



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

DIPARTIMENTO DI ELETTRTECNICA, ELETTRONICA ED INFORMATICA

**XX Ciclo del
Dottorato di Ricerca in
Ingegneria dell'Informazione**
(Settore scientifico-disciplinare: ING-INF/03)

SINTESI RIASSUNTIVA

Beamforming Techniques for Wireless Communications in Low-Rank Channels: Analytical Models and Synthesis Algorithms

Dottorando

MASSIMILIANO COMISSO

Coordinatore

Chiar.mo Prof. Alberto Bartoli
(Università degli Studi di Trieste)

FIRMA:

Tutore

Chiar.mo Prof. Fulvio Babich
(Università degli Studi di Trieste)

Relatore

Chiar.mo Prof. Lucio Manià
(Università degli Studi di Trieste)

Correlatore

Chiar.mo Prof. Roberto Vescovo
(Università degli Studi di Trieste)

Esposizione riassuntiva

L'obiettivo di questa tesi è analizzare e discutere l'applicazione delle tecniche multiantenna nell'ambito delle reti di comunicazione wireless e dei sistemi di telecomunicazione di quarta generazione. Nel contesto delle soluzioni emergenti che mirano ad un aumento della velocità di trasmissione nelle comunicazioni digitali, i contributi originali presentati in questo studio coinvolgono principalmente due settori di ricerca: la modellizzazione matematica delle reti wireless distribuite che impiegano sistemi avanzati d'antenna e lo sviluppo di algoritmi iterativi per la sintesi del diagramma di radiazione prodotto da schiere di antenne. Il materiale presentato in questa dissertazione è il risultato di tre anni di studi svolti all'interno del Gruppo Telecomunicazioni del Dipartimento di Elettrotecnica, Elettronica ed Informatica presso l'Università degli Studi di Trieste durante il corso di Dottorato in Ingegneria dell'Informazione.

Recentemente i sistemi di comunicazione wireless hanno sperimentato un enorme aumento del traffico a causa della significativa crescita del numero di utenti e dello sviluppo di nuove applicazioni che richiedono elevate velocità di trasmissione. Gli esperti del settore prevedono che nel prossimo futuro questo andamento sarà confermato. Questo stimolante scenario coinvolge non solo il ben instaurato mercato della telefonia cellulare, ma anche il campo delle tecnologie wireless emergenti, come il WiMAX (Worldwide interoperability for Microwave Access) per le reti metropolitane, ed il Wi-Fi (Wireless Fidelity) per le reti locali, le reti ad-hoc e le reti mesh. La rapida diffusione di architetture che adottano il paradigma ad-hoc, in cui l'infrastruttura di rete è parzialmente o totalmente assente e dove la rete stessa può venire dispiegata utilizzando dispositivi autoconfiguranti a basso costo, ha ulteriormente aumentato il numero di sistemi che devono condividere un limitato spettro di frequenze radio. In questo tipo di scenario in forte evoluzione gli aspetti più rilevanti riguardano lo sviluppo di tecniche di mitigazione dell'interferenza che migliorino l'affidabilità delle comunicazioni, l'implementazione di opportuni meccanismi di allocazione delle risorse per la gestione della mobilità degli utenti e per il supporto di applicazioni multimediali ad alta velocità. Gli approcci classici sono focalizzati sullo sfruttamento delle risorse spettrali e temporali del canale. D'altra parte, per soddisfare la crescente domanda di capacità trasmissiva nel campo delle reti, garantendo nel contempo una elevata qualità dei servizi offerti, produttori ed operatori devono necessariamente ideare e sperimentare nuove soluzioni.

In questo scenario lo sfruttamento del dominio spaziale del canale di comunicazione tramite l'impiego di sistemi ad antenne multiple può rappresentare un miglioramento decisivo per aumentare l'efficienza spettrale dei dispositivi wireless.

In un ambiente caratterizzato da una bassa correlazione spaziale tra le repliche di uno stesso segnale, l'impiego di più antenne permette di adottare tecniche di diversità e multiplazione atte a mitigare e, rispettivamente, sfruttare gli effetti legati al multipath fading. Al contrario, in canali wireless contraddistinti da una elevata correlazione spaziale, la combinazione di schiere di antenne e di algoritmi di beamforming fornisce la possibilità di sopprimere le sorgenti indesiderate e di ricevere i segnali provenienti da quelle desiderate. Questo porta ad un aumento del rapporto segnale interferenza più rumore al ricevitore che può essere sfruttato per ottenere vantaggi rilevanti in termini di capacità e di affidabilità delle comunicazioni. Una progettazione opportuna del livello Medium Access Control (MAC) della rete wireless può abilitare il simultaneo scambio di pacchetti tra diverse coppie di nodi e/o la ricezione simultanea di pacchetti da più trasmettitori da parte di un singolo nodo. Antenne di tipo switched-beam, antenne adattative (dette anche antenne intelligenti), e schiere a controllo di sola fase rappresentano alcune delle tecniche di beamforming attualmente disponibili. Queste soluzioni possono essere utilizzate per aumentare la capacità complessiva della rete e per mitigare l'interferenza in uno scenario in cui numerose tecnologie differenti sono costrette a condividere le stesse risorse spettrali e temporali.

Nel contesto delle reti wireless distribuite che impiegano sistemi ad antenne multiple, il nucleo di questa tesi è lo sviluppo di un modello matematico per l'analisi delle prestazioni di una rete in presenza di multipath fading. In particolare, il modello fa riferimento ad un canale trasmissivo in cui le repliche dei segnali che giungono al ricevitore sono caratterizzate da bassi ritardi relativi e sono confinate entro un angolo piccolo rispetto all'ampiezza del lobo principale del diagramma di radiazione generato dal sistema d'antenna. Questo ambiente di propagazione, noto come *a basso rango (low-rank)*, è lo scenario operativo tipico delle antenne intelligenti. Gli aspetti innovativi di questo studio sono rappresentati dalla modellizzazione teorica e numerica delle sofisticate antenne adattative in combinazione con una dettagliata descrizione delle statistiche del canale e del livello MAC dello standard IEEE 802.11. Un modello teorico in grado di fornire una visione realistica del comportamento delle antenne intelligenti nelle reti distribuite risulta desiderabile se si considera che, attualmente, non solo problemi relativi ai costi, ma anche aspettative troppo ottimistiche rispetto alle prime misure sul campo, hanno indotto gli operatori del settore wireless a ritardare l'adozione dei sistemi multiantenna più avanzati.

L'analisi qui presentata include gli elementi più rilevanti che possono influenzare il comportamento della rete: il modello spaziale del canale, la statistica del fading, la topologia della rete, lo schema di accesso, l'algoritmo di beamforming e la geometria della schiera di antenne. Quest'ultimo aspetto viene numericamente investigato considerando che le dimensioni del terminale rappresentano un

vincolo molto stretto sul numero di antenne che possono essere installate su un dispositivo wireless creato per operare in un contesto distribuito. Di conseguenza, il problema della massimizzazione delle prestazioni deve essere analizzato considerando la distribuzione geometrica degli elementi radianti. Nelle reti ad-hoc e nelle reti mesh i dispositivi di comunicazione tipici, come i palmari, i portatili o i cosiddetti personal digital assistant, richiedono strutture radianti che siano economiche e compatte, ed algoritmi di beamforming che siano veloci e semplici da implementare. In particolare, le caratteristiche di basso costo hanno garantito una vasta popolarità alla tecnologia delle reti wireless mesh, che a sua volta ha incoraggiato la nascita di un nuovo fenomeno sociale, conosciuto come *wireless community network*, il cui scopo è la riduzione dei costi legati all'accesso ad Internet.

L'adozione dei sistemi multiantenna è l'obiettivo dell'estensione IEEE 802.11n che, tuttavia, non considerando modifiche a livello MAC, può garantire velocità di trasmissione più elevate per il singolo collegamento, ma non permette di sostenere più comunicazioni simultanee tra diverse coppie di nodi. Un altro aspetto fondamentale che deve essere considerato nella progettazione del livello accesso è legato alla retrocompatibilità delle soluzioni proposte, requisito oramai fondamentale tenendo conto dell'enorme diffusione della famiglia di standard globalmente noti con la dicitura 802.11x. Il modello matematico elaborato in questa tesi analizza i valori più opportuni da assegnare ai parametri dell'algoritmo di backoff, in modo da sfruttare i sistemi avanzati d'antenna nelle reti basate su tecnologia 802.11 quando lo schema di accesso è in grado di supportare più comunicazioni simultanee in condizioni realistiche di propagazione.

La presentazione di due nuovi algoritmi iterativi per la sintesi del diagramma di radiazione prodotto da una schiera di antenne rappresenta il nucleo dell'ultima parte di questa dissertazione. Le soluzioni proposte sono caratterizzate da semplicità di implementazione, basso carico computazionale e non richiedono la modifica dell'ampiezza delle eccitazioni degli elementi della schiera. Questi vantaggi rendono le tecniche descritte applicabili ad un elevato numero di sistemi di telecomunicazione e soddisfano i requisiti di basso costo tipici dei dispositivi utilizzati nelle reti mesh ed in quelle ad-hoc. Le tecniche di beamforming a controllo di sola fase, infatti, permettono di usare componenti hardware disponibili a basso prezzo, come gli sfasatori, evitando l'impiego dei più costosi divisori di potenza.

Il primo algoritmo presentato usa la statistica del canale nel dominio spaziale per posizionare opportunamente gli zeri del diagramma di radiazione in modo da sopprimere l'interferenza proveniente da un certo settore angolare. Questa soluzione sfrutta i recenti studi effettuati nel campo della modellizzazione del canale wireless nel dominio azimutale per potenziare le capacità di riduzione dell'interferenza in scenari in cui è necessario tener conto dello spread angolare delle sorgenti in-

desiderate. Il secondo algoritmo presentato è un metodo a controllo di sola fase in grado di generare zeri multipli verso gli interferenti e lobi principali multipli verso le sorgenti desiderate. Un singolo nodo può quindi ricevere simultaneamente informazione da più sorgenti diverse tramite l'adozione di tecniche di multiplazione spaziale impiegando componenti elettronici a basso costo.

La tesi è suddivisa in tre parti. Nella prima parte vengono descritti gli argomenti fondamentali, mentre le parti successive sono dedicate ai risultati originali che sono stati sviluppati durante l'attività di ricerca.

Per quanto riguarda la prima parte, una introduzione alle schiere di antenne viene presentata nel primo capitolo. Gli aspetti più rilevanti dell'ambiente di propagazione wireless sono esposti nel secondo capitolo, con particolare riferimento alle caratteristiche del canale a basso rango nel dominio spaziale. Il terzo capitolo presenta una classificazione delle diverse tecniche multiantenna in accordo con le proprietà del canale e fornisce una visione generale degli algoritmi di beamforming più diffusi. Il quarto capitolo introduce le reti wireless distribuite, discutendo i principali problemi ancora aperti e le soluzioni proposte per lo sfruttamento delle potenzialità offerte dai sistemi avanzati d'antenna.

La seconda parte della tesi descrive i risultati originali ottenuti nella modellizzazione matematica delle reti ad-hoc e delle reti mesh che utilizzano antenne intelligenti in scenari realistici di propagazione. Più precisamente, il quinto capitolo propone un'analisi teorica per la valutazione del numero di comunicazioni simultanee che possono essere sostenute da una rete wireless distribuita che utilizza antenne adattative in presenza di multipath. Il sesto capitolo estende questo modello alle antenne switched-beam, ponendo attenzione agli aspetti legati alla mobilità e discutendo il compromesso costi-benefici relativo alle odierne reti wireless che impiegano sofisticati sistemi d'antenna. Una dettagliata analisi del throughput e del ritardo viene sviluppata nel settimo capitolo, dove l'impatto delle antenne direzionali ed adattative in una rete basata su tecnologia 802.11 viene investigato utilizzando un approccio markoviano. L'influenza della geometria della schiera viene esaminata nell'ottavo capitolo attraverso uno studio numerico basato su un simulatore tempo discreto in grado di tenere in conto in modo dettagliato le caratteristiche del canale ed il comportamento del sistema d'antenna.

La terza parte descrive i risultati originali ottenuti nel campo della sintesi del diagramma di radiazione prodotto da schiere di antenne. Il nono capitolo presenta una tecnica che, attraverso la modifica delle sole fasi degli elementi radianti, permette di sopprimere l'interferenza all'interno di una certa regione angolare in accordo con la statistica del segnale nel dominio spaziale. Il decimo capitolo descrive un algoritmo iterativo per schiere a controllo di sola fase in grado di generare diagrammi di radiazione con zeri e lobi principali multipli. Infine, l'undicesimo capitolo riassume i contributi principali della tesi e sottolinea le conclusioni più

importanti.

L'intento principale del lavoro di seguito presentato è quello di esaminare i benefici che derivano dall'impiego delle antenne intelligenti da una prospettiva realistica, proponendo alcune soluzioni per migliorare l'affidabilità delle comunicazioni e per aumentare la capacità della rete.