\mathbb{V} \left[\frac{(\mathbf{g}_k)^H \mathbf{g}_j}{\sqrt{\mathbb{E}(\|\mathbf{g}_k\|^2) \mathbb{E}(\|\mathbf{g}_j\|^2)}} \right] \quad (2.29)$$

La condizione ideale per la propagazione favorevole è che il valore della varianza espressa nella (2.29) sia zero. La varianza viene determinata dalla correlazione spaziale dei due canali. Per questo motivo, se i due utenti hanno correlazione spaziale dei due canali nulla, la varianza risulta essere nulla.

2.4 Propagazione favorevole in reti cell-free massive MIMO

Come per il fenomeno di channel-hardening, anche per la propagazione favorevole è molto importante valutare se essa può essere sfruttata, utilizzata ed applicata nelle reti cell-free massive MIMO.

È necessario, infatti, svolgere uno studio per i sistemi cell-free per comprendere se essi possono assumere la proprietà di propagazione favorevole, grazie alla quale, come detto anche in precedenza, si riducono drasticamente le interferenze tra due utenti, fino a cancellarle, in quanto i canali di servizio tra i due utenti sono ortogonali. Mediante la cancellazione di queste interferenze si può avere un'elaborazione di segnale utilizzando tecniche meno complesse. Nonostante le diverse definizioni di propagazione favorevole che si trovano in letteratura, è stata determinata una formula per la propagazione favorevole apposita per scenari specifici di reti cell-free massive MIMO [2][10].

Per lo studio e l'analisi della proprietà della propagazione favorevole riferita ai sistemi cell-free massive MIMO, si è proceduto facendo riferimento ad uno scenario con le stesse caratteristiche di quello utilizzato per lo studio del fenomeno di channel-hardening. Nello scenario preso in esame vi è, appunto, una regione senza celle con all'interno UE, in cui vi sono un determinato numero di access-points che trasmettono in modo coerente e che sono collegati ad unità centrali che processano i dati. Gli AP possono essere a singola antenna, cioè costituiti da una sola antenna, ma possono anche avere più antenne. Lo scenario è quindi composto da:

- un numero di AP pari ad L che servono congiuntamente gli utenti;
- un numero di antenne per ciascun access-point pari ad N ;
- utenti presenti all'interno della regione;
- un esponente di path-loss α che indica il modello di propagazione;
- un numero totale di antenne $M = LN$.

Lo scenario viene rappresentato nella figura 2.9 seguente:

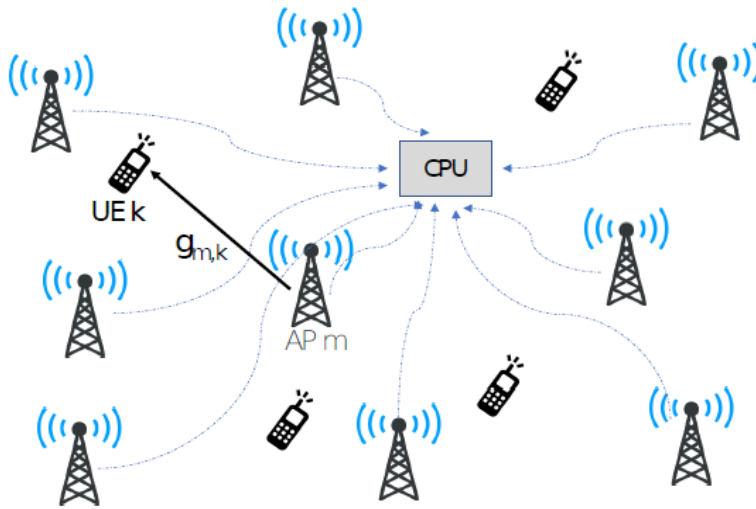


Figura 2.9: Rappresentazione scenario cell-free massive MIMO [10].

La propagazione favorevole, come detto in precedenza, è la caratteristica che permette la cancellazione di interferenze tra utenti sfruttando l'ortogonalità dei canali. Quindi la definizione di propagazione favorevole adattata agli scenari cell-free è costituita dal vettore \mathbf{g}_k dei canali formati tra un utente in una determinata posizione (definito utente k -esimo) e tra tutti gli AP presenti e dal vettore \mathbf{g}_j dei canali tra un altro utente (identificato come utente j -esimo) e tutti gli AP [10]. I vettori di canale \mathbf{g}_k e \mathbf{g}_j sono vettori M -dimensionali costituiti, appunto, da numero di elementi pari ad M , che rappresenta il numero totale delle antenne presenti.

$$\mathbf{g}_k = [g_{1,k}, \dots, g_{M,k}]^T \quad (2.30)$$

$$\mathbf{g}_j = [g_{1,j}, \dots, g_{M,j}]^T \quad (2.31)$$

Questi due vettori di canale includono sia gli effetti di fading di larga scala che quelli di fading di piccola scala. Sia \mathbf{g}_k che \mathbf{g}_j sono caratterizzati dalla norma euclidea che rappresenta il guadagno di canale: $\|\mathbf{g}_k\|^2$ e $\|\mathbf{g}_j\|^2$. Gli elementi del vettore dei canali, definiti come $g_{m,k}$ e $g_{m,j}$, in cui il pedice m può assumere valori da 1 ad M ed indica l'indice dell' antenna di servizio ed in cui i pedici k e j indicano gli utenti k -esimo e j -esimo, presentano la seguente formulazione:

$$g_{m,k} = \sqrt{l(d_{m,k})}h_{m,k} \text{ con } m = 1, \dots, M \quad (2.32)$$

$$g_{m,j} = \sqrt{l(d_{m,j})}h_{m,j} \text{ con } m = 1, \dots, M \quad (2.33)$$

Si osserva, quindi, come nel caso di channel-hardening analizzato precedentemente, che gli elementi del vettore dei canali sono costituiti dall'elemento $h_{m,k}$, per l'utente k -esimo e dall'elemento $h_{m,j}$ per l'utente j -esimo, che sono variabili aleatorie indipendenti e identicamente distribuite, rappresentative dei fenomeni di fading di piccola scala (si considera fading alla Rayleigh) e presentano la seguente distribuzione:

$$h_{m,k} \sim CN(0, 1) \quad (2.34)$$

$$h_{m,j} \sim CN(0, 1) \quad (2.35)$$

Sempre gli elementi del vettore dei canali sono composti, inoltre, dagli elementi $l(d_{m,k})$ per l'utente k -esimo e $l(d_{m,j})$ per l'utente j -esimo, che rappresentano il guadagno medio in potenza del canale, a meno delle fluttuazioni

di fading veloce, tra utente k -esimo e antenna m -esima considerando la dipendenza dal path-loss e utilizzando un modello di path-loss non singolare. Come nel channel-hardening, anche per la proprietà di propagazione favorevole, nel caso in cui gli AP sono costituiti da più antenne si sfrutta la seguente semplificazione, data dall'ipotesi di campo lontano fra utenti e AP:

$$d_{(i-1)N+1,k} = d_{(i-1)N+2,k} = \dots = d_{iN,k} \text{ con } i = 1, \dots, L \quad (2.36)$$

$$d_{(i-1)N+1,j} = d_{(i-1)N+2,j} = \dots = d_{iN,j} \text{ con } i = 1, \dots, L \quad (2.37)$$

Esistono, quindi, due vettori M -dimensionali delle distanze denominati \mathbf{d}_k e \mathbf{d}_j che sono formati nel seguente modo:

$$\mathbf{d}_k = [d_{1,k}, \dots, d_{m,k}]^T \text{ con } m = 1, \dots, M \quad (2.38)$$

$$\mathbf{d}_j = [d_{1,j}, \dots, d_{m,j}]^T \text{ con } m = 1, \dots, M \quad (2.39)$$

Il vettore \mathbf{d}_k , infatti, contiene gli elementi $d_{m,k}$ che rappresentano le distanze tra l'utente k -esimo e tra tutte le antenne presenti nella regione analizzata. Il vettore \mathbf{d}_j è costituito dagli elementi $d_{m,j}$ rappresentativi delle distanze tra tutte le antenne e l'utente j -esimo. Il pedice m indica l'indice delle antenne che va da 1 ad M , dove M è ottenuto dal prodotto tra numero di AP totali (L) e tra antenne appartenenti a ciascun AP (N). Date le formule (2.32 e 2.33) che indicano da cosa sono composti gli elementi $g_{m,k}$ e $g_{m,j}$ si possono descrivere i vettori dei canali in un modo alternativo, ovvero:

$$\mathbf{g}_k = [\sqrt{l(d_{1,k})}h_{1,k}, \dots, \sqrt{l(d_{M,k})}h_{M,k}]^T \quad (2.40)$$

$$\mathbf{g}_j = [\sqrt{l(d_{1,j})}h_{1,j}, \dots, \sqrt{l(d_{M,j})}h_{M,j}]^T \quad (2.41)$$

I vettori dei canali hanno un'importanza fondamentale per lo studio della propagazione favorevole, dato che, come detto in precedenza, essa è legata all'ortogonalità delle direzioni dei canali di servizio. Mediante l'ortogonalità dei canali, difatti, si ha la soppressione delle interferenze. Per avere il fenomeno di propagazione favorevole i due vettori dei canali, \mathbf{g}_k e \mathbf{g}_j , devono essere ortogonali e quindi deve essere valida la seguente condizione [10]:

$$\mathbf{g}_k^H \mathbf{g}_j = \begin{cases} 0 & \text{se } k \neq j \\ \|\mathbf{g}_k\|^2 \neq 0 & \text{se } k = j \end{cases} \quad (2.42)$$

Questa condizione appena descritta, può essere raggiunta, in maniera approssimativa, se il numero di antenne totali M aumenta in modo evidente, tendendo all'infinito. Si ottiene, quindi, la formulazione della condizione di propagazione favorevole per i sistemi cell-free massive MIMO [10]:

$$\frac{\mathbf{g}_k^T \mathbf{g}_j}{\sqrt{\mathbb{E} [\|\mathbf{g}_k\|^2 | \mathbf{d}_k] \mathbb{E} [\|\mathbf{g}_j\|^2 | \mathbf{d}_j]}} \rightarrow 0 \text{ quando } M \rightarrow \infty \quad (2.43)$$

Considerando le definizioni di \mathbf{g}_k e \mathbf{g}_j precedentemente espresse, si ricava il prodotto tra i due:

$$\mathbf{g}_k^H \mathbf{g}_j = N \sum_{i=1}^L \sqrt{l(d_{iN,k})l(d_{iN,j})} h_{iN,k}^H h_{iN,j} = \sum_{m=1}^M \sqrt{l(d_{m,k})l(d_{m,j})} h_{m,k}^H h_{m,j} \quad (2.44)$$

In questo modo, si può sviluppare la seguente formula della condizione di propagazione favorevole:

$$\frac{\sum_{m=1}^M \sqrt{l(d_{m,k})l(d_{m,j})} h_{m,k}^H h_{m,j}}{\sqrt{\mathbb{E} [\|\mathbf{g}_k\|^2 | \mathbf{d}_k] \mathbb{E} [\|\mathbf{g}_j\|^2 | \mathbf{d}_j]}} \rightarrow 0 \text{ quando } M \rightarrow \infty \quad (2.45)$$

Come spiegato in precedenza, nel capitolo sul channel-hardening, il valor medio del guadagno di canale condizionato dal vettore delle distanze si ricava da una somma di variabili aleatorie indipendenti Gamma. Si ricavano, così, le espressioni dei valori medi dei guadagni di canale ($\|\mathbf{g}_k\|^2$ e $\|\mathbf{g}_j\|^2$) condizionati dai vettori delle distanze \mathbf{d}_k e \mathbf{d}_j :

$$\mathbb{E} [\|\mathbf{g}_k\|^2 | \mathbf{d}_k] = N \sum_{i=1}^L l(d_{iN,k}) = \sum_{m=1}^M l(d_{m,k}) \quad (2.46)$$

$$\mathbb{E} [\|\mathbf{g}_j\|^2 | \mathbf{d}_j] = N \sum_{i=1}^L l(d_{iN,j}) = \sum_{m=1}^M l(d_{m,j}) \quad (2.47)$$

Si può affermare che il valor medio della condizione di propagazione favorevole adattata ai sistemi cell-free massive MIMO sia nullo.

$$\mathbb{E} \left[\frac{\mathbf{g}_k^H \mathbf{g}_j}{\sqrt{\mathbb{E} [\|\mathbf{g}_k\|^2 | \mathbf{d}_k] \mathbb{E} [\|\mathbf{g}_j\|^2 | \mathbf{d}_j]}} \middle| \mathbf{d}_k, \mathbf{d}_j \right] = 0 \text{ se } k \neq j \quad (2.48)$$

Per questo motivo, per dimostrare la convergenza a zero del rapporto dell'espressione (2.43) è necessario che la varianza del medesimo rapporto tenda

asintoticamente a zero. Di fondamentale importanza per verificare ed analizzare la propagazione favorevole nei sistemi cell-free massive MIMO è, quindi, la varianza del rapporto indicato alla formula (2.43), cioè:

$$\mathbb{V} \left[\frac{\mathbf{g}_k^H \mathbf{g}_j}{\sqrt{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{d}_k] \mathbb{E}[\|\mathbf{g}_j\|^2|\mathbf{d}_j]}} \mid \mathbf{d}_k, \mathbf{d}_j \right] = \frac{\mathbb{V}[\mathbf{g}_k^H \mathbf{g}_j]}{(\sqrt{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{d}_k] \mathbb{E}[\|\mathbf{g}_j\|^2|\mathbf{d}_j]})^2} \quad (2.49)$$

Si valuta la varianza del prodotto tra i due vettori \mathbf{g}_k^H e \mathbf{g}_j , che si trova al numeratore, come segue:

$$\begin{aligned} \mathbb{V}[\mathbf{g}_k^H \mathbf{g}_j] &= \mathbb{V} \left[\sum_{m=1}^M \sqrt{l(d_{m,k})l(d_{m,j})} h_{m,k}^H h_{m,j} \right] = \\ &= \mathbb{V} \left[N \sum_{i=1}^L \sqrt{l(d_{iN,k})l(d_{iN,j})} h_{iN,k}^H h_{iN,j} \right] = \\ &= N \sum_{i=1}^L l(d_{iN,k})l(d_{iN,j}) \end{aligned} \quad (2.50)$$

L'espressione del denominatore dell'espressione (2.49) viene ricavata considerando il prodotto dei valori medi dei guadagni di canale condizionati dai vettori delle distanze, per cui si ha:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{d}_k] \mathbb{E}[\|\mathbf{g}_j\|^2|\mathbf{d}_j] &= \sum_{m=1}^M l(d_{m,k}) \sum_{m=1}^M l(d_{m,j}) = \\ &= N^2 \sum_{i=1}^L l(d_{iN,k}) \sum_{i=1}^L l(d_{iN,j}) \end{aligned} \quad (2.51)$$

Una volta valutate a livello matematico le espressioni del numeratore e del denominatore, si ottiene la formulazione esatta della varianza del rapporto indicato alla (2.43) che deve tendere asintoticamente a zero per avere la caratteristica di propagazione favorevole, ovvero:

$$\begin{aligned} \mathbb{V} \left[\frac{\mathbf{g}_k^H \mathbf{g}_j}{\sqrt{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{d}_k] \mathbb{E}[\|\mathbf{g}_j\|^2|\mathbf{d}_j]}} \mid \mathbf{d}_k, \mathbf{d}_j \right] &= \frac{\mathbb{V}[\mathbf{g}_k^H \mathbf{g}_j]}{(\sqrt{\mathbb{E}[\|\mathbf{g}_k\|^2|\mathbf{d}_k] \mathbb{E}[\|\mathbf{g}_j\|^2|\mathbf{d}_j]})^2} = \\ &= \frac{N \sum_{i=1}^L l(d_{iN,k})l(d_{iN,j})}{N^2 \sum_{i=1}^L l(d_{iN,k}) \sum_{i=1}^L l(d_{iN,j})} = \frac{\sum_{i=1}^L l(d_{iN,k})l(d_{iN,j})}{N \sum_{i=1}^L l(d_{iN,k}) \sum_{i=1}^L l(d_{iN,j})} \end{aligned} \quad (2.52)$$

Grazie a questa espressione della varianza, è stato possibile definire la misura della propagazione favorevole X_{fp} . Si assume, infatti, che la misura della propagazione favorevole viene identificata dalla seguente espressione:

$$X_{fp} = \frac{\sum_{i=1}^L l(d_{iN,k})l(d_{iN,j})}{N \sum_{i=1}^L l(d_{iN,k}) \sum_{i=1}^L l(d_{iN,j})} \quad (2.53)$$

Come per lo studio del channel-hardening, in uno scenario cell-free massive MIMO, gli utenti possono assumere all'interno della regione posizione aleatorie e, a causa di questo, si avranno vettori delle distanze (\mathbf{d}_k e \mathbf{d}_j) differenti. Avendo diverse realizzazioni dei vettori \mathbf{d}_k e \mathbf{d}_j , occorre calcolare la probabilità che due utenti posizionati in maniera arbitraria abbiano i valori della misura di propagazione favorevole (X_{fp}) inferiore ad una soglia di riferimento, denominata γ , fissata ad un valore pari a 0.01 [12].

In conclusione si stabilisce, quindi, che per valutare ed analizzare il fenomeno di propagazione favorevole in uno scenario cell-free massive MIMO con un determinato numero di AP costituiti da un certo numero di antenne, considerando un ambiente di propagazione non singolare che presenterà un certo esponente di path-loss ed utilizzando studi basati sulla geometria [9], si utilizza la seguente espressione:

$$p_\gamma = \mathbb{P}[X_{fp} \leq \gamma] \quad (2.54)$$

Dove p_γ è la funzione di distribuzione cumulativa di X_{fp} . È proprio attraverso l'analisi degli andamenti delle CDF p_γ , che si raggiungono importanti deduzioni e conclusioni riguardanti l'importante fenomeno di propagazione favorevole sulle reti cell-free massive MIMO.

Capitolo 3

Channel-hardening in diverse tipologie di scenari cell-free massive MIMO

Dopo aver studiato, a livello teorico, le condizioni di channel-hardening, sia per sistemi cellulari massive MIMO, che per sistemi cell-free massive MIMO e dopo aver analizzato come ottenere la formula della misura di channel-hardening mediante studi basati sulla geometria stocastica, ovvero basati sulla disposizione degli AP con un certo numero di antenne, è stato utile sfruttare questi studi al fine di verificare ed analizzare la caratteristica di channel-hardening per diverse tipologie di scenari che possono avere senso pratico.

Per quanto riguarda lo studio del fenomeno channel-hardening è stato opportuno, inoltre, osservare l'incidenza che alcuni parametri hanno su di esso. Per questo motivo, sono state svolte diverse simulazioni riguardanti uno specifico scenario, facendo variare alcuni parametri, per poi verificarne l'influenza che hanno sul channel-hardening e giungere ad alcune conclusioni utili sull'argomento della proprietà del channel-hardening per reti cell-free.

Tutte le analisi effettuate per il channel-hardening dei diversi scenari si basano sulle espressioni (2.24) e (2.25) di misura del channel-hardening, espresse al capitolo precedente.

Per lo studio del channel-hardening di diversi scenari è stato utilizzato il software *Matlab*. Realizzando, infatti, un'opportuna funzione *Matlab* è stato

possibile riprodurre i diversi scenari su cui si è voluto studiare e valutare questa proprietà, mediante il calcolo delle misure di channel-hardening e delle funzioni di distribuzione cumulative, sfruttando la geometria imposta dallo scenario.

3.1 Channel-hardening rete cell-free massive MIMO in una regione circolare

Il primo scenario studiato per l'analisi del channel-hardening è uno scenario che ha come caratteristica quella di avere una regione, su cui possono essere posizionati gli utenti, di geometria circolare. Questa tipologia di scenario, nella realtà, potrebbe corrispondere ad una rete cell-free massive MIMO che ha il compito di fornire un servizio di rete ad alcuni utenti che si trovano, ad esempio, all'interno di uno stadio, di un teatro, di un palazzetto sportivo o di un'arena.

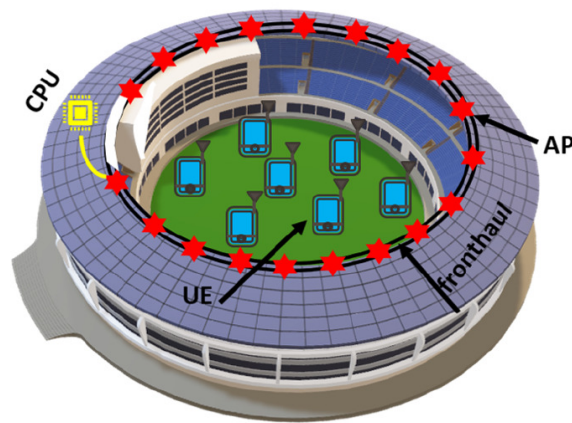


Figura 3.1: Rete cell-free massive MIMO per uno scenario pratico come lo stadio [15].

Come si può osservare anche dalla figura 3.1, questa tipologia di scenario analizzata, presenta una zona circolare in cui vi possono essere disposti gli utenti in modo aleatorio e sul perimetro della regione circolare vi è un numero di AP che possono essere formati da una o più antenne. Gli access-points sono distribuiti e servono congiuntamente gli utenti. Sono, inoltre, collegati ad una CPU che ha il compito di processare, elaborare, codificare e decodificare i dati.

In questo scenario, si prende in considerazione un modello di path-loss non singolare, per avere coerenza con gli studi fatti in precedenza. Si avranno, così, determinati parametri importantissimi all'interno di questo scenario, come:

- esponente di path-loss, identificato con α ;
- numero di AP presenti sul perimetro, identificato con L ;
- numero di antenne presenti su ciascun access-point del perimetro, identificato con N ;
- raggio della regione circolare, identificato con R ;
- numero di utenti posizionati casualmente all'interno della zona circolare, identificato con K ;
- numero di antenne totali presenti nell'area circolare, identificato con M , ottenuto dal prodotto tra gli AP e il numero di antenne per ciascun AP, ovvero $M = LN$;

I parametri appena elencati, sono i parametri che verranno fatti variare durante le simulazioni e, dalla variazione di essi, si può osservare l'incidenza che hanno sul channel-hardening. In seguito è riportata la figura 3.2 dello scenario esaminato con alcuni parametri, ad esempio dieci AP con tre antenne ciascuno e quattro utenti posizionati casualmente all'interno dell'area circolare di raggio R .

Mediante *Matlab*, come detto in precedenza, si è potuto procedere con l'implementazione di una funzione in grado di realizzare la tipologia di scenario appena descritto e, in seguito, effettuare simulazioni variando i precedenti parametri e ricavando le diverse misure di channel-hardening.

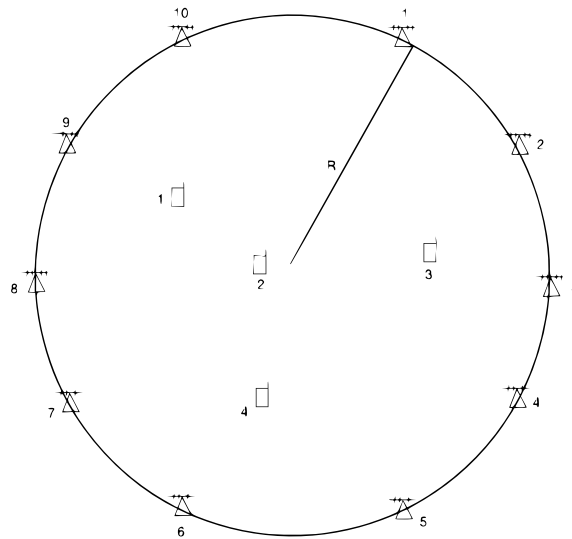


Figura 3.2: Scenario con regione circolare, con 10 AP con 3 antenne l'uno e 4 utenti.

La funzione *Matlab* implementata ha, difatti, come argomenti in ingresso alcuni parametri, precedentemente descritti, ovvero:

- valore del numero di AP presenti sul perimetro;
- valore dell'esponente di path-loss;
- valore del numero di antenne che costituiscono ciascun access-point;
- valore del raggio della regione circolare;
- valore del numero di posizioni arbitrarie che l'utente può assumere dentro l'area.

In uscita della funzione realizzata su *Matlab*, si ha il grafico della riproduzione della regione circolare in un piano cartesiano bidimensionale, con all'interno utenti che possono assumere un determinato numero di posizioni aleatorie e con gli AP distribuiti sul perimetro della regione.

Ad esempio, la regione circolare, con all'interno quattro utenti e dieci AP di tre antenne ciascuno, mostrato alla figura 3.2, viene riprodotta su un piano cartesiano, grazie al codice *Matlab*, come segue in figura 3.3.

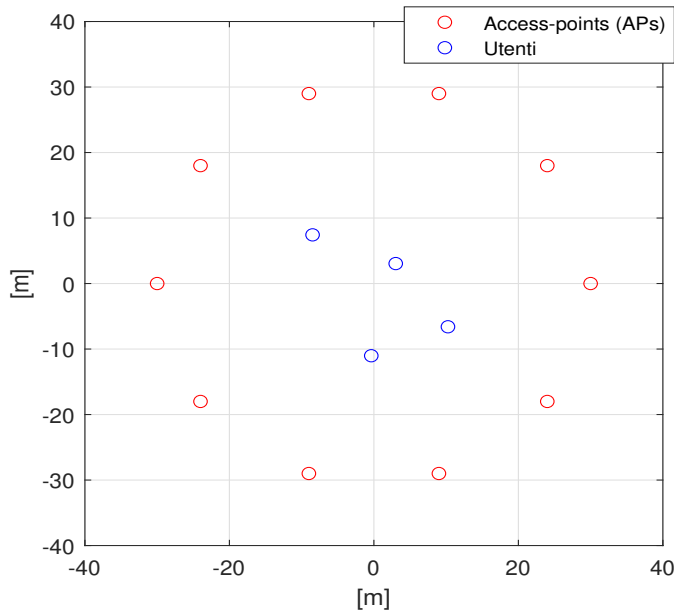


Figura 3.3: Diagramma cartesiano regione circolare, con 10 AP con 3 antenne ciascuno e 4 utenti.

Una volta ottenuta in uscita la rappresentazione su un piano cartesiano dello scenario preso in esame, con i diversi parametri, argomenti di ingresso, si ottengono le coordinate, sia ascisse che ordinate, sia delle posizioni degli AP sul perimetro che delle posizioni arbitrarie degli utenti all'interno dell'area. In questo modo si possono ricavare, da un punto di vista geometrico, le distanze tra gli utenti e tutti gli access-points, dalle quali si ricava il vettore \mathbf{r}_k delle distanze tra AP e utente k -esimo. Il vettore presenta un numero pari a L di elementi, perché vi sono un numero pari ad L di access-points situati sul perimetro.

Come spiegato, anche al capitolo precedente, se in un access-point sono presenti un numero di antenne maggiore ad uno, le distanze tra tutte le antenne appartenenti ad uno stesso access-point ed un utente sono uguali. Gli elementi all'interno del vettore delle distanze \mathbf{r}_k sono ottenuti dall'espressione (2.8).

Per calcolare queste distanze da un punto di vista geometrico, attraverso la rappresentazione dello scenario nel diagramma cartesiano, nella funzione *Matlab* è stato implementato il calcolo della distanza euclidea tra ciascun utente e tutti i singoli AP. Si ha, in questo modo, il vettore delle distanze che, però, subisce un'ulteriore modifica, perché si considera un modello di propagazione di path-loss non singolare. Per questo motivo ciascuna distanza, tra ciascun utente e ciascun access-point, calcolata mediante distanza euclidea utilizzando le coordinate degli AP e degli utenti, viene trasformata dalla formula (2.6).

Il codice *Matlab* realizzato che permette di ottenere quindi una matrice in cui vi sono tutte le distanze tra tutti gli AP e ciascun singolo utente, considerando un modello di path-loss non singolare, è il seguente:

```
for i=1:numero_pos_casuali_utente
    for j=1:numero_APs
        dist_UAPs(i,j) = sqrt(((pos_U_x(i)-pos_x_AP(j)).^2)+
                               ((pos_U_y(i)-pos_y_AP(j)).^2));}
        l_UAPs = min(1,dist_UAPs.^(-alfa));
    end
end
```

Il codice appena mostrato, porta alla formazione di una matrice con un numero di righe pari al numero delle posizioni arbitrarie che possono assumere gli utenti e un numero di colonne pari al numero di AP presenti sul perimetro dell'area. All'interno di ogni cella vi sono le distanze tra ogni posizione dell'utente i -esimo e ogni access-point. Una volta ottenuta la matrice delle distanze, considerando anche il modello di propagazione di path-loss non singolare, si può procedere a ricavare il vettore dei valori delle misure del channel-hardening, denominato X_{ch} .

Per la valutazione del fenomeno di channel-hardening quando si hanno diverse realizzazioni delle distanze occorre avere, come spiegato anche precedentemente, la funzione di distribuzione cumulativa della varianza di guadagno di canale, espressa da un punto di vista geometrico con la formula (2.25). È stato necessario sviluppare, all'interno della funzione *Matlab*, un codice che permetta di acquisire il vettore contenente le misure di channel-hardening per

ciascuna posizione che l'utente può assumere. Il codice in questione, consiste nell'esecuzione del calcolo delle misure di channel-hardening. Per svolgere il calcolo delle misure di channel-hardening X_{ch} si ricavano, in primo luogo, i valori della sommatoria relativa a tutti gli AP, delle distanze al quadrato tra una specifica posizione di un utente e tra la posizione di tutti gli access-points, ovvero:

$$\sum_{i=1}^L l^2(r_i) \quad (3.1)$$

Questi valori si ottengono mediante il seguente codice *Matlab*:

```
Matrix_distanzeUAP_alquadrato = 1_UAPs.^2;
Num_Xch = sum(Matrix_distanzeUAP_alquadrato,2);
```

In secondo luogo, si calcolano i valori della sommatoria al quadrato, eseguita sempre su tutti gli AP, delle distanze formate dall'utente situato in un determinato punto del piano cartesiano e dagli access-points che si trovano sul perimetro, ovvero:

$$\left(\sum_{i=1}^L l(r_i) \right)^2 \quad (3.2)$$

Questi valori si ottengono grazie al seguente codice *Matlab*:

```
Somma_distanze_UAPs = sum(1_UAPs,2);
Den_Xch = numero_antenne_xAP.*(Somma_distanze_UAPs.^2);
```

A questo punto si è proceduto implementando, attraverso l'opportuno codice *Matlab*, presente in seguito, il calcolo di X_{ch} facendo il rapporto in cui al numeratore si ha il vettore della sommatoria sul numero totale di AP delle distanze al quadrato, tra le posizioni dell'utente e tra le posizioni degli AP (3.1) e dove al denominatore vi sono i valori della sommatoria su tutti gli AP delle distanze tra l'utente in un certo punto della regione e AP elevata al quadrato (3.2) moltiplicata per il numero di antenne presenti per ciascun access-point. Il codice *Matlab* del calcolo del vettore delle misure X_{ch} è:

```
Xch = Num_Xch./Den_Xch;
```

Infine, una volta ottenuto il vettore delle misure di channel-hardening si utilizza il codice *Matlab*, mostrato in seguito, che permette di ricavare la funzione di distribuzione cumulativa empirica del vettore X_{ch} . Il codice *Matlab* per ottenere i valori ed il grafico della CDF del vettore delle misure di channel-hardening è:

```
cdfplot(Xch);
```

Il grafico della CDF del vettore delle misure di channel-hardening è di estrema importanza per effettuare un'analisi ed una valutazione sulla caratteristica del channel-hardening e su come questa proprietà varia, apportando modifiche ai parametri che sono argomenti di ingresso della funzione realizzata.

Per raggiungere alcune conclusioni sul channel-hardening per reti cell-free massive MIMO in uno scenario circolare è stato opportuno, quindi, svolgere diverse simulazioni della funzione *Matlab* appena descritta. Ogni simulazione, infatti, è caratterizzata da determinati parametri e porta ad acquisire informazioni riguardanti lo studio del channel-hardening su una rete senza celle per uno scenario di una regione di forma circolare.

Come prima simulazione effettuata, si è trattato di studiare il channel-hardening riferito ad un caso di estrema semplicità, ovvero uno scenario con area circolare di raggio di trenta metri, che oltre ad avere un numero di AP distribuiti sul perimetro, presenta un unico utente situato esattamente al centro. In questo scenario, inoltre, si considera un ambiente di propagazione caratterizzato da un esponente di path-loss $\alpha = 2$.

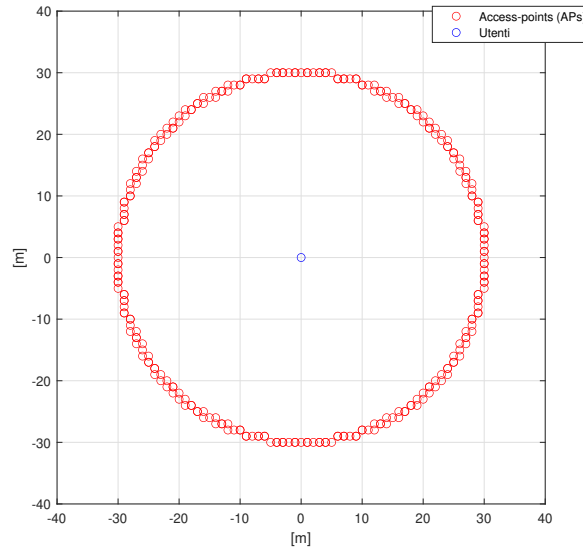


Figura 3.4: Scenario con regione circolare di raggio 30m, con 300 AP su perimetro a singola antenna, con un utente centrale ed $\alpha = 2$.

Questo caso semplificato non può essere considerato un caso realistico, ma solamente un punto di partenza per le ulteriori simulazioni e per giungere a conclusioni di base che sono state poi approfondite per studiare meglio il fenomeno di channel-hardening in reti senza celle.

Viene riportata, in figura 3.4, la rappresentazione del diagramma cartesiano, realizzato in *Matlab*, che mostra lo scenario riguardante, appunto, questa prima simulazione. Avendo un utente situato esattamente al centro della regione circolare, comporta, come conseguenza, il fatto che tutte le distanze tra utente e AP siano esattamente uguali e siano pari alla dimensione del raggio. A causa di questo, il vettore \mathbf{r}_k delle distanze presenta tutti gli stessi elementi e, quindi, la formula matematica della misura di channel-hardening X_{ch} è soggetta ad una semplificazione matematica, ovvero:

$$X_{ch} = \frac{\sum_{i=1}^L l^2(r_i)}{N \left(\sum_{i=1}^L l(r_i) \right)^2} = \frac{Ll^2(r_i)}{N(Ll(r_i))^2} = \frac{Ll^2(r_i)}{NL^2l^2(r_i)} = \frac{1}{NL} \quad (3.3)$$

Da questa formula (3.3) della misura di channel-hardening, semplificata, si evince come, in questo specifico caso, gli unici fattori che influenzano la misura X_{ch} siano il numero di AP presenti sul perimetro ed il numero di antenne di ciascun AP, cioè il numero totale di antenne presenti nella regione.

Si può concludere, infatti, svolgendo diverse simulazioni di questa tipologia di scenario che, aumentando la quantità di antenne totali la varianza del guadagno di canale tende diminuire e tende maggiormente a zero, favorendo la proprietà di channel-hardening. Altri parametri come raggio dell'area ed esponente di path-loss α , in questo caso non incidono sul fenomeno di channel-hardening. Queste conclusioni trovano coerenza, a livello matematico, con la formula semplificata di X_{ch} (3.3). In questo caso preso in esame non occorre valutare la CDF in quanto il valore della misura di channel-hardening (X_{ch}) non è una variabile aleatoria, perché l'utente mantiene una posizione fissa all'interno dell'area.

Sono stati riportati, quindi, in tabella 3.1, i valori delle misure di channel-hardening, nel caso specifico in cui si ha un utente posizionato al centro della zona circolare, considerando un esponente di path-loss α fisso ad un valore pari a due, un raggio della regione fissato a trenta metri e facendo variare sia il numero di access-points sul perimetro (L), che il numero di antenne per ciascun AP (N).

Numero AP (L)	Numero antenne per AP (N)	Numero antenne totali (M)	X_{ch}
50	1	50	0.02
80	1	80	0.0125
100	1	100	0.01
150	1	150	0.007
200	1	200	0.005
50	2	100	0.01
80	2	160	0.0063
100	2	200	0.005
150	2	300	0.0033
200	2	400	0.0025

Tabella 3.1: Valori X_{ch} di uno scenario con area circolare di raggio $30m$, esponente di path-loss $\alpha = 2$ e utente al centro, variando i parametri numero di AP e numero di antenne per AP.

Da questa prima simulazione si è poi proceduto con un'ulteriore analisi, ovvero quella di verificare come si modificano i valori delle misure di channel-hardening quando l'utente si sposta dal centro verso il perimetro della superficie circolare. Sono state, quindi, eseguite alcune simulazioni mantenendo i parametri di ingresso alla funzione (numero di AP, numero di antenne per AP, esponente di path-loss, raggio della regione) fissi e variando solamente la posizione dell'utente, avvicinandolo al bordo della regione. In queste tipologie di simulazioni non si può ricorrere alla semplificazione utilizzata in precedenza, in quanto le distanze dell'utente rispetto agli AP sono diverse. Per questo si utilizza la definizione matematica della misura di channel-hardening vista nell'espressione (2.25). In seguito viene riportata la tabella 3.2 dei diversi valori di X_{ch} delle varie simulazioni effettuate modificando la posizione dell'utente, allontanandolo dal centro e avvicinandolo al perimetro.

Numero AP (L)	Coordinate utente	X_{ch}
100	[0,0]	0.010
100	[5,5]	0.011
100	[10,10]	0.016
100	[0,27]	0.094
100	[20,20]	0.134

Tabella 3.2: Valori X_{ch} di uno scenario con area circolare di raggio $30m$, con 100AP a singola antenna, con esponente di path-loss $\alpha = 2$, variando la posizione dell'utente e mantenendo fissi tutti gli altri argomenti in ingresso.

Dai risultati ottenuti si evince che se l'utente è in posizione centrale, a parità di numero di antenne totali presenti sull'area, a parità di esponente di path-loss e di raggio della regione, si ha un effetto di channel-hardening migliore, in quanto la variazione di guadagno di canale ha valori più piccoli.

Successivamente sono state fatte ulteriori simulazioni dove lo scenario mostra casi sicuramente più simili alla realtà. Per una rete cell-free di uno scenario realistico, infatti, gli utenti si possono trovare in diverse posizioni casuali all'interno dell'area di interesse. Questo scenario, più complesso e più simile alla realtà, con gli utenti in posizioni arbitrarie viene riprodotto dal diagramma cartesiano, riportato in figura 3.5, in uscita dalla funzione *Matlab*.

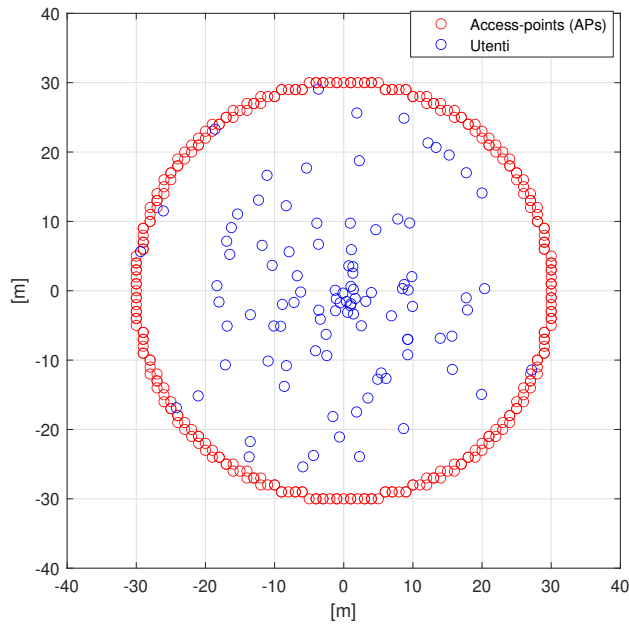


Figura 3.5: Scenario con regione circolare, con 300 AP su perimetro a singola antenna e utenti che possono assumere un centinaio di posizioni arbitrarie.

Sono stati, quindi, generati, mediante la funzione *Matlab*, descritta in precedenza, i grafici della CDF del vettore delle misure di channel-hardening, in cui gli utenti assumono un centinaio di posizioni arbitrarie all'interno della regione presa in esame. La CDF è stata calcolata attraverso la formula (2.25). Si considera un valore di riferimento θ pari a 0.01, per il quale al di sopra di esso non si ha channel-hardening. I grafici generati riguardano simulazioni dello scenario con regione circolare in cui sono stati fatti variare determinati parametri posti in ingresso (numero di AP sul perimetro, numero di antenne per AP ed esponente di path-loss α) per stabilire ed osservare le conseguenze che essi apportano al fenomeno channel-hardening.

Dalla formula matematica, è evidente, come il parametro del numero delle antenne totali, presenti sul perimetro, incida particolarmente sulle misure del channel-hardening, motivo per il quale sono state effettuate le simulazioni variando il parametro in ingresso del numero totale di antenne (M), lasciando invariati altri argomenti in ingresso, come esponente di path-loss e raggio. La CDF empirica delle misure X_{ch} , per queste simulazioni, si costruisce avendo una disposizione aleatoria degli utenti. Si ha una stima della vera CDF, una CDF empirica, perché è stato utilizzato il metodo di Monte Carlo per ricavare il valore di p_θ . Non si ha la vera CDF, ma semplicemente una stima della vera CDF, a causa del fatto che il numero di iterazioni di Monte Carlo è comunque limitato.

In seguito sono riportati i valori di p_θ variando il parametro del numero di antenne totali (M), con una tipologia di scenario circolare, con raggio pari a trenta metri, con esponente di path-loss $\alpha = 2$ e con posizioni arbitrarie degli utenti pari a cento. I risultati che si osservano in tabella 3.3, sono stati costruiti grazie alla generazione dei grafici degli andamenti della CDF p_θ , mediante *Matlab*.

Numero antenne toali (M)	p_θ
300	75%
500	82%
800	88%
1000	90%
1500	94%

Tabella 3.3: Valori di p_θ al variare del numero di antenne totali con esponente di path-loss pari a 2.

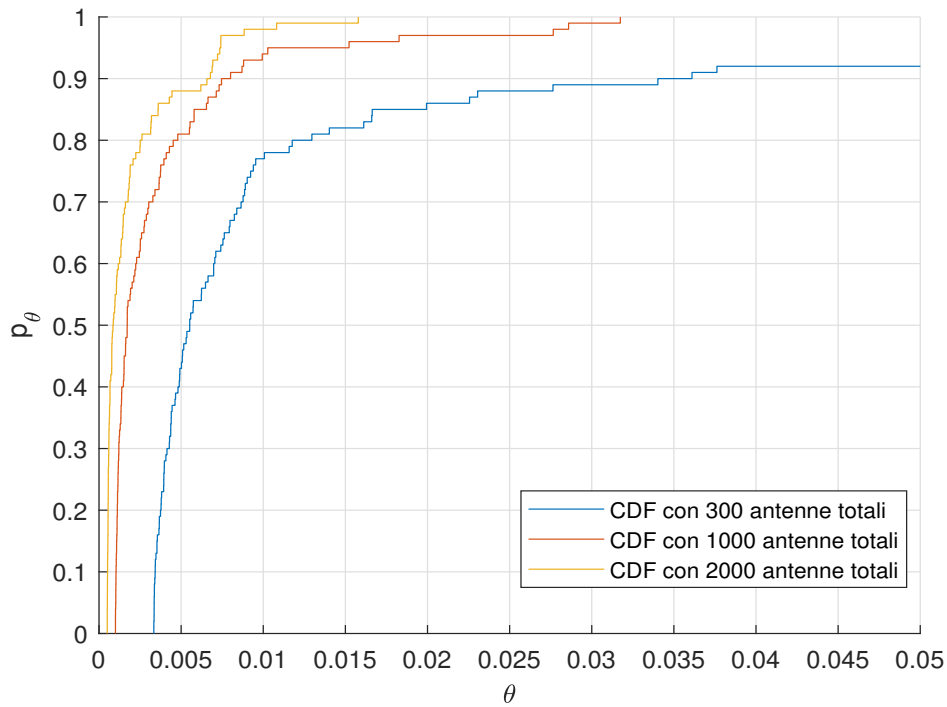


Figura 3.6: Andamenti delle CDF con 300, 1000 e 2000 antenne totali di uno scenario con regione circolare di raggio 30m ed esponente di path-loss pari a 2.

Viene, infatti, mostrata in figura 3.6 la rappresentazione grafica, ottenuta con la funzione *Matlab* delle tre diverse curve della CDF p_θ , relative alle misure di channel-hardening facendo variare il parametro del numero delle antenne totali (M). Nell'andamento della prima curva di p_θ si ha un numero di antenne totali pari a 300, in quello della seconda pari ad 1000, mentre nell'ultimo pari a 2000.

Per verificare, l'influenza sul channel-hardening di un altro parametro come l'esponente di path-loss α , sono state eseguite ulteriori simulazioni con gli stessi parametri utilizzati nella tabella precedente, ma con un esponente di path-loss diverso, ovvero:

- raggio area $R = 30m$;
- esponente di path-loss $\alpha = 3$;
- posizioni casuali utente pari a 100.

Si ottengono, così, in tabella 3.4, i seguenti risultati:

Numero antenne totali (M)	p_θ
300	58%
500	64%
800	79%
1000	83%
1500	87%

Tabella 3.4: Valori di p_θ al variare del numero di antenne totali con esponente di path-loss pari a 3.

È stata realizzata anche la rappresentazione grafica, presente in figura 3.7, delle tre differenti curve della CDF p_θ , relative alle misure di channel-hardening al variare del numero di antenne totali (M) con un esponente di path-loss pari a tre. Le CDF fornite riguardano uno scenario con un numero di antenne pari a 300, un numero di antenne pari a 800 e un numero di antenne pari a 1500, entrambi con esponente di path-loss pari a tre.

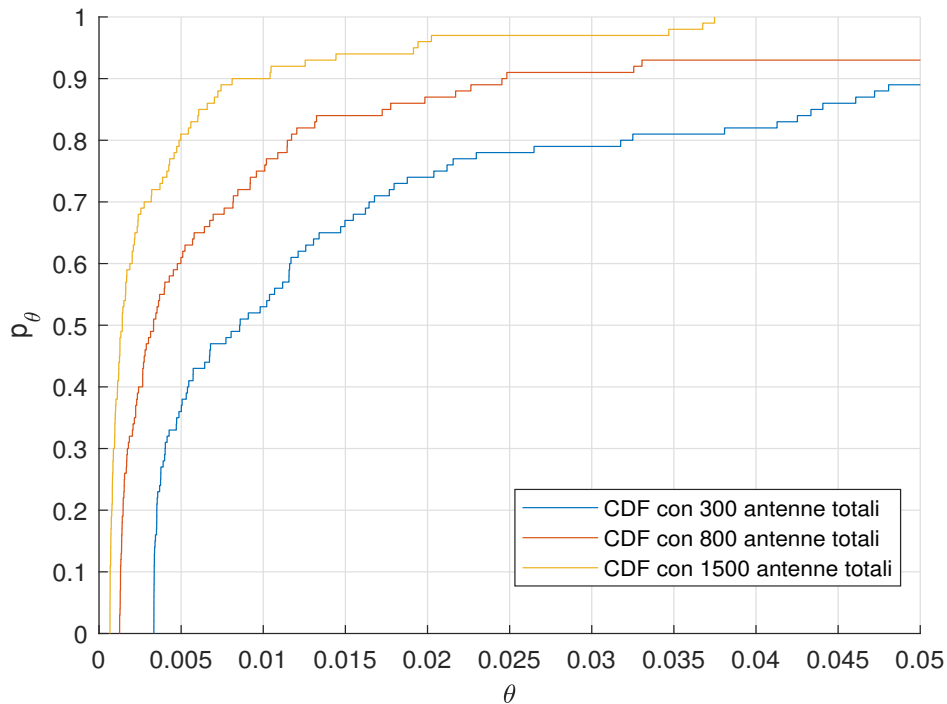


Figura 3.7: Andamenti delle CDF tipologia di scenario con area circolare di raggio $30m$, con 300, 800 e 1500 antenne totali ed esponente di path-loss pari a 3.

Dai risultati ricavati fino a questo momento, si può giungere a due importanti conclusioni. Una conclusione è relativa al parametro del numero di antenne totali, mentre l'altra all'ambiente di propagazione dello scenario, cioè al parametro dell'esponente di path-loss.

Si può affermare, infatti, grazie alle simulazioni eseguite, che il fenomeno di channel-hardening in una rete cell-free massive MIMO di un'area di forma circolare è migliore con un numero più alto di antenne e con un esponente di path-loss relativamente piccolo.

È chiaro, anche dalla formula matematica, che ricava le misure di channel-hardening basata sulla geometria stocastica, come incida notevolmente sul channel-hardening il numero di antenne totali presenti nella regione studiata.

Numero di AP (L)	50	50	50	50	100	100	100	100
Numero antenne per AP (N)	4	5	6	10	4	5	6	10
p_θ	59.2%	68.2%	75%	82%	77%	82%	85%	91%

Tabella 3.5: Valori di p_θ al variare del numero di AP e del numero di antenne per AP di uno scenario con area circolare di raggio di $30m$ ed esponente di path-loss pari a 2, in cui l'utente può assumere un centinaio di posizioni aleatorie.

L'influenza sul channel-hardening del numero di antenne totale è stata analizzata sia con le variazioni dell'argomento in ingresso numero di AP (L), sia variando il numero di antenne appartenenti a ciascun AP (N). In tabella 3.5 sono mostrati i risultati che mettono a confronto le varie funzioni di distribuzione cumulativa di una tipologia di scenario di regione circolare, sia al variare del numero di AP che al variare del numero delle antenne per singolo AP, tenendo costanti tutti gli altri argomenti in ingresso. In seguito, in figura 3.8, si possono osservare gli andamenti delle tre CDF p_θ al variare del numero di antenne per ciascun AP. Si considerano AP con due antenne, con cinque antenne e con dieci antenne, mantenendo fisso il numero di AP sul perimetro al valore di 100, con esponente di path-loss pari a due e raggio pari a trenta metri.

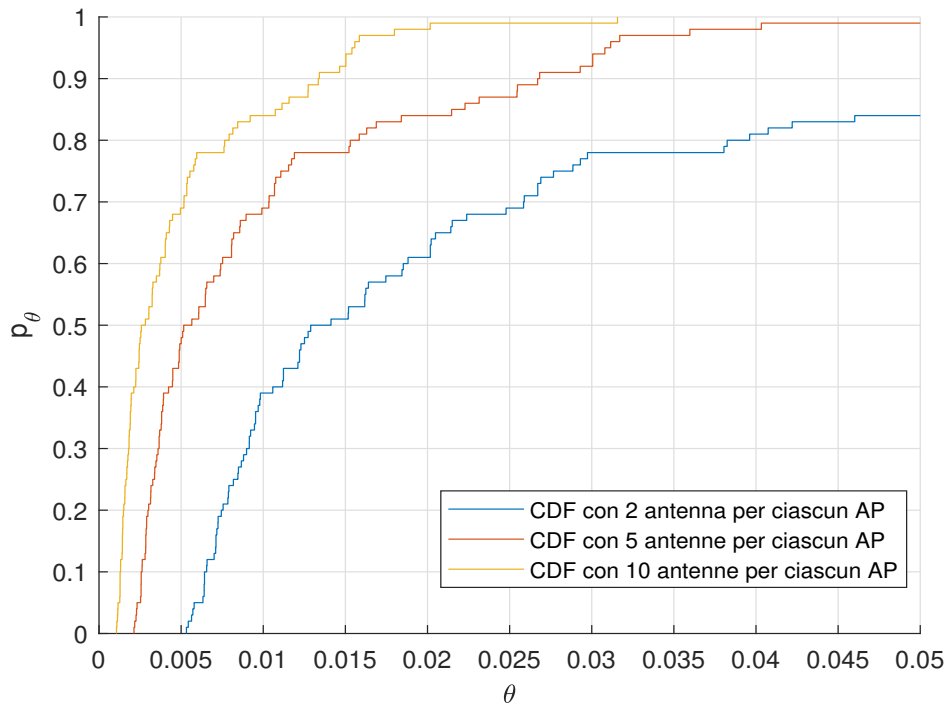


Figura 3.8: Andamenti delle CDF di uno scenario con regione circolare con 2, 5 e 10 antenne per AP, con 100 AP ed esponente di path-loss pari a 2.

Dalla panoramica di tutti i valori, legati alle misure di channel-hardening, ricavati dalle simulazioni che differiscono per alcuni parametri, argomenti di ingresso, è stato possibile giungere ad importanti osservazioni sullo studio del channel-hardening, basato sulla geometria stocastica, su un sistema cell-free massive MIMO di uno scenario di una regione circolare. Le conclusioni raggiunte sono le seguenti:

1. nel momento in cui si ha un utente ed esso si trova esattamente al centro della regione, tutti i parametri che non siano numero di AP e numero di antenne per AP non influiscono sulla proprietà di channel-hardening;
2. aumentando il numero di antenne totali ($M = LN$), presenti nella regione, si tende a migliorare il fenomeno di channel-hardening. Di conseguenza anche aumentando solamente il numero di AP sul bordo della regione o solamente il numero di antenne per ciascun AP si ottiene lo stesso risultato;

3. anche l'ambiente di propagazione influenza il channel-hardening. L'esponente di path-loss α , infatti, deve essere relativamente piccolo, ma comunque significativo e realistico;
4. in uno scenario con regione circolare, se gli utenti sono concentrati prevalentemente al centro dell'area questo favorisce la proprietà di channel-hardening, piuttosto che se gli utenti sono concentrati in tutta l'area, trovandosi, quindi, anche vicino ai bordi della regione. Questa deduzione è osservabile alla figura sottostante 3.9.

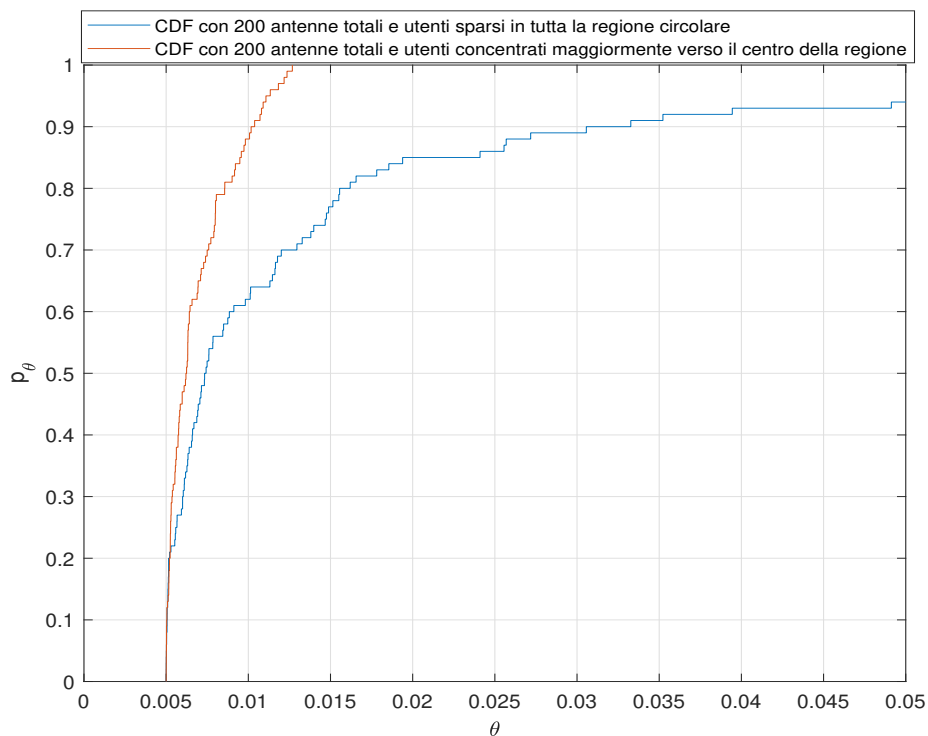


Figura 3.9: Andamenti di due differenti CDF di uno scenario con regione circolare di raggio $30m$, con 200 antenne totali, esponente di path-loss pari a 2, in cui gli utenti in un caso sono posizionati arbitrariamente in tutta la regione e nell'altro caso si trovano più concentrati verso il centro della regione.

3.2 Channel-hardening rete cell-free massive MIMO in un ambiente di forma quadrata

Uno degli obiettivi di questo lavoro di tesi è quello di risolvere, appunto, i dubbi, precedentemente espressi, sulla caratteristica del channel-hardening legato a reti cell-free massive MIMO utilizzate per scenari che rappresentano la realtà.

Un altro degli scenari in cui è sicuramente di grande interesse lo studio del channel-hardening per reti senza celle, oltre a quello analizzato in precedenza, è quello di un ambiente che rappresenta una stanza quadrata in cui gli access-points sono posizionati sul perimetro e gli utenti si trovano all'interno della stanza.

Si è proceduto, quindi, ad analizzare e studiare anche la proprietà di channel-hardening per reti cell-free in questa tipologia di ambiente, utilizzando, comunque, un approccio basato sulla geometria. La formula matematica per l'analisi di questo tipo di scenario è la (2.25), la stessa utilizzata per lo scenario con ambiente circolare. La tipologia di scenario di un ambiente di forma quadrata, soggetta allo studio del fenomeno di channel-hardening, è raffigurata in figura 3.10 come segue:

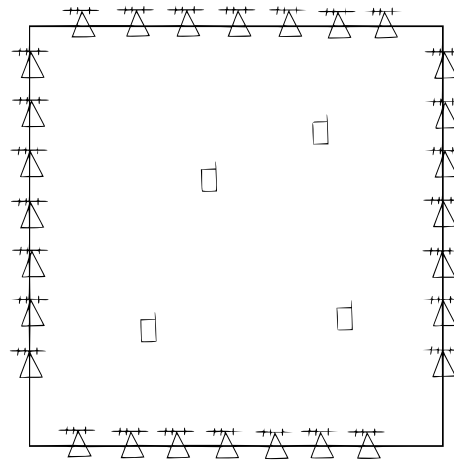


Figura 3.10: Scenario di un ambiente di forma quadrata con AP sul perimetro e utenti situati all'interno.

L'ambiente preso in esame presenta le seguenti caratteristiche che possono subire modifiche:

- esponente di path-loss, denominato con α ;
- access-points situati sui lati della regione. Numero di AP identificato con L ;
- ciascun access-point presente sul perimetro è costituito da un numero pari ad N di antenne;
- dimensione del lato della regione;
- utenti che possono assumere diverse posizioni aleatorie all'interno della regione;
- numero totale di antenne presenti in questo tipo di ambiente, identificato con M , in cui $M = LN$.

Per questa tipologia di scenario è stata utilizzata la medesima funzione *Matlab* descritta in precedenza.

Il codice della funzione, difatti, è stato progettato in modo tale che vi è la possibilità di riprodurre un ambiente di dimensioni quadrate, oltre che una regione circolare.

Qualora si scegliesse di valutare il channel-hardening, in una regione di forma quadrata l'uscita della funzione *Matlab* risulta essere il diagramma cartesiano in grado di identificare le posizioni geometriche degli AP e degli utenti come mostrato in figura 3.11.

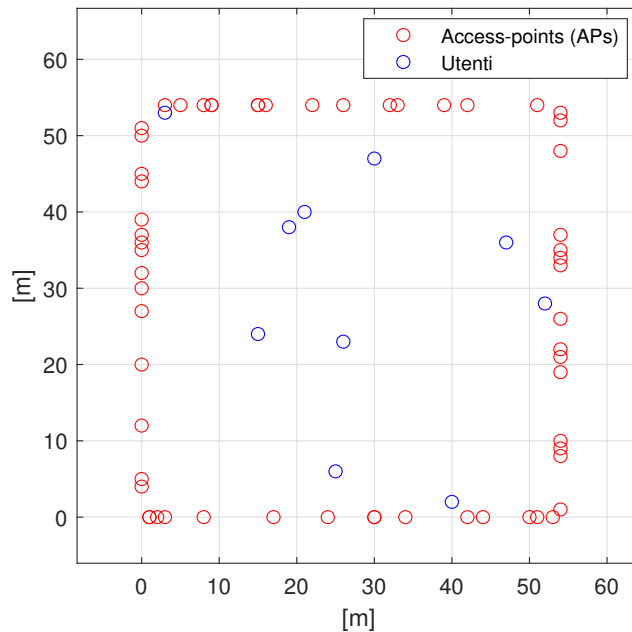


Figura 3.11: Diagramma cartesiano scenario di una regione quadrata con AP sul perimetro e utenti situati all'interno dell'area.

Essendo la stessa funzione *Matlab*, spiegata al capitolo 3.1, la funzione che permette di studiare il channel-hardening in questo ulteriore tipo di scenario, una volta ottenuto il grafico cartesiano dell'ambiente con determinati parametri in ingresso, essa procede con il calcolo del vettore delle distanze tra utenti e AP, considerando il modello di path-loss non singolare, con il calcolo delle misure di channel-hardening e con la realizzazione della CDF delle misure di channel-hardening. Sfruttando questa funzione, anche per questa tipologia di scenario, sono state fatte diverse simulazioni, per studiare il fenomeno di channel-hardening, modificando gli argomenti in ingresso come numero di AP presenti (L), numero di antenne per ciascun AP (N), esponente di path-loss α .

Il modo in cui si è deciso di procedere con le simulazioni su questa tipologia di ambiente è il medesimo di quello usato per l'analisi di channel-hardening per reti cell-free nello scenario con regione circolare.

Si è così studiato, in un primo momento, il channel-hardening relativo al caso più semplice in cui vi è un utente al centro della regione.

La prima evidente differenza rispetto al caso analizzato al capitolo precedente, in cui la regione risulta essere circolare, è che nella formula della misura di channel-hardening X_{ch} non si può eseguire la semplificazione descritta al capitolo precedente (3.3) quando l'utente si trova al centro della regione. A causa di questo i risultati del fenomeno di channel-hardening, per questa prima simulazione, sono influenzati sia dal numero totale di antenne presenti sul perimetro della regione (identificato con $M = LN$), come nello scenario di area circolare, ma anche, dall'esponente di path-loss α .

In seguito, nella tabella 3.6, vi sono riportati i risultati delle misure di channel-hardening, facendo variare sia il numero di AP presenti sul perimetro (L), che il numero di antenne per ciascun AP (N), ottenuti dalla simulazione del caso più semplice legato ad un ambiente di dimensioni quadrate, con lato di $53,17m$, con esponente di path-loss pari a due e nel momento in cui vi è un utente posizionato al centro della zona. Il diagramma cartesiano, in uscita della funzione *Matlab*, della tipologia di scenario che permette di raggiungere i risultati alla tabella 3.6 è rappresentato in figura 3.12.

Numero AP (L)	Numero antenne per AP (N)	Numero antenne totali (M)	X_{ch}
60	1	60	0.0174
80	1	80	0.0131
100	1	100	0.0104
200	1	200	0.0052
60	2	120	0.0087
80	2	160	0.0065
100	2	200	0.0053
200	2	400	0.0026

Tabella 3.6: Valori di X_{ch} al variare del numero di AP e del numero di antenne per AP in una regione quadrata con lato di $53,17m$, con un utente al centro della regione ed $\alpha = 2$.

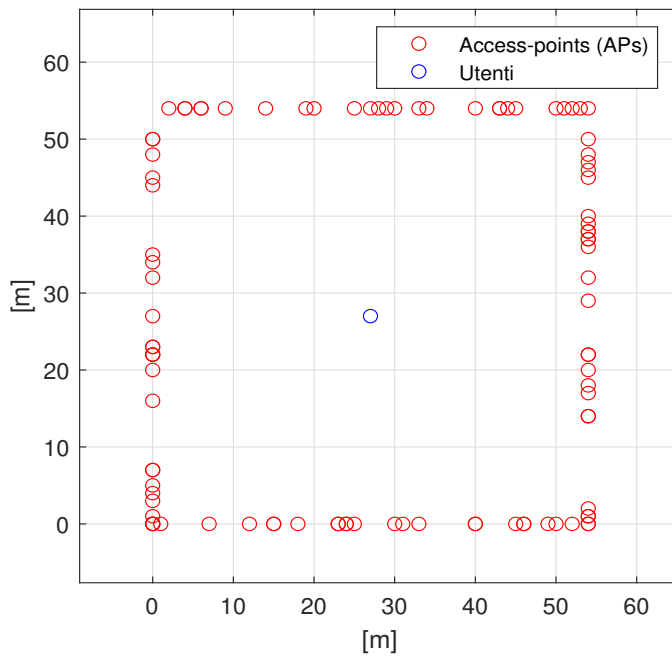


Figura 3.12: Diagramma cartesiano regione quadrata di lato di $53,17m$, con 100 AP sul perimetro a singola antenna e un utente al centro della regione.

Numero AP (L)	X_{ch}
60	0.0183
80	0.0138
100	0.0109
200	0.0055

Tabella 3.7: Valori di X_{ch} al variare del numero di AP a singola antenna in una regione quadrata con lato di $53,17m$, con un utente al suo interno ed $\alpha=3$.

Nella tabella 3.7 viene mostrata l'influenza sulle misure del channel-hardening del parametro esponente di path-loss α , utilizzando lo stesso scenario con parametri uguali a quello appena analizzato, ma modificando, solamente, il valore dell'esponente di path-loss, che questa volta assume valore pari a tre. Da questi primi risultati si può stabilire che, anche nel caso di rete senza celle massive MIMO della regione di dimensioni quadrate con un singolo utente centrale, il fenomeno di channel-hardening è migliore quando il numero totale di antenne presenti sul perimetro aumenta. Il numero di antenne totali (M) può aumentare grazie ad un incremento del numero di AP (L) o del numero di antenne presenti in ciascun AP (N).

Si conclude, inoltre, che l'aumento del valore dell'esponente di path-loss da due a tre, in questa tipologia di scenario analizzata, con un utente posizionato al centro, comporta il fatto che il valore X_{ch} tende leggermente meno allo zero, quindi la proprietà di channel-hardening peggiora.

Come nella regione circolare si è proseguito poi con l'analisi di come incide la posizione dell'utente sul channel-hardening (nel caso semplificato con solamente un utente all'interno della regione esaminata).

È stata quindi realizzata la tabella in cui vi sono i valori delle misure di channel-hardening (X_{ch}), modificando la posizione dell'utente, avvicinandolo man mano al perimetro.

Numero AP (L)	Coordinate utente	X_{ch}
100	[26,5;26,5]	0.0109
100	[44;44]	0.0148
100	[49;49]	0.0298
100	[52;52]	0.1396

Tabella 3.8: Valori X_{ch} scenario con area quadrata variando la posizione dell'utente e mantenendo fissi tutti gli altri argomenti in ingresso, ovvero lato di $53,17m$, esponente di path-loss $\alpha = 2$ e numero di AP a singola antenna.

Si evince, anche per uno scenario in cui si ha una geometria dell'area quadrata, che l'utente che tende ad allontanarsi dal centro non rappresenta la condizione ottimale per avere la proprietà di channel-hardening. La condizione di channel-hardening, infatti, si ottiene maggiormente con utenti che si trovano al centro della zona presa in esame per la rete cell-free.

Dal caso di estrema semplicità, ovvero con un singolo utente all'interno della regione quadrata, sono state poi eseguite le simulazioni in cui l'utente può assumere un centinaio di posizioni aleatorie all'interno di questa regione con lato fissato sempre $53,17m$. La riproduzione dello scenario è mostrata nella figura seguente 3.13.

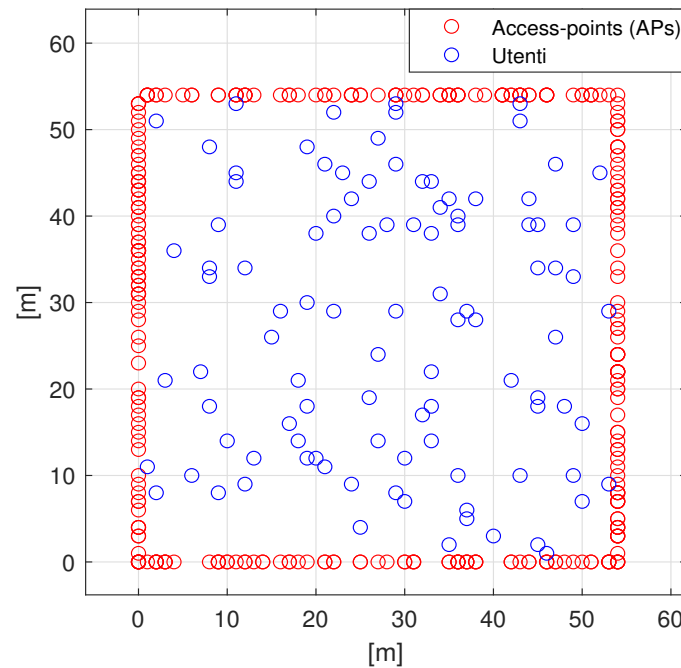


Figura 3.13: Diagramma cartesiano regione quadrata di lato di $53,17m$, con 300 AP sul perimetro a singola antenna e utenti che possono assumere 100 posizioni arbitrarie.

Anche in questo caso, come lo scenario precedente, è stata ricavata una stima della vera CDF, la CDF empirica, eseguendo un numero, comunque limitato, di iterazioni per il metodo di Monte Carlo, mantenendo i parametri di ingresso costanti, per valutare il valore di p_θ . Il valore di p_θ viene valutato per differenti simulazioni:

1. simulazione dove varia il numero di antenne totali (M) e si mantiene fisso l'esponente di path-loss con valore $\alpha = 2$, come si vede in tabella 3.9;
2. simulazione in cui viene modificato il parametro esponente di path-loss da un valore pari a due ad un valore pari a tre, mostrata in tabella 3.10;
3. simulazione in cui cambia sia il numero di AP, che il numero di antenne per ciascun AP (N), visualizzabile in tabella 3.11.

Numero antenne totali (M)	p_θ
300	50%
500	66%
800	80%
1000	87%
1500	89%

Tabella 3.9: Valori di p_θ di uno scenario di una regione quadrata di lato pari a $53,17m$, al variare del numero di antenne totali con esponente di path-loss pari a 2.

Numero antenne totali (M)	p_θ
300	26%
500	46%
800	62%
1000	68%
1500	81%

Tabella 3.10: Valori di p_θ di uno scenario di una regione quadrata di lato pari a $53,17m$ al variare del numero di antenne totali con esponente di path-loss pari a 3.

Numero di AP (L)	60	60	60	100	100	100
Numero antenne per AP (N)	2	5	10	2	5	10
p_θ	10%	50%	75%	30%	66%	87%

Tabella 3.11: Valori di p_θ di uno scenario di una regione quadrata, di lato pari a $53,17m$ al variare del numero di AP e del numero di antenne per AP e con esponente di path-loss pari a 2.

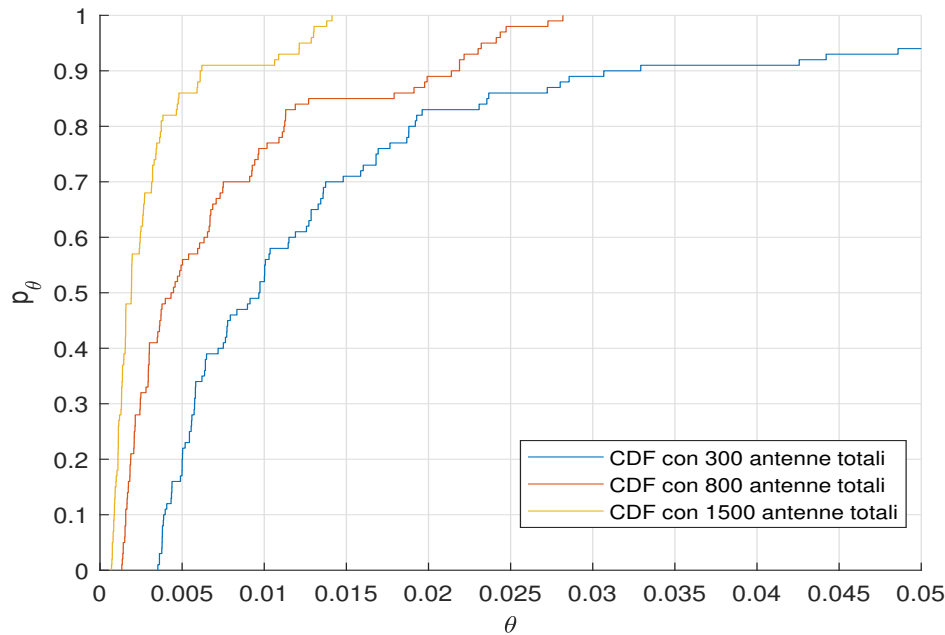


Figura 3.14: Andamenti p_θ con 300, 800 e 1500 antenne totali, in una stanza quadrata di lato pari a $53,17m$ in cui l'utente può assumere un centinaio di posizioni casuali ed esponente di path-loss $\alpha = 2$.

In figura 3.14, è stato riportato il grafico realizzato, attraverso *Matlab*, in cui vi sono i tre andamenti della CDF p_θ dello scenario della regione quadrata, con un centinaio di posizioni assumibili dagli utenti in modo random e con esponente di path-loss pari a due. I tre andamenti delle CDF si riferiscono ai tre casi, in cui in un caso si hanno 300 antenne totali, in un altro 800 antenne e in un ultimo caso 1500 antenne totali. Lo stesso grafico delle tre curve della CDF p_θ al variare del numero di antenne totali è stato costruito anche per le simulazioni fatte con esponente di path-loss pari a tre ed è riportato in figura 3.15. È stato realizzato, anche il grafico, mostrato in figura 3.16 delle tre curve degli andamenti delle funzioni di distribuzione cumulative p_θ relative ai tre casi in cui si hanno access-points con due antenne, access-points con cinque antenne e infine con dieci antenne, tenendo fisso il numero totale di AP a 100.

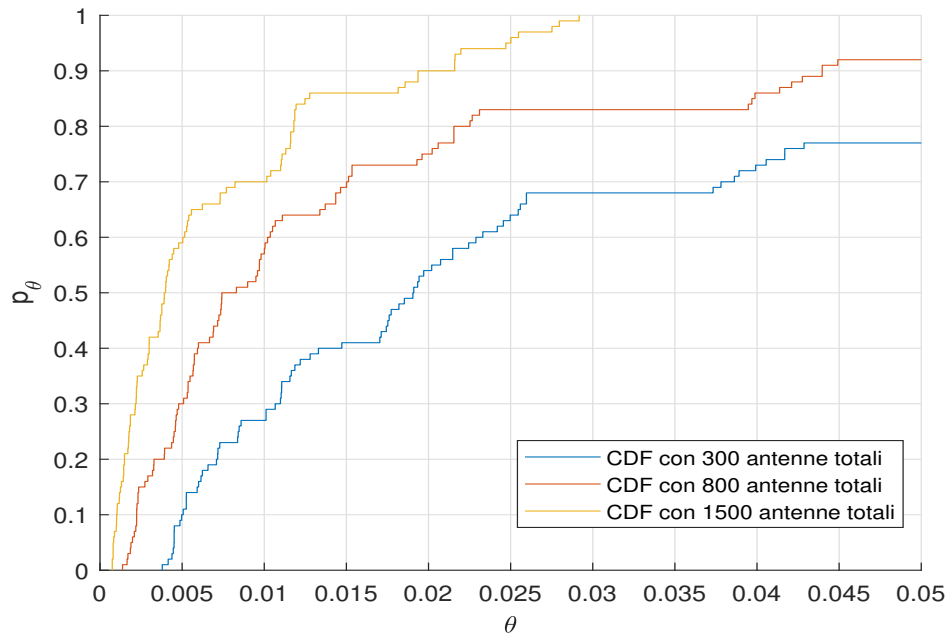


Figura 3.15: Andamenti p_θ con 300, 800 e 1500 antenne totali, in una regione quadrata, di lato pari a $53,17m$ in cui l'utente può assumere un centinaio di posizioni casuali ed esponente di path-loss $\alpha = 3$.

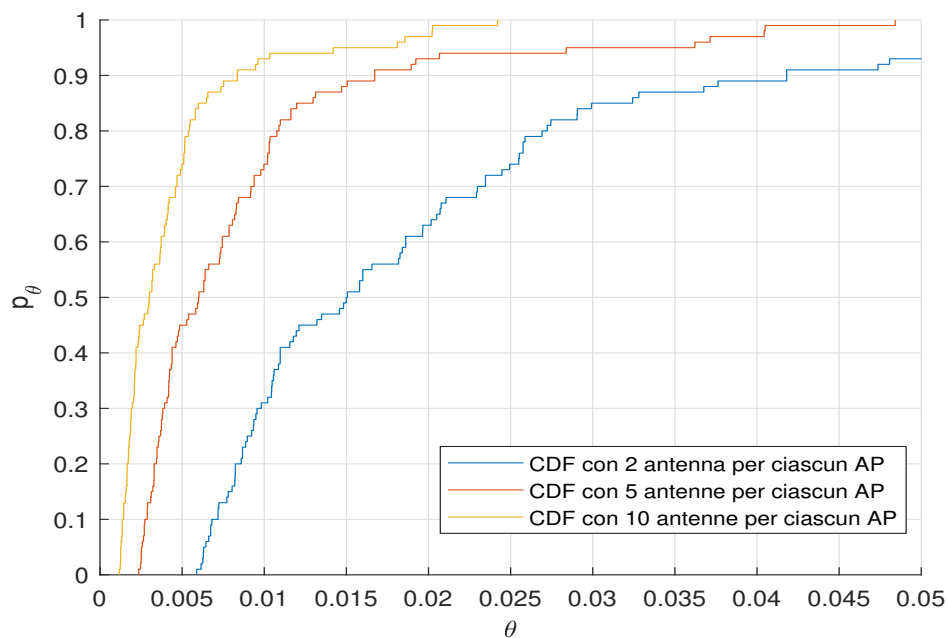


Figura 3.16: Andamenti p_θ con 2, 5 e 10 antenne per ogni AP, numero di AP pari a 100, in cui l'utente può assumere un centinaio di posizioni casuali ed esponente di path-loss $\alpha = 2$.

Analizzando i risultati, presenti nelle varie tabelle mostrate in precedenza delle diverse simulazioni, essi permettono di ottenere le stesse deduzioni raggiunte per lo scenario di un ambiente circolare. Dopo aver analizzato, studiato e verificato mediante le simulazioni eseguite con *Matlab* il fenomeno di channel-hardening di una rete cell-free massive MIMO per la tipologia di scenario di regione quadrata, basandosi sulla geometria stocastica, infatti, è stato possibile fissare alcune importanti conclusioni, ovvero:

1. il numero degli AP (L) che servono congiuntamente gli utenti presenti all'interno della regione analizzata influisce sulla proprietà del channel-hardening. Si conclude che aumentando il numero di AP, si avrà una varianza del guadagno di canale che tende maggiormente a zero e quindi si ha una tendenza a migliorare il channel-hardening. La stessa cosa accade aumentando il numero di antenne per ogni access-point (N). Si può affermare, quindi, che il channel-hardening viene migliorato con l'aumentare del numero di antenne totali (M);
 2. quando gli utenti possono assumere posizioni arbitrarie all'interno dell'area, in cui si analizza il channel-hardening, se si ha una prevalenza di posizioni concentrate al centro della regione viene migliorata la proprietà di channel-hardening, come mostrato in figura 3.17;
 3. si deduce che per le reti cell-free massive MIMO una buona caratteristica di channel-hardening riguarda principalmente scenari con ambiente di propagazione con valore piccolo dell'esponente di path-loss e aumentandolo, anche minimamente, si va a peggiorare il channel-hardening.
-

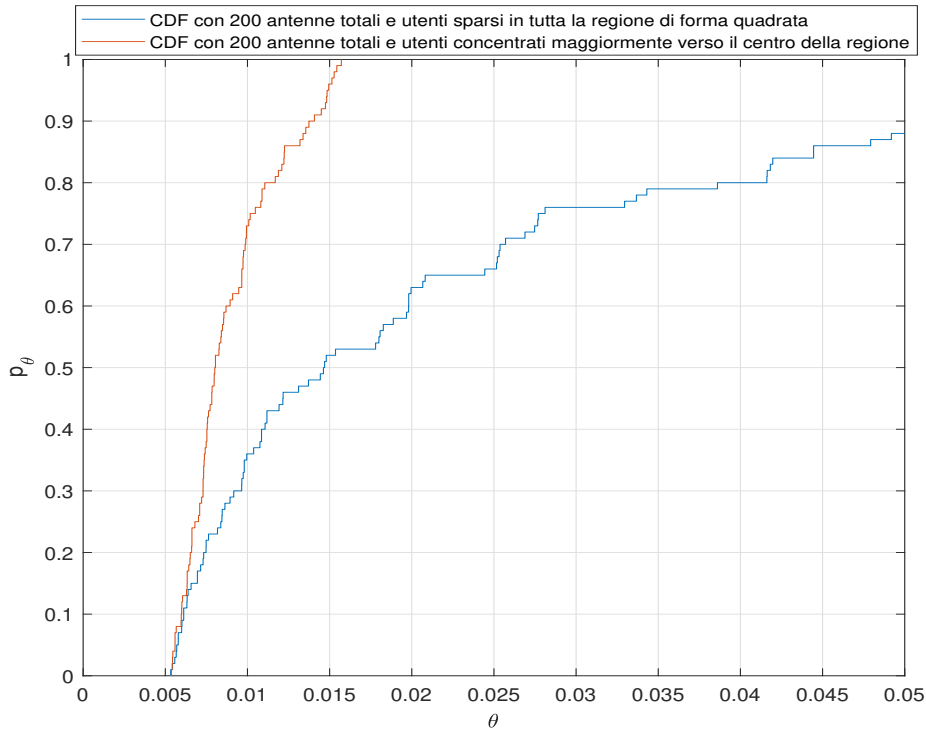


Figura 3.17: Andamenti di due differenti CDF di uno scenario con regione di forma quadrata, di lato $53,17m$, con 200 antenne totali, esponente di path-loss $\alpha = 2$, in cui gli utenti in un caso sono posizionati arbitrariamente su tutta l'area e nell'altro caso si concentrano maggiormente al centro della regione.

3.3 Channel-hardening con AP situati all'interno della regione

Per raggiungere un quadro sempre più completo ed un'analisi sempre più accurata sul fenomeno di channel-hardening per il sistema cell-free massive MIMO, si è deciso di effettuare ulteriori simulazioni, sempre attraverso la funzione *Matlab* implementata. Queste ulteriori simulazioni sono in grado di valutare il channel-hardening quando gli AP vengono disposti all'interno dell'area presa in esame e non sul perimetro, come nelle simulazioni descritte precedentemente. Le simulazioni del sistema cell-free massive MIMO con AP distribuiti all'interno della regione e utenti posizionati in un centinaio di posizioni arbitrarie, sono state eseguite sia quando la regione in esame è di forma circolare, mostrata in figura 3.18, sia quando la regione assume una forma quadrata, mostrata in figura 3.19. Entrambe le regioni hanno un'area di $2827 m^2$ circa.

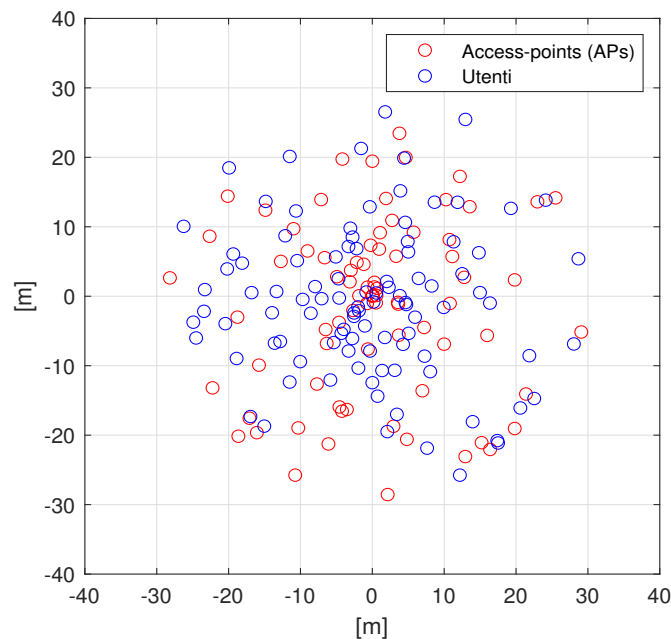


Figura 3.18: Scenario di regione circolare di raggio $30m$ con AP sparsi all'interno dell'area ed esponente di path-loss pari a due, in cui le posizioni arbitrarie degli utenti possono essere un centinaio.

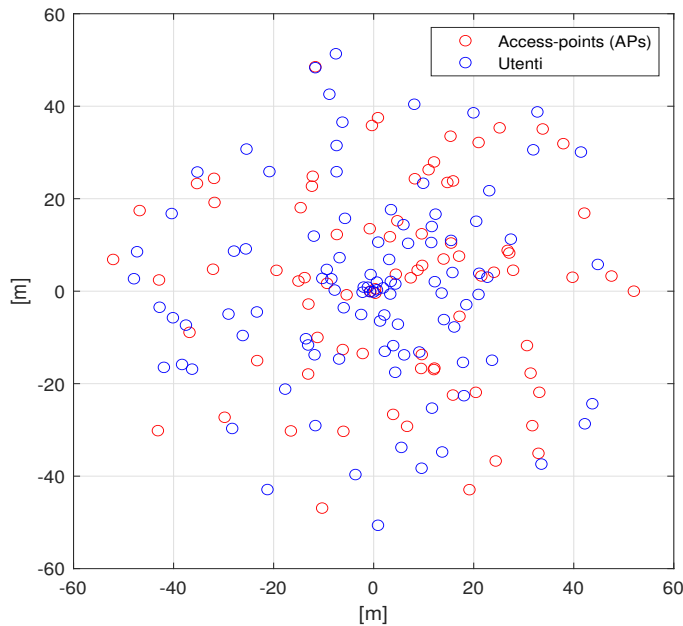


Figura 3.19: Scenario di regione quadrata di lato $53,17m$ con AP sparsi all'interno dell'area ed esponente di path-loss pari a due, in cui le posizioni arbitrarie degli utenti possono essere un centinaio.

Quando gli AP si trovano sparsi all'interno della zona si nota che, rispetto ad una situazione in cui vi sono lo stesso numero di AP ma sul perimetro, vi è una riduzione delle distanze tra AP e utenti. Questa riduzione delle distanze medie comporta uno svantaggio per il verificarsi della caratteristica di channel-hardening. Il fatto che la riduzione delle distanze tra AP e utenti comporti uno svantaggio per il channel-hardening trova spiegazione negli studi fondati sulla geometria stocastica, in quanto (come spiegato nel capitolo 2.1) i vettori di canale dipendono dalle distanze tra l'utente e le antenne costituenti ciascun AP che si ottengono utilizzando un modello di path-loss non singolare (2.6). A causa di questo legame tra le distanze tra AP-utenti e la proprietà di channel-hardening, quando si aumenta il numero di AP, quindi al crescere della densità di AP, da un lato il channel-hardening viene migliorato dal maggior numero di antenne, ma dall'altro può essere peggiorato dalla notevole riduzione delle distanze. Questo fenomeno è stato dimostrato osservando i valori di p_θ (presenti nelle tabelle 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15)

ottenuti applicando il metodo Monte Carlo a simulazioni in cui sono state considerate due diverse scelte progettuali. Le scelte progettuali riguardano la disposizione delle antenne totali (M) all'interno della regione.

- a) In una scelta progettuale il numero totale di antenne (M) si ottiene da un maggior numero di AP e da un minor numero di antenne per ciascun AP (N). I valori di p_θ relativi a questa scelta progettuale sono riportati nella tabella 3.12 per una regione circolare e nella tabella 3.14 per una regione di forma quadrata.
- b) In un'altra scelta progettuale si sceglie di raggiungere il numero totale di antenne (M) con una minore densità di AP e un maggior numero di antenne per ogni AP (N). La tabella 3.13 contiene i valori di p_θ di questa scelta progettuale riguardante uno scenario di una regione circolare, mentre la tabella 3.15 si riferisce a questa scelta progettuale su una regione quadrata.

Numero antenne totali (M)	Numero AP (L)	Numero antenne per AP (N)	p_θ
300	30	10	31,5%
500	50	10	39,8%
800	80	10	50%
1500	150	10	65,6%

Tabella 3.12: Valori di p_θ con AP all'interno di una regione circolare con raggio pari a $30m$, con scelta progettuale di tipologia (a), con esponente di path-loss $\alpha = 2$.

Numero antenne totali (M)	Numero AP (L)	Numero antenne per AP (N)	p_θ
300	10	30	62.1%
500	10	50	83.2%
800	10	80	97.1%
1500	10	150	100%

Tabella 3.13: Valori di p_θ con AP all'interno di una regione circolare con raggio pari a $30m$, con scelta progettuale di tipologia (b), con esponente di path-loss $\alpha = 2$.

Numero antenne totali (M)	Numero AP (L)	Numero antenne per AP (N)	p_θ
300	30	10	30,7%
500	50	10	34%
800	80	10	47,2%
1500	150	10	51,5%

Tabella 3.14: Valori di p_θ con AP all'interno di una regione quadrata con lato pari a $53,17m$, con scelta progettuale di tipologia (a), con esponente di path-loss $\alpha = 2$.

Numero antenne totali (M)	Numero AP (L)	Numero an- tenne per AP (N)	p_θ
300	10	30	62,1%
500	10	50	82,6%
800	10	80	96,5%
1500	10	150	100%

Tabella 3.15: Valori di p_θ con AP all'interno di una regione quadrata con lato pari a $53,17m$, con scelta progettuale di tipologia (b), con esponente di path-loss $\alpha = 2$.

Si è deciso, inoltre, di graficare i due andamenti delle CDF p_θ sia per la regione circolare in figura 3.20, che per la regione quadrata in figura 3.21, con un numero pari di antenne totali a 800 ed esponente di path loss pari a due. Le curve CDF differiscono per la scelta progettuale. In un caso si sceglie di distribuire pochi AP dotati di un elevato numero di antenne N , nell'altro caso molti AP costituiti da un numero più contenuto di antenne N .

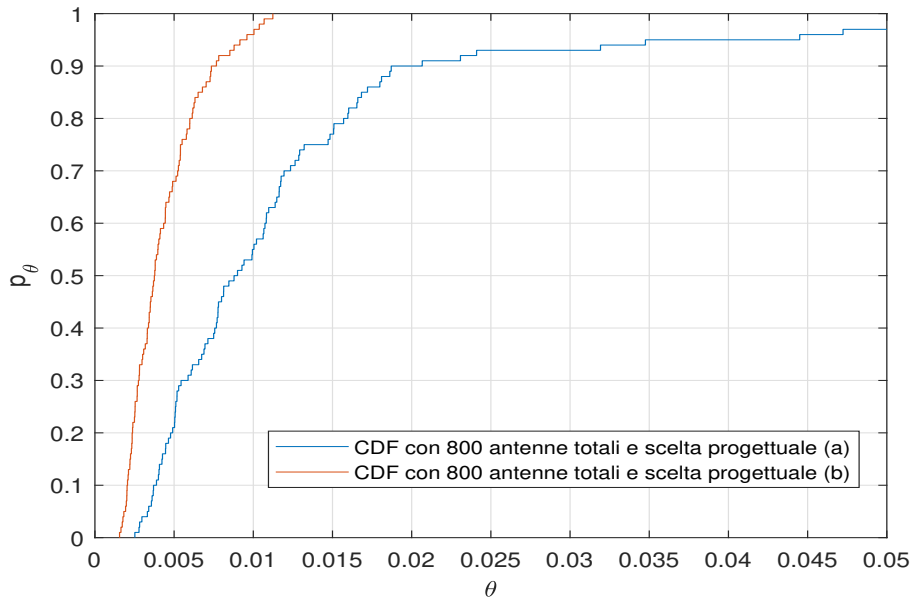


Figura 3.20: Confronto CDF delle due scelte progettuali (a) e (b) di una regione circolare di raggio 30m con AP sparsi all'interno dell'area ed esponente di path-loss pari a due.

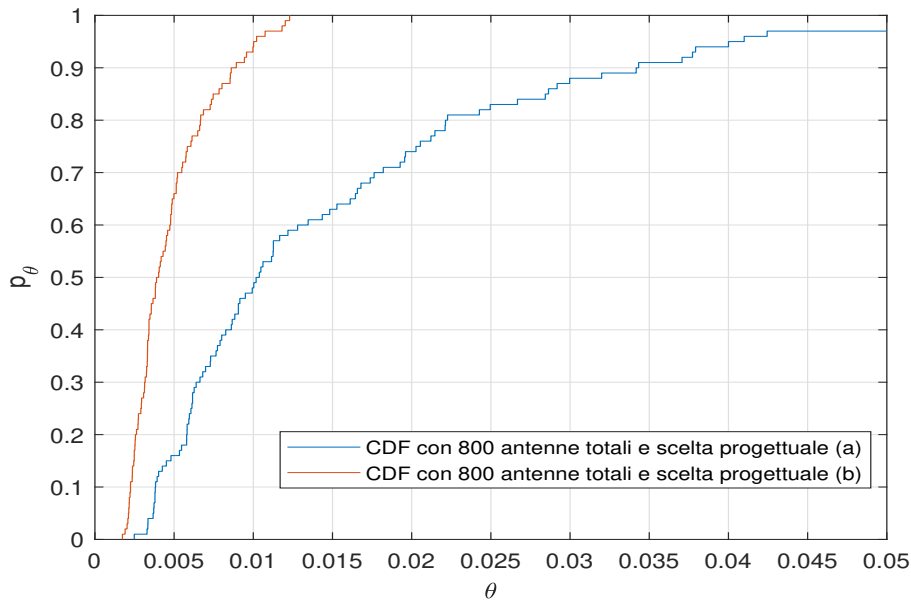


Figura 3.21: Confronto CDF delle due scelte progettuali (a) e (b) di una regione circolare di raggio 53,17m con AP sparsi all'interno dell'area ed esponente di path-loss pari a due.

Esaminando i risultati riportati nelle tabelle 3.12-3.15 e nei grafici 3.20 e 3.21, si dimostra, come spiegato in precedenza grazie alle formulazioni matematiche, che nel momento in cui gli AP si trovano sparsi all'interno della regione, oltre al parametro del numero di antenne totali, sulla proprietà di channel-hardening ha una notevole influenza anche il parametro della densità di AP. Aumentando la densità di AP si tende a peggiorare il channel-hardening. Si può anche affermare che quando si ha un ambiente di propagazione con esponente di path-loss relativamente piccolo, come in questo caso preso in esame, il numero totale di antenne ha un impatto maggiore sul fenomeno di channel-hardening, rispetto alla densità degli AP.

Dopo aver ricavato queste importanti conclusioni sulle relazioni tra channel-hardening di un sistema cell-free massive MIMO con AP sparsi all'interno della regione, numero di antenne totali e densità di AP, si è proceduto ad analizzare l'influenza dell'ambiente di propagazione. Utilizzando il modello di path-loss non singolare, espresso dalla formula (2.6), si osserva subito il legame che c'è tra le distanze formate tra AP e utenti e l'esponente di path-loss α . Quando gli AP sono posizionati all'interno della regione dove si trovano gli utenti, la riduzione delle distanze AP-utenti affiancata ad un aumento del valore dell'esponente di path-loss comporta un notevole ostacolo per raggiungere una buona condizione di channel-hardening. Come già dichiarato in precedenza, infatti, con esponenti di path-loss più alti, l'aumento della densità di AP ha un maggiore impatto anche rispetto all'aumento del numero di antenne. Quest'ultima osservazione trova dimostrazione nei valori di p_θ riportati nelle tabelle 3.16 e 3.17. In tabella 3.16 vi sono i valori di p_θ in cui vi è implementata la scelta progettuale (a) per tre diversi esponenti di path-loss (2, 2.5 e 3), al variare del numero di antenne totali, quando gli AP sono posti all'interno di una regione circolare con area di 2827 m^2 . La tabella 3.17 ha le stesse caratteristiche della tabella 3.16, ma si riferisce ad una regione quadrata. Da entrambe le tabelle si può osservare quanto detto, ovvero che quando l'esponente di path-loss assume valori più significativi, si ha un notevole peggioramento per il channel-hardening e anche l'aumento del numero di antenne totali causato dall'aumento della densità di AP non riesce a portare ad un evidente miglioramento del channel-hardening.

Numero antenne totali (M)	1500	1500	1500	2000	2000	2000	2500	2500	2500
Numero AP (L)	150	150	150	200	200	200	250	250	250
Numero antenne per AP (N)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Esponente di path-loss α	2	2.5	3	2	2.5	3	2	2.5	3
p_θ	65,6%	32,2%	17%	78,3%	38,7%	21,5%	91,1%	46,1%	23%

Tabella 3.16: Valori di p_θ ottenuti da una scelta progettuale di tipo (a) quando gli AP sono all'interno di una regione di forma circolare di raggio pari a $30m$ al variare dell'esponente di path-loss e della densità del numero di AP.

Numero antenne totali (M)	1500	1500	1500	2000	2000	2000	2500	2500	2500
Numero AP (L)	150	150	150	200	200	200	250	250	250
Numero antenne per AP (N)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Esponente di path-loss α	2	2.5	3	2	2.5	3	2	2.5	3
p_θ	57%	27,1%	10,7%	78%	24,2%	11,2%	92%	28,5%	13,4%

Tabella 3.17: Valori di p_θ ottenuti da una scelta progettuale di tipo (a) quando gli AP sono all'interno di una regione di forma quadrata di lato pari a $53,17m$ al variare dell'esponente di path-loss e della densità del numero di AP.

Nel momento in cui si ha un aumento dell'esponente di path-loss α in scenari in cui viene fatta una scelta progettuale di tipo (b), ovvero quando si sceglie di aumentare il numero di antenne per ciascun AP (N), piuttosto che incrementare la densità di AP il fenomeno di channel-hardening subisce sempre un peggioramento. Questa conclusione trova dimostrazione dai valori di p_θ presenti nelle tabelle 3.18 e 3.19. La tabella 3.18 si riferisce ad un ambiente di forma circolare, mentre la 3.19 ad un ambiente di forma quadrata.

Numero antenne totali (M)	300	300	300	500	500	500	800	800	800
Numero AP (L)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Numero antenne per AP (N)	30	30	30	50	50	50	80	80	80
Esponente di path-loss α	2	2.5	3	2	2.5	3	2	2.5	3
p_θ	62,1%	51%	39%	83,2%	75,9%	70%	97,1%	91,6%	85,5%

Tabella 3.18: Valori di p_θ ottenuti da una scelta progettuale di tipo (b) di uno scenario con AP distribuiti in modo aleatorio all'interno di una regione di forma circolare di raggio di $30m$, al variare dell'esponente di path-loss e del numero di antenne totali.

Numero antenne totali (M)	300	300	300	500	500	500	800	800	800
Numero AP (L)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Numero antenne per AP (N)	30	30	30	50	50	50	80	80	80
Esponente di path-loss α	2	2.5	3	2	2.5	3	2	2.5	3
p_θ	59%	46,6%	34,3%	79,3%	72%	62,4%	95%	91,3%	84,6%

Tabella 3.19: Valori di p_θ ottenuti da una scelta progettuale di tipo (b) di uno scenario con AP distribuiti in modo aleatorio all'interno di una regione di forma quadrata di lato di $53,17m$, al variare dell'esponente di path-loss e del numero di antenne totali.

Infine sono state realizzate le tabelle 3.20 e 3.21, riferite rispettivamente ad una regione circolare e ad una regione quadrata, che consentono di effettuare il confronto relativo alla proprietà di channel-hardening tra uno scenario in cui gli AP sono posizionati internamente alla regione e uno scenario in cui gli AP si trovano sul perimetro.

Numero AP (L)	20	40	60	80
Numero antenne per AP (N)	10	10	10	10
p_θ AP interni	28,8%	36,2%	50%	53,5%
p_θ AP sul perimetro	60,2%	78,5%	84,3%	88%

Tabella 3.20: Confronto valori di p_θ tra una distribuzione di AP all'interno della regione circolare e una distribuzione di AP sul perimetro, con ambiente di propagazione caratterizzato da un esponente di path-loss $\alpha = 2$.

Numero AP (L)	20	40	60	80
Numero antenne per AP (N)	10	10	10	10
p_θ AP interni	25,7%	29,9%	38,9%	47,2%
p_θ AP sul perimetro	33%	63%	75%	80%

Tabella 3.21: Confronto valori di p_θ tra una distribuzione di AP all'interno della regione di forma quadrata e una distribuzione di AP sul perimetro, con ambiente di propagazione caratterizzato da un esponente di path-loss $\alpha = 2$.

Tutte le tabelle realizzate 3.12-3.21 e i grafici delle figure 3.20 e 3.21 permettono quindi di raggiungere determinate importanti conclusioni sul fenomeno di channel-hardening.

- I parametri che influenzano la proprietà di channel-hardening di un sistema cell-free massive MIMO in cui gli AP sono disposti arbitrariamente, all'interno della regione presa in esame, sono la densità di AP, il numero di antenne totali (M), la scelta progettuale della disposizione delle antenne totali e l'esponente di path-loss α .
- Un aumento del numero delle antenne costituenti ciascun access-point migliora sempre il channel-hardening.
- Una riduzione delle distanze tra AP e utenti comporta un peggioramento del channel-hardening.

- Un incremento dell'aumento dell'esponente di path-loss porta sempre ad un peggioramento delle condizioni per cui si verifica channel-hardening.
 - Nel caso in cui gli AP sono sparsi all'interno della zona presa in esame, l'aumento del numero di AP incide in maniera negativa sul fenomeno di channel-hardening, ma per scenari con esponenti di path-loss bassi, questo fattore può essere compensato dall'aumento del numero di antenne totali. In scenari con esponenti di path-loss più elevati, una maggiore densità di AP causa il raggiungimento di scenari piuttosto critici per permettere un miglioramento significativo del channel-hardening.
 - È bene trovare il giusto trade-off tra numero totali di antenne e densità di AP.
 - Un numero più elevato del numero totale di antenne contribuisce a migliorare sempre il channel-hardening.
 - Per raggiungere un livello buono di channel-hardening è più idoneo uno scenario in cui gli AP sono disposti sul perimetro.
-

Capitolo 4

Propagazione favorevole in diverse tipologie di scenari cell-free massive MIMO

Come per la proprietà di channel-hardening, si è deciso di studiare e verificare, sfruttando gli studi basati sulla geometria stocastica e servendosi dei valori della misura della propagazione favorevole X_{fp} espressa dalla formula (2.53) e della CDF (2.54), la proprietà di propagazione favorevole in diverse tipologie di ambienti.

Come spiegato in precedenza, il sistema cell-free massive MIMO di varie tipologie di scenari analizzate è caratterizzato da determinati parametri come: numero di access-points (L) distribuiti nella regione che servono congiuntamente gli utenti, posizioni arbitrarie che possono assumere gli utenti, numero di antenne costituenti ciascun access-point (N), dimensioni della regione ed esponente di path-loss (α).

Molto importante, infatti, per lo studio di questa caratteristica è stato comprendere come questi parametri caratteristici dei vari scenari incidono sulle misure della propagazione favorevole. Per questo sono state effettuate diverse e numerose simulazioni, modificando i valori dei parametri caratteristici degli scenari, per valutare gli effetti che essi hanno sulla propagazione favorevole e giungere a determinate conclusioni.

Per effettuare queste tipologie di simulazioni, come nello studio del channel-hardening, è stato utilizzato il software *Matlab* su cui è stata implementata

una funzione che ha le seguenti caratteristiche e i seguenti obiettivi:

- la funzione ha come argomenti in ingresso i parametri caratteristici degli scenari (numero di AP, numero di antenne per ciascun AP, esponente di path-loss α , numero delle posizioni arbitrarie che possono assumere sia l'utente k -esimo che l'utente j -esimo e dimensioni della regione) in modo tale da poterli modificare per svolgere simulazioni differenti ed osservare l'influenza di essi sulle misure X_{fp} e sulle funzioni di distribuzione cumulative p_γ ;
- la funzione permette di scegliere se realizzare uno scenario con una regione circolare oppure con una regione di dimensioni quadrate, inserendo un *flag* (denominato nella funzione *scenario_zona_circolare*) come argomento di ingresso. Il codice *Matlab* che identifica gli argomenti in ingresso alla funzione, che possono essere fatti variare dall'utente per svolgere le diverse simulazioni, è riportato qui in seguito:

```
function_propag_favorevole_v2(numero_APs,numero_antenne_xAP,
alfa,R,num_posizioni_casuali_uk,num_posizioni_casuali_uj,
scenario_zona_circolare)
```

- la funzione inizialmente ha il compito di distribuire il numero di AP sul perimetro della regione analizzata e di determinare in modo casuale le posizioni assumibili all'interno della zona sia dall'utente k -esimo, che dall'utente j -esimo, sia nel caso di regione circolare che nel caso di una zona di dimensioni quadrate;
 - la funzione consente di realizzare in uscita un diagramma cartesiano in cui vi è la riproduzione dello scenario, ovvero vi sono le posizioni, quindi le coordinate degli AP e degli utenti, utili per il calcolo delle distanze tra di essi con cui si formano i due vettori \mathbf{d}_k e \mathbf{d}_j e gli elementi $l(\mathbf{d}_k)$ e $l(\mathbf{d}_j)$, ottenuti successivamente, considerando un modello di path-loss non singolare;
 - la funzione è in grado di simulare il calcolo delle misure di propagazione favorevole X_{fp} , sia per una tipologia di scenario con una regione circolare, che per uno scenario di un ambiente di dimensioni quadrate,
-

attraverso la formula (2.53). Per eseguire il calcolo delle misure X_{fp} , è stato necessario ricavarsi le matrici contenenti tutti i valori delle distanze, tenendo in considerazione il modello di path-loss non singolare, tra le posizioni assunte dall'utente k -esimo e quelle assunte dall'utente j -esimo e gli access-points sul perimetro. Queste matrici sono state ottenute su *Matlab* mediante il seguente codice:

```

dist_UkAPs = zeros(num_posizioni_casuali_uk,numero_APs);
for i=1:num_posizioni_casuali_uk
    for j=1:numero_APs
        dist_UkAPs(i,j) = sqrt(((pos_Uk_x(i)-pos_x_AP(j)).^2)
+((pos_Uk_y(i)-pos_y_AP(j)).^2));
        l_UkAPs = min(1,dist_UkAPs.^(-alfa));
    end
end
end

dist_UjAPs = zeros(num_posizioni_casuali_uj,numero_APs);
for i=1:num_posizioni_casuali_u2
    for j=1:numero_APs
        dist_UjAPs(i,j) = sqrt(((pos_Uj_x(i)-pos_x_AP(j)).^2)
+((pos_Uj_y(i)-pos_y_AP(j)).^2));
        l_UjAPs = min(1,dist_UjAPs.^(-alfa));
    end
end
end

```

- la funzione implementata ha come scopo quello di avere in uscita i grafici degli andamenti delle funzioni di distribuzioni cumulative dopo aver calcolato le misure di propagazione favorevole X_{fp} . Per ottenere i grafici delle CDF si esegue su *Matlab* il seguente comando:

```

figure;
cdfplot(Xfp);

```

4.1 Propagazione favorevole di una rete cell-free massive MIMO in una regione circolare

Siccome, come già dichiarato, è stata valutata la propagazione favorevole di diverse tipologie di scenari cell-free massive MIMO, si è potuto procedere, quindi, a trarre conclusioni e ad analizzare, in un primo momento, la propagazione favorevole riguardante uno scenario di una regione di forma circolare. Le figura di riferimento che si utilizza per questa tipologia di scenario è uguale alla figura 3.2 mostrata al capitolo precedente 3.1, riportata nuovamente qui di seguito in figura 4.1. Le simulazioni effettuate, utilizzando la funzione *Matlab* appena descritta, per lo studio della proprietà di propagazione favorevole, sono simili a quelle svolte per lo studio del channel-hardening.

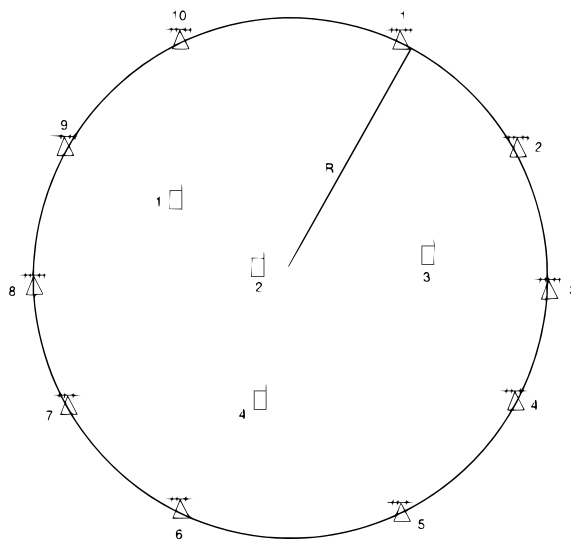


Figura 4.1: Scenario di una regione circolare.

Anche per le misure di propagazione favorevole, infatti, in un primo momento si è deciso di studiare il caso più elementare possibile, in cui vi sono due utenti (l'utente k -esimo e l'utente j -esimo) che assumono una sola posizione scelta in maniera arbitraria all'interno della regione.

In questo caso di base sono state effettuate quattro tipologie di simulazioni. Per ciascuna simulazione la funzione è stata modificata in modo tale da mantenere fisse le posizioni sia dell'utente k -esimo, che dell'utente j -esimo. Le coordinate, che sono state poi mantenute fisse per ciascun utente, sono state scelte in maniera casuale (coordinate scelte per l'utente $k = [0;10]$, coordinate scelte per utente $j = [-8;4]$). In figura 4.2 vi è il diagramma cartesiano, riprodotto su *Matlab*, dello scenario sul quale vengono eseguite queste prime simulazioni.

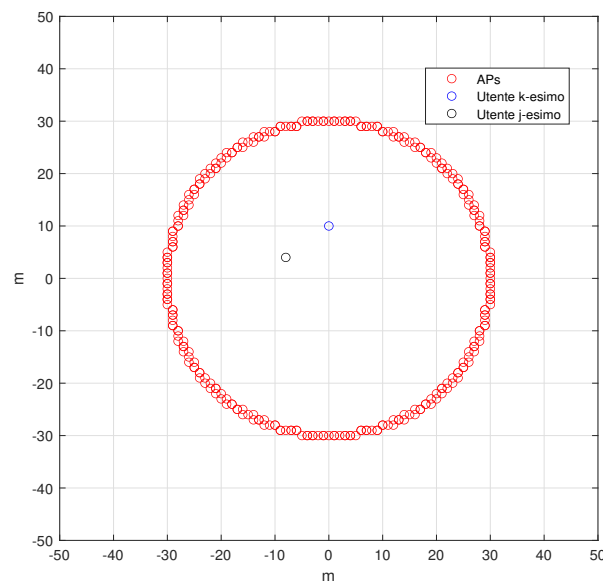


Figura 4.2: Diagramma cartesiano che rappresenta le posizioni degli AP e le posizioni dell'utente k -esimo e j -esimo, fissate in determinate coordinate in un sistema cell-free massive MIMO, di uno scenario con una regione circolare.

In ciascuna delle quattro simulazioni, sono stati fatti variare alcuni parametri:

1. per la prima simulazione il parametro in ingresso che varia è il numero di antenne totali presenti sul perimetro (M) e viene mantenuto fisso l'esponente di path-loss α ad un valore pari a due. Il raggio della regione circolare è pari a $30m$. I dati delle misure X_{fp} , ottenute in questa prima simulazione, sono riportati in tabella 4.1;
2. nella seconda simulazione si analizza l'influenza sulle misure di propagazione favorevole dell'esponente di path-loss α , mantenendo costante il raggio a $30m$. I risultati di questa simulazione si possono visualizzare in tabella 4.2;
3. per quanto riguarda il terzo tipo di simulazione si va a studiare l'incidenza sulle misure X_{fp} del numero di antenne per ciascun AP in scenari con diversi valori del numero di AP presenti. Vengono mantenuti stabili i valori dell'esponente di path-loss α , impostato al valore pari a due ed il raggio dell'area circolare che è di $30m$. La tabella 4.3 mostra i valori ricavati delle misure X_{fp} ;
4. in merito alla quarta simulazione vengono attribuiti diversi valori dell'argomento in ingresso raggio della regione circolare. Si imposta un valore fisso del numero di antenne totali pari a 100 e l'esponente di path-loss viene fissato ad un valore pari a due. Nella tabella 4.4 si possono osservare i valori delle misure di propagazione favorevole di questa simulazione.

Numero antenne (M)	X_{fp}
50	0.0215
100	0.0108
300	0.0036
500	0.0022

Tabella 4.1: Risultati di un sistema cell-free massive MIMO di una regione circolare con raggio di $30m$, con utenti k -esimo e j -esimo fissi in due posizioni all'interno della regione, in cui varia il numero di antenne totali $M = LN$ sul perimetro e con un esponente di path-loss $\alpha = 2$.

Numero di antenne (M)	50	50	100	100	300	300	500	500
Esponente di path-loss (α)	2	3	2	3	2	3	2	3
X_{fp}	0.0215	0.0228	0.0108	0.0114	0.0036	0.0038	0.0022	0.0023

Tabella 4.2: Risultati di un sistema cell-free massive MIMO di una regione circolare con raggio di $30m$, con utenti k -esimo e j -esimo fissi in due posizioni all'interno della regione e con numero di antenne totali M ed esponente di path-loss α che assumono valori diversi.

Numero Ap (L)	50	50	50	50	100	100	100	100
Numero antenne per AP (N)	1	2	5	10	1	2	5	10
X_{fp}	0.0215	0.0108	0.0043	0.0022	0.0108	0.0054	0.0022	0.0011

Tabella 4.3: Risultati di un sistema cell-free massive MIMO di una regione circolare con utenti k -esimo e j -esimo fissi su due posizioni all'interno della regione, al variare del numero di AP e del numero di antenne costituenti ogni AP.

Raggio area (m)	30	50	100	200
X_{fp}	0.0108	0.0103	0.0101	0.0100

Tabella 4.4: Risultati di un sistema cell-free massive MIMO di una regione circolare con utenti k -esimo e j -esimo fissi in due posizioni all'interno della regione, dove si varia il raggio, con numero di AP a singola antenna pari a 100.

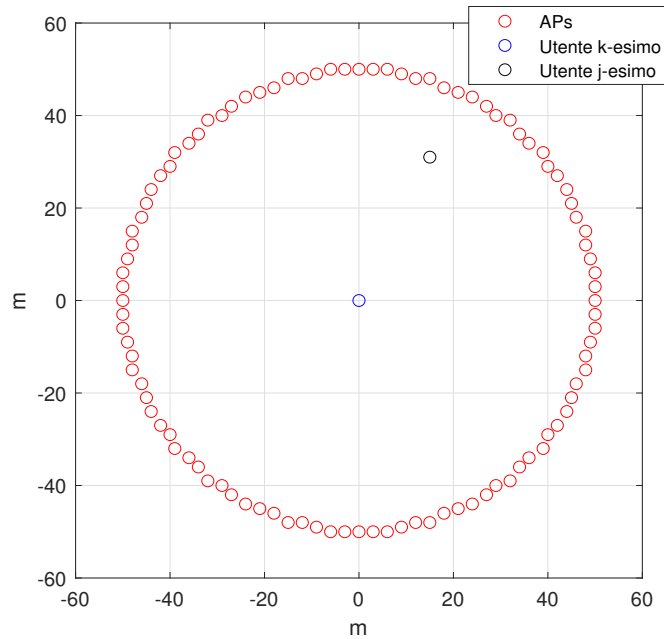


Figura 4.3: Diagramma cartesiano zona circolare di raggio $50m$, con 100 AP e utenti k -esimo e j -esimo, in cui uno dei due utenti è posizionato al centro dell'area.

Un'ulteriore simulazione, la quale presenta una specifica particolarità, è quella dove si ha un'area circolare in cui uno dei due utenti assume come unica posizione il centro della circonferenza. Il diagramma cartesiano, generato dalla funzione *Matlab*, delle posizioni degli AP e degli utenti k -esimo e j -esimo è rappresentato in figura 4.3. La particolarità individuata in questa specifica configurazione dello scenario circolare, è che le distanze tra gli tutti gli access-points e l'utente situato al centro della regione sono tutte uguali e corrispondono al raggio della zona circolare. A causa di questo, si può eseguire una significativa semplificazione nella formula della misura della propagazione favorevole (2.53). Se, infatti, uno dei due utenti assume la posizione centrale in una regione circolare si ottiene la seguente uguaglianza:

$$X_{fp} = \frac{\sum_{i=1}^L l(d_{iN,k})l(d_{iN,j})}{N \sum_{i=1}^L l(d_{iN,k}) \sum_{i=1}^L l(d_{iN,j})} = \frac{1}{NL} \quad (4.1)$$

Da questa semplificazione si nota come, in questo specifico ed unico caso, i parametri che influenzano le misure di propagazione favorevole sono solamente il numero di access-points presenti (L) ed il numero di antenne da cui ogni access-points sono composti (N).

Dalle precedenti simulazioni e tabelle 4.1-4.4 si raggiungono le seguenti deduzioni e osservazioni, inerenti alla propagazione favorevole di rete senza celle su una regione circolare in un caso estremamente semplice:

- quando vi è un aumento del numero di antenne totali presenti, le misure di propagazione assumono valori più piccoli, che tendono maggiormente a zero e quindi il maggior numero di antenne totali (M) favorisce la proprietà di propagazione favorevole. Il maggior numero di antenne totali può dipendere sia da un maggior numero di AP, che da un maggior numero di antenne per ogni AP;
- per quanto riguarda l'esponente di path-loss α , vengono utilizzati ambienti di propagazione con valori degli esponenti di path-loss piuttosto bassi, ma se il valore dell'esponente di path-loss è più alto, questo porta ad un aumento, in certi casi minimo e poco significativo, delle misure X_{fp} ;
- il parametro del raggio della regione circolare, come si può vedere dai risultati in tabella 4.4, incide in maniera minima, quasi trascurabile, sulle misure di propagazione favorevole. Aumentando il raggio si avranno valori leggermente più bassi di X_{fp} ;
- nel caso in cui uno dei due utenti (o l'utente k -esimo o l'utente j -esimo) sia posizionato al centro dell'area circolare, i soli ed unici due parametri che hanno un'influenza sulla propagazione favorevole sono il numero di AP ed il numero di antenne per ogn AP. Solamente il numero di antenne totali, quindi, incide sulle misure X_{fp} .

È evidente che, come per il fenomeno di channel-hardening, per un corretto studio, una corretta ed idonea analisi ed una opportuna verifica della proprietà di propagazione favorevole per un sistema cell-free massive MIMO, in una tipologia di scenario circolare, che rappresenta uno scenario realistico,

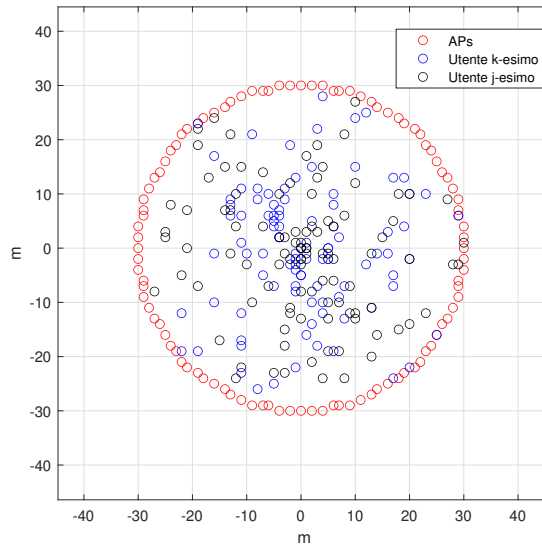


Figura 4.4: Diagramma cartesiano di una rete senza celle applicata ad una regione circolare di raggio di $30m$, in cui sono indicate le posizioni degli AP sul perimetro ed un centinaio di posizioni che possono essere assunte, sia dall'utente k -esimo che dall'utente j -esimo.

le simulazioni siano svolte anche per il caso in cui i due utenti assumano diverse posizioni aleatorie all'interno della regione, per riprodurre con maggiore verosimiglianza la realtà. Questa tipologia di scenario è rappresentato dal diagramma cartesiano in figura 4.4. In queste simulazioni, avendo più realizzazioni differenti dei due vettori delle distanze tra i due utenti e tra ciascun access-point, si valuta la propagazione favorevole mediante i valori della CDF p_γ secondo la formula (2.54) e impostando il valore della soglia γ a 0.01.

Gli andamenti e i grafici della CDF p_γ , che sono stati ricavati grazie alla funzione *Matlab*, riguardano i seguenti casi:

1. un caso preso in esame è quando viene fatto variare il numero di antenne totali, in una regione circolare di raggio pari a $30m$, con esponente di path-loss α con valore pari a due e con un centinaio di posizioni arbitrarie che può avere sia l'utente k -esimo che l'utente j -esimo. Si ottengono i diversi valori della CDF empirica, per i diversi numeri di antenne totali presenti (M).

Si ottiene una CDF empirica, ovvero una stima della vera CDF, perché si utilizza il metodo di Monte Carlo con un numero, comunque limitato di iterazioni, che permettono di eseguire la funzione più volte mantenendo fissi tutti gli argomenti di ingresso. Attraverso il metodo di Monte Carlo si può avere una stima della CDF più precisa. La tabella 4.5 presenta tutti i valori di p_γ ottenuti dalle simulazioni, eseguite con *Matlab*, per questo determinato caso;

2. un altro caso, analizzato, riguarda sempre uno scenario circolare di raggio pari a $30m$, in cui l'utente k -esimo e l'utente j -esimo possono trovarsi in un centinaio di posizioni random e in cui varia il numero di antenne totali (M). In questo caso, però, a differenza del precedente l'esponente di path-loss α è stato settato ad un valore pari a tre e non a due, per osservare l'influenza che esso ha sulla propagazione favorevole. Anche per questo caso, come quello precedente, è stato utilizzato il metodo di Monte Carlo con un numero limitato di iterazioni (tenendo costanti i valori argomenti di ingresso alla funzione) per ottenere la stima delle vere CDF, ovvero le CDF empiriche, quindi i vari valori di p_γ . La tabella 4.6 presenta i dati di p_γ ricavati dalle simulazioni, svolte su *Matlab* per questo specifico caso;
 3. un ulteriore caso, dove sono stati ricavati i valori di p_γ , è quello in cui oltre a far variare il numero di AP (L), viene modificato anche il numero di antenne costituenti ciascun access-point (N). Entrambi i parametri apportano modifiche sul numero totale di antenne presenti nello scenario di regione circolare. Anche per questo caso il raggio rimane fisso a trenta metri, l'esponente di path-loss considerato è di valore due e i due utenti k -esimo e j -esimo possono avere un centinaio di posizioni casuali. La tabella 4.7 mostra i valori di p_γ delle diverse simulazioni di questo caso appena descritto.
-

Numero antenne totali (M)	p_γ
200	76.8%
300	82.8%
400	88.3%
500	90.5%
800	93.4%

Tabella 4.5: Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali (M) per uno scenario circolare di raggio di $30m$ ed esponente di path-loss α pari a 2.

Numero antenne totali (M)	p_γ
200	66.7%
300	73%
400	76.3%
500	78.3%
800	82.4%

Tabella 4.6: Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali (M) per uno scenario circolare di raggio di $30m$ ed esponente di path-loss α pari a 3.

Numero AP (L)	50	50	50	50	100	100	100	100
Numero antenne per AP (N)	1	2	5	10	1	2	5	10
p_γ	30,7%	54,8%	79,8%	89,6%	54,8%	76,4%	89,6%	94,7%

Tabella 4.7: Valori di p_γ al variare del numero di AP e del numero di antenne per ciascun AP, per uno scenario circolare di raggio di $30m$ ed esponente di path-loss α pari a 2.

Sono stati, inoltre, realizzati con *Matlab*, i grafici delle figure 4.5, 4.6 e 4.7 che rappresentano gli andamenti di tre CDF al variare di alcuni parametri:

1. nel primo grafico, in figura 4.5, sono mostrati gli andamenti delle tre CDF rappresentative di tre casi, dove per ciascun caso varia il numero di antenne totali (primo caso 200 antenne totali, secondo caso 400 antenne totali e terzo caso 800 antenne totali). Vengono, invece, mantenuti fissi l'esponente di path-loss α di valore pari a due, il raggio della regione circolare pari a $30m$, il numero di posizioni aleatorie che possono assumere i due utenti pari a 100;
2. nel secondo grafico, in figura 4.6, vengono rappresentati le tre CDF di scenari in cui varia il numero di AP esattamente come al caso precedente, rappresentato dal grafico 4.5. La differenza rispetto al grafico 4.5 è che viene utilizzato un esponente di path-loss α di valore pari a tre anzichè due;
3. per quanto riguarda il terzo grafico in figura 4.7, esso riporta gli andamenti delle CDF in tre casi differenti in cui varia il numero di antenne costituenti ciascun AP (1 antenna per AP, 2 antenne per AP e 5 antenne per AP), con un numero di AP pari a 100, esponente di path-loss α di valore pari a due e raggio della regione circolare pari a $30m$.

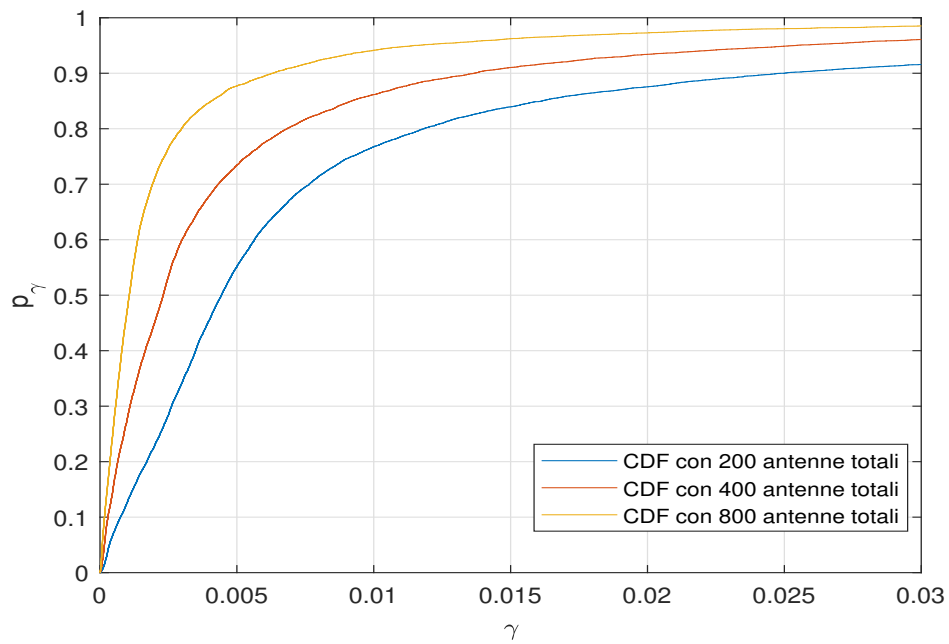


Figura 4.5: Andamenti p_γ di simulazioni caratterizzate da 200, 400 e 800 antenne totali, di una regione circolare di raggio di $30m$ ed $\alpha = 2$.

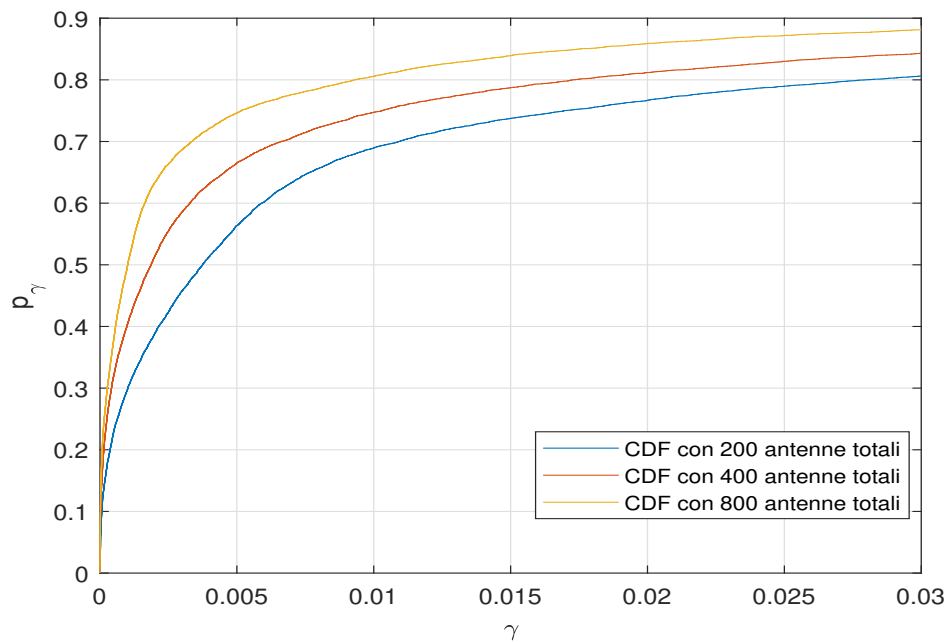


Figura 4.6: Andamenti p_γ di simulazioni caratterizzate da 200, 400 e 800 antenne totali, di una regione circolare di raggio di $30m$ ed $\alpha = 3$.

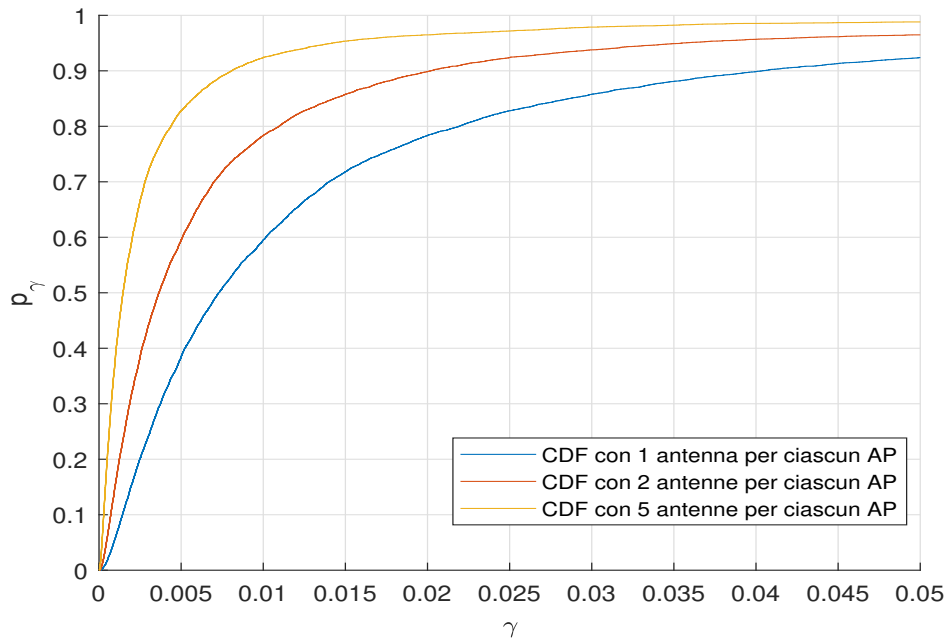


Figura 4.7: Andamenti p_γ simulazioni caratterizzate da 100 AP che sono costituiti da 1, 2 o 5 antenne, di una regione circolare di raggio pari a $30m$ ed $\alpha = 2$.

Osservando le differenti curve riportate nei grafici delle figure 4.5, 4.6 e 4.7 si evince, in particolare, come il numero di antenne totali M incida sul fenomeno di propagazione favorevole. Aumentando il numero di antenne totali, la proprietà di propagazione favorevole viene migliorata. Si nota anche, paragonando gli andamenti delle CDF delle figure 4.5 e 4.6, che un incremento dell'esponente di path-loss, invece, tende a peggiorare la propagazione favorevole.

4.2 Propagazione favorevole di reti cell-free massive MIMO in un ambiente di forma quadrata

Per avere un quadro più completo possibile sullo studio e sull'analisi della caratteristica della propagazione favorevole, relativa ad una rete senza celle, sono state svolte simulazioni quando i due utenti possono assumere diverse posizioni all'interno di una regione di forma quadrata. La regione presa in esame, per le ulteriori valutazioni sulla propagazione favorevole, è riportata in figura 4.8 e presenta le seguenti caratteristiche:

- un numero di AP L distribuiti lungo il perimetro;
- un numero di antenne N per ciascun AP;
- due utenti (utente k -esimo e j -esimo) che possono assumere varie posizioni all'interno della regione;
- un esponente di path-loss α caratteristico dell'ambiente di propagazione.

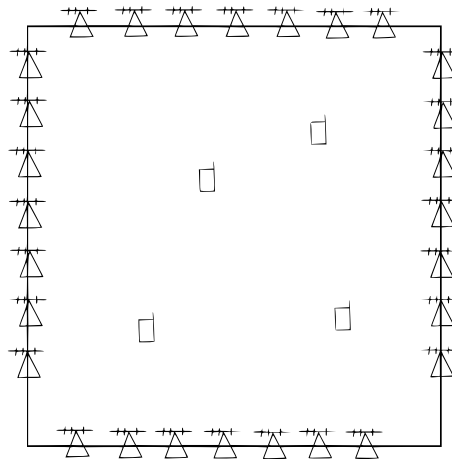


Figura 4.8: Scenario di un ambiente di forma quadrata.

Per svolgere le simulazioni che permettono di ottenere le misure di propagazione favorevole X_{fp} , le funzioni di distribuzioni cumulative empiriche delle misure X_{fp} e i grafici riguardanti sia gli andamenti delle CDF che la disposizione di AP e degli utenti, si è proceduto utilizzando la stessa funzione *Matlab* spiegata e descritta precedentemente. La funzione permette, come detto in precedenza, di eseguire simulazioni modificando determinati parametri, fornitegli in ingresso (numero AP presenti, numero antenne per ciascun AP, esponente di path-loss α , dimensioni del lato della stanza in m e posizioni che possono assumere gli utenti k -esimo e j -esimo all'interno della stanza) per verificare l'influenza di essi sul fenomeno di propagazione favorevole. Nei parametri in ingresso è, inoltre, presente il *flag* che consente di decidere se utilizzare una tipologia di area circolare o quadrata. Per questa seconda analisi della propagazione favorevole del sistema cell-free il *flag* è stato impostato in modo tale da avere un'area di forma quadrata.

Anche per lo studio della propagazione favorevole relativa alla tipologia di scenario cell-free massive MIMO, in cui la regione ha dimensione quadrata, inizialmente sono state eseguite le analisi riguardanti il caso più semplice e basilare, ovvero in cui si hanno AP posizionati sul perimetro della stanza e in cui sia l'utente k -esimo che l'utente j -esimo assumono posizioni fisse all'interno dell'area, scelte in modo random. Ad esempio, si è potuto impostare le coordinate dei due utenti, effettuando un'opportuna modifica al codice della funzione *Matlab*, posizionando l'utente k -esimo a coordinate $[1, 1]$ e l'utente j -esimo a coordinate $[5, 10]$.

Il diagramma cartesiano, ottenuto mediante *Matlab*, di questa tipologia di scenario appena descritta è riportato in figura 4.9.

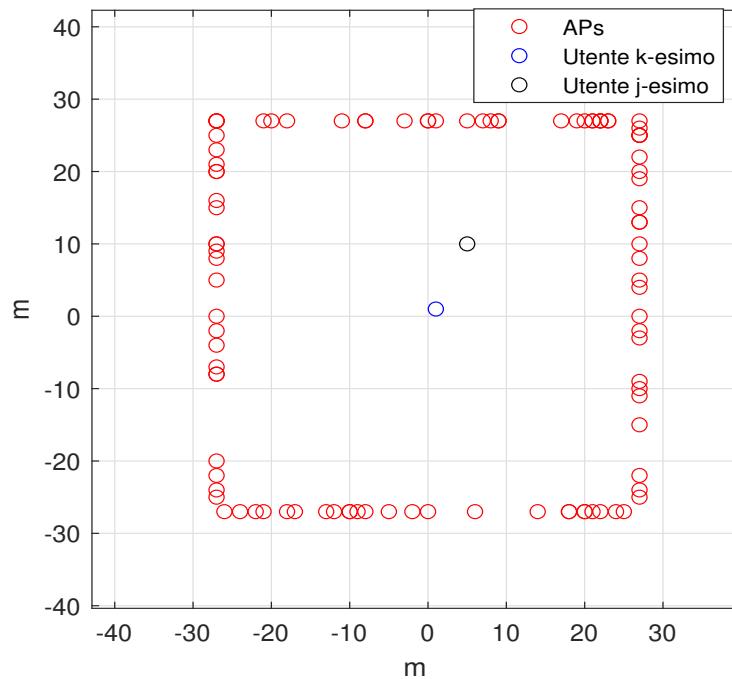


Figura 4.9: Diagramma cartesiano che rappresenta le posizioni degli AP e le posizioni dell'utente k -esimo e j -esimo, fissate in determinate coordinate in un sistema cell-free massive MIMO di uno scenario con una regione quadrata di lato di $53,17m$.

A questo punto, è stato possibile calcolare e valutare le misure di propagazione favorevoli X_{fp} , mediante l'espressione (2.53).

Sfruttando, infatti, la geometria e le distanze euclidee bidimensionali tra i due utenti e tutti gli AP, si possono ottenere le misure X_{fp} per diverse simulazioni, elencate in seguito, in cui sono stati fatti variare certi parametri in ingresso. In queste simulazioni, difatti, sono state mantenute fisse le posizioni degli utenti e sono stati fatti variare i seguenti parametri:

1. numero di antenne totali M ;
2. esponente di path-loss α ;
3. numero di antenne per ciascun AP N .

È stata realizzata la tabella 4.8 che riporta le misure X_{fp} relative alla simulazione in cui i due utenti hanno posizioni fisse, con esponente di path-loss di valore pari a due, con le dimensioni dei lati della regione settate a $53,17m$, con tutti gli AP a singola antenna, dove però il numero di antenne totali che costituiscono lo scenario è variabile.

Anche per quanto riguarda la simulazione in cui viene valutata l'influenza dell'esponente di path-loss α , facendolo variare da un valore pari a due ad un valore pari a tre per diversi valori del numero di antenne totali e con una dimensione del lato pari a $53,17m$, sono state calcolate le misure X_{fp} e riportate in tabella 4.9.

Nella tabella 4.10, invece, sono stati riportati i valori delle misure di propagazione favorevole ricavate dalle simulazioni in cui vengono fatti variare i due parametri di ingresso: numero di antenne per ciascun AP e numero di AP. In queste simulazioni vengono mantenuti costanti le dimensioni del lato, impostato a $53,17m$, e l'esponente di path-loss α scelto ad un valore pari a due.

Numero di antenne totali (M)	X_{fp}
40	0.0269
60	0.0184
80	0.0135
100	0.0108
200	0.0054

Tabella 4.8: Valori delle misure X_{fp} di un sistema cell-free massive MIMO con utente k -esimo e utente j -esimo in posizioni fisse, con esponente di path-loss $\alpha = 2$, in una regione quadrata di lato di $53,17m$, in cui varia il numero di antenne totali sul perimetro.

Numero antenne totali (M)	60	60	80	80	100	100	200	200
Esponente di path-loss (α)	2	3	2	3	2	3	2	3
X_{fp}	0.0184	0.0206	0.0135	0.0154	0.0108	0.0118	0.0054	0.0062

Tabella 4.9: Valori delle misure X_{fp} di un sistema cell-free massive MIMO di una regione quadrata di lato $53,17m$ con utenti k -esimo e j -esimo in due posizioni fisse e con numero di antenne ed esponente di path-loss α che assumono valori diversi.

Numero AP (L)	60	60	80	80	100	100	200	200
Numero antenne per AP (N)	2	5	2	5	2	5	2	5
X_{fp}	0.009	0.0036	0.0068	0.0027	0.0054	0.0021	0.0027	0.0011

Tabella 4.10: Valori delle misure X_{fp} di un sistema cell-free massive MIMO di una regione quadrata di lato $53,17m$ con utenti k -esimo e j -esimo a due posizioni fisse, con $\alpha = 2$, in cui variano il numero di AP ed il numero di antenne di ciascun AP.

I dati riportati nelle tabelle 4.8, 4.9 e 4.10 hanno permesso il raggiungimento di determinate deduzioni e conclusioni che mettono in relazione il fenomeno di propagazione favorevole con i parametri in ingresso alla funzione (numero di AP, numero di antenne per ogni AP, numero di antenne totali ed esponente di path-loss α). Dalle tabelle 4.8 e 4.10 si può dedurre che, in un sistema cell-free con una tipologia di regione quadrata (con lato di $53,17m$), con utenti k -esimo e j -esimo in posizioni fisse e con un ambiente di propagazione con esponente di path-loss con valore pari a due, all'aumentare del numero di antenne totali ($M = LN$) le misure X_{fp} tendono maggiormente a zero. Nella tabella 4.8, infatti, si nota la tendenza verso lo zero dei valori di X_{fp} con l'incremento del numero di antenne totali sul perimetro. Con la tabella 4.10, invece, si può osservare la tendenza delle misure X_{fp} a zero a causa dell'aumento sia del numero di AP che del numero di antenne che costituiscono ogni AP. Dalla tabella 4.9 si evince che quando si hanno ambienti di propagazione caratterizzati da un'esponente di path-loss α più alto le misure X_{fp} hanno valori leggermente più alti.

Si è poi proceduto, anche per questo scenario di rete cell-free massive MIMO applicata ad una regione di dimensioni quadrate, con l'esecuzione di simulazioni in cui entrambi gli utenti (k -esimo e j -esimo) possono assumere un determinato numero di posizioni aleatorie all'interno della zona e di conseguenza diverse coordinate all'interno del diagramma cartesiano, riportato in figura 4.10. La figura 4.10, infatti, è la riproduzione dello scenario e comprende sia la rappresentazione delle posizioni degli AP, che la rappresentazione delle posizioni arbitrarie che gli utenti k -esimo e j -esimo possono assumere.

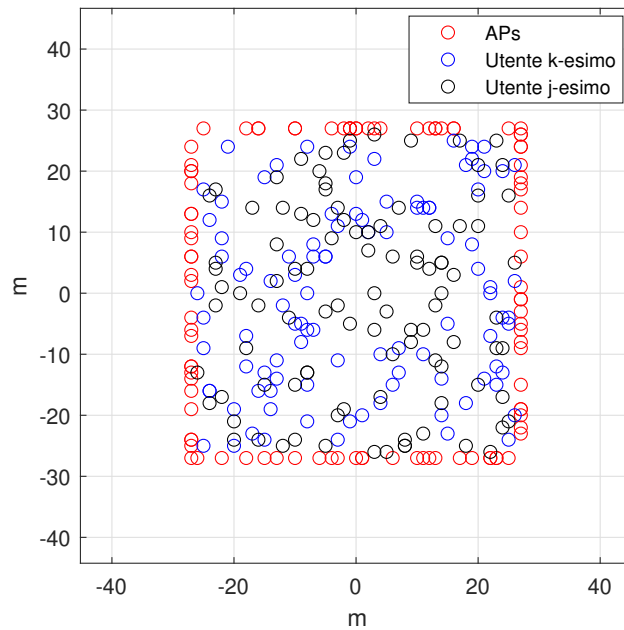


Figura 4.10: Diagramma cartesiano che rappresenta le posizioni degli AP e le posizioni degli utenti k -esimo e j -esimo, di una rete cell-free massive MIMO, di uno scenario con una regione quadrata e di lato di $53.17m$.

Queste tipologie di simulazioni, come già detto in precedenza, sono più complesse, ma permettono di analizzare, verificare e studiare la proprietà della propagazione favorevole di una determinata tipologia di scenario di un caso più simile alla realtà. In questo caso, quando due utenti possono avere posizioni casuali, le misure di X_{fp} sono variabili aleatorie e quindi si calcola la funzione di distribuzione cumulativa delle misure X_{fp} e quindi si valuta la probabilità p_γ secondo la formula (2.54), considerando sempre il valore di riferimento della soglia γ a 0.01. Per ottenere i valori della probabilità p_γ , è stato utilizzato, come in precedenza, il metodo di Monte Carlo con un numero di iterazioni limitato.

Le simulazioni, eseguite con la funzione *Matlab*, per valutare la propagazione favorevole quando i due utenti assumono posizioni random, sono le stesse che sono state svolte per la rete cell-free massive MIMO con la tipologia di regione circolare, spiegate al capitolo 4.1, ovvero:

1. una prima simulazione che valuta, calcola ed analizza la CDF della rete cell-free massive MIMO con uno scenario di un'area quadrata, di lato di $53,17m$, con i due utenti che possono trovarsi un centinaio di posizioni casuali, con un ambiente di propagazione che ha come esponente di path-loss α un valore pari a due e in cui viene fatto variare il numero di antenne totali M per osservare l'influenza di questo parametro sui valori di p_γ . I risultati di questa simulazione sono riportati in tabella 4.11;
 2. una seconda simulazione per valutare, studiare ed analizzare come incide l'esponente di path-loss caratteristico dell'ambiente di propagazione sulla CDF delle misure X_{fp} in una rete cell-free massive MIMO in una regione di dimensioni quadrate di lato di $53,17m$ con l'utente k -esimo e j -esimo che possono posizionarsi in un centinaio di posizioni arbitrarie all'interno dell'area; È stata, infatti, realizzata la tabella 4.12 che riporta i valori di p_γ di uno scenario con le stesse caratteristiche della simulazione precedente, in cui varia il numero di antenne totali, ma con la differenza sostanziale che si assume un esponente di path-loss di valore pari a tre, anzichè pari a due;
 3. una terza simulazione riguarda l'analisi di un caso in cui vengono fatti variare sia il numero di antenne per ciascun AP che il numero di AP, sempre in una rete cell-free massive MIMO di uno scenario in cui vi è la regione quadrata di lato $53,17m$, con esponente di path-loss fissato a due, con due utenti che possono posizionarsi casualmente in un centinaio di posizioni all'interno della regione. I risultati di questa analisi sono visualizzabili in tabella 4.13.
-

Numero antenne totali (M)	p_γ
200	77,4%
300	83,9%
400	88,6%
500	91,2%
800	94%

Tabella 4.11: Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali (M) per uno scenario di una regione quadrata di lato di $53,17m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie ed $\alpha = 2$.

Numero antenne totali (M)	p_γ
200	71,4%
300	75,3%
400	80,1%
500	81,4%
800	85,6%

Tabella 4.12: Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali (M) per uno scenario di una regione quadrata di lato di $53,17m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie ed $\alpha = 3$.

Numero AP (L)	60	60	60	60	100	100	100	100
Numero antenne per AP (N)	1	2	5	10	1	2	5	10
p_γ	48,2%	64,9%	83,9%	91,9%	59%	77,4%	91,2%	95%

Tabella 4.13: Valori di p_γ al variare del numero di AP e del numero di antenne per ciascun AP per uno scenario di una regione quadrata di lato di $53,17m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie ed $\alpha = 2$.

Come per lo scenario di una regione circolare, anche per l'analisi e lo studio della propagazione favorevole su una tipologia scenario di forma quadrata, sono stati realizzati su *Matlab* tre grafici (figura 4.11, 4.12 e 4.13) in cui in ciascuno vi sono rappresentati gli andamenti di tre CDF differenti. Per quanto riguarda il grafico in figura 4.11, sono mostrati le tre differenti curve delle CDF in cui il numero totale di antenne assume i valori pari a 200, 400 e 800, in cui si ha esponente di path-loss α di valore pari a due, in cui il lato della regione ha valore pari a $53,17m$ ed in cui entrambi i due utenti (k -esimo e j -esimo) possono avere un centinaio di posizioni aleatorie. In figura 4.12 le tre CDF raffigurate hanno gli stessi parametri del grafico in figura 4.11 tranne il valore dell'esponente di path-loss che questa volta risulta essere pari a tre, anzichè pari a due. Infine, in figura 4.13, i tre andamenti delle CDF riguardano sempre uno scenario di una regione con lato di $53,17m$, esponente di path-loss pari a due ed i due utenti (k -esimo e j -esimo) che possono avere un centinaio di posizioni aleatorie e si differenziano per il numero di antenne costituenti ciascun AP. Ad esempio nella prima curva della CDF si hanno 100 AP a singola antenna, nella seconda curva della CDF si hanno 100 AP costituiti da due antenne ed infine nella terza curva della CDF si hanno 100 AP formati da cinque antenne.

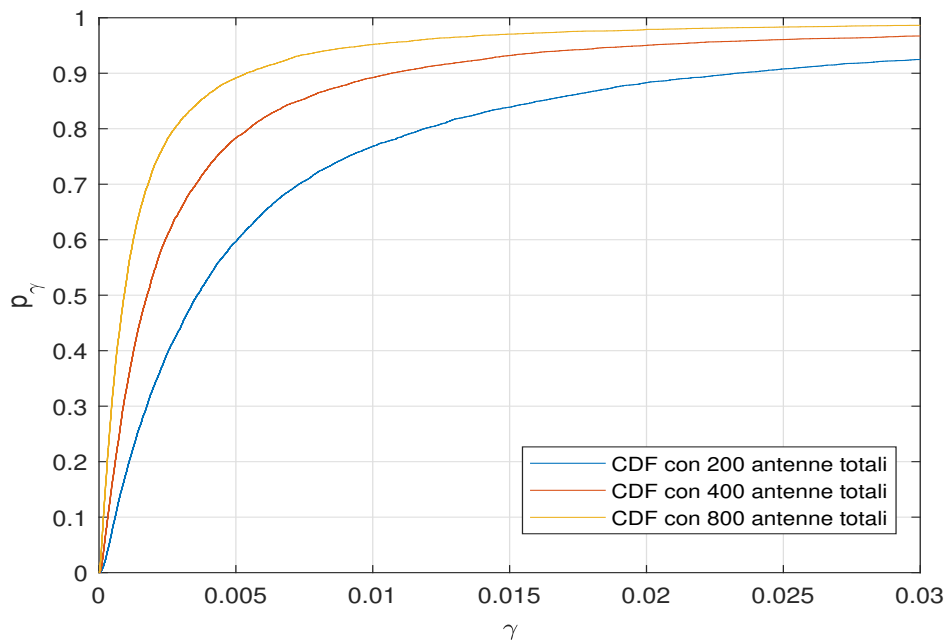


Figura 4.11: Andamenti p_γ con 200, 400 e 800 antenne totali, in una regione di forma quadrata di lato pari a $53,17m$ ed $\alpha = 2$.

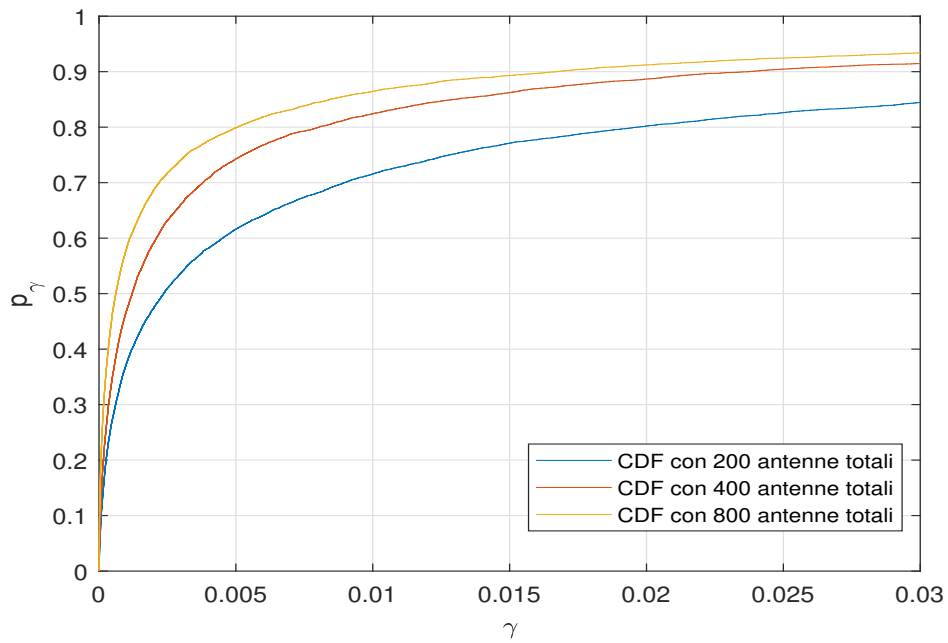


Figura 4.12: Andamenti p_γ con 200, 400 e 800 antenne totali, in una regione di forma quadrata di lato pari a $53,17m$ ed $\alpha = 3$.

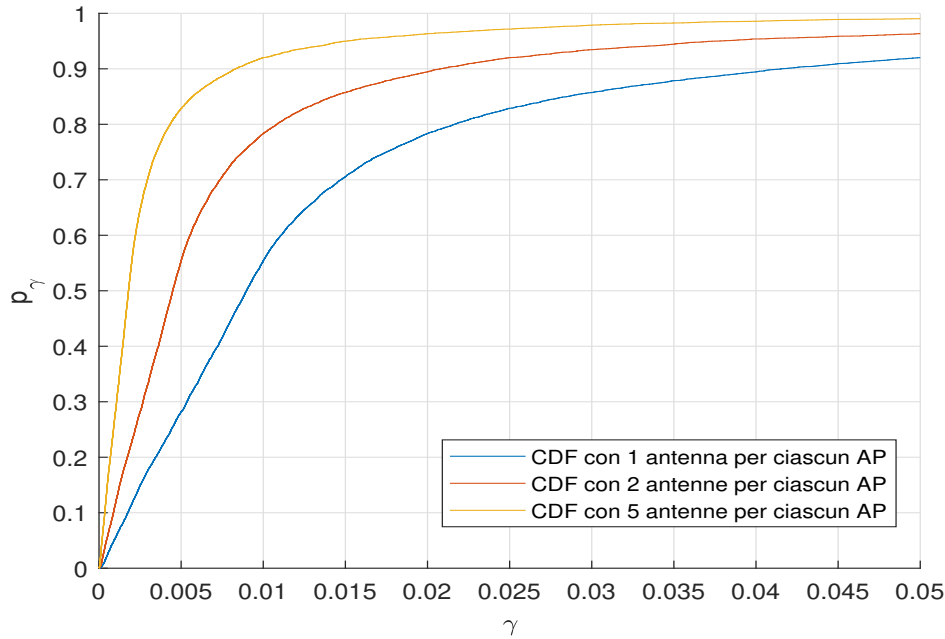


Figura 4.13: Andamenti p_γ con 100 AP costituiti da una singola antenna, da due antenne e da cinque antenne in una regione di forma quadrata di lato pari a $53,17m$ ed $\alpha = 2$.

Grazie ai risultati, riportati nelle tabelle 4.5, 4.6, 4.7, 4.11, 4.12 e 4.13 e grazie ai grafici 4.5, 4.6, 4.7, 4.11, 4.12 e 4.13 che riguardano i valori p_γ delle due differenti tipologie di scenario (ambiente regione circolare ed ambiente di forma quadrata), quando i due utenti (k -esimo e j -esimo) possono assumere un certo numero di posizioni aleatorie ed ottenuti mediante il metodo di Monte Carlo si è potuto giungere ad alcune conclusioni che fanno comprendere la relazione tra fenomeno di propagazione favorevole ed alcune caratteristiche del sistema cell-free massive MIMO, come: numero di AP (L), numero di antenne costituenti ciascun AP (N), numero di antenne di servizio totali (M) ed esponente di path-loss α . Si conclude, infatti, che aumentando sia il numero di AP, che il numero di antenne costituenti ciascun AP e quindi con un aumento del numero di antenne totali, i valori di p_γ aumentano, migliorando, così, il fenomeno di propagazione favorevole per entrambe le tipologie dei due scenari analizzati della rete cell-free massive MIMO.

Per quanto riguarda il parametro esponente di path-loss α , si evince, dai risultati mostrati nelle tabelle 4.6 e 4.12 e nei grafici 4.6 e 4.12, che quando si aumenta l'esponente di path-loss dell'ambiente di propagazione, utilizzando comunque valori accettabili, i valori di p_γ diminuiscono peggiorando, così, la propagazione favorevole.

4.3 Propagazione favorevole con AP situati all'interno della regione

Dopo aver studiato ed esaminato la propagazione favorevole per una tecnologia cell-free massive MIMO applicata a due tipologie diverse di ambienti in cui gli AP sono situati lungo il perimetro della zona presa in considerazione, si è deciso di studiare la propagazione favorevole anche per il sistema cell-free massive MIMO applicato ad ambienti che hanno gli AP distribuiti al loro interno, come mostrato nelle figure 4.14 e 4.15. Le due regioni considerate sono di forma circolare e di forma quadrata con aree di 2827 m^2 circa. All'interno di queste aree gli utenti possono assumere un centinaio di posizioni arbitrarie. Per studiare la propagazione favorevole, anche in questo caso, si utilizzano gli studi fondati sulla geometria stocastica, descritti al capitolo 2.4, e si ricavano i valori delle CDF empiriche, quindi i valori di p_γ , con l' utilizzo del metodo di Monte Carlo, sfruttando le formule (2.53) e (2.54). La propagazione favorevole fa sì che ci sia ortogonalità tra due canali. Dallo studio dell'espressione matematica (2.53), che definisce la misura di propagazione favorevole, si nota che la densità di antenne totali sparse all'interno dell'area incide sull'ortogonalità tra i due canali. L'aumento della densità di antenne può avvenire in due differenti casi, entrambi contribuiscono a migliorare la propagazione favorevole e quindi l'ortogonalità tra due canali.

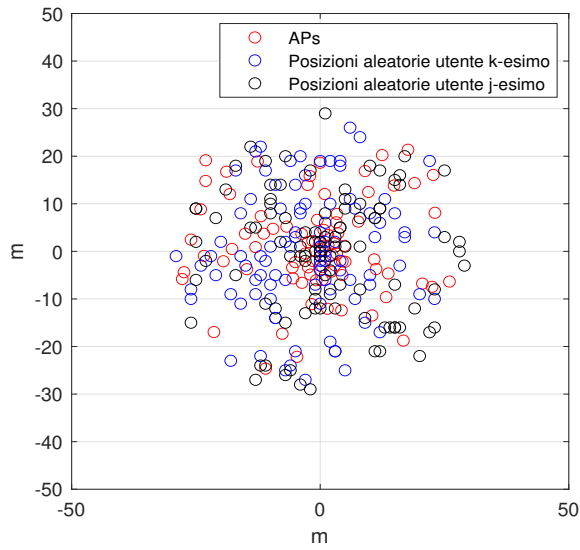


Figura 4.14: Scenario di regione circolare di raggio $30m$ con AP sparsi all'interno dell'area ed esponente di path-loss pari a due, in cui le posizioni arbitrarie dei due utenti possono essere un centinaio.

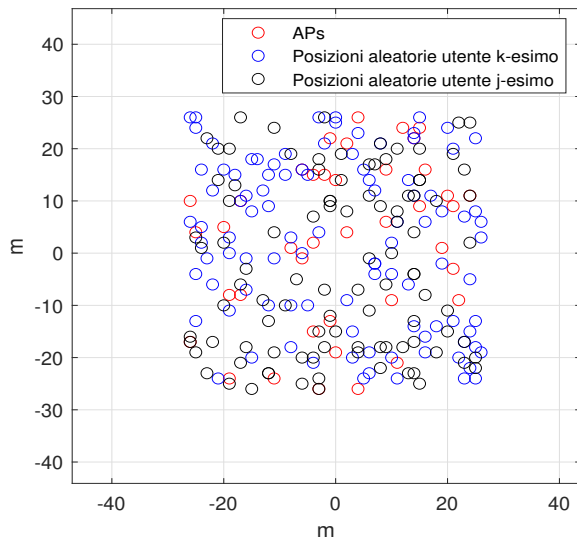


Figura 4.15: Scenario di regione quadrata di lato $53,17m$ con AP sparsi all'interno dell'area ed esponente di path-loss pari a due, in cui le posizioni arbitrarie dei due utenti possono essere un centinaio.

I due differenti casi sono:

1. quando l'aumento del numero della densità di antenne totali (M) avviene con l'aumento del numero di antenne per ciascun AP (N), mentre il numero di AP presenti (L) rimane costante. Nelle tabelle 4.14 e 4.15 vi sono riportati i valori di p_γ per questo caso, rispettivamente per la regione circolare e per la regione quadrata. Per entrambi le regioni si considera un esponente di path-loss di valore pari a due. Grazie ai risultati riportati nelle tabelle 4.14 e 4.15 si dimostra che l'aumento del numero di antenne per ciascun AP migliora la propagazione favorevole;
2. quando si verifica un aumento del numero di antenne totali (M) mediante l'incremento della densità di AP e mantenendo fisso il numero di antenne per ciascun AP (N). Le tabelle 4.16 e 4.17 contengono i valori p_γ per questo caso, per la regione circolare e per quella di forma quadrata, entrambe sempre con esponente di path-loss pari a due. Si può quindi affermare, osservando i valori di p_γ delle tabelle 4.16 e 4.17 come, anche con l'aumento del numero di AP, la propagazione favorevole tende a migliorare.

Numero AP (L)	80	80	80
Numero antenne per AP (N)	3	5	10
p_γ	73,9%	80%	91%

Tabella 4.14: Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali sparse all'interno dell'area, mantenendo fisso il numero di AP, per uno scenario di una regione circolare di raggio di $30m$, in cui i due utenti possono assumere un centinaio di posizioni arbitrarie ed esponente di path-loss α pari a 2.

Numero AP (L)	80	80	80
Numero antenne per AP (N)	3	5	10
p_γ	84,6%	90,5%	95,2%

Tabella 4.15: Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali sparse all'interno dell'area, mantenendo fisso il numero di AP, per uno scenario di una regione quadrata di lato di $53.17m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie ed esponente di path-loss α pari a 2.

Numero AP (L)	20	40	60	80	150
Numero antenne per AP (N)	10	10	10	10	10
p_γ	65%	74%	84,5%	91%	93%

Tabella 4.16: Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali sparse all'interno dell'area, facendo variare il numero di AP e mantenendo fisso il numero di antenne costituenti ciascun AP, per uno scenario di una regione circolare di raggio di $30m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie ed esponente di path-loss α pari a 2.

Numero AP (L)	20	40	60	80	150
Numero antenne per AP (N)	10	10	10	10	10
p_γ	73,9%	87,7%	92%	93,5%	98,4%

Tabella 4.17: Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali sparse all'interno dell'area, facendo variare il numero di AP e mantenendo fisso il numero di antenne costituenti ciascun AP, per uno scenario di una regione quadrata di lato di $53,17m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie ed esponente di path-loss α pari a 2.

Osservando tutte le tabelle dei due casi (4.14-4.15-4.16-4.17) si può dedurre anche che l'aumento del numero di AP (L) ha una maggiore influenza sul miglioramento della propagazione favorevole, rispetto all'incremento del numero di antenne per ciascun AP (N). Quanto appena affermato è dimostrabile anche matematicamente, in quanto nella formula (2.53) si vede che quando il numero di AP aumenta, il denominatore cresce in maniera proporzionale al numero di AP al quadrato, mentre il numeratore aumenta linearmente con il numero di AP. Questo concetto, inoltre, si può notare nei due grafici delle figure 4.16 e 4.17 che rappresentano, rispettivamente per un ambiente circolare e per un ambiente di forma quadrata di stessa area, due andamenti delle CDF, che riguardano i due seguenti casi:

- un caso in cui il numero di antenne totali ($M = 400$) è ottenuto da un minor numero di AP ($L = 40$) e da un numero maggiore di antenne per ciascun AP ($N = 10$);
 - un caso in cui il numero totale di antenne ($M = 400$) viene raggiunto da un numero più elevato di AP ($L = 80$) e da un numero più basso di antenne per ciascun AP ($N = 5$).
-

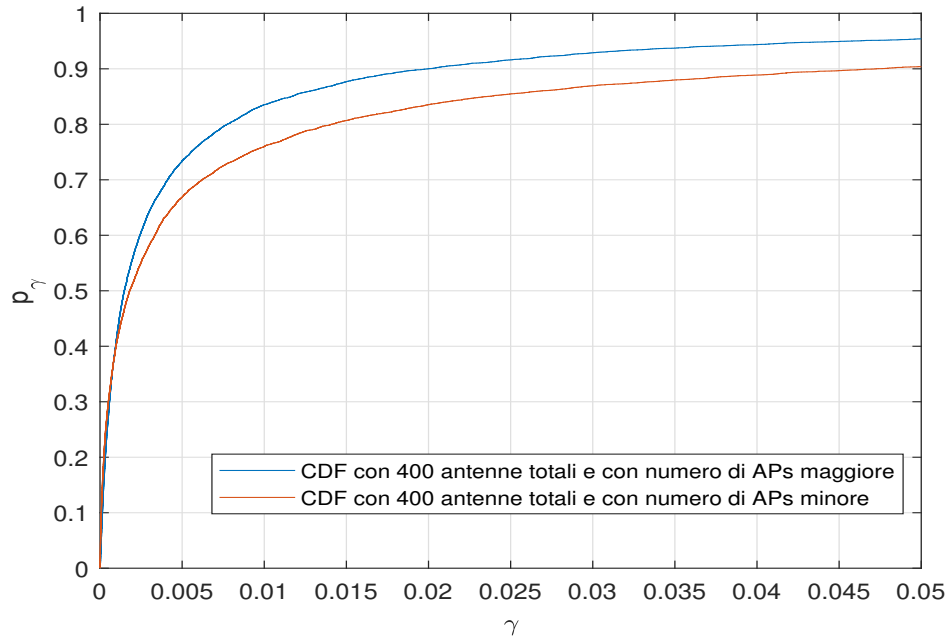


Figura 4.16: Andamenti di due curve della CDF che differiscono per numero di AP sparsi in una regione circolare di raggio pari a $30m$ e numero di antenne per ciascun AP, con 400 antenne totali ed $\alpha = 2$.

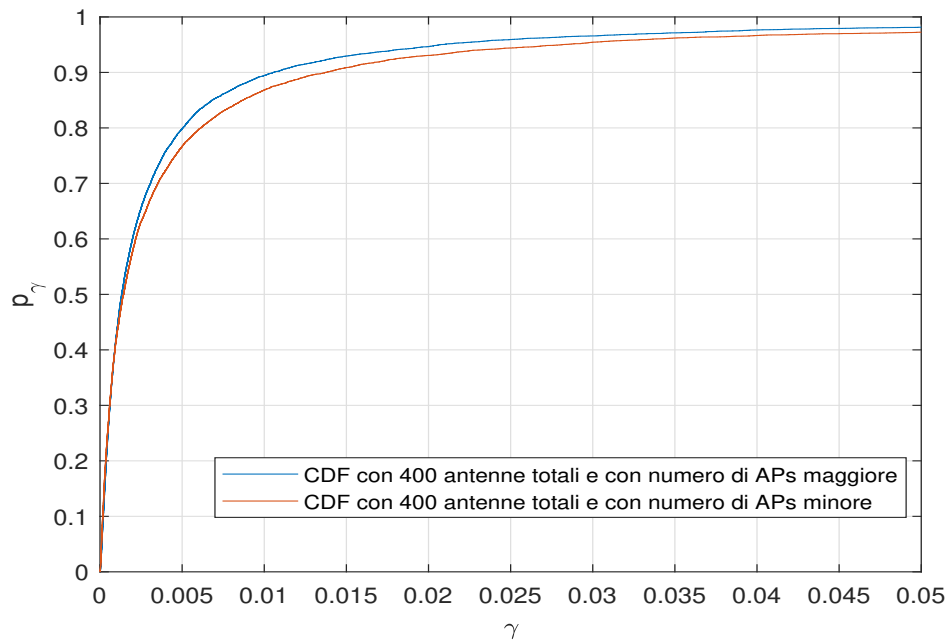


Figura 4.17: Andamenti di due curve della CDF che differiscono per numero di AP sparsi in una regione quadrata di lato pari a $53,17m$ e numero di antenne per ciascun AP, con 400 antenne totali ed $\alpha = 2$.

In un secondo momento è stato opportuno valutare anche l'influenza che l'ambiente di propagazione ha sul fenomeno di propagazione favorevole nella tipologia di scenario di una rete cell-free massive MIMO in cui gli AP sono localizzati all'interno della regione. Sono state, quindi, realizzate le tabelle 4.18 e 4.19. La tabella 4.18 si riferisce ad una zona circolare e confronta i valori di p_γ ottenuti da ambienti di propagazione caratterizzati da due valori diversi di esponenti di path-loss α : 2 e 3.

La tabella 4.19 riporta i valori di p_γ ottenuti da simulazioni con le stesse caratteristiche di quelle utilizzate per realizzare la tabella 4.18, ma per una regione di forma quadrata. Grazie alle simulazioni in cui sono stati ottenuti i valori di p_γ presenti nelle tabelle 4.18 e 4.19, si evince che un aumento dell'esponente di path-loss α tende a peggiorare la propagazione favorevole.

Numero AP (L)	60	60	80	80	150	150
Numero antenne per AP (N)	10	10	10	10	10	10
α	2	3	2	3	2	3
p_γ	84,5%	81,3%	91%	84,4%	93%	89,6%

Tabella 4.18: Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali sparse all'interno dell'area per uno scenario di una regione circolare di raggio di $30m$, in cui i due utenti possono assumere un centinaio di posizioni arbitrarie e in cui si confrontano i valori ottenuti da due diversi esponente di path-loss α (2 e 3).

Numero AP (L)	60	60	80	80	150	150
Numero antenne per AP (N)	10	10	10	10	10	10
α	2	3	2	3	2	3
p_γ	92%	89%	93,5%	91,5%	98,4%	96,5%

Tabella 4.19: Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali sparse all'interno dell'area per uno scenario di una regione quadrata di lato di $53,17m$, in cui i due utenti possono assumere un centinaio di posizioni arbitrarie e in cui si confrontano i valori ottenuti da due diversi esponente di path-loss α (2 e 3).

Infine sono state realizzate le tabelle 4.20 e 4.21, riferite rispettivamente ad un'area circolare e ad un'area di forma quadrata. Entrambe le tabelle confrontano il fenomeno della propagazione favorevole nel caso in cui gli AP sono disposti sul perimetro con il caso in cui gli AP sono posizionati in modo arbitrario all'interno della zona presa in esame.

Numero AP (L)	20	40	60	80
Numero antenne per AP (N)	10	10	10	10
p_γ AP interni	65%	74%	81,3%	91%
p_γ AP sul perimetro	76,8%	88,3%	92,1%	93,4%

Tabella 4.20: Confronto valori di p_γ tra una distribuzione di AP all'interno della regione circolare e una distribuzione di AP sul perimetro, a parità di numero di antenne totali, numero di AP, numero di antenne per ciascun AP ed esponente di path-loss $\alpha = 2$.

Numero AP (L)	20	40	60	80
Numero antenne per AP (N)	10	10	10	10
p_γ AP interni	73,9%	87,7%	92%	93,5%
p_γ AP sul perimetro	77,4%	88,6%	92,8%	94%

Tabella 4.21: Confronto valori di p_γ tra una distribuzione di AP all'interno della regione quadrata e una distribuzione di AP sul perimetro, a parità di numero di antenne totali, numero di AP, numero di antenne per ciascun AP ed esponente di path-loss $\alpha = 2$.

In conclusione si può quindi affermare che, in reti cell-free massive MIMO caratterizzate da AP disposti in maniera casuale internamente all'ambiente preso in esame, la propagazione favorevole migliora sempre quando vi è un aumento del numero di antenne totali presenti, mentre tende sempre a peggiorare quando si ha un ambiente di propagazione con esponente di path-loss più alto. Nel caso di aumento del numero di antenne totali (M), l'aumento del numero di AP (L) migliora in maniera più netta la propagazione favorevole, rispetto all'aumento del numero antenne per ciascun AP (N). In generale, per la propagazione favorevole è meglio posizionare gli AP sul perimetro piuttosto che posizionarli sparsi all'interno della regione considerata. Il posizionamento degli AP sul perimetro migliora maggiormente la propagazione di una tipologia di ambiente di forma circolare, mentre per un ambiente di forma quadrata vi è un miglioramento meno significativo, soprattutto quando si ha un numero di antenne totali sufficientemente alto.

Capitolo 5

Channel-hardening e propagazione favorevole in uno scenario realistico tipo stadio

Estremamente interessante, è stato svolgere, come analisi finale e per completare maggiormente lo studio delle proprietà di channel-hardening e di propagazione favorevole sui sistemi cell-free massive MIMO, alcune simulazioni, in grado di ottenere risultati relativi ad entrambe le caratteristiche, per uno scenario realistico come quello di uno stadio. Per eseguire queste simulazioni, quindi per implementare questa tipologia di scenario su *Matlab*, sono state utilizzate le stesse funzioni descritte precedentemente, in cui sono state applicate determinate modifiche riguardanti specialmente la disposizione degli AP e la disposizione degli utenti.

Come tipologia di scenario è stato, appunto, considerato uno stadio di calcio di forma ellissoidale, con un'area di $42474m^2$, caratterizzato da un perimetro interno ed un perimetro esterno, in cui gli AP possono essere posizionati in quattro diverse modalità:

1. AP posizionati solamente sul perimetro esterno;
2. AP situati solamente sul perimetro interno;
3. AP disposti per metà sul perimetro interno e per metà sul perimetro esterno;

4. AP distribuiti all'interno dei settori dove si trovano gli utenti.

Lo stadio preso in considerazione presenta un ambiente di propagazione caratterizzato da un esponente di path-loss α di valore pari a 2.5. Si ipotizza di lavorare ad una frequenza di lavoro di 28 GHz con una banda di frequenza di 20 MHz.

Le simulazioni sono state eseguite ipotizzando di dover servire un numero di utenti pari a 1000. Questo numero è notevolmente minore rispetto alla capienza dello stadio, perché si ipotizza di servire gli utenti con un'unica risorsa radio a banda stretta (es. un resource block del sistema 5G), mentre solitamente il gestore ha a disposizione più risorse radio per servire cifre maggiori di utenti.

In uno scenario di questo tipo si ipotizza di poter applicare un sistema a radio-stripes per l'implementazione a livello pratico della tecnologia cell-free massive MIMO, in modo tale da poter godere di tutti i vantaggi, descritti al capitolo 1.3, che il sistema a radio-stripes presenta.

Sono state generate le rappresentazioni su diagramma cartesiano dello scenario di uno stadio con la disposizione di 1000 utenti nei vari settori, ad esempio durante un evento calcistico. In particolare, le rappresentazioni, in figura 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, differiscono per la distribuzione delle antenne, nello scenario dello stadio, durante un evento calcistico, in cui i 1000 utenti sono posizionati uniformemente nei vari settori.

- Nel diagramma cartesiano, riportato in figura 5.1, si nota che le antenne sono disposte sul perimetro esterno dello stadio;
 - nel diagramma cartesiano, raffigurato in figura 5.2, le antenne si trovano sul perimetro interno dello stadio;
 - nel diagramma cartesiano, rappresentato in figura 5.3, le antenne sono distribuite per metà sul perimetro interno e per metà sul perimetro esterno dello stadio;
 - nel diagramma cartesiano di figura 5.4, le antenne sono distribuite nei settori dove si trovano anche gli utenti.
-

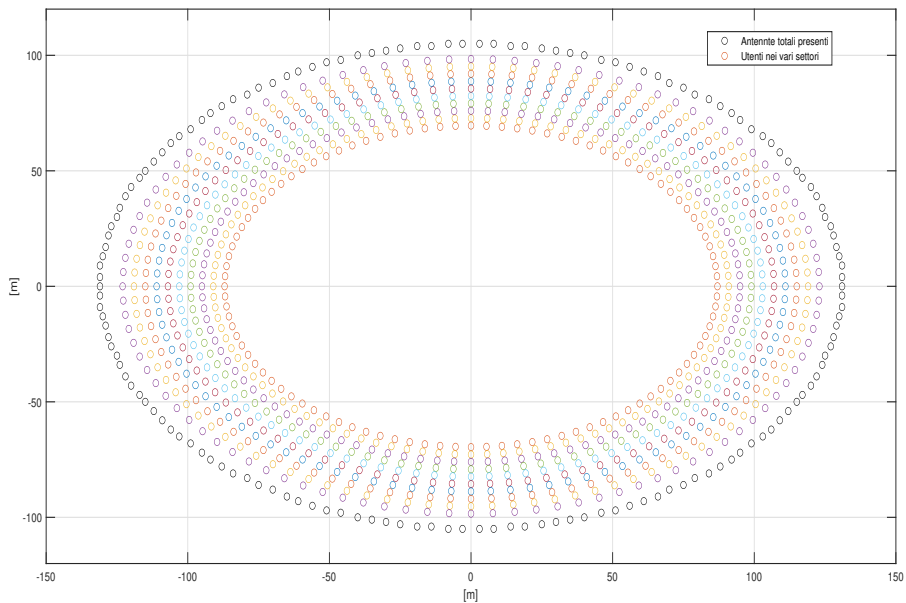


Figura 5.1: Diagramma cartesiano della rappresentazione di uno stadio di area di $42474m^2$, in cui vi sono un migliaio di utenti disposti nei vari settori e le antenne sono distribuite sul perimetro esterno.

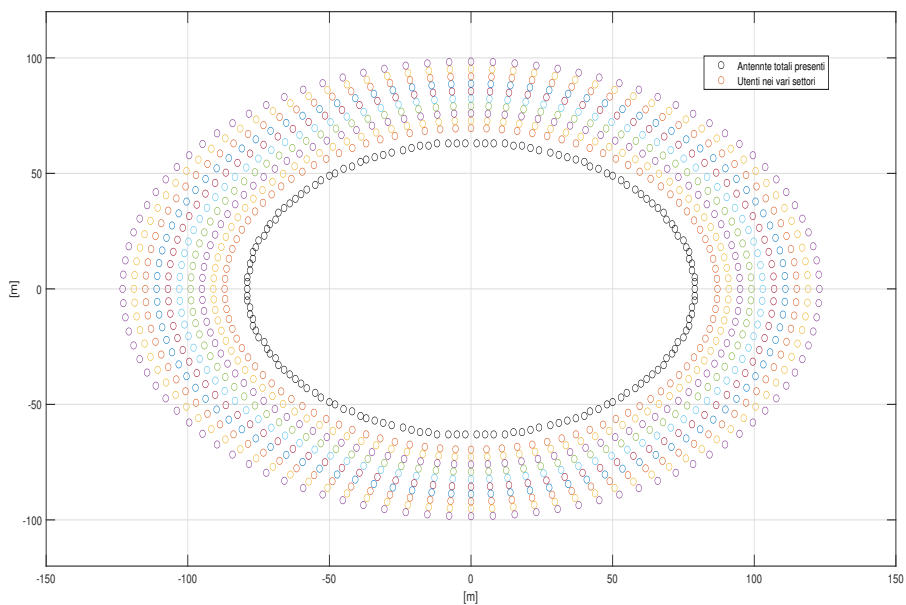


Figura 5.2: Diagramma cartesiano della rappresentazione di uno stadio di area di $42474m^2$, in cui vi sono un migliaio di utenti disposti nei vari settori e le antenne sono disposte sul perimetro interno.

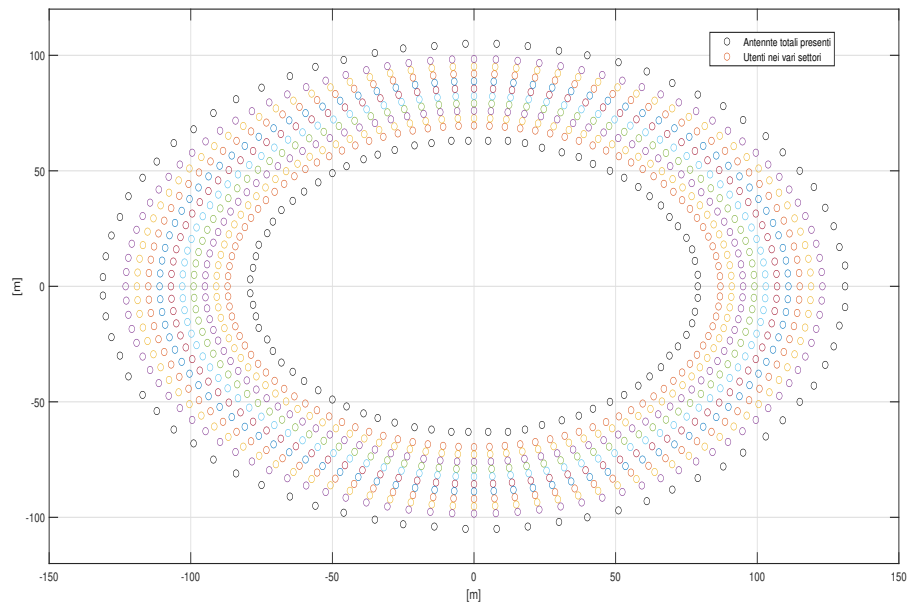


Figura 5.3: Diagramma cartesiano della rappresentazione di uno stadio di area di $42474m^2$, in cui vi sono un migliaio di utenti disposti nei vari settori e le antenne sono posizionate per metà sul perimetro esterno e per metà sul perimetro interno.

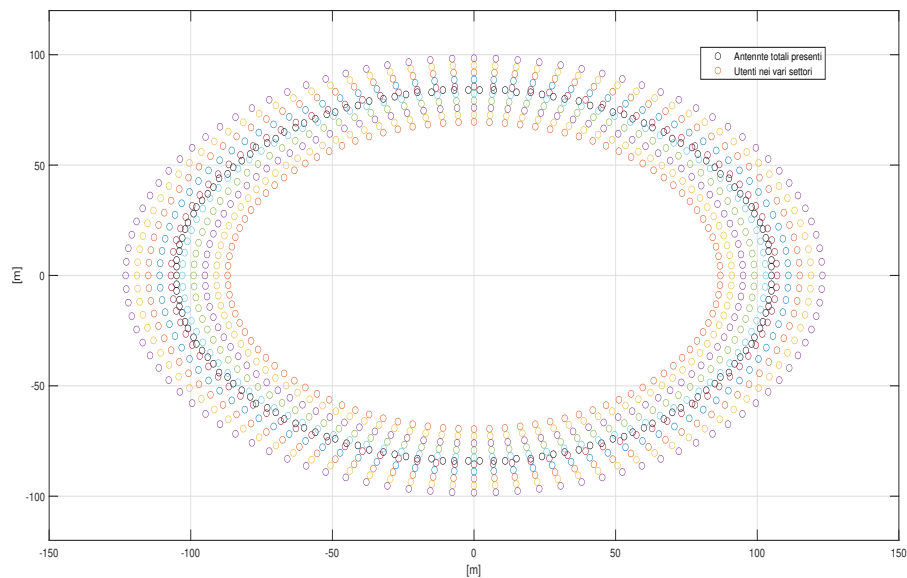


Figura 5.4: Diagramma cartesiano della rappresentazione di uno stadio di area di $42474m^2$, in cui vi sono un migliaio di utenti disposti nei vari settori e le antenne si trovano nei settori dove si trovano anche gli utenti.

5.1 Channel-hardening relativo allo scenario dello stadio

Per quanto riguarda l'analisi del fenomeno di channel-hardening per il caso realistico dello stadio, sono state eseguite opportune simulazioni con il fine di ricavare i valori della CDF p_θ , utilizzando sempre la medesima formula (2.24). I valori p_θ servono per valutare il fenomeno di channel-hardening del sistema cell-free massive MIMO applicato a questo specifico scenario dello stadio, che presenta le caratteristiche descritte precedentemente.

Dalle simulazioni che sono state eseguite, mediante *Matlab*, sono stati ricavati i valori di p_θ al variare del numero di antenne totali ed al variare della disposizione delle antenne.

È stata realizzata la tabella 5.1, in base ai tre scenari delle figure 5.1 - 5.4, che contiene i vari valori di p_θ al variare del numero di antenne totali (M), in cui i 1000 utenti sono posizionati nei vari settori, come ad un evento calcistico. Quando le antenne sono localizzate all'interno dei settori dove si trovano gli utenti, come mostrato nel diagramma cartesiano 5.4, infatti, si ha un notevole peggioramento del channel-hardening. Questo peggioramento è spiegato da quanto detto al capitolo 3.3, ovvero dalla riduzione elevata delle distanze tra AP e utenti.

Numero antenne totali (M)	1000	1200	1600	2000	2400	3000
Antenne sul perimetro esterno	70,5%	75,5%	85,5%	93%	95,4%	100%
Antenne sul perimetro interno	84,5%	90,1%	95,4%	100%	100%	100%
Antenne sia sul perimetro interno che esterno	44%	50,9%	64,7%	73,8%	81%	87,4%
Antenne distribuite nei settori	23%	34,6%	51,3%	61,4%	68%	75,4%

Tabella 5.1: Risultati dei valori di p_θ di un sistema cell-free massive MIMO applicato ad uno stadio di area $42474m^2$ con 1000 utenti, facendo variare il numero di antenne totali M e le posizioni delle antenne e con un esponente di path-loss pari a 2.5.

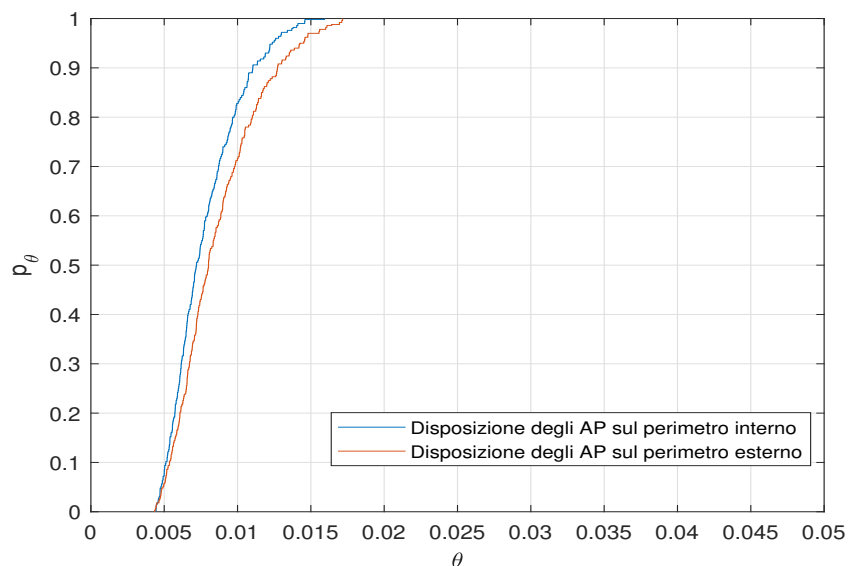


Figura 5.5: Confronto tra due diversi andamenti delle CDF p_θ riferiti allo scenario dello stadio con 1000 antenne totali, che differiscono per la disposizione degli AP, in un caso si hanno gli AP posizionati sul perimetro interno, nell'altro caso gli AP sono disposti sul perimetro esterno.

La tabella 5.1 ed il grafico in figura 5.5 consentono di raggiungere determinate conclusioni relative alla proprietà di channel-hardening della tecnologia cell-free massive MIMO applicata ad uno scenario realistico come lo stadio considerato. Si evince, infatti, che in questa tipologia di scenario l'aumento del numero di antenne totali permette di migliorare il channel-hardening e la configurazione in cui le antenne si trovano sul perimetro interno, a parità di numero di antenne totali presenti, risulta essere la configurazione per migliorare maggiormente il channel-hardening. Nello specifico, sono sufficienti circa 1800-2000 antenne per raggiungere valori prossimi al 100%. Il fatto che la configurazione migliore per il channel-hardening sia quella in cui gli AP sono distribuiti sul perimetro interno si può spiegare a livello intuitivo e matematico in quanto in questa tipologia di distribuzione si ha un minor numero di utenti situati a distanza più ravvicinata dagli AP.

5.2 Propagazione favorevole relativa allo scenario dello stadio

Oltre alla valutazione delle CDF empiriche p_θ per il fenomeno di channel-hardening relativo allo scenario realistico dello stadio, con le caratteristiche già descritte, è stato opportuno analizzare anche i valori delle CDF empiriche p_γ per esaminare il fenomeno di propagazione favorevole.

Per i valori di p_γ è stata utilizzata la definizione matematica (2.54).

È stata realizzata la tabella 5.2 che riporta i valori p_γ di simulazioni differenti, che differiscono per numero di antenne totali e per posizioni assunte dagli AP e quindi delle antenne totali. Le CDF empiriche ricavate si riferiscono, appunto, alle diverse configurazioni relative allo scenario dello stadio mostrate nelle figure 5.1-5.4.

Numero antenne totali (M)	500	800	1000	1200	1600	2000
Antenne sul perimetro esterno	97,1%	98,3%	98,7%	98,9%	99%	99,5%
Antenne sul perimetro interno	92,6%	95,5%	96,4%	96,6%	98%	98,6%
Antenne sia sul perimetro interno che esterno	99,3%	99,5%	99,8%	100%	100%	100%
Antenne distribuite nei settori	99,6%	99,8%	100%	100%	100%	100%

Tabella 5.2: Risultati dei valori di p_γ di un sistema cell-free massive MIMO applicato ad uno stadio di area $42474m^2$ con 1000 utenti, facendo variare il numero di antenne totali M e le posizioni delle antenne e con un esponente di path-loss pari a 2.5.

Osservando i valori p_γ , presenti in tabella 5.2, si deduce come l'aumento del numero di antenne totali permette di migliorare il fenomeno di propagazione favorevole. Si osserva anche che, per questo fenomeno, non si hanno evidenti differenze tra una configurazione e l'altra. Nessuna configurazione, infatti, migliora in maniera netta rispetto alle altre la propagazione favorevole. Nonostante non ci siano grandi differenze, la distribuzione migliore delle antenne totali è quella in cui gli AP sono distribuiti all'interno dei settori dove si trovano gli utenti. In questo caso la propagazione favorevole non viene peggiorata da una riduzione delle distanze tra AP e utenti. Questa configurazione in questa tipologia di scenario risulta essere, quindi, vantaggiosa per la propagazione favorevole, ma piuttosto critica per il channel-hardening. Si evince anche, dal confronto delle due tabelle, che si raggiunge una buona caratteristica di propagazione favorevole per un valore più basso del numero di antenne, rispetto a quello che occorre per avere una buona caratteristica di channel-hardening. Nello specifico, sono sufficienti circa 1000-1600 antenne per raggiungere valori prossimi al 100% per la propagazione favorevole con la stessa configurazione ottimale per il channel-hardening. La presenza di

una buona propagazione favorevole per questo scenario può essere spiegata a livello intuitivo e a livello matematico dalle dimensioni dello stadio e dalla disposizione degli utenti nei vari settori. La distanza tra gli utenti risulta essere elevata per questa tipologia di scenario. Quando i due utenti si trovano più distanti, infatti, è maggiormente probabile che i loro canali siano ortogonali.

Dati i valori di p_θ e p_γ riportati nelle due tabelle (5.1 e 5.2) a parità di numero di antenne si preferisce posizionare gli AP sul perimetro interno.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi sono state ottenute alcune considerazioni e valutazioni su due importanti aspetti chiave, ovvero sul fenomeno di channel-hardening e di propagazione favorevole, relative alla rete cell-free massive MIMO, che rappresenta la possibile soluzione per massimizzare ed ottimizzare diverse prestazioni delle generazioni future di rete mobile. È stato possibile, infatti, grazie alle simulazioni svolte su *Matlab* per un sistema cell-free massive MIMO applicato a diversi scenari, giungere ad importanti conclusioni ed affermazioni.

Per quanto riguarda la caratteristica di channel-hardening in un primo momento essa è stata studiata e verificata per un caso di uno scenario semplificato in cui l'utente assume una singola posizione all'interno di una regione. Successivamente si è proceduto con lo studio di uno scenario più complesso in cui gli utenti possono assumere diverse posizioni aleatorie all'interno della regione presa in considerazione. Sia per lo scenario semplificato, che per quello più complesso le conclusioni raggiunte riguardano due tipologie di regioni: regione di forma circolare e regione di forma quadrata. Nello scenario più complicato e più simile alla realtà, in cui gli utenti possono assumere posizioni casuali, sono stati ricavati ed esaminati gli andamenti ed i valori delle CDF empiriche p_θ delle misure di channel-hardening X_{ch} , ottenute mediante l'espressione (2.25), sfruttando il metodo di Monte Carlo, che hanno permesso di giungere alle seguenti ed importanti conclusioni, valide per entrambi gli scenari:

- l'aumento del numero di antenne totali, distribuite all'interno dell'area analizzata, che può essere dovuto sia da un aumento del numero di AP, oppure avendo più antenne per ogni AP, comporta un miglioramento del fenomeno di channel-hardening;

- un migliore channel-hardening è la caratteristica di scenari in cui si ha un ambiente di propagazione con esponente di path-loss α basso, ma comunque significativo. Un aumento dell'esponente di path-loss causa un peggioramento del channel-hardening;
- se le posizioni degli utenti si concentrano maggiormente al centro della regione, piuttosto che sui bordi, il channel-hardening migliora;
- a parità di numero di antenne totali, di disposizione degli AP, di ambiente di propagazione e area della regione, la proprietà di channel-hardening è migliore in uno scenario di regione circolare piuttosto che in uno scenario di regione di forma quadrata.

Le conclusioni descritte fino a questo momento, riguardano un sistema cell-free massive MIMO in cui le antenne sono disposte sul perimetro dell'area analizzata. Dopotutto, vi è anche la possibilità di distribuire gli AP, e quindi le antenne totali, sparsi all'interno della regione. Sono state effettuate le simulazioni relative a questa disposizione degli AP per avere una valutazione più completa ed accurata sulla proprietà di channel-hardening. Dai valori delle CDF delle misure di channel-hardening (X_{ch}) riferiti a questa caso, sia per uno scenario di regione circolare che per uno scenario di forma quadrata, si evince che:

- a differenza di quando gli AP sono posizionati sul perimetro, in questo caso incidono in modo evidente sul channel-hardening le distanze tra AP e utenti e la densità del numero di AP. Dai risultati ottenuti si osserva che la riduzione delle distanze AP-utenti causa un peggioramento del channel-hardening e per questo fenomeno si preferisce avere un maggior numero di antenne totali senza aumentare troppo il numero di AP. Bisogna, quindi, trovare il giusto trade-off tra densità di AP e numero di antenne per ciascun AP;
 - l'incremento del numero di antenne per ciascun AP migliora sempre il channel-hardening;
 - quando si ha un ambiente di propagazione con esponente di path-loss α relativamente piccolo, l'aumento del numero di antenne totali influisce
-

in maniera maggiore sul channel-hardening, rispetto alla densità degli AP;

- un esponente di path-loss più alto peggiora il channel-hardening e se esso è affiancato ad un aumento significativo del numero di AP, si possono verificare situazioni piuttosto critiche per avere un buon channel-hardening.

Effettuando, inoltre, il confronto tra il caso in cui le antenne sono disposte sul perimetro ed il caso in cui sono distribuite all'interno della regione, si conclude che per favorire il channel-hardening è meglio il caso in cui le antenne sono localizzate sul perimetro. Questa affermazione è valida per entrambe le tipologie di regioni analizzate, circolare e quadrata. Le stesse simulazioni per gli stessi scenari sono state effettuate per il raggiungimento di alcune valutazioni, analisi e conclusioni relative anche alla proprietà di propagazione favorevole dei sistemi cell-free massive MIMO. Come per la caratteristica di channel-hardening, anche per questa caratteristica sono stati analizzati sia il caso di scenario più elementare, sia il caso di scenario più complesso e più simile alla realtà. Per il caso più semplice si hanno solamente due utenti all'interno della regione, per il caso più complicato si hanno i due utenti che possono assumere posizioni aleatorie all'interno della regione presa in esame. Per quest'ultimo caso sono state, così, ricavate le CDF delle misure di propagazione favorevole (X_{fp}), ottenute utilizzando le espressioni (2.53) e (2.54), sia per lo scenario di regione circolare, che per lo scenario di regione di forma quadrata, con AP disposti sul perimetro. Dai valori di queste CDF si dimostra che:

- quando si ha un maggior numero di antenne totali dovuto sia da un aumento di AP, sia da un aumento del numero di antenne per ciascun AP, si ha un miglioramento della propagazione favorevole;
- quando si hanno valori più alti di esponente di path-loss, il fenomeno di propagazione favorevole tende a peggiorare.

Le precedenti conclusioni relative allo studio della propagazione favorevole di un sistema cell-free massive MIMO, si riferiscono al caso in cui le antenne

sono posizionate sul perimetro della regione. Sono stati ricavati i valori delle CDF delle misure di propagazione favorevole (X_{fp}) riferite a due regioni, una circolare ed una quadrata, con stessa area in cui gli AP si trovano sparsi all'interno dell'area. Dalle CDF ottenute dalle simulazioni si può dimostrare che la propagazione favorevole viene migliorata quando si aumenta il numero di antenne totale. La propagazione favorevole viene favorita sia se si ha solo un aumento di AP che se si ha solo un aumento del numero di antenne per ciascun AP. L'aumento del numero di AP migliora in modo maggiore la propagazione favorevole, rispetto all'incremento del numero di antenne per ogni AP.

Per quanto riguarda l'ambiente di propagazione, anche in questo caso, l'aumento dell'esponente di path-loss causa un peggioramento del fenomeno di propagazione favorevole.

Di notevole interesse sono le conclusioni raggiunte dalle simulazioni fatte per valutare le due proprietà per il sistema cell-free massive MIMO applicato ad un caso pratico, come quello di uno stadio da calcio di area di $42474m^2$, con ambiente di propagazione caratterizzato da un esponente di path-loss di valore pari a 2,5 e prendendo in considerazione 1000 utenti disposti nei vari settori. Per questo scenario sono state valutate le CDF per le misure di channel-hardening e per le misure di propagazione favorevole di diverse disposizioni degli AP e facendo variare il numero di antenne totali. I valori delle CDF ricavate hanno dimostrato che per avere sia un buon fenomeno di channel-hardening che una buona propagazione favorevole è meglio posizionare gli AP sul perimetro interno dello stadio e, soprattutto per il fenomeno di channel-hardening, bisogna avere un numero di antenne totali piuttosto elevato.

Per uno scenario come quello di uno stadio si può utilizzare il sistema a radio-stripes per l'implementazione della tecnologia cell-free massive MIMO.

Elenco delle figure

1.1	Tecnologia cell-free massive MIMO formata dall'intersezione di tre vantaggi appartenenti a tre tecnologie differenti [2].	6
1.2	Illustrazione che mostra il confronto di una rete cellulare MIMO con una rete cell-free massive MIMO [3].	8
1.3	Confronto tra data rate di una rete cell-free e di una rete cellulare con 64 AP con antenne omnidirezionali [2].	8
1.4	Confronto tra tre differenti CDF del rapporto segnale rumore di tre configurazioni: configurazione sistema massive MIMO cellulare, configurazione con small-cells e configurazione cell-free massive MIMO [2].	9
1.5	Architettura e componenti di un sistema cell-free massive MIMO [2].	11
1.6	Illustrazione sistema cell-free massive MIMO con suddivisione in clusters degli AP [2].	12
1.7	Illustrazione dell'architettura a tre stadi dei sistemi cell-free massive MIMO [4].	17
1.8	Illustrazione dell'architettura di un sistema a radio-stripes [5].	19
2.1	Processi di up-link e di down-link in uno scenario cellular massive MIMO [6].	21
2.2	Grafico che mostra il fenomeno di channel-hardening in cui il guadagno di canale si avvicina al valor medio quando vi è un aumento di antenne [6].	23
2.3	Grafico che mostra la varianza che si riduce quando vi è un aumento di antenne [6].	25

2.4	Scenario cell-free massive MIMO con AP distribuiti, utenti e CPU che processano i dati [2].	26
2.5	Scenario cell-free massive MIMO con 5 AP distribuiti, ciascuno costituito da due antenne, con utenti e CPU collegata agli AP che processa i dati.	29
2.6	Rappresentazione scenario cellular massive MIMO.	35
2.7	Rappresentazione scenario cellular massive MIMO durante il processo di up-link.	36
2.8	Rappresentazione scenario cellular massive MIMO durante il processo di down-link.	37
2.9	Rappresentazione scenario cell-free massive MIMO [10].	40
3.1	Rete cell-free massive MIMO per uno scenario pratico come lo stadio [15].	47
3.2	Scenario con regione circolare, con 10 AP con 3 antenne l'uno e 4 utenti.	49
3.3	Diagramma cartesiano regione circolare, con 10 AP con 3 antenne ciascuno e 4 utenti.	50
3.4	Scenario con regione circolare di raggio $30m$, con 300 AP su perimetro a singola antenna, con un utente centrale ed $\alpha = 2$	54
3.5	Scenario con regione circolare, con 300 AP su perimetro a singola antenna e utenti che possono assumere un centinaio di posizioni arbitrarie.	58
3.6	Andamenti delle CDF con 300, 1000 e 2000 antenne totali di uno scenario con regione circolare di raggio $30m$ ed esponente di path-loss pari a 2.	60
3.7	Andamenti delle CDF tipologia di scenario con area circolare di raggio $30m$, con 300, 800 e 1500 antenne totali ed esponente di path-loss pari a 3.	62
3.8	Andamenti delle CDF di uno scenario con regione circolare con 2, 5 e 10 antenne per AP, con 100 AP ed esponente di path-loss pari a 2.	64

3.9	Andamenti di due differenti CDF di uno scenario con regione circolare di raggio $30m$, con 200 antenne totali, esponente di path-loss pari a 2, in cui gli utenti in un caso sono posizionati arbitrariamente in tutta la regione e nell'altro caso si trovano più concentrati verso il centro della regione.	65
3.10	Scenario di un ambiente di forma quadrata con AP sul perimetro e utenti situati all'interno.	66
3.11	Diagramma cartesiano scenario di una regione quadrata con AP sul perimetro e utenti situati all'interno dell'area.	68
3.12	Diagramma cartesiano regione quadrata di lato di $53,17m$, con 100 AP sul perimetro a singola antenna e un utente al centro della regione.	70
3.13	Diagramma cartesiano regione quadrata di lato di $53,17m$, con 300 AP sul perimetro a singola antenna e utenti che possono assumere 100 posizioni arbitrarie.	73
3.14	Andamenti p_θ con 300, 800 e 1500 antenne totali, in una stanza quadrata di lato pari a $53,17m$ in cui l'utente può assumere un centinaio di posizioni casuali ed esponente di path-loss $\alpha = 2$	75
3.15	Andamenti p_θ con 300, 800 e 1500 antenne totali, in una regione quadrata, di lato pari a $53,17m$ in cui l'utente può assumere un centinaio di posizioni casuali ed esponente di path-loss $\alpha = 3$	76
3.16	Andamenti p_θ con 2, 5 e 10 antenne per ogni AP, numero di AP pari a 100, in cui l'utente può assumere un centinaio di posizioni casuali ed esponente di path-loss $\alpha = 2$	76
3.17	Andamenti di due differenti CDF di uno scenario con regione di forma quadrata, di lato $53,17m$, con 200 antenne totali, esponente di path-loss $\alpha = 2$, in cui gli utenti in un caso sono posizionati arbitrariamente su tutta l'area e nell'altro caso si concentrano maggiormente al centro della regione.	78
3.18	Scenario di regione circolare di raggio $30m$ con AP sparsi all'interno dell'area ed esponente di path-loss pari a due, in cui le posizioni arbitrarie degli utenti possono essere un centinaio.	79

3.19	Scenario di regione quadrata di lato $53,17m$ con AP sparsi all'interno dell'area ed esponente di path-loss pari a due, in cui le posizioni arbitrarie degli utenti possono essere un centinaio.	80
3.20	Confronto CDF delle due scelte progettuali (a) e (b) di una regione circolare di raggio $30m$ con AP sparsi all'interno dell'area ed esponente di path-loss pari a due.	84
3.21	Confronto CDF delle due scelte progettuali (a) e (b) di una regione circolare di raggio $53,17m$ con AP sparsi all'interno dell'area ed esponente di path-loss pari a due.	84
4.1	Scenario di una regione circolare.	94
4.2	Diagramma cartesiano che rappresenta le posizioni degli AP e le posizioni dell'utente k -esimo e j -esimo, fissate in determinate coordinate in un sistema cell-free massive MIMO, di uno scenario con una regione circolare.	95
4.3	Diagramma cartesiano zona circolare di raggio $50m$, con 100 AP e utenti k -esimo e j -esimo, in cui uno dei due utenti è posizionato al centro dell'area.	99
4.4	Diagramma cartesiano di una rete senza celle applicata ad una regione circolare di raggio di $30m$, in cui sono indicate le posizioni degli AP sul perimetro ed un centinaio di posizioni che possono essere assunte, sia dall'utente k -esimo che dall'utente j -esimo.	101
4.5	Andamenti p_γ di simulazioni caratterizzate da 200, 400 e 800 antenne totali, di una regione circolare di raggio di $30m$ ed $\alpha = 2$	105
4.6	Andamenti p_γ di simulazioni caratterizzate da 200, 400 e 800 antenne totali, di una regione circolare di raggio di $30m$ ed $\alpha = 3$	105
4.7	Andamenti p_γ simulazioni caratterizzate da 100 AP che sono costituiti da 1, 2 o 5 antenne, di una regione circolare di raggio pari a $30m$ ed $\alpha = 2$	106
4.8	Scenario di un ambiente di forma quadrata.	107

4.9	Diagramma cartesiano che rappresenta le posizioni degli AP e le posizioni dell'utente k -esimo e j -esimo, fissate in determinate coordinate in un sistema cell-free massive MIMO di uno scenario con una regione quadrata di lato di $53,17m$	109
4.10	Diagramma cartesiano che rappresenta le posizioni degli AP e le posizioni degli utenti k -esimo e j -esimo, di una rete cell-free massive MIMO, di uno scenario con una regione quadrata e di lato di $53,17m$	113
4.11	Andamenti p_γ con 200, 400 e 800 antenne totali, in una regione di forma quadrata di lato pari a $53,17m$ ed $\alpha = 2$	117
4.12	Andamenti p_γ con 200, 400 e 800 antenne totali, in una regione di forma quadrata di lato pari a $53,17m$ ed $\alpha = 3$	117
4.13	Andamenti p_γ con 100 AP costituiti da una singola antenna, da due antenne e da cinque antenne in una regione di forma quadrata di lato pari a $53,17m$ ed $\alpha = 2$	118
4.14	Scenario di regione circolare di raggio $30m$ con AP sparsi all'interno dell'area ed esponente di path-loss pari a due, in cui le posizioni arbitrarie dei due utenti possono essere un centinaio.	120
4.15	Scenario di regione quadrata di lato $53,17m$ con AP sparsi all'interno dell'area ed esponente di path-loss pari a due, in cui le posizioni arbitrarie dei due utenti possono essere un centinaio.	120
4.16	Andamenti di due curve della CDF che differiscono per numero di AP sparsi in una regione circolare di raggio pari a $30m$ e numero di antenne per ciascun AP, con 400 antenne totali ed $\alpha = 2$	124
4.17	Andamenti di due curve della CDF che differiscono per numero di AP sparsi in una regione quadrata di lato pari a $53,17m$ e numero di antenne per ciascun AP, con 400 antenne totali ed $\alpha = 2$	124
5.1	Diagramma cartesiano della rappresentazione di uno stadio di area di $42474m^2$, in cui vi sono un migliaio di utenti disposti nei vari settori e le antenne sono distribuite sul perimetro esterno.	130

- 5.2 Diagramma cartesiano della rappresentazione di uno stadio di area di $42474m^2$, in cui vi sono un migliaio di utenti disposti nei vari settori e le antenne sono disposte sul perimetro interno. 130
- 5.3 Diagramma cartesiano della rappresentazione di uno stadio di area di $42474m^2$, in cui vi sono un migliaio di utenti disposti nei vari settori e le antenne sono posizionate per metà sul perimetro esterno e per metà sul perimetro interno. 131
- 5.4 Diagramma cartesiano della rappresentazione di uno stadio di area di $42474m^2$, in cui vi sono un migliaio di utenti disposti nei vari settori e le antenne si trovano nei settori dove si trovano anche gli utenti. 131
- 5.5 Confronto tra due diversi andamenti delle CDF p_θ riferiti allo scenario dello stadio con 1000 antenne totali, che differiscono per la disposizione degli AP, in un caso si hanno gli AP posizionati sul perimetro interno, nell'altro caso gli AP sono disposti sul perimetro esterno. 133
-

Elenco delle tabelle

3.1	Valori X_{ch} di uno scenario con area circolare di raggio $30m$, esponente di path-loss $\alpha = 2$ e utente al centro, variando i parametri numero di AP e numero di antenne per AP.	56
3.2	Valori X_{ch} di uno scenario con area circolare di raggio $30m$, con 100AP a singola antenna, con esponente di path-loss $\alpha = 2$, variando la posizione dell'utente e mantenendo fissi tutti gli altri argomenti in ingresso.	57
3.3	Valori di p_θ al variare del numero di antenne totali con esponente di path-loss pari a 2.	59
3.4	Valori di p_θ al variare del numero di antenne totali con esponente di path-loss pari a 3.	61
3.5	Valori di p_θ al variare del numero di AP e del numero di antenne per AP di uno scenario con area circolare di raggio di $30m$ ed esponente di path-loss pari a 2, in cui l'utente può assumere un centinaio di posizioni aleatorie.	63
3.6	Valori di X_{ch} al variare del numero di AP e del numero di antenne per AP in una regione quadrata con lato di $53,17m$, con un utente al centro della regione ed $\alpha = 2$	70
3.7	Valori di X_{ch} al variare del numero di AP a singola antenna in una regione quadrata con lato di $53,17m$, con un utente al suo interno ed $\alpha=3$	71
3.8	Valori X_{ch} scenario con area quadrata variando la posizione dell'utente e mantenendo fissi tutti gli altri argomenti in ingresso, ovvero lato di $53,17m$, esponente di path-loss $\alpha = 2$ e numero di AP a singola antenna.	72

3.9	Valori di p_θ di uno scenario di una regione quadrata di lato pari a $53,17m$, al variare del numero di antenne totali con esponente di path-loss pari a 2.	74
3.10	Valori di p_θ di uno scenario di una regione quadrata di lato pari a $53,17m$ al variare del numero di antenne totali con esponente di path-loss pari a 3.	74
3.11	Valori di p_θ di uno scenario di una regione quadrata, di lato pari a $53,17m$ al variare del numero di AP e del numero di antenne per AP e con esponente di path-loss pari a 2.	74
3.12	Valori di p_θ con AP all'interno di una regione circolare con raggio pari a $30m$, con scelta progettuale di tipologia (a), con esponente di path-loss $\alpha = 2$	81
3.13	Valori di p_θ con AP all'interno di una regione circolare con raggio pari a $30m$, con scelta progettuale di tipologia (b), con esponente di path-loss $\alpha = 2$	82
3.14	Valori di p_θ con AP all'interno di una regione quadrata con lato pari a $53,17m$, con scelta progettuale di tipologia (a), con esponente di path-loss $\alpha = 2$	82
3.15	Valori di p_θ con AP all'interno di una regione quadrata con lato pari a $53,17m$, con scelta progettuale di tipologia (b), con esponente di path-loss $\alpha = 2$	83
3.16	Valori di p_θ ottenuti da una scelta progettuale di tipo (a) quando gli AP sono all'interno di una regione di forma circolare di raggio pari a $30m$ al variare dell'esponente di path-loss e della densità del numero di AP.	86
3.17	Valori di p_θ ottenuti da una scelta progettuale di tipo (a) quando gli AP sono all'interno di una regione di forma quadrata di lato pari a $53,17m$ al variare dell'esponente di path-loss e della densità del numero di AP.	86
3.18	Valori di p_θ ottenuti da una scelta progettuale di tipo (b) di uno scenario con AP distribuiti in modo aleatorio all'interno di una regione di forma circolare di raggio di $30m$, al variare dell'esponente di path-loss e del numero di antenne totali.	87

3.19	Valori di p_θ ottenuti da una scelta progettuale di tipo (b) di uno scenario con AP distribuiti in modo aleatorio all'interno di una regione di forma quadrata di lato di $53,17m$, al variare dell'esponente di path-loss e del numero di antenne totali.	88
3.20	Confronto valori di p_θ tra una distribuzione di AP all'interno della regione circolare e una distribuzione di AP sul perimetro, con ambiente di propagazione caratterizzato da un esponente di path-loss $\alpha = 2$	89
3.21	Confronto valori di p_θ tra una distribuzione di AP all'interno della regione di forma quadrata e una distribuzione di AP sul perimetro, con ambiente di propagazione caratterizzato da un esponente di path-loss $\alpha = 2$	89
4.1	Risultati di un sistema cell-free massive MIMO di una regione circolare con raggio di $30m$, con utenti k -esimo e j -esimo fissi in due posizioni all'interno della regione, in cui varia il numero di antenne totali $M = LN$ sul perimetro e con un esponente di path-loss $\alpha = 2$	97
4.2	Risultati di un sistema cell-free massive MIMO di una regione circolare con raggio di $30m$, con utenti k -esimo e j -esimo fissi in due posizioni all'interno della regione e con numero di antenne totali M ed esponente di path-loss α che assumono valori diversi.	97
4.3	Risultati di un sistema cell-free massive MIMO di una regione circolare con utenti k -esimo e j -esimo fissi su due posizioni all'interno della regione, al variare del numero di AP e del numero di antenne costituenti ogni AP.	98
4.4	Risultati di un sistema cell-free massive MIMO di una regione circolare con utenti k -esimo e j -esimo fissi in due posizioni all'interno della regione, dove si varia il raggio, con numero di AP a singola antenna pari a 100.	98
4.5	Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali (M) per uno scenario circolare di raggio di $30m$ ed esponente di path-loss α pari a 2.	103

- 4.6 Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali (M) per uno scenario circolare di raggio di $30m$ ed esponente di path-loss α pari a 3. 103
- 4.7 Valori di p_γ al variare del numero di AP e del numero di antenne per ciascun AP, per uno scenario circolare di raggio di $30m$ ed esponente di path-loss α pari a 2. 103
- 4.8 Valori delle misure X_{fp} di un sistema cell-free massive MIMO con utente k -esimo e utente j -esimo in posizioni fisse, con esponente di path-loss $\alpha = 2$, in una regione quadrata di lato di $53,17m$, in cui varia il numero di antenne totali sul perimetro. 110
- 4.9 Valori delle misure X_{fp} di un sistema cell-free massive MIMO di una regione quadrata di lato $53,17m$ con utenti k -esimo e j -esimo in due posizioni fisse e con numero di antenne ed esponente di path-loss α che assumono valori diversi. 111
- 4.10 Valori delle misure X_{fp} di un sistema cell-free massive MIMO di una regione quadrata di lato $53,17m$ con utenti k -esimo e j -esimo a due posizioni fisse, con $\alpha = 2$, in cui variano il numero di AP ed il numero di antenne di ciascun AP. 111
- 4.11 Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali (M) per uno scenario di una regione quadrata di lato di $53,17m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie ed $\alpha = 2$ 115
- 4.12 Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali (M) per uno scenario di una regione quadrata di lato di $53,17m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie ed $\alpha = 3$ 115
- 4.13 Valori di p_γ al variare del numero di AP e del numero di antenne per ciascun AP per uno scenario di una regione quadrata di lato di $53,17m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie ed $\alpha = 2$ 115
-

- 4.14 Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali sparse all'interno dell'area, mantenendo fisso il numero di AP, per uno scenario di una regione circolare di raggio di $30m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie ed esponente di path-loss α pari a 2. 121
- 4.15 Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali sparse all'interno dell'area, mantenendo fisso il numero di AP, per uno scenario di una regione quadrata di lato di $53.17m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie ed esponente di path-loss α pari a 2. 122
- 4.16 Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali sparse all'interno dell'area, facendo variare il numero di AP e mantenendo fisso il numero di antenne costituenti ciascun AP, per uno scenario di una regione circolare di raggio di $30m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie ed esponente di path-loss α pari a 2. 122
- 4.17 Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali sparse all'interno dell'area, facendo variare il numero di AP e mantenendo fisso il numero di antenne costituenti ciascun AP, per uno scenario di una regione quadrata di lato di $53,17m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie ed esponente di path-loss α pari a 2. 122
- 4.18 Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali sparse all'interno dell'area per uno scenario di una regione circolare di raggio di $30m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie e in cui si confrontano i valori ottenuti da due diversi esponente di path-loss α (2 e 3). 125
- 4.19 Valori di p_γ al variare del numero di antenne totali sparse all'interno dell'area per uno scenario di una regione quadrata di lato di $53,17m$, in cui i due utenti possono assumere un centinatio di posizioni arbitrarie e in cui si confrontano i valori ottenuti da due diversi esponente di path-loss α (2 e 3). 126
-

-
- 4.20 Confronto valori di p_γ tra una distribuzione di AP all'interno della regione circolare e una distribuzione di AP sul perimetro, a parità di numero di antenne totali, numero di AP, numero di antenne per ciascun AP ed esponente di path-loss $\alpha = 2$. . . 126
- 4.21 Confronto valori di p_γ tra una distribuzione di AP all'interno della regione quadrata e una distribuzione di AP sul perimetro, a parità di numero di antenne totali, numero di AP, numero di antenne per ciascun AP ed esponente di path-loss $\alpha = 2$. . . 127
- 5.1 Risultati dei valori di p_θ di un sistema cell-free massive MIMO applicato ad uno stadio di area $42474m^2$ con 1000 utenti, facendo variare il numero di antenne totali M e le posizioni delle antenne e con un esponente di path-loss pari a 2.5. . . . 133
- 5.2 Risultati dei valori di p_γ di un sistema cell-free massive MIMO applicato ad uno stadio di area $42474m^2$ con 1000 utenti, facendo variare il numero di antenne totali M e le posizioni delle antenne e con un esponente di path-loss pari a 2.5. . . . 135
-

Bibliografia

- [1] C. D. Alwis et al., “Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research” in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 836-886, 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3071496.
- [2] Özlem Tugfe Demir, Emil Björnson and Luca Sanguinetti (2021), “Foundations of User-Centric Cell-Free Massive MIMO”, *Foundations and Trends in Signal Processing: Vol. 14, No. 3-4*, pp 162-472
- [3] J. Zhang, S. Chen, Y. Lin, J. Zheng, B. Ai e L. Hanzo, “Cell-Free Massive MIMO: A New Next-Generation Paradigm”, in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99878-99888, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2930208.
- [4] Chen, Shuaifei e Zhang, Jiayi e Zhang, Jing e Björnson, Emil e Bo Ai. (2021). “A survey on user-centric cell-free massive MIMO systems”. *Digital Communications and Networks*. 10.1016/j.dcan.2021.12.005.
- [5] Giovanni Interdonato, Emil Björnson, Hien Quoc Ngo, Pål K. Frenger e Erik G. Larsson. (2019), “Ubiquitous cell-free Massive MIMO communications”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2019 pp. 1-13.
- [6] Emil Björnson, Jakob Hoydis e Luca Sanguinetti (2017), “Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency”, *Foundations and Trends R in Signal Processing: Vol. 11, No. 3-4*, pp 154-655. DOI: 10.1561/20000000093.
- [7] S. Gunnarsson, J. Flordelis, L. Van der Perre and F. Tufvesson, “Channel Hardening in Massive MIMO-A Measurement Based Ana-

- lysis” 2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/SPAWC.2018.8445925.
- [8] H. Q. Ngo and E. G. Larsson, “No Downlink Pilots Are Needed in TDD Massive MIMO”, in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 5, pp. 2921-2935, May 2017, doi: 10.1109/TWC.2017.2672540.
- [9] Chen, Zheng e Björnson, Emil. “Can We Rely on Channel Hardening in Cell-Free Massive MIMO?” 2017 1-6.10.1109/GLOCOMW.2017.8269162.
- [10] Z. Chen e E. Björnson, “Channel hardening and favorable propagation in cell-free Massive MIMO with stochastic geometry”. *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 11, pp. 5205-5219, Nov 2018, doi: 10.1109/TCOMM.2018.2846272.
- [11] H. A. Ammar, R. Adve, S. Shahbazpanahi, G. Boudreau e K. V. Srinivas, “User-Centric Cell-Free Massive MIMO Networks: A Survey of Opportunities, Challenges and Solutions” in *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 24, no. 1, pp. 611-652, Firstquarter 2022, doi: 10.1109/COMST.2021.3135119.
- [12] D. Dardari, “Channel Hardening, Favorable Equalization and Propagation in Wideband Massive MIMO” 2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2019, pp. 1-5, doi: 10.23919/EUSIPCO.2019.8902768.
- [13] X. Wu, N. C. Beaulieu, e D. Liu, “On favorable propagation in massive MIMO systems and different antenna configurations” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 5578-5593, 2017.
- [14] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, “Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 4, pp. 1436-1449, 2013.
-

-
- [15] Shaik, Z. H., Bjornson, E., Larsson, E. G, (2021), “MMSE-Optimal Sequential Processing for Cell-Free Massive MIMO With Radio Stripes”, *IEEE Transactions on Communications*, 69(11), 7775-7789. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3100619>
-

Ringraziamenti

Giunta al termine di questo percorso universitario penso sia doveroso e giusto dedicare qualche parola a chi ha reso possibile la realizzazione di questo lavoro ed il raggiungimento di questo traguardo personale ed accademico.

In primis ci tengo a ringraziare il mio relatore, il professor Dardari, sia per avermi dato l'opportunità di seguire il suo corso di sistemi di telecomunicazioni durante questo percorso studi, sia per avermi permesso di svolgere questo interessantissimo lavoro di tesi al meglio. Lo ringrazio per la sua conoscenza trasmessa, per i suoi preziosi consigli e suggerimenti pratici, per la sua pazienza, disponibilità e tempestività nel rispondere ad ogni mia richiesta.

Ringrazio tutto il corpo docenti, grazie alle loro conoscenze ed elevate competenze ho avuto l'occasione di completare questo percorso universitario nel migliore dei modi, arricchendo la mia istruzione e la mia persona.

Ringrazio anche l'università di Bologna che ha saputo, anche in momenti difficili come la pandemia, fornire tutti gli strumenti idonei per agevolare il percorso studi nel migliore dei modi e che mi ha dato l'opportunità di essere affiancata da docenti e collaboratori con una grandissima esperienza e preparazione.

Un ringraziamento sincero va a tutti i colleghi universitari. Grazie a loro è stato possibile realizzare lavori e progetti e migliorare la capacità di lavorare in team di lavoro. Sono stati tutti di grandissimo aiuto. In particolar modo ringrazio Alessandra e Caterina, colleghe, ma soprattutto amiche e spalle su cui ho potuto contare, che mi hanno affiancata sia all'interno dell'ambito universitario che fuori.

Volevo ringraziare anche le mie colleghe universitarie del mio precedente percorso accademico, Alessia, Beatrice, Rosa e Samira, perché seppur distanti il

loro supporto è sempre stato presente e prezioso.

Un ringraziamento speciale va a tutta la mia famiglia, ai nonni, zii e cugini che mi hanno dato la spinta e la carica giusta per affrontare gli studi.

Ringrazio di cuore la mia seconda famiglia: i miei amici, quelli di sempre. Ringrazio di cuore Andrea, Giacomo, Marco e Simona per aver creduto sempre in me, per esserci sempre stati, per avermi dedicato il vostro tempo e per avermi accompagnato nella realizzazione di questo mio obiettivo universitario. Ci tenevo tanto a ringraziare anche Debora, Elisa, Francesca, Gloria, Lucia, Marianna, Matilde, Nicol e Stefano. Ringrazio tutti coloro citati fino ad ora per avermi sopportato e supportato sempre, per essere stati una fonte di energia importante. Il tempo trascorso insieme e la spensieratezza dei nostri momenti è stato molto prezioso ed importante.

Infine un ringraziamento enorme va ai miei genitori per avermi sempre aiutata a superare qualsiasi tipo di difficoltà, per essere stati dei perfetti compagni di squadra, per avermi dato sempre sostegno e perché con i loro sacrifici mi hanno permesso di intraprendere e terminare tutti i miei percorsi di studio.

