



# UNIVERSITÀ DI PISA

---

## INTELLIGENT WIRELESS TECHNOLOGIES

**MARCO MORETTI**

Anno accademico

2021/22

CdS

INGEGNERIA DELLE  
TELECOMUNICAZIONI

Codice

1037I

CFU

6

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
IINTELLIGENT WIRELESS TECHNOLOGIES	ING-INF/03	LEZIONI	60	MARCO MORETTI

### Obiettivi di apprendimento

#### *Conoscenze*

Il corso Intelligent wireless technologies è pensato per fornire allo studente conoscenze nel campo dell'ottimizzazione per le comunicazioni wireless.

Al termine del corso lo studente avrà acquisito conoscenze relative a come formulare un problema di ottimizzazione per un sistema wireless e ai principali metodi di soluzione, ottimi ed euristici.

#### *Modalità di verifica delle conoscenze*

L'accertamento delle conoscenze sarà effettuato

- in classe attraverso la partecipazione attiva alle lezioni;
- a casa con la soluzione di problemi ad hoc ed sviluppo del relativo software;
- attraverso la realizzazione di un progetto finale.

#### *Capacità*

Al termine del corso, lo studente saprà

- formulare un problema di ottimizzazione in forma standard e valutare quale approccio utilizzare per trovarne la soluzione;
- implementare e trovare la soluzione al problema in MATLAB.

#### *Modalità di verifica delle capacità*

Le capacità degli studenti vengono testate valutando la loro partecipazione alle lezioni e affrontando insieme la risoluzione di alcuni problemi di ottimizzazione verificando la comprensione dell'impatto sulle prestazioni di un sistema di telecomunicazioni.

#### *Comportamenti*

Lo studente potrà acquisire e sviluppare sensibilità alle problematiche relative all'ottimizzazione di sistemi complessi anche in ambiti diversi dalle comunicazioni wireless.

#### *Modalità di verifica dei comportamenti*

GLi studenti verranno organizzati in gruppi e ciascun gruppo dovrà affrontare la soluzione di uno specifico problema, appositamente disegnato per mettere alla prova il livello di maturità raggiunto.

#### *Prerequisiti (conoscenze iniziali)*

Per potere seguire con successo questo corso è necessario possedere una buona conoscenza dei sistemi di comunicazione wireless e solide basi di matematica e signal processing. Conoscenze che comunque fanno parte del bagaglio culturale di uno studente di Ingegneria delle TLC al secondo anno della Laurea Magistrale.

#### *Indicazioni metodologiche*

Le lezioni sono tenute con l'utilizzo di lucidi che vengono distribuiti agli studenti utilizzando l'applicativo MS onenote. Il materiale didattico (lucidi e programmi MATLAB) è messo a disposizione sul sito del corso.



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

### Programma (contenuti dell'insegnamento)

Introduzione al corso. Principali argomenti che verranno trattati. Modalità di esame. Evoluzione delle comunicazioni wireless attraverso le varie generazioni di telefonia mobile.

Modellizzazione del canale di propagazione: large e small scale fading. Attenuazione di canale dovuta alla distanza, path-loss exponent. Attenuazione in funzione della frequenza e dimensionamento della cella in base a capacità e copertura. Small-scale fading: multipath fading e canali selettivi in frequenza. Dispersione del canale nel tempo: delay spread. Prestazioni di un sistema numerico su canale multipath.

Modulazione OFDM come risposta al multipath. Canale di propagazione modellato come tapped delay line. Convulsione rappresentata come un prodotto matriciale con una matrice di Toeplitz. Estensione ciclica del segnale tramite l'utilizzo di prefisso ciclico. Convulsione circolare rappresentata con l'uso di una matrice circolante. Proprietà delle matrici circolanti. Architettura di trasmettitore e ricevitore OFDM.

Definizione di insieme convessi e funzioni convesse. Condizioni di convessità per funzioni differenziabili. Definizione di problema di ottimizzazione in forma standard. Problemi di ottimizzazione convessa. Lagrangiano e moltiplicatori di Lagrange. Funzione duale di Lagrange e dimostrazione della proprietà di Lower bound della Lagrangian dual function. Problema duale di Lagrange. Complementary slackness per problemi di ottimizzazione strongly dual. KKT conditions.

Problema di massimizzare il rate di un sistema OFDM in presenza d un vincolo sulla potenza complessiva. Utilizzo delle condizioni KKT per trovare la soluzione waterfilling. Methods per calcolare il water level per l' algoritmo di waterfilling. Metodo 1: spengendo progressivamente i canali dove si trasmette con potenza negativa. Metodo 2: algoritmo della bisettrice. Realizzazione in Matlab dell'algoritmo di waterfilling.

Problema di ottimizzazione duale rispetto al waterfilling classico: minimizzazione della potenza necessaria per soddisfare un vincolo sul rate. Studio della relazione tra le soluzioni del problema di massimizzazione del rate con un vincolo sulla potenza e del problema di minimizzazione della potenza con un vincolo sul rate. Soluzione in MATLAB di un problema di minimizzazione convessa vincolato.

Introduzione al problema dell'allocazione risorse in scenari multi-utente. Principali assunzioni e vincoli. Ortogonalità in frequenza dell'allocazione. Problema di allocazione max sum rate e max min rate. Soluzioni euristiche e algoritmi greedy. Metodo del gradiente per la minimizzazione di una funzione non vincolata. Utilizzo del metodo del gradiente per trovare il massimo della lagrangian dual function. Problema di allocazione risorse con proportional rate constraints. Soluzione euristica per l'allocazione delle sottoportanti. Formulazione dell'allocazione della potenza come problema convesso. Lagrangiano e gradiente del problema dell'allocazione della potenza con proportional rate constraints. Derivazione del calcolo della potenza su ciascuna sottoportante. Formulazione del problema come un sistema di K incognite in K equazioni non-lineari. Metodo di Newton-Raphson per la soluzione di un sistema non lineare. Metodo di Newton per trovare il minimo di una funzione. Formulazione alternativa per il problema dell'allocazione con proportional rate constraints. Schema di soluzione nel dominio duale. Analisi delle prestazioni dei vari algoritmi rate adaptive al variare del numero degli utenti.

Algoritmi margin adaptive. Formulazione del problema di ottimizzazione. Rilassamento della condizione di integralità della variabile di allocazione. Dimostrazione della convessità del problema di minimizzazione della potenza con vincoli sul rate. Calcolo del Lagrangian e del gradiente. Soluzione nel dominio duale. Discussione. Algoritmo iterativo per risolvere il problema WCLM. Effetto della scelta del moltiplicatore di lagrange lambda sul rate e l'allocazione di sottoportanti di un utente. Algoritmo di allocazione congiunta di rate e sottoportanti. Approccio che vede la soluzione nel dominio duale per il problema non convesso. Studio del Lagrangiano. Optimal rate allocation nel dominio duale.

Definizione di problema separabile. Calcolo della Lagrangian dual function come soluzione di un problema separabile. Definizione del subgradient for una funzione convessa (concava). Dimostrazione che il vincolo calcolato rispetto al valore delle variabili duali rappresenta un subgradiente per la Lagrangian dual function. Soluzione del problema duale utilizzando il sub-gradiente. Realizzazione in Matlab di alcuni algoritmi di ottimizzazione. Metodo dell'ellissoide per risolvere il Lagrangian dual problem. Come inizializzare l'ellissoide. Allocazione di risorse formulata come problema di linear integer programming. Allocazione risorse basata sull'utilizzo di un unico formato di modulazione con linear programming. Bipartite weighted matching. Risultati e confronti per i vari schemi di allocazione margin adaptive. Soluzione nel dominio duale del knapsack problem e implementazione in MATLAB.

Allocazione risorse nei sistemi MIMO. Allocazione ottima nel caso singolo utente. Allocazione risorse per sistemi MIMO multi-user. Allocazione margin adaptive per sistemi MIMO. Block diagonalization precoding: matrice dell'interferenza, decomposizione a valori singolari e matrice equivalente di canale. Distribuzione ottima della potenza. Soluzione del problema MIMO margine adaptive nel dominio duale. Implementazione in Matlab del problema di allocazione singolo utente con precoder zero-forcing e con SVD e waterfilling. Algoritmo semplificato per sistemi MIMO broadcast: assegnazione sequenziale di canale. Sbiancamento della matrice dell'interferenza. Allocazione ottima in presenza di interferenza. Riformulazione del problema SCA con linear programming. Risultati e confronto tra i vari algoritmi.

MIMO interference channel. Formulazione del problema sum-rate. Ricevitore MIMO MSE. Pre-codifica e filtraggio MSE. Coordinate descent method. Algoritmo iterativo BCD per la minimizzazione del MSE in un sistema MIMO. Definizione del problema di ottimizzazione WMMSE. Gradiente del determinante e della traccia. Formule aggiornate al caso WMMSE dei filtri di ricezione e pre-codifica. Soluzione alla convergenza del problema WMMSE. Equivalenza tra problema WMMSE e sum-rate maximization.

Comunicazioni D2D: canale sidelink. Potenziali applicazioni di D2D in una rete 5G. Modalità di utilizzo D2D: trasmissioni underlay e overlay. Allocazione di potenza in modalità overlay. Introduzione alla teoria dei giochi e ai giochi potenziali. Best e better response dynamics. Allocazione di potenza formulata come gioco potenziale. Allocazione best response. Allocazione better response. Linearizzazione di parte della funzione obiettivo. Dimostrazione che la soluzione del problema di allocazione di potenza linearizzato è una better response per il problema originale della massimizzazione del rate in un sistema D2D. Soluzione del problema di massimizzazione del rate globale linearizzato nella funzione convessa. Interpretazione del significato dei termini lineari rispetto al problema di ottimizzazione rilassato. Allocazione di potenza in 'reuse mode'. Definizione dei vincoli addizionali. Studio di un bound per il problema dell'allocazione D2D in 'reuse mode'. Studio del problema rilassato nel dominio duale. Formulazione del Lagrangian dual problem e algoritmo iterativo su due livelli risolto col metodo dell'ellissoide. Risultati per un sistema D2D. Confronto delle prestazioni di D2D in 'dedicated mode' e in 'reuse mode'.

### Bibliografia e materiale didattico

Dimitri P. Bertsekas. *Nonlinear Programming*. Athena Scientific, 2016.  
Stephen P. Boyd, and Lieven Vandenberghe. *Convex optimization*. Cambridge University Press, 2004.

### Modalità d'esame



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

L'esame è composto da una prova orale che richiede la consegna di un elaborato. Il voto finale terrà conto del livello di partecipazione alle lezioni.

*Ultimo aggiornamento 04/02/2022 13:53*