



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**

Dipartimento di Ingegneria e Architettura

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Elettronica e
Informatica

curriculum Applicazioni Informatiche

Summary of “Random Access Heterogeneous MIMO Networks”

Laureando: Marco Bidoli

Relatore: Prof. Massimiliano Comisso

Anno Accademico: 2023-2024

Indice

1	Introduzione	1
2	802.11n⁺– design e funzionamento	1
2.1	Multi-dimensional carrier sensing	1
2.2	Trasmissione: nulling e alignment	2
3	Metodologia e risultati della sperimentazione	3
3.1	Valutazione del multi-dimensional carrier sensing	3
3.2	Valutazione delle tecniche di nulling e aligning	4
3.3	Valutazione del throughput	5
4	Conclusioni	6

1 Introduzione

L'evoluzione tecnologica nell'ambito delle telecomunicazioni ha visto aumentare il numero di antenne presenti all'interno dei dispositivi che compongono le moderne reti wireless, favorendo negli standard IEEE 802.11 l'adozione di tecniche multiple-input multiple-output (MIMO) per migliorare le prestazioni e l'affidabilità delle trasmissioni. Tuttavia, l'eterogeneità nel numero di antenne dei nodi all'interno delle reti non viene adeguatamente sfruttata; nel caso di 802.11n un nodo multi-antenna, in presenza di una comunicazione tra nodi della rete, dovrà attendere che il mezzo trasmissivo torni disponibile prima di tentare una trasmissione, limitando il throughput della rete.

Nell'articolo analizzato, gli autori presentano un protocollo ad accesso casuale denominato 802.11n⁺ o più semplicemente n⁺, che sfrutta l'eterogeneità dei nodi per permettere un numero di trasmissioni simultanee pari a quelle supportate dal dispositivo con il maggior numero di antenne sulla rete. Nel protocollo vengono definite le strategie adottate per soddisfare le due principali esigenze: garantire l'accesso al mezzo trasmissivo in modo completamente distribuito e trasmettere un nuovo segnale evitando interferenze ai nodi già impegnati in una comunicazione. La prima trova soluzione nell'estensione della tecnica di carrier sensing (CSMA/CA) su spazi ortogonali rispetto alle trasmissioni già presenti, mentre la seconda è la combinazione di due tecniche MIMO: *interference nulling* e *interference alignment*.

Infine, a verifica della validità delle soluzioni presentate, viene eseguita un'implementazione di n⁺ in un ambiente di test, simulando una rete eterogenea formata da tre coppie di nodi, in cui vengono valutate le prestazioni della capacità di carrier sensing, l'efficacia delle tecniche di allineamento e annullamento ed infine le prestazioni di n⁺, considerando il throughput medio, confrontandole con quelle ottenute tramite il protocollo 802.11n.

2 802.11n⁺ – design e funzionamento

Le tecniche MIMO utilizzate all'interno del protocollo sono basate sulla rappresentazione dei segnali ricevuti da un nodo con N antenne come vettori di uno spazio N -dimensionale. Da questo modello prende spunto la principale idea utilizzata dagli autori: proiettare i segnali ricevuti su opportuni sottospazi ortogonali tra loro, definiti dai canali utilizzati dalle singole antenne di trasmettitore e ricevitore. Grazie alla proprietà di ortogonalità, la proiezione dei segnali ricevuti su uno spazio noto al proprio trasmettitore offrirà al ricevitore il segnale desiderato, mentre gli altri segnali presenti sul mezzo non verranno considerati.

Nel definire il protocollo gli autori si sono confrontati con due principali esigenze: la necessità per un nodo che vuole accedere al mezzo wireless di effettuare il carrier sensing (CS) anche in presenza di altre trasmissioni e quella, una volta ottenuto l'accesso al mezzo trasmissivo, di trasmettere il proprio segnale in maniera trasparente ai ricevitori già impegnati in una comunicazione.

2.1 Multi-dimensional carrier sensing

All'inizio di ogni comunicazione la coppia di nodi interessata scambia in broadcast tramite protocollo *light-weight RTS-CTS* informazioni sul numero di antenne, bitrate e canali utilizzati nella comunicazione. Questo protocollo, del tutto simile al meccanismo RTS-CTS usato in 802.11, riduce l'overhead dei pacchetti separando gli header dai body di *DATA* e *ACK* ed inviandoli insieme anticipatamente.

Un nodo MIMO interessato ad iniziare una nuova trasmissione calcola lo spazio delle comunicazioni in corso, sfruttando i messaggi RTS-CTS precedenti, e un nuovo spazio ortogonale a quest'ultimo su cui effettua il carrier sensing definito per 802.11. Nel caso in cui rilevi una comunicazione, ripeterà il procedimento fino all'esaurirsi dei propri gradi di libertà, dati dal numero di antenne installate. Questo meccanismo viene denominato dagli autori *multi-dimensional carrier sensing* ed è illustrato in Figura 1.

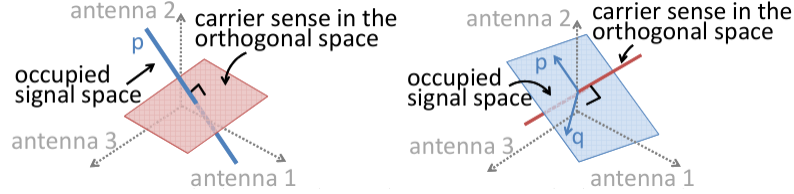


Figura 1: Multi-dimensional carrier sensing: un nodo a 3 antenne rileva sul mezzo un segnale (in blu nell'immagine a sinistra) e calcola lo spazio ortogonale a questo (in rosso) dove inizierà una nuova contesa per la sua trasmissione. Nella figura a destra si ha il caso in cui lo stesso nodo esegua il CS in presenza di due trasmissioni, p e q ; viene allora sfruttato l'ultimo grado di libertà del nodo e il nuovo spazio su cui effettuare il carrier sensing sarà quello in rosso a destra.

2.2 Trasmissione: nulling e alignment

Ottenuto l'accesso al mezzo wireless, il trasmettitore deve strutturare i flussi dati inviati dalle proprie antenne in modo da non interferire con i ricevitori delle comunicazioni già in corso. Allo scopo, gli autori prevedono per n^+ l'utilizzo combinato delle tecniche MIMO di *nulling* e *alignment*.

Il *nulling* consiste nel produrre dei flussi di dati, uno per antenna, in modo tale che questi interferiscano distruttivamente tra di loro, annullandosi dal punto di vista del ricevitore. Questa tecnica porta con sé lo svantaggio di occupare al trasmettitore N antenne, pari a quelle in uso dal ricevitore con il quale non si vuole interferire, pertanto viene utilizzata solamente per i ricevitori impegnati in $n = N$ flussi.

Se $n < N$ si fa uso dell'*alignment*, nel quale il trasmettitore calcola lo spazio U^\perp , in cui avviene la comunicazione del ricevitore, e allinea i propri segnali all'interno dello spazio U , a questo perpendicolare, evitando l'interferenza.

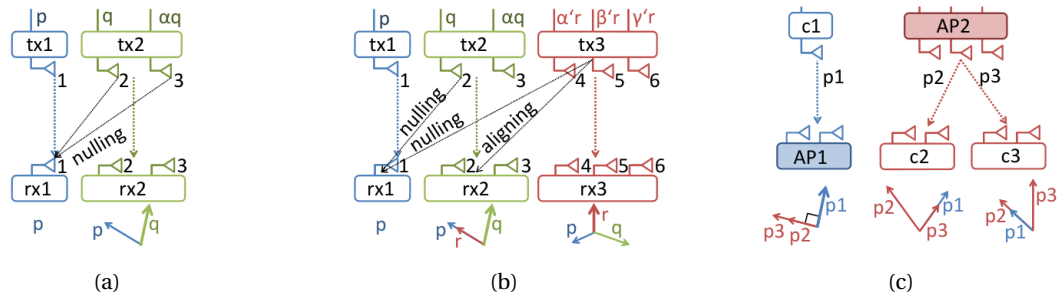


Figura 2: (a) tx2 esegue il nulling del segnale per rx1. (b) tx3 rende nullo il suo segnale per rx1 e invece lo allinea nello stesso spazio di tx1 per rx2, usando la sua terza antenna per comunicare con rx3. (c) AP2 allinea i suoi segnali in uno spazio che non interferisca con la comunicazione preesistente $p1$ e per assicurare a $c2$ e $c3$ la ricezione del solo pacchetto a loro indirizzato. I diagrammi vettoriali sotto ogni immagine rappresentano le trasmissioni dal punto di vista di ogni rx.

Gli scenari mostrati in Figura 2 sono quelli simulati sperimentalmente dagli autori. Un esempio di nulling viene mostrato in 2a in cui tx2, che vuole trasmettere a rx2 il simbolo q , grazie alla conoscenza dei coefficienti di canale h_{ij} ¹ della comunicazione tx1-rx1, invierà dalle sue antenne i simboli q e αq , avendo calcolato il valore di pre-codifica $\alpha = -\frac{h_{21}}{h_{31}}$ in modo tale che il segnale ricevuto dall'unica antenna di rx1 sia $y_1 = (h_{21} + \alpha h_{31})q = 0$. In 2b si può invece vedere l'utilizzo dell'alignment da parte di tx3, che allinea la sua trasmissione r nello spazio U di rx2, dove è già confinato il segnale p , risolvendo l'equazione:

$$\frac{(\alpha' h_{42} + \beta' h_{52} + \gamma' h_{62})}{h_{12}} = \frac{(\alpha' h_{43} + \beta' h_{53} + \gamma' h_{63})}{h_{13}} = L$$

per α', β', γ' che andranno a comporre il vettore di pre-codifica \vec{v} , mentre L è una costante qualsiasi. Così facendo i segnali y_2, y_3 ricevuti dalle due antenne di rx2 saranno:

$$\begin{aligned} y_2 &= h_{12}(p + Lr) + (h_{22} + \alpha h_{32})q \\ y_3 &= h_{13}(p + Lr) + (h_{23} + \alpha h_{33})q \end{aligned}$$

permettendo a rx2 di decodificare q correttamente e di trascurare il segnale $(p + Lr)$.

In generale, il trasmettitore dotato di M antenne, dovrà quindi soddisfare un vincolo, sia esso di nulling o alignment, per ognuno dei K flussi già presenti sul mezzo al momento della trasmissione. Per fare ciò, risolve il sistema composto dall'insieme dei vincoli di nulling e alignment rispetto al vettore di pre-codifica \vec{v} :

$$\left[H_1^T H_2^T \dots (U_j^\perp H_j)^T \dots \right]^T \vec{v} = \vec{0} \quad (1)$$

dove ogni $Hv = 0$ rappresenta un vincolo di nulling mentre $U^\perp Hv = 0$ rappresenta un vincolo di alignment. H è la matrice di canale che lega il trasmettitore ad ogni ricevitore mentre U^\perp è lo spazio ortogonale a quello delle comunicazioni indesiderate per il j -esimo ricevitore. La soluzione delle K equazioni linearmente indipendenti fornisce un vettore di pre-codifica \vec{v} . Il trasmettitore potrà quindi utilizzare questi valori per comunicare con le rimanenti $m = M - K$ antenne a sua disposizione.

3 Metodologia e risultati della sperimentazione

La sperimentazione del protocollo è stata effettuata utilizzando le piattaforme SDR (Software Defined Radio) USRP2 con schede RFX2400, necessarie per operare nelle frequenze di interesse di 802.11. A causa di alcuni vincoli del software usato, GNU Radio, gli autori hanno condotto separatamente le fasi di sperimentazione del carrier sensing e di trasmissione, senza implementazione delle risposte ACK.

3.1 Valutazione del multi-dimensional carrier sensing

La valutazione è stata effettuata sulla base delle tecniche già usate in 802.11n, ovvero il rilevamento dell'energia presente sul mezzo trasmissivo e la cross-correlazione dei primi simboli presenti nei preamboli dei pacchetti, per la verifica che l'energia rilevata sia una comunicazione della famiglia 802.11 e non dovuta ad interferenze esterne.

Nell'esperimento è stato simulato lo scenario con 3 coppie di nodi di Figura 2b, in cui il carrier sensing è eseguito da tx3 in due situazioni: nel caso di trasmissione da parte di tx1 e

¹ h_{ij} rappresenta il canale tra la i -esima antenna di tx e la j -esima antenna di rx

successivamente con la trasmissione contemporanea di tx1 e tx2. Le misurazioni sono state ripetute per diversi valori di potenza trasmessa di tx1 e tx2.

I risultati ottenuti sono un'analisi a posteriori dei dati registrati, in cui si simula il processo di proiezione del segnale ricevuto da tx3 sullo spazio ortogonale alla trasmissione di tx1. Viene concluso da questi dati, mostrati in Figura 3a, come l'analisi dell'energia presente sul mezzo sia insufficiente per la rilevazione della presenza di più trasmissioni, in particolar modo se le successive hanno una potenza relativamente inferiore a quelle già in corso mentre, effettuando il CS sullo spazio ortogonale ad una delle trasmissioni in corso, altre eventuali trasmissioni sono facilmente riconoscibili.

I risultati della cross-correlazione sono mostrati in Figura 3b dove si osserva che in assenza del meccanismo di proiezione del segnale di tx2, è presente un'area in cui non è distinguibile se questo stia trasmettendo o meno.

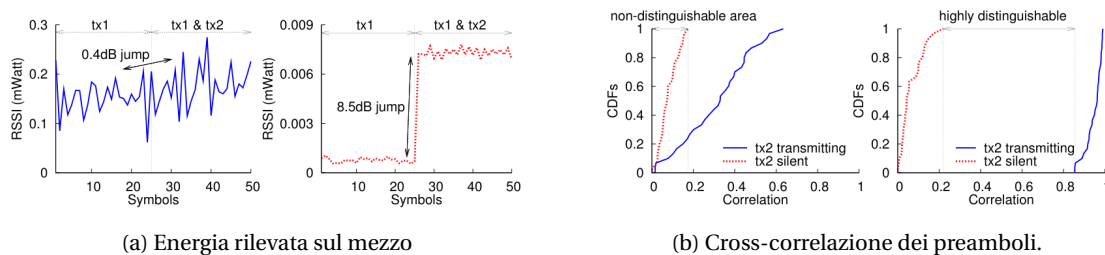


Figura 3: Risultati del multi-dimensional carrier sensing in presenza di trasmissioni.

3.2 Valutazione delle tecniche di nulling e aligning



Figura 4: Nelle simulazioni dei vari scenari i nodi sono stati assegnati casualmente nei punti indicati per valutare le prestazioni del protocollo in un ambiente reale con ostacoli e riflessioni del segnale.

L'efficacia del nulling è stata sperimentata ricreando lo scenario di Figura 2a. Sono stati fatti comunicare tx1-rx1, è stata effettuata una misura del SNR (signal to noise ratio) del segnale di tx1 in assenza di interferenze e un'altra misura è stata effettuata con la trasmissione sovrapposta di tx2, senza utilizzo di nulling. Infine, un'ultima misurazione è stata effettuata nel caso di trasmissione concorrente con effetto del nulling.

Per quanto riguarda l'alignment, lo scenario simulato è quello della Figura 2b e le misurazioni sono rispetto a rx2. Viene misurato prima il valore SNR base, dato dalla trasmissione simultanea di tx1 e tx2, successivamente viene introdotto il contributo di tx3 per avere una misura dell'interferenza prodotta ed infine viene considerata la rete con tutti i trasmettitori attivi simultaneamente, facendo uso dell'aligning da parte di tx3. In entrambi i casi i nodi sono stati disposti casualmente come mostrato in Figura 4.

I risultati (Figura 5) mostrano come la riduzione di SNR del segnale desiderato sia maggiore nel caso in cui il valore SNR dei flussi indesiderati sia superiore alla soglia di 27 dB, motivo

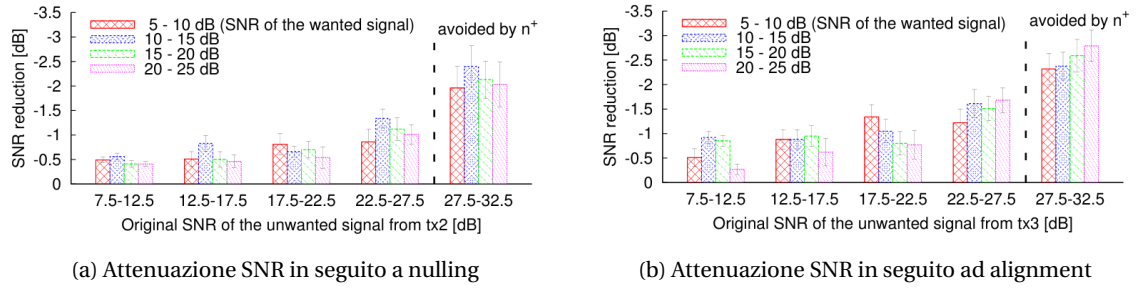


Figura 5: Perdita di SNR della trasmissione desiderata in funzione dell'SNR originale delle trasmissioni indesiderate, le barre si riferiscono ai differenti SNR dei flussi ricevuti da tx2 e tx3.

per cui gli autori hanno deciso di imporre nel design di n^+ , ai nodi che vogliono trasmettere contemporaneamente ad altri, di ridurre la propria interferenza al di sotto di questa soglia. Con queste premesse, vengono trovati come valori medi di peggioramento del SNR 0.8 dB per il nulling e 1.3 dB per l'alignment.

3.3 Valutazione del throughput

L'ultima valutazione effettuata dagli autori è quella riguardante il throughput per le varie coppie di nodi, messo a confronto con quello che si ottiene con l'utilizzo di 802.11n. La disposizione dei nodi è stata scelta casualmente tra quelle possibili indicate in Figura 4 e in ogni esperimento l'ordine di accesso al mezzo è stato scelto casualmente. Inoltre, per ridurre le variabili in gioco, sono stati utilizzati gli stessi valori di bitrate e dimensioni dei pacchetti scambiati per entrambi i protocolli.

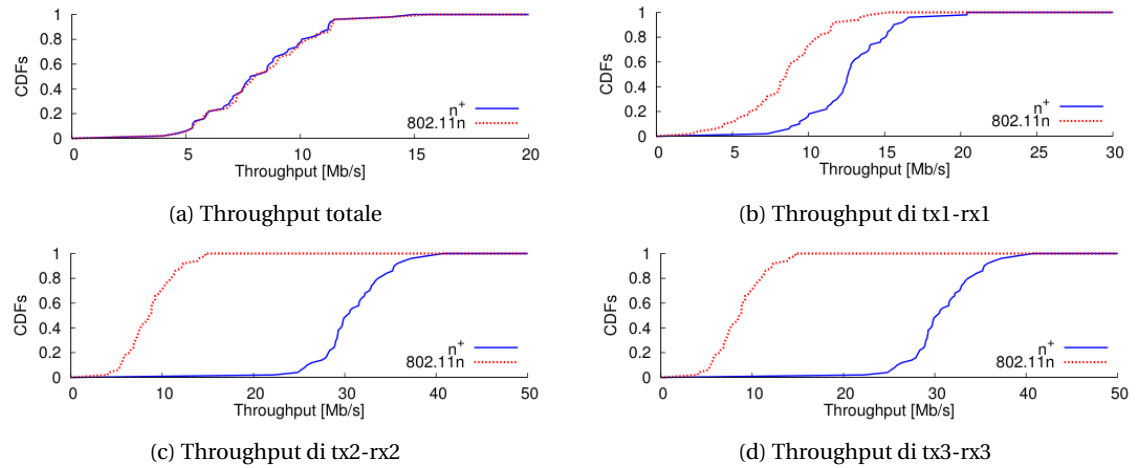


Figura 6: Throughput medio per i vari nodi con l'utilizzo di n^+ rispetto al protocollo 802.11n.

I risultati di Figura 6 mostrano come i nodi con un numero maggiore di antenne siano quelli che beneficiano maggiormente della possibilità di trasmissione concorrente, ottenendo per il nodo a 2 antenne un guadagno di throughput di 1.5 volte quello di 802.11n e per il nodo a 3 antenne un guadagno 3.5 volte maggiore. La spiegazione a questi risultati è data dalla capacità dei nodi che adottano n^+ di sfruttare più efficientemente la capacità MIMO della rete, evitando le attese causate solitamente dalle trasmissioni di nodi con una singola antenna, che in 802.11n hanno la stessa probabilità degli altri nodi di ottenere l'accesso al mezzo, limitando il throughput.

Un'ultima sperimentazione è stata eseguita per lo scenario più generico descritto dalla Figura 2c, dove anche in presenza di numero differente di antenne tra trasmettitore e ricevitori, si ha un miglioramento del throughput di 2.4 volte rispetto a 802.11n.

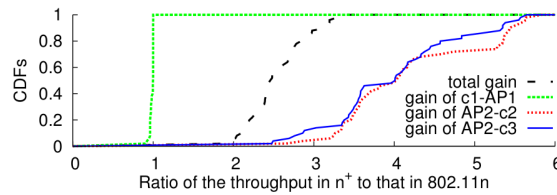


Figura 7: Aumento di throughput relativo a 802.11n nelle ipotesi dello scenario 2c dove dispositivi con antenne differenti comunicano simultaneamente.

4 Conclusioni

I risultati ottenuti validano il design di n^+ proposto dagli autori, che dimostrano come sia possibile far coesistere un numero di trasmissioni pari al numero delle antenne a disposizione del trasmettitore. Lo studio è stato basato su protocolli e tecniche MIMO già presenti in letteratura, ma si differenzia da questi per la capacità di n^+ di operare in modo completamente distribuito, ovvero garantendo un coordinamento degli accessi indipendente da un nodo centrale, e per la sua capacità di utilizzare efficientemente i gradi di libertà offerti dal MIMO, riducendo i tempi di attesa e migliorando il throughput per i nodi multi-antenna rispetto a quanto avviene con 802.11n.

Riferimenti bibliografici

- [1] Kate Ching-Ju Lin, Shyamnath Gollakota, and Dina Katabi. Random access heterogeneous mimo networks. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 41(4):146–157, August 2011.