

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Tesi di Laurea Triennale in
INGEGNERIA INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

**Classificazione delle Tecniche di Condivisione
delle Risorse Tramite Teoria dei Giochi in
Reti di Nuova Generazione**

Relatore
Prof. Leonardo Badia

Candidato
Marco Scantamburlo

Anno Accademico 2012/2013

Sommario

Con il passare degli anni le esigenze degli utenti di sistemi di telecomunicazione stanno aumentando molto più rapidamente da quanto consentito dai semplici avanzamenti tecnologici dovuti ai progressi dell'elettronica. Si è reso quindi necessario lo studio di metodi che consentano uno sfruttamento più efficiente della banda, per esempio con la condivisione delle risorse. Nel lavoro di questa tesi ci si concentrerà maggiormente sulla condivisione dello spettro tra utenti che partecipano alla trasmissione in un canale comune, in particolare enfatizzando come la teoria dei giochi fornisca degli ottimi strumenti per lo studio di questo problema. Per avere una panoramica generale, nell'ambito della tesi è stata inoltre sviluppata una tassonomia delle varie tecniche impiegate. I risultati di questo studio sono stati sintetizzati tramite un documento ipertestuale, disponibile come pagina web, così da consentire un accesso alle informazioni più veloce e intuitivo.

Indice

1	La Teoria dei Giochi nella Condivisione dello Spettro Radio	5
1.1	Gioco di Stackelberg per Reti Multisalto [28]	7
1.1.1	Cooperazione Forzata	9
1.1.2	Cooperazione Volontaria	9
1.1.3	Risultati Numerici	13
1.2	Gioco di Stackelberg per Reti Multi-Utente [29]	15
1.2.1	Gioco a Contesa	16
1.2.2	Gioco di Stackelberg a Contesa	17
2	Panoramica su alcune Tecniche di Allocazione di Risorse	22
2.1	Generalità sulla Condivisione di Risorse	22
2.2	Metodi di Condivisione di Risorse	23
2.3	Condivisione di Spettro tramite la Teoria dei Giochi	25
2.3.1	Giochi Non Cooperativi Gerarchici	25
2.3.2	Giochi Non Cooperativi a Ripetizione	26
2.3.3	Giochi Cooperativi	27
3	Tassonomia Web	31
4	Conclusioni	33

Introduzione

Con l'introduzione negli anni di sistemi di comunicazione sempre più sofisticati e diffusi all'interno della società è emersa l'esigenza di sfruttare in maniera sempre più spinta le risorse a disposizione per effettuare scambio di dati all'interno della rete mondiale. È stato previsto nel 2012 da Wireless World Forum (WWRF) [1] che entro il 2017 saranno presenti circa 7 mila miliardi di apparecchiature wireless pronte a servire 7 miliardi di utenze. Ogni utente vorrà avere a disposizione in qualsiasi momento una connessione affidabile e ad alta velocità.

Fino ad ora sono state ideate e applicate tra le più moderne tecniche di trasmissione tra le quali troviamo: accesso multiplo basato sul conflitto, sistemi multi-antenna come lo Space Division Multiple Access (SDMA [2]) o il Time Division Multiple Access (TDMA [3]), modulazioni e schemi di codifica adattabili, comunicazioni cooperative, ecc. Ognuno di questi sviluppi della comunicazione ha la responsabilità di allocare al meglio le risorse in termini di infrastrutture, spettro ed energia, ed è stato dimostrato anche in [15] come la cooperazione nella allocazione delle risorse porti un beneficio comune all'interno di ognuno di questi tre campi, traducendosi quindi in guadagni economici, come discusso in [4]. Gli scenari in cui vengono studiate queste ottimizzazioni all'interno della tesi saranno essenzialmente due: reti cellulari e reti multisalto. Con reti cellulari si definiscono quelle reti che consentono una comunicazione wireless tra delle stazioni mobili, dette celle, e una stazione centrale, detta stazione radio base. Un esempio di questa rete è il sistema di comunicazione di quarta generazione Long Term Evolution (LTE) [6] che, come vedremo nei prossimi capitoli, si presta particolarmente bene per l'implementazione di una condivisione di risorse ottimale. Quest'ultimo utilizza una trasmissione a commutazione di pacchetto [7] e lo schema di trasmissione che caratterizza il downlink (DL) di una cella, con il quale si intende il canale di trasmissione dalla stazione base e arriva all'utenza mobile,

e l'uplink (UL), analogo al DL, è caratterizzato come segue:

- Per il DL viene utilizzato uno schema TDMA/OFDMA (Orthogonal Frequency Multiple Access) [8]. Il tempo viene diviso in slot da 10 ms, ognuno dei quali si divide in sotto-slot da 1 ms. Lo spettro viene diviso in sezioni adiacenti, ognuna identificata da una determinata sotto-portante, definendo così dei sotto-canali che saranno assegnati ad un singolo utente, se si tratta di allocazione localizzata o, a due utenti, se si tratta di una allocazione distribuita. L'assegnazione degli slot resta costante per tutta la durata di uno slot temporale mentre può variare per slot temporali differenti. La scelta su come distribuire la quantità di banda da assegnare ad un determinato utente dipende dallo scheduling e dalle regole che si decidono per la allocazione di risorse, per esempio, si possono assegnare per ottimizzare l'utilità, in termini di guadagno, che ogni utente può raggiungere con la sua trasmissione.

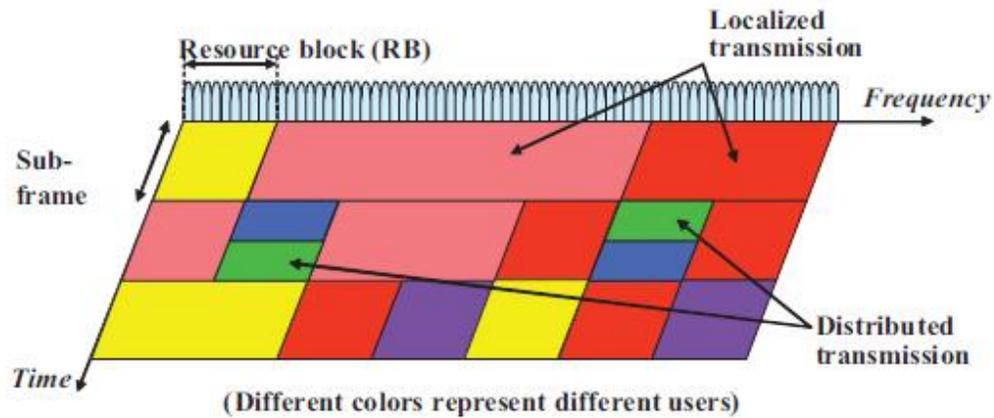


Figura 1: Schematizzazione di allocazione utenti in un sistema OFDMA, tratto da [9].

- Per l'UL viene adottato un SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access)[10]. Questo modello è stato scelto per raggiungere una copertura più ampia, piuttosto che prestazioni più spinte

ottenibili se si fosse usato un sistema a portante multipla. Sul canale di uplink condiviso viene utilizzata una FDMA con trasmissione localizzata.

Le reti multisalto [11], invece, sono delle particolari reti wireless, dove sorgente e destinatario sono interconnessi da una serie di nodi, infatti per la sorgente è impossibile comunicare direttamente con il destinatario a causa di distanze troppo elevate e quindi vengono utilizzati dei nodi intermedi per ritrasmettere il segnale fino a destinazione.

Ci sono comunque dei limiti da considerare quando si effettua una condivisione di risorse e possiamo dividerli in due classi principali: limiti normativi e limiti fisici. I primi derivano dalla necessità che vengano rispettati le leggi e i regolamenti imposti dai paesi, mentre i secondi sono essenzialmente dovuti alle caratteristiche fisiche del canale e dei dispositivi che interessano il livello 1 dello stack protocollare [7]; per entrambe queste classi vengono trattati i limiti sulla potenza di trasmissione. È necessario quindi introdurre delle figure di controllo che considerino tutti questi aspetti interdisciplinari per garantire efficienza e correttezza nel sistema e, proprio sotto questo aspetto, la teoria dei giochi si è rivelata essere essenziale per l'analisi e il controllo nella condivisione di spettro all'interno di una rete [12].

Il resto della tesi è organizzato come segue. Nel Capitolo 1 saranno date delle definizioni nell'ambito della teoria dei giochi e saranno spiegati due articoli per fornire un esempio più nel dettaglio di come possono essere applicate queste tecniche. Nel Capitolo 2 saranno elencati vari articoli che trattano la condivisione di risorse. Alcuni di questi saranno discussi nel dettaglio per poterli confrontare tra loro. Nel Capitolo 3 si fornisce una pagina web che descrive una possibile tassonomia dei vari articoli elencati nel capitolo precedente. Infine nelle Conclusioni si fornisce una breve analisi dell'elaborato e possibili sviluppi futuri.

Capitolo 1

La Teoria dei Giochi nella Condivisione dello Spettro Radio

La teoria dei giochi studia la modellizzazione matematica su casistiche di conflittualità e cooperazione tra soggetti intelligenti e razionali [13]. Un elemento necessario da definire per questa branca della matematica è l'*equilibrio di Nash* [14]. Tale equilibrio è la soluzione di un gioco non cooperativo [16] di due o più giocatori che fanno le loro scelte senza conoscere quella dei propri avversari. Se alla fine della partita ogni giocatore, osservando il risultato dei suoi avversari, non ha alcun pentimento sulla scelta della propria strategia, allora l'insieme delle strategie e dei guadagni raggiunti dai giocatori alla conclusione di tale partita definiscono un equilibrio di Nash. Essendo le scelte di strategia possibili per ogni giocatore non uniche, non è prevedibile a priori quale sia il punto di equilibrio che si raggiungerà, infatti certi equilibri portano guadagni generali maggiori rispetto ad altri.

Se un gioco ha un equilibrio di Nash che porta un basso guadagno ai giocatori, sarà desiderabile per loro trasformarlo, estendendo l'insieme degli equilibri per includere risultati migliori [13]. Nella teoria dei giochi si sono studiati tre quattro principali di trasformazione : (1) giochi con contrattazione [17], (2) giochi con comunicazione [18], (3) giochi con ripetizioni [19] e (4) metodo di riconoscimento [20].

1. Un gioco è detto a contrattazione se i giocatori possono comunicare e contrattare con gli altri e far rispettare gli accordi tramite contratti

vincolanti. L'ostacolo principale per applicare questo metodo alle reti radio è la sua conformazione distribuita dove, per arrivare ad un accordo, gli utenti dovrebbero conoscere il sistema della rete ed essere in grado di comunicare tra loro. Saranno quindi in grado di pianificare un accordo;

2. Un gioco con comunicazione è quello in cui i giocatori possono comunicare tra loro tramite un mediatore, ma tra loro non riescono a formulare un accordo vincolante. Altman in [21] studia l'equilibrio correlato usando un meccanismo di coordinazione in uno scenario slotted Aloha[22]. Diversamente da (1) questo non richiede che le azioni dei giocatori debbano essere rispettate e inoltre, è necessario che i segnali siano convogliati da un mediatore a tutti gli utenti e che questi ultimi ne interpretino correttamente il significato;
3. Un gioco con ripetizioni è un gioco dinamico, dove lo stesso gioco viene giocato ripetutamente dagli stessi giocatori per periodi finiti o infiniti di tempo. Le interazioni ripetute dagli stessi giocatori gli permettono di sostenere una cooperazione, punendo chi devia da questa in sotto sequenze di periodi.
4. Il metodo di riconoscimento. Un ente centrale decide delle *ricompense* sugli utenti per poter controllare il loro utilizzo della rete. Gli equilibri di Nash con questo tipo di modello sono analizzati in [23] [24] per una rete Aloha. Implementare questo schema richiede che un ente centrale abbia rilevanti informazioni di sistema. Estrarre informazioni private si traduce in perdita di efficienza nei presenti comportamenti strategici degli utenti, come mostrato in [25]. Mentre nel caso in cui l'ente centrale possiede già le informazioni rilevanti del sistema, le taglie devono essere scelte e comunicate agli utenti per dargli la possibilità di scegliere se partecipare o meno alla rete.

Un caso particolare di equilibrio di Nash è l'equilibrio di Stackelberg [26] e può essere raggiunto per un gioco dinamico detto *gioco di Stackelberg* che funziona nella seguente maniera: come primo passo si decide il ruolo che ogni giocatore deve coprire scegliendo tra *follower* o *leader*, dopo di che il leader sceglie per primo la sua strategia di gioco e, una volta decretata, i followers possono decidere la loro strategia basandosi su quella fatta precedentemente

dal leader. In questa maniera tutti i followers sono obbligati a giocare secondo quello che il leader decide e nessuno tra loro può cambiare la propria strategia a piacimento, per esempio per trarre più profitto dal gioco, poiché il leader può cambiare la sua strategia a sfavore di chi non rispetta le sue regole. Con questo metodo di punizione è facile prevedere che gli utenti, considerati perfettamente intelligenti, fanno sempre le loro scelte di strategia lealmente e di conseguenza si possono definire delle strategie che portano i followers al raggiungimento di un determinato equilibrio di Stackelberg, il quale massimizza il livello generale di soddisfazione dei giocatori come, per esempio, avviene nel seguente articolo [27].

Ora si discuteranno due particolari tipi di condivisione di banda tra gli utenti tramite l'utilizzo della teoria dei giochi. I due esempi qui discussi modellano entrambi il problema di condivisione di spettro come un gioco di Stackelberg ma, con una sostanziale differenza tra i due tipi di approcci: nel primo esempio [28] preso in considerazione si utilizza un modello dove un particolare nodo (nodo 0) mentre gli utenti che partecipano alla rete coprono la parte di followers; viceversa, nel secondo esempio [29], si identificano gli utenti come leaders e un manager come unico follower. Per entrambi i casi l'obiettivo sarà raggiungere un equilibrio di Stackelberg che, esiste unico, ed il suo valore dipende dalle decisioni che gli utenti operano durante il corso del gioco. Il raggiungimento di un equilibrio di Stackelberg sta ad indicare che nessun utente resta insoddisfatto alla fine della sua trasmissione e quindi, se potesse tornare sulle decisioni fatte precedentemente non cambierebbe strategia, poiché sa che porterebbe ad un guadagno inferiore rispetto a quello appena raggiunto. Questo è vero proprio perché si dimostra in [30] che la collaborazione tra gli utenti, anche se in questo caso viene forzata dalla figura del leader, è più efficiente rispetto al caso in cui ognuno scegliesse di percorrere una strategia di trasmissione non collaborativa.

1.1 Gioco di Stackelberg per Reti Multisalto [28]

Si prenda in considerazione un sistema di trasmissione wireless strutturato come in figura 1.1 dove al centro si trova il nodo 0, il quale fa da ricevitore per tutti i nodi che lo circondano. Più è distante un nodo più è cattivo il suo canale di trasmissione e si ordinano gli indici degli utenti in ordine

crescente rispettivamente al loro valore di SNR al nodo 0. Viene adottato il metodo Automatic Retransmission reQuest (ARQ) [31]. Si assume che gli utenti siano *backlogged*, cioè hanno sempre un pacchetto da trasmettere.

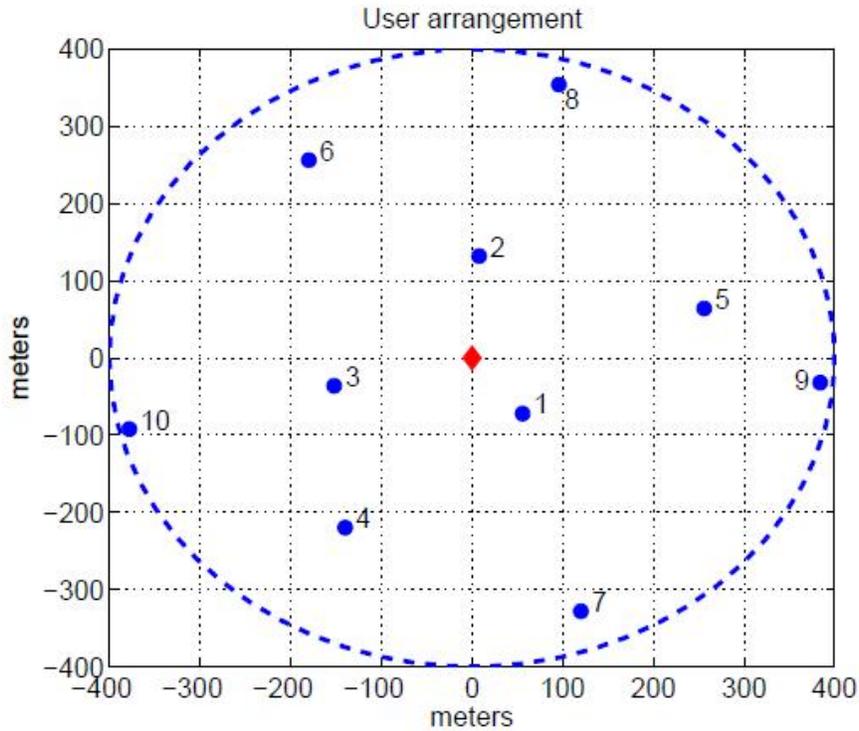


Figura 1.1: *Disposizione dei nodi in una Wireless Network, tratto da [28]*

Il nodo 0 ha anche la funzione di decidere chi trasmette durante un certo slot del modello TDMA sul quale si basa la rete.

Nella figura 1.2 viene data una rappresentazione di una ritrasmissione di un pacchetto attraverso una catena di Markov, identificando con q la probabilità di successo di trasmissione del pacchetto. Per semplicità si è assunto che la ritrasmissione possa essere effettuata una sola volta, dopo la quale il pacchetto viene perso.

Si introduce ora la teoria dei giochi studiando due sistemi differenti di cooperazione e vediamo nel dettaglio entrambi i sistemi osservando successi-

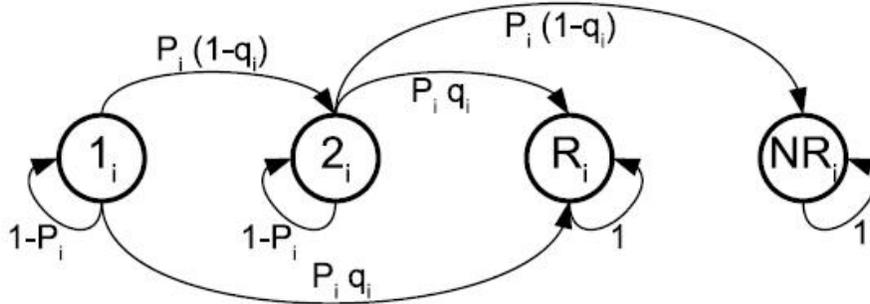


Figura 1.2: *Catena di Markov della ARQ modificata con ritrasmissione da parte di un nodo più vicino, tratto da [28].*

vamente attraverso qualche grafico di simulazione quali sono i guadagni, in termini di throughput, per entrambi i metodi.

1.1.1 Cooperazione Forzata

Gli utenti sono obbligati a seguire le direttive del nodo 0: il primo tentativo di trasmissione sarà effettuato dall'utente i , mentre quello di ritrasmissione non è detto che sia effettuato dallo stesso, infatti se i ha un SNR più basso di un certo utente j allora quest'ultimo sarà *costretto* a ritrasmettere il segnale di i aumentando così la probabilità di successo q con il quale il pacchetto viene ricevuto dal nodo 0. In questo caso è evidente come la spesa aggiuntiva di energia del nodo j dovuta alla ritrasmissione non viene in alcun modo premiata, creando uno squilibrio di soddisfazione a favore di i . Nella figura 1.3 nella pagina che segue viene schematizzata tale procedura con una catena di Markov.

1.1.2 Cooperazione Volontaria

In questo scenario profondamente asimmetrico, dove ci sono utenti che vengono aiutati e, coloro che aiutano, spendono energia aggiuntiva, si è studiato un metodo che perdeva una cooperazione volontaria da parte degli utenti che fungono da ritrasmettitori, incentivandoli alla collaborazione con un premio, come avviene anche in [32]. Infatti a coloro che cooperano, il nodo 0 assegna

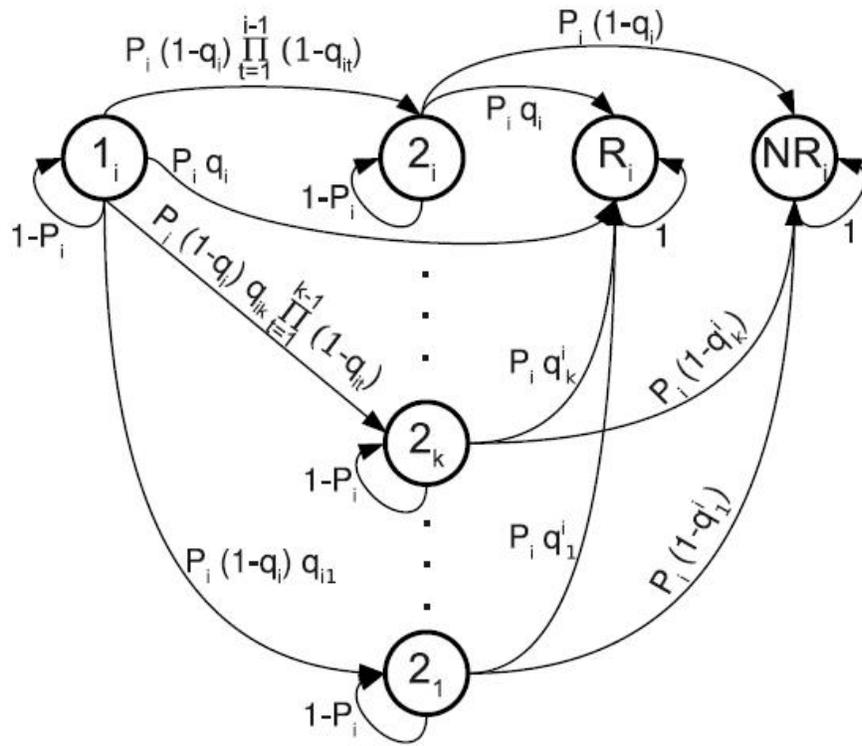


Figura 1.3: *Catena di Markov di cooperazione forzata, tratto da [28].*

una maggiore probabilità di trasmissione, compensando quindi l'inefficienza di soddisfazione della cooperazione forzata. Si può considerare, all'interno del calcolo della probabilità che il nodo 0 riceva correttamente il pacchetto trasmesso dal nodo i , dei pesi $w_{ij} \in [0, 1]$, che tengono conto della cooperazione tra gli utenti. La decisione del valore di questi pesi spetta al nodo 0, che comunica previamente agli utenti che fungono da ritrasmettitori, quanta probabilità di trasmissione guadagnano aiutando un determinato nodo i in modo tale da lasciare a loro la decisione di chi effettivamente aiutare e con chi cooperare, massimizzando quindi il guadagno complessivo.

Anche in questo caso è possibile schematizzare la trasmissione di un pacchetto, da parte di un utente i , attraverso una catena di Markov (figura 1.4), dove le probabilità di trasmissione dipendono dagli utenti con cui i ha collaborato e da quelli che l'hanno aiutato a ritrasmettere il pacchetto. Gli apici delle probabilità indicano quale slot di tempo si sta considerando, a partire da un generale n -esimo slot.

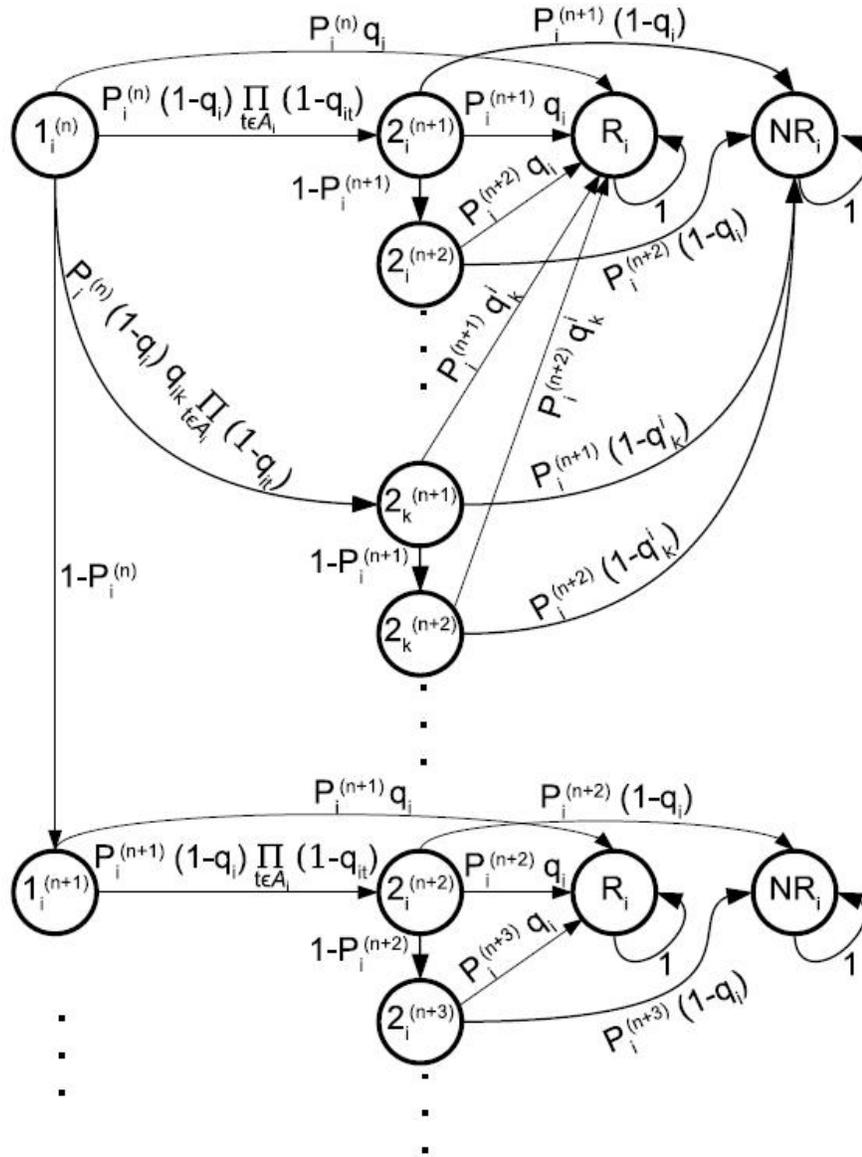


Figura 1.4: Catena di Markov di cooperazione volontaria, tratto da [28].

1.1.3 Risultati Numerici

In [28] vengono riportati i seguenti andamenti del throughput in tre diversi casi di trasmissione: non cooperativa, cooperazione forzata e cooperazione volontaria. La figura 1.5 rappresenta il throughput asintotico in funzione dell'indice di utente, indicando con numeri crescenti, fino a 10, utenti via via più lontani.

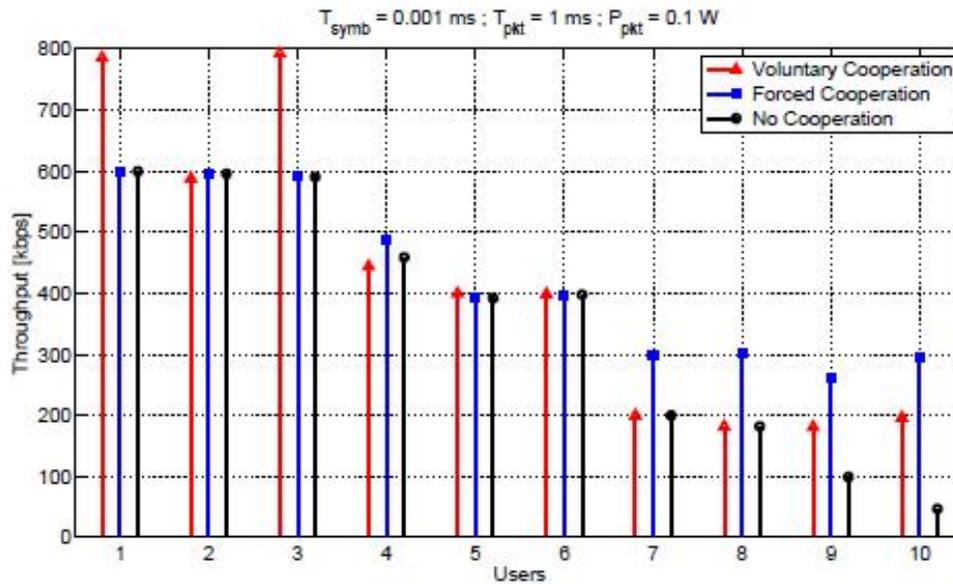


Figura 1.5: *Throughput asintotico per ogni utente, tratto da [28].*

Si nota come nella cooperazione forzata gli utenti con più alto indice hanno un maggiore beneficio. Infatti sanno che quelli con indice inferiore devono cooperare per forza e si può notare inoltre che, in questo caso, non si ha nessun miglioramento di throughput per questi ultimi ma solamente un dispendio di energia. La collaborazione volontaria livella meglio il guadagno di throughput complessivo calandolo leggermente agli utenti di indice alto e portando miglioramenti a quello degli utenti di indice basso.

La figura 1.6 invece, mostra come l'utilità nel caso di una collaborazione forzata sia solo a vantaggio degli utenti con indice alto e addirittura decremента per quelli che aiutano la ritrasmissione dei loro segnali, in questo

modo la collaborazione non viene sicuramente incentivata. Mentre nel caso di collaborazione volontaria gli unici che hanno un effettivo guadagno di utilità sono gli utenti lontani (anche se inferiore rispetto alla collaborazione forzata), mentre quella degli utenti di indice minore resta pressoché invariata. In questo caso si può affermare che il livello di soddisfazione nella rete è equamente distribuito.

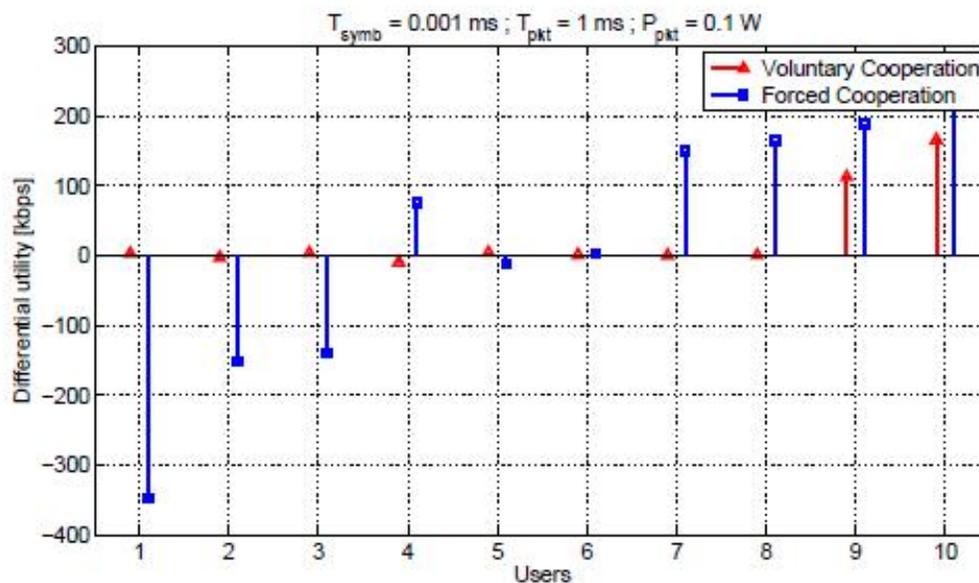


Figura 1.6: *Differenza di utilità raggiunta per i diversi tipi di collaborazione, tratto da [28].*

Dalla figura 1.7 si nota come l'aumento medio di throughput nella rete cresce rispetto al numero di utenti che ne partecipano, ma possiamo desumere che se la rete presenta un numero di utenti inferiore a 5 si ha un throughput migliore se si utilizza una strategia di collaborazione forzata.

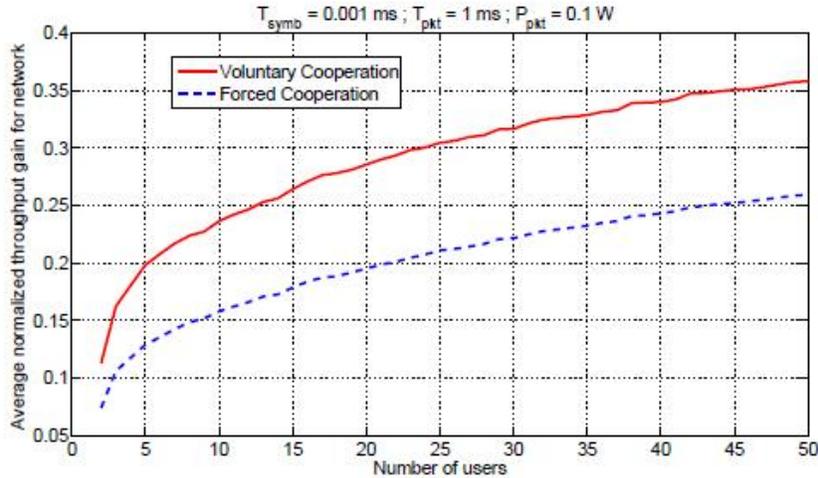


Figura 1.7: *Throughput medio per numero di utenti nella network, tratto da [28].*

1.2 Gioco di Stackelberg per Reti Multi-Utente [29]

Si prenda in considerazione uno scenario di rete cellulare ad accesso multiplo dove diversi utenti accedono in maniera casuale cercando di trasmettere a proprio interesse, cioè scegliere una strategia di trasmissione che massimizzi il proprio throughput. Questa situazione è stata studiata con l'utilizzo della teoria dei giochi in [34][35] e si è giunto alla conclusione che un punto operativo per il sistema di trasmissione che gli utenti vorrebbero raggiungere è un equilibrio di Nash. Si modella quindi il problema di condivisione come un gioco a contesa dove sono state fatte le seguenti assunzioni:

- Un utente rappresenta una coppia trasmettitore-ricevitore.
- Un numero finito di utenti interagiscono per un dato periodo di tempo (sessione).
- Il tempo è diviso in slot diversi e sono tra loro sincronizzati.
- Un utente ha sempre un pacchetto da trasmettere in ogni slot.

- La trasmissione di un pacchetto viene completata attraverso uno slot.
- Un utente trasmette il suo pacchetto attraverso ogni slot con la stessa probabilità. Non ci sono aggiustamenti nelle probabilità di trasmissione durante una sessione.
- Se più di un utente trasmette un pacchetto simultaneamente in uno slot, si crea una collisione e nessun pacchetto viene trasmesso.
- Non ci sono costi di trasmissione per il pacchetto.

1.2.1 Gioco a Contesa

Come prima cosa analizziamo come un gioco *non cooperativo* ed analizziamo come prima cosa il guadagno (payoff) raggiunto da un utente. Denotiamo un insieme di utenti con $N = \{1, \dots, n\}$. Proprio perchè l'utente ha la stessa probabilità di trasmissione in un'intera sessione possiamo assumere che la sua scelta di strategia sta proprio nella scelta della sua probabilità di trasmissione, e la denotiamo con $p_i, \forall i \in N$.

Una volta che l'utente decide la sua probabilità di trasmissione, viene definito un profilo di strategia. Un profilo strategico può essere scritto con il vettore $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n)$ dove $P = P_1 \times \dots \times P_n$, è l'insieme dei profili strategici. La funzione di payoff dell'utente $i, u_i : P \rightarrow R$, è definita come :

$$u_i(\mathbf{p}) = k_i p_i \prod_{j \neq i} (1 - p_j)$$

dove $k_i > 0$ è un valore che pesa l'importanza dell'utente i -esimo (se si fa l'assunzione di utenti omogenei allora $k_i = 1 \forall i \in N$) e $p_i \prod_{j \neq i} (1 - p_j)$ è la probabilità di successo di trasmissione per l'utente i .

Si può dimostrare come in questo caso un equilibrio di Nash viene raggiunto se e solo se esiste almeno un $p_i = 1$ all'interno del profilo di strategia. Nella maggior parte dei casi si arriva ad un equilibrio di Nash dove tutti gli utenti trasmettono con massima probabilità i loro pacchetti e come risultato nessun pacchetto viene inviato con successo per via delle collisioni che si creano.

Quindi sarebbe come se ogni utente partecipasse ad una rete collassata ottenendo un guadagno nullo, come argomentato in [36]. Si mostra questo risultato in figura 1.8 dove si simula la trasmissione di due utenti in modo non cooperativo.

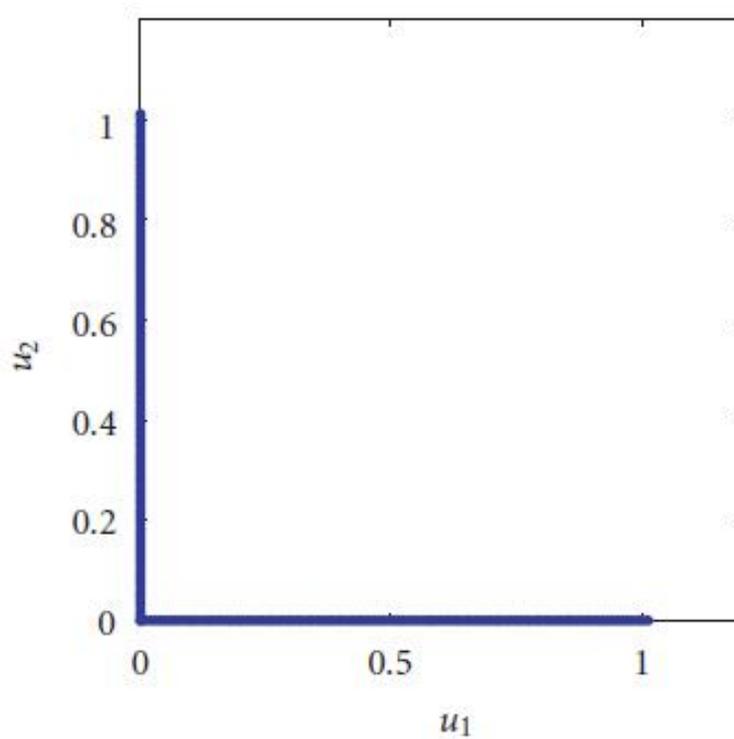


Figura 1.8: *Equilibrio di Nash per due utenti non collaborativi, tratto da [29]*

Si rende così necessaria una trasformazione di questo tipo di gioco, detto *a contesa*, adottando un modello basato sul gioco di Stackelberg.

1.2.2 Gioco di Stackelberg a Contesa

Introduciamo nel gioco a contesa un *network manager* come un tipo speciale di utente e lo nominiamo utente 0. Come ogni altro utente, il manager può accedere al canale con una certa probabilità di trasmissione, con la differenza

che può modificarla in funzione di quella scelta dagli altri utenti. Questa abilità gli permette di agire come un controllore: se un utente accede al canale eccessivamente, il manager può intervenire punendolo con la scelta di un'alta probabilità di trasmissione così riducendo il rate di successo dell'utente.

Si può schematizzare l'evoluzione della trasmissione nei seguenti passi temporali:

1. Il manager della rete determina la sua funzione di intervento;
2. Conosciuta la funzione di intervento, gli utenti scelgono le loro probabilità di trasmissione simultaneamente;
3. Osservando il profilo di strategia degli utenti, il manager determina il livello di intervento usando una determinata *funzione di intervento* g ;
4. La probabilità di trasmissione del manager e degli utenti determina il loro guadagno;

La figura 1.9 mostra che la funzione del manager è settare le regole di intervento e implementarle. Se gli utenti continuano a voler massimizzare il loro guadagno non cooperativamente, l'intervento del manager li spinge ad allontanarsi da tale comportamento anche se, quest'ultimo, non li controlla mai direttamente né comunica continuamente con loro per coordinarli.

Essendo le probabilità di trasmissione degli utenti dipendenti dalla funzione g , ridefiniamo il gioco a contesa Γ come un gioco a contesa di Stackelberg:

$$\Gamma_g = \langle N, (P_i), (\tilde{u}_i(\cdot; g)) \rangle .$$

Viene fornito un concetto di equilibrio per il gioco a contesa di Stackelberg: una funzione di intervento g e un profilo di probabilità di trasmissione degli utenti $\hat{\mathbf{p}} = (\hat{p}_1, \dots, \hat{p}_n)$ costituisce un equilibrio di Stackelberg se (i) $\hat{\mathbf{p}}$ è un equilibrio di Nash del gioco a contesa con intervento g ; (ii) $\hat{\mathbf{p}} = \tilde{\mathbf{p}}$, dove $\tilde{\mathbf{p}}$ è un equilibrio di Nash di Γ_g e $g(\tilde{\mathbf{p}}) = 0$, di conseguenza anche $g(\hat{\mathbf{p}}) = 0$.

La condizione (i) dice che una volta che il manager sceglie la sua strategia, gli utenti, considerati perfettamente intelligenti, giocano un profilo di strategia per raggiungere un equilibrio di Nash, mentre la condizione (ii) dice che se gli utenti scelgono le loro strategie per arrivare ad un equilibrio di Nash, il manager non applica nessun intervento sulle loro azioni.

Un volta che il manager decide la strategia g per massimizzare il comportamento non collaborativo degli utenti, e comincia ad implementare la

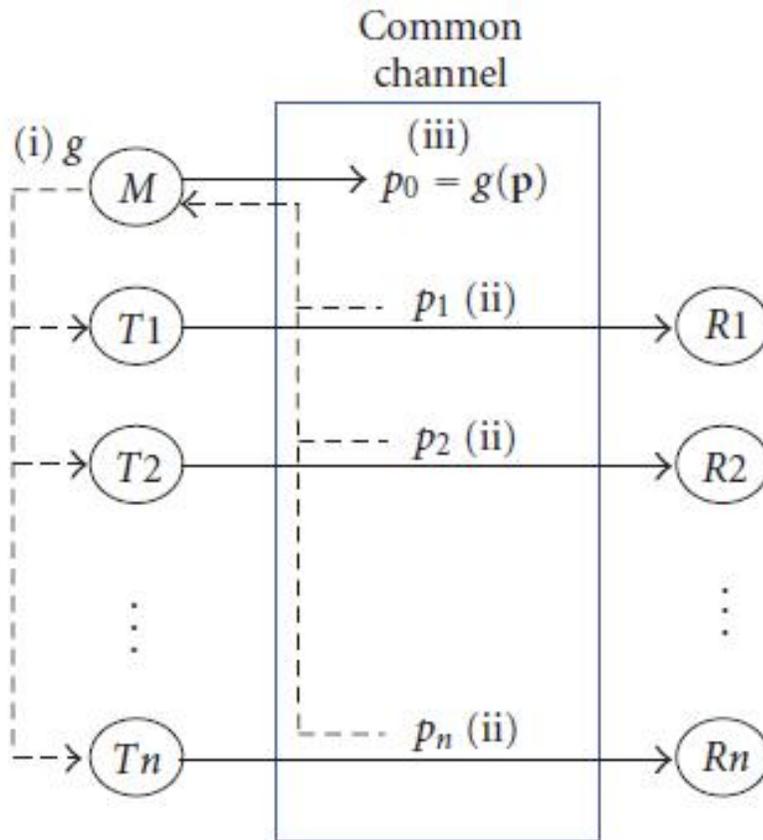


Figura 1.9: Schematizzazione di una trasmissione con controllo del manager, tratto da [29].

sua probabilità di trasmissione in accordo con essa, il resto dei passi 2 - 4 costituiscono un gioco non cooperativo. Data la funzione di intervento g , la funzione di payoff per un utente i è la seguente:

$$\tilde{u}_i = k_i p_i (1 - g(\mathbf{p})) \prod_{i \neq j} (1 - p_j).$$

Nella figura 1.10 si mostra come il guadagno per due utenti viene reso più omogeneo all'interno dell'area sottoscritta dalla linea tratteggiata, la quale illustra l'andamento dei guadagni nel caso di un accesso casuale, cioè con un modello di gioco a conflitto. La presenza del manager mantiene un equilibrio

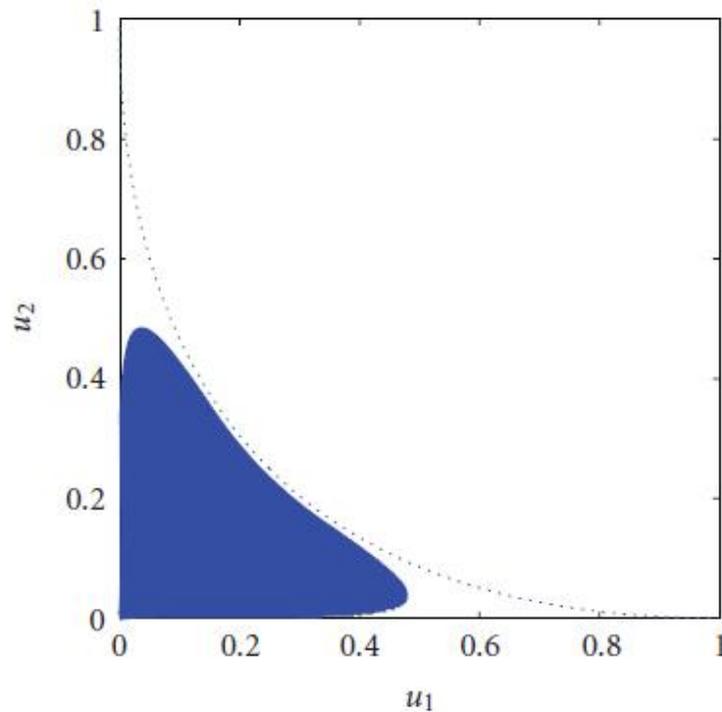


Figura 1.10: *Payoffs per due utenti con controllo del manager, tratto da [29]*

tra i guadagni dei diversi utenti, impedendo che uno di essi possa avvicinarsi ad una probabilità unitaria di trasmissione. In questo caso il livello

generale di soddisfazione è distribuito in maniera equa tra i due utenti e di conseguenza, tutelati da un controllo centrale, sono incoraggiati a collaborare [37].

Dalle simulazioni fatte su [28] e [29] si può constatare che, l'utilizzo della teoria dei giochi, porta dei considerevoli miglioramenti all'interno della comunicazione multipla su un canale condiviso, contrariamente a quanto si otterrebbe se ogni utente agisse senza controllo.

Capitolo 2

Panoramica su alcune Tecniche di Allocazione di Risorse

Per offrire una maggiore comprensione sul problema di allocazione delle risorse è necessario avere una panoramica completa sulle tecniche utilizzate per migliorarla. Sarà quindi possibile individuare più agevolmente il livello di sviluppo e verso quale direzione si sta concentrando maggiormente per una implementazione efficiente sulle realtà delle telecomunicazioni.

La scelta di strutturare l'elenco degli articoli come seguirà è stata fatta per avere prima di tutto una conoscenza generale su quali sono le problematiche attuali per l'allocazione delle risorse e i motivi che spingono il mondo delle telecomunicazioni, a studiare una condivisione delle risorse più efficiente. Successivamente verranno esposte le tecniche principali di condivisione sottoclassificandole in *condivisione di spettro* [12] e *condivisione di infrastrutture* [38], concentrandosi infine su qualche esempio di condivisione di spettro che utilizza la teoria dei giochi distinguendoli per modello di gioco utilizzato.

2.1 Generalità sulla Condivisione di Risorse

- RESOURCE SHARING IN WIRELESS NETWORKS: THE SAPHYRE APPROACH [4]

SAPHYRE è un progetto di ricerca europeo che coinvolge i seguenti settori delle telecomunicazioni: comunicazione wireless, teoria dell'informazione, modelli di teoria dei giochi, networking, business e di regolamentazione, considerando anche le connessioni interdisciplinari

tra questi campi. Tale progetto è stato introdotto per rendere l'Europa competitiva nella condivisione dello spettro e delle infrastrutture, consentendo agli operatori di adattarsi alle nuove opportunità di business e permettendo agli organismi di regolamentazione di concordare meccanismi di condivisione facilmente gestibili, dandogli la possibilità di sviluppare nuove stazioni radio e cellulari con le tecnologie richieste. SAPHYRE mette in luce la necessità di avere la collaborazione sistematica di tutti gli operatori del settore per renderlo efficiente e competitivo con il susseguirsi degli sviluppi tecnologici e del fabbisogno generato da questi ultimi.

- FUNDAMENTAL LIMITS OF SPECTRUM-SHARING IN FADING ENVIRONMENTS [39]

Si considera una condivisione di spettro dinamica tra un utente possessore di una certa banda (licensed user) ed un secondo utente (unlicensed user), che trasmette all'interno della stessa, noleggiando la parte che non viene utilizzata dall'utente primario. Verrà quantificato attraverso una *temperatura di interferenza* quanta interferenza è tollerabile al ricevitore sulla trasmissione del possessore della licenza di banda. Con questo dato è possibile fornire un limite di potenza per una trasmissione secondaria in modo che l'interferenza non superi un certo limite prefissato. Lo studio dell'efficienza di questo sistema sarà svolta all'interno di un ambiente di tipo dispersivo, tenendo quindi in considerazione le riduzioni di capacità di canale dovute alle dispersioni e ai disturbi sui canali di trasmissione, diversificandone i risultati per diverse categorie di ambiente.

2.2 Metodi di Condivisione di Risorse

- INTER-BASE STATION RESOURCE SHARING AND IMPROVING THE OVERALL EFFICIENCY OF B3G SYSTEMS [38]

Per una rete cellulare una condivisione delle risorse porta ad una efficienza generale maggiore. Con "risorse" non viene inteso solamente lo spettro, ma anche le infrastrutture come le stazioni base e le torri trasmettitore. La condivisione di queste non porta solamente un guadagno maggiore all'utente che usufruisce del servizio, ma anche agli operatori che lo offrono. Infatti una stazione mobile può collegarsi a

stazione base che le può offrire prestazioni migliori, senza che questa appartenga necessariamente all'operatore di contratto. In questo modo l'utente ottiene una trasmissione più efficiente e il suo operatore reale non deve spendere più energia per fargli ottenere le stesse prestazioni che ottiene in questo caso.

- INTER OPERATOR SPECTRUM SHARING IN A BROADBAND CELLULAR NETWORK [12]

Considerando una rete cellulare ad ampia area di copertura si calcola, per un caso ideale di condivisione di spettro tra operatori, il limite di utenti che può sopportare la rete, affinché sia garantito un valore accettabile di QoS (Quality of Service). Essendo questo limite idealistico difficile da raggiungere nella realtà, sono stati escogitati in [12] degli algoritmi che calcolano quanto effettivamente si può sfruttare una rete con la presenza dei disturbi ambientali e localizzazione geografica. Una tra le simulazioni fatte è quella rappresentata dalla figura 2.1: più cresce il numero degli operatori più cresce il guadagno con la condivisione di spettro. Per uno spettro condiviso il ritardo nella trasmissione cala più rapidamente garantendo quindi un QoS migliore rispetto alla non condivisione.

- CAPACITY GAINS DUE TO ORTHOGONAL SPECTRUM SHARING IN MULTI-OPERATOR LTE CELLULAR NETWORKS [40]

In questo sistema l'interferenza inter-operatore viene evitata grazie alla distribuzione ortogonale dello spettro dovuta all'LTE ma, in questo modo, si sfrutta in maniera non efficiente tale risorsa. Viene presa in considerazione l'opportunità, per gli operatori di condividere parte del proprio spettro con un accesso monitorato sulle risorse condivise come avviene anche in "Tragedy of the Commons" [42]. Esistono diversi algoritmi per lo studio di questo problema e possono essere suddivisi in due fondamentali categorie: ortogonali e non ortogonali. Il primo si riferisce al caso in cui ogni operatore ha il proprio sotto-canale di trasmissione ed evita di interferire con la trasmissione degli altri, mentre nel secondo operatori differenti si trovano ad occupare la stessa frequenza di trasmissione quindi l'interferenza che si creano tra loro deve essere studiata per renderli distinguibili ad un ricevitore. All'interno di questo progetto viene quantificato il limite superiore del guadagno

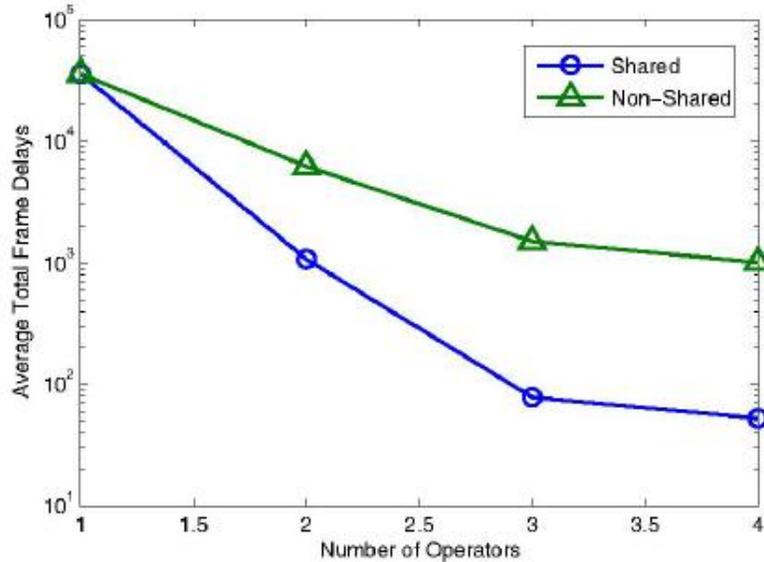


Figura 2.1: *Simulazione delay medio, tratto da [12].*

ottenibile da una condivisione di spettro ortogonale e si fornisce un algoritmo di tipo centralizzato che mira a calcolare la capacità massima che si può raggiungere per ogni cella di trasmissione.

2.3 Condivisione di Spettro tramite la Teoria dei Giochi

2.3.1 Giochi Non Cooperativi Gerarchici

- INTER OPERATOR SPECTRUM SHARING FROM A GAME THEORETICAL PERSPECTIVE [43]

Si considera una trasmissione di due operatori sulla stessa frequenza. Nel momento in cui effettuano una comunicazione nello stesso momento, condividono lo stesso mezzo di comunicazione in maniera simmetrica ed ortogonale. Per regolare tale trasmissione viene utilizzata la teoria dei giochi, in particolare si modella la trasmissione come gioco di Stackelberg. Ci si concentra a rispondere alle seguenti domande fon-

damentali sul funzionamento del sistema: Se gli utenti operano simultaneamente in maniera non cooperativa qual è l'allocazione di risorse risultante? Viene quantificata, a tal proposito, l'interferenza generata dalla trasmissione del primo operatore sul secondo, studiando un punto equilibrio che accordi entrambe le parti. Fornendo una caratterizzazione del canale è possibile prevedere il risultato del gioco? Come si trovano le regioni dove operare per ottenere un equilibrio di Stackelberg? Se esiste una gerarchia tra gli operatori è possibile prevedere l'esito del gioco? Quanto si avvicina un approccio di tipo distribuito rispetto ad una allocazione centralizzata delle potenze? Per ognuna di queste domande viene effettuata un'analisi matematica del problema, fornendo dei grafici che stimano i risultati dei modelli teorizzati.

- INTRODUCING HIERARCHY IN ENERGY GAMES [44]

Nelle tecniche di condivisione di spettro che utilizzano un metodo basato sulla teoria dei giochi non è stata considerata l'efficienza dell'utilizzo dell'energia e, come spiegato in [45], l'equilibrio di Nash raggiunto è energeticamente inefficiente. In questo lavoro, viene utilizzata una tecnica di pricing come quella dell'articolo [46], modificandola con l'introduzione di un grado di gerarchia tra gli utenti. Con l'utilizzo di un gioco di Stackelberg si vuole mantenere monitorata l'unicità dell'equilibrio raggiunto dagli utenti a fine trasmissione e l'energia che viene spesa per effettuarla. Si studia quale potrebbe essere un punto di accordo tra stazione base e stazioni mobili sull'utilizzo di signaling, per risparmiare su eventuali sprechi energetici.

2.3.2 Giochi Non Cooperativi a Ripetizione

- SPECTRUM SHARING FOR UNLICENSED BANDS [47]

Si considera un sistema di comunicazione wireless multipla, all'interno di un ambiente urbano, dove ciascun tipo di sistema non collabora e ha finalità differenti da ogni altro. Si vogliono quindi definire delle regole che permettano di rendere l'utilizzo dello spettro disponibile efficiente, imparziale e incentivabile. Con *efficiente* si intende che non è possibile aumentare l'utilità raggiunta da un sistema senza dover abbassare quella degli altri; l'*imparzialità* tra i sistemi significa che le regole di partecipazione sono applicate in maniera omogenea per rendere tutti

efficienti allo stesso modo, ed infine *incentivabile* significa che coloro che partecipano al sistema non hanno alcun interesse a non attenersi alle regole che ne governano le trasmissioni poichè sanno che andrebbero in perdita di utilità.

Questo tipo di scenario viene modellizzato come un gioco *non cooperativo a ripetizione* dove ogni sistema gioca ogni volta il suo turno considerando le esperienze passate. Il sistema fa rispettare l'equità nella allocazione portando le potenze ai valori minimi di un equilibrio di Nash per un gioco statico.

2.3.3 Giochi Cooperativi

- A CHARACTERIZATION OF RESOURCE ALLOCATION IN LTE SYSTEMS AIMED AT GAME THEORETICAL APPROACHES [48]

L'assegnazione delle risorse dello stato fisico è dinamicamente eseguita in funzione alle condizioni del canale e la qualità del servizio degli utenti. Un importante scenario dove queste scoperte trovano applicazione è rappresentato dal sistema LTE di quarta generazione poiché usa un TDMA/OFDMA come schema di trasmissione nel downlink. L'organizzazione delle risorse può essere effettuata nelle due seguenti maniere: con una pianificazione basata sul credito, agendo sul livello di trasporto e di accesso al mezzo dello stack protocollare. Lo *scheduler* determina quali pacchetti devono essere presi in considerazione per la prossima allocazione. L'*allocatore di risorse* associa i pacchetti a gruppi di sotto portanti e slot di tempo differenti, suddividendo quindi le risorse da allocare in blocchi distinti da tempo e frequenza. In questo modo, l'allocatore decide un certo grado di libertà, rappresentato dal numero di pacchetti selezionati dallo scheduler. L'allocazione risultante deve essere un compromesso tra due obiettivi contrastanti: massimizzazione del throughput, raggiunto selezionando i pacchetti in base alla qualità del canale, e un'equità tra i flussi di trasmissione. Per allocare gli utenti in maniera equa si utilizza uno scheduler credit-based [49] che dà priorità agli utenti con più alto valore di credito, assegnato secondo delle regole decise a priori. Se il numero di pacchetti è troppo elevato rispetto alla capacità del canale, l'allocatore di risorse sceglie di prendere in considerazione solamente gli utenti con una qualità di canale maggiore, trascurando quindi l'equità tra i flussi.

Per arrivare a questo tipo di compromesso viene utilizzato un modello di gioco non cooperativo. Il risultante equilibrio di Nash viene considerato come una possibile soluzione di allocazione.

- BANDWIDTH EXCHANGE: AN ENERGY CONSERVING INCENTIVE MECHANISM FOR COOPERATION [32]

Viene proposta una soluzione alla scarsità di banda disponibile, studiando i benefici che si otterrebbero se in una rete radio ogni stazione mobile mettesse a disposizione di altre utenze, parte della banda che la stazione base gli ha assegnato, nel momento in cui non ha la necessità di utilizzarla. Si modella il sistema come un insieme di sotto sistemi formati da coppie di stazioni mobili ognuno dei quali ha l'obiettivo di raggiungere una NBS (Nash Bargaining Solution) [33], cioè avviene una contrattazione che porta ad una soluzione equa. Nella figura 2.2 che segue si fornisce una schematizzazione intuitiva dell'utilizzo della banda dei vari nodi.

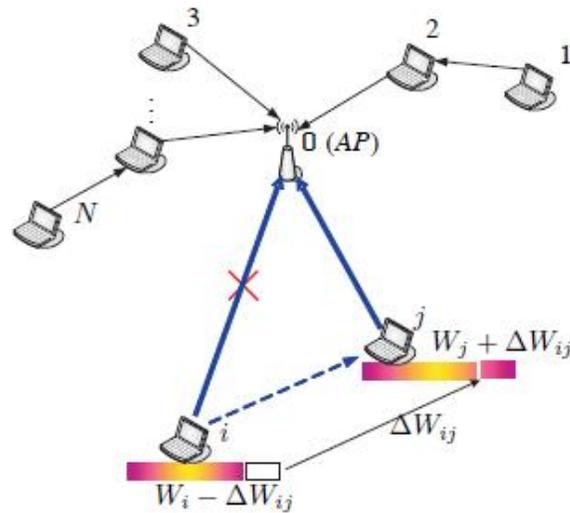


Figura 2.2: Schema di rete per Bandiwdth Exchange, tratto da [32]

- COOPERATIVE GAME THEORY FOR DISTRIBUTED SPECTRUM SHARING [50]

Al crescere della capacità di canale si calcola il valore del throughput che può raggiungere ogni utente partedipando ad un canale condiviso di una rete wireless. Si mostra che una Nash Bargaining Solution (NBS) fornisce una allocazione efficiente ed equa dello spettro ed è desiderabile che gli utenti sia incentivati a raggiugerla. A tal fine si propone un algoritmo che utilizza le informazioni sullo stato del canale per determinare l'allocazione dello spettro da adottare.

- SIMULATION MODELS FOR THE PERFORMANCE EVALUATION OF SPECTRUM SHARING TECHNIQUES IN OFDMA NETWORKS [51]

I risultati di varie ricerche hanno portato ad affermare che la cooperazione porta dei benefici, in termini di guadagno, a tutti gli utenti che ne partecipano. Oltre alle teorizzazioni matematiche, è necessaria una prova empirica per dimostrare più efficacemente queste considerazioni. Questo articolo lavora su una versione modificata di un simulatore di reti già esistente, il Simulator-3 [52], che ha una struttura ottimale per uno scenario di condivisione di spettro. Per modificarlo è stato introdotto un *mercato virtuale* che ha il compito di assegnare, con il giusto criterio, le frequenze comuni a tutti gli utenti e regolamentare i casi di conflittualità. Per la simulazione si assume che gli utenti agiscono in maniera ortogonale e, la condivisione dello spettro, modellata come un gioco a contesa. Si alizza quindi le funzionalità dei meccanismi che lo renderanno un gioco collaborativo. Nella figura 2.3 viene mostrato l'andamento del throughput in funzione della percentuale di condivisione delle frequenze in comune all'aumentare degli utenti, evidenziando come, al crescere di questi ultimi, si ha un miglioramento del throughput con la garanzia di una trasmissione equa.

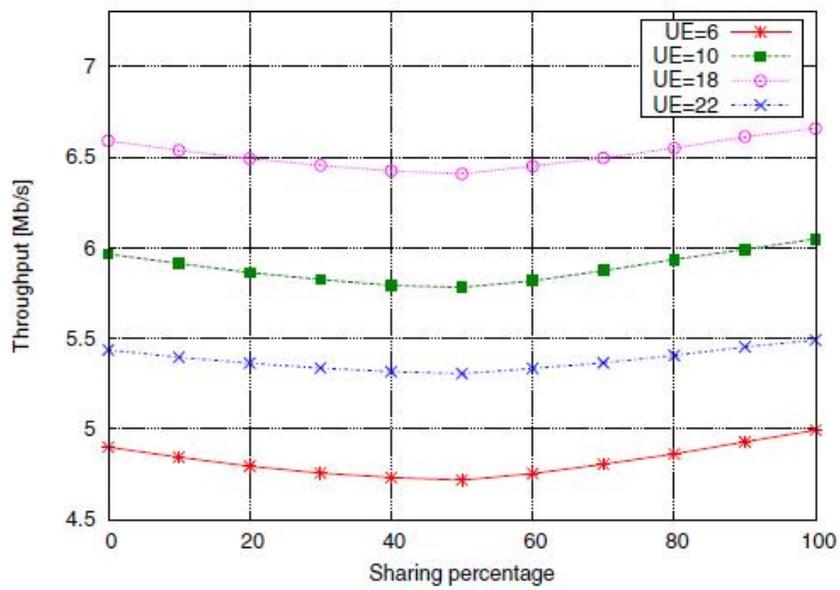


Figura 2.3: *Throughput per cella con allocazione equa in funzione della percentuale di condivisione del canale, tratto da [51]*

Capitolo 3

Tassonomia Web

Per avere una schematizzazione completa e intuitiva degli articoli che sono stati citati nel corso di questa tesi si è pensato di costruire una pagina web che riporta, in maniera ordinata, la struttura che è stata data agli argomenti fin'ora affrontati.

È più facile quindi compiere delle ricerche all'interno di questo settore poichè vengono classificati nella pagina web il titolo, l'autore e l'anno di pubblicazione secondo la struttura dell'elenco del capitolo precedente, con la possibilità di cliccare sul link adiacente per leggere immediatamente l'articolo di interesse.

Questa pagina web è suddivisa in tre parti distinte partendo dai problemi generali che hanno portato alla necessità di condividere le risorse nell'ambito delle telecomunicazioni e addentrandosi successivamente sempre più nello specifico con articoli selezionati nelle le due successive sezioni. Come è possibile notare la maggior parte degli articoli è concentrata sulla terza sezione, infatti il problema di allocare le risorse si offre particolarmente bene ad essere gestito tramite la teoria dei giochi. Proprio per la struttura di questa branca matematica è stato necessario dividere le varie tecniche di condivisione in funzione al modello di gioco che viene utilizzato. Una breve didascalia descrive brevemente l'organizzazione che è stata data a ciascun settore per chiarire a chi consulta la pagina ipertestuale come muoversi all'interno di essa. Le due figure 3.1 e 3.2 che seguiranno, mostrano come si presenta la pagina web, raggiungibile dal seguente link:

www.dei.unipd.it/~badia/spectrum_sharing_taxonomy.html .




Universita' degli Studi di Padova

Ingegneria dell'Informazione a.a. 2012/2013 Marco Scantamburlo mtr.610295

Tassonomia Tecniche di Spectrum Sharing

Questa pagina web e' strutturata in tre parti distinte partendo dai problemi che hanno portato alla necessita' di condividere le risorse nell'ambito delle telecomunicazioni e portandosi successivamente sempre piu' nello specifico con articoli selezionati nelle due successive sezioni. Come e' possibile notare la maggior parte degli articoli e' concentrata sulla terza sezione, infatti il problema di allocare le risorse si offre particolarmente bene ad essere gestito tramite la teoria dei giochi. Proprio per la struttura di questa branca matematica e' stato necessario dividere le varie tecniche di condivisione in funzione al modello di gioco che viene utilizzato.

Generality and limits on *Resource Sharing*

Viene motivata la necessita' della condivisione delle risorse per avere un sistema di comunicazione efficiente e all'avanguardia. Vengono esposti inoltre quali sono i limiti che creano delle difficolta' sull'applicazione degli studi fatti su questa materia.

The SAPHYRE project [HTML](#)

Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments [IEEEExplore](#)
A. Ghasemi and E. S. Sousa, February 2007.

Resource sharing improves the network efficiency for network operators [PDF](#)

Figura 3.1: *Presentazione testa della pagina.*

Cooperative game theory for distributed spectrum sharing [PDF](#)
J. E. Surtis, L. A. DaSilva, Z. Han, and A. B. MacKenzie, 2007.

NON-COOPERATIVE HIERARCHICAL

Promoting cooperation in wireless relay networks through stackelberg dynamic scheduling [IEEEExplore](#)
L. Canzian, L. Badita, M. Zorzi, 5 May 2012.

Inter-operator spectrum sharing from a game theoretical perspective [PDF](#)
M. Bennis, S. Lasaulce and M. Debbah, 2009.

Introducing hierarchy in energy games [IEEEExplore](#)
S. Lasaulce, Y. Hayel, R. El Azouzi, and M. Debbah, July 2009.

Stackelberg contention games in multiuser networks [RESEARCHGATE](#)
J. Park and M. van der Schaar, 30 May 2009.

NON-COOPERATIVE REPEATED

Figura 3.2: *Struttura elenco con link evidenziato in blu al passaggio del cursore.*

Capitolo 4

Conclusioni

È stato visto come, nello scenario delle telecomunicazioni, una condivisione delle risorse è necessaria per l'efficienza di un sistema di comunicazione moderno. Presa in considerazione la teoria dei giochi come strumento di analisi di queste problematiche si sono esposti due esempi che sfruttano un modello di gioco non cooperativo, ma con tecniche di sviluppo differenti. Si è reso evidente come questo campo di ricerca è abbastanza assortito e, per poterlo comprendere meglio, può essere organizzato secondo una struttura che parte dal problema generale di condivisione delle risorse e arriva a trattare nello specifico alcune tecniche che utilizzano la teoria dei giochi, suddivise secondo il modello di gioco utilizzato. In questo modo si è evidenziata con quale flessibilità la teoria dei giochi si adatta a scenari differenti di reti, specialmente nel contesto dei sistemi di quarta generazione LTE, ottimi per l'implementazione di questi modelli di condivisione. La pagina web che ne è stata ricavata permette di avere un accesso veloce a tali informazioni e può essere aggiornata in futuro per dare la possibilità a chi la consulta di restare al passo con i tempi, senza dover perdere tempo a cercare gli articoli alla rinfusa nel web.

Bibliografia

- [1] “Wireless World Research Forum”, HTML,
<http://www.wireless-world-research.org/index.php?id=91> .
- [2] H. Yin and H. Liu, “Performance of space-division multiple-access (SDMA) with scheduling,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, no. 4, pp. 611 - 618, October 2002.
- [3] J. Capetanakis, “Generalized TDMA: The Multi-Accessing Tree Protocol,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 27, no. 10, pp. 1476 - 1484, October 1979.
- [4] E. Jorswieck, H. Mark, A. Kuzminskiy, F. Boccardi, L. Badia, et al., “Resource Sharing in Wireless Networks: The SAPHYRE Approach,” *Future Network and Mobile Summit (previously ICT Mobile Summit)*, Florence, Italy, June 2010.
- [5] R. Gibbons, “Teoria dei giochi,” Il Mulino, Bologna, October 2005.
- [6] S. Sesia, I. Toufik and M. Baker, “LTE, The UMTS Long Term Evolution,” WILEY, United Kingdom, 2011.
- [7] N. Benvenuto and M. Zorzi, “Principles of Communications Networks and Systems,” WILEY, United Kingdom, pp. 1-25, 2010.
- [8] A. Goldsmith, “Wireless Communications,” Cambridge University Press, New York, pp. 374-401, 2005.
- [9] S. Abeta, “Toward LTE Commercial Launch and Future Plan for LTE Enhancements (LTE-Advanced),” *IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, pp. 146 - 150, 17-19 November 2010.

- [10] H. G. Myung, "Single Carrier FDMA", May 18, 2008, PDF, http://faculty.kfupm.edu.sa/COE/ashraf/RichFilesTeaching/COE082_543/Papers/SCFDMA.pdf .
- [11] H. Li, M. Lott, M. Weckerle and W. Zirwas and E. Schulz, "Multihop communications in future mobile radio networks," *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 1, pp. 54 - 58, 15-18 September 2002.
- [12] G. Middleton, K. Hoolit and A. Tellit and J. Lilleberg, "Inter-Operator Spectrum Sharing in a Broadband Cellular Network," *IEEE Ninth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, 2006.
- [13] R. Myerson, "Game Theory: Analysis of Conflict," Harvard University Press, Cambridge, Mass, USA, 1991.
- [14] J. Nash, "Two-person cooperative games," *Econometrica*, vol. 21, 1953.
- [15] L. Badia, M. Levorato and F. Librino and M. Zorzi, "Cooperation techniques for wireless systems from networking perspective," *IEEE Wireless Communications Magazine*, April 2010.
- [16] N. N. Vorob'ev, "Foundations of Game Theory, Noncooperative Games," Birkhauser Verlag, Berlin, 1994.
- [17] H. J. M. Peters, "Axiomatic Bargaining Game Theory," Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [18] D. Yang, X. Fang and G. Xue, "Game theory in cooperative communications," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.19, pp. 44-49, April 2012.
- [19] D. Abreu, "On the theory of infinitely repeated games with discounting," *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1988.
- [20] J. K. MacKie-Mason and H. R. Varian, "Pricing congestible network resources," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 13, no. 7, pp. 1141-1149, 1995.

- [21] E. Altman, N. Bonneau and M. Debbah, “Correlated equilibrium in access control for wireless communications,” *Proceedings IFIP NETWORKING*, vol. 3976 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 173-183, Coimbra, Portugal, May 2006.
- [22] A. Goldsmith, “Wireless Communications,” Cambridge University Press, New York, pp. 452-500, 2005.
- [23] Y. Jin and G. Kesidis, “A pricing strategy for an Aloha network of heterogeneous users with inelastic bandwidth requirements,” *Proceedings of the 39th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, pp. 1030-1033, Princeton, NJ, USA, March 2002.
- [24] D. Wang, C. Comaniciu and U. Tureli, “A fair and efficient pricing strategy for slotted Aloha in MPR models,” *Proceedings of the 64th IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 2474-2478, Montreal, Canada, September 2006.
- [25] R. Johari and J. N. Tsitsiklis, “Efficiency loss in a network resource allocation game,” *Mathematics of Operations Research*, vol. 29, no. 3, pp. 407-435, 2004.
- [26] T. Basar and G. J. Olsder, “Dynamic Noncooperative Game Theory, 2nd Edition,” *Classics in Applied Mathematics*, pp. 365-422, 1999.
- [27] Y. A. Korilis, A. A. Lazar and A. Orda, “Achieving network optima using Stackelberg routing strategies,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, no. 1, pp. 161-173, 1997.
- [28] L. Canzian, L. Badia and M. Zorzi, “Promoting Cooperation in Wireless Relay Networks through Stackelberg Dynamic Scheduling,” *IEEE Transactions on Communications*, pp. 1-12, May 2012.
- [29] J. Park and M. van der Schaar, “Stackelberg Contention Games in Multiuser Networks,” *EURASIP J. Advances Signal Process*, 2009.
- [30] G. Tan and J. Guttag, “The 802.11 MAC protocol leads to inefficient equilibria,” *Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, vol. 1, no. 3859, pp. 1243-1248, Miami, FL, USA, March 2005.

- [31] M. Rossi, L. Badia and M. Zorzi, “Exact statistics of ARQ packet delivery delay over Markov channels with finite round-trip delay,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 4, pp. 1858-1868, July 2005.
- [32] D. Zhang, R. Shinkuma and N. B. Mandayam, “Bandwidth exchange: An energy conserving incentive mechanism for cooperation,” *IEEE Transactions on Wireless Communincations*, vol. 9, no. 6, p. 2055, 2010.
- [33] K. Binmore, A. Rubinstein and A. Wolinsky, “The Nash bargaining solution in economic modelling,” *The RAND Journal of Economics*, JSTOR, 1986.
- [34] L. Chen, T. Cui, S. H. Low and J. C. Doyle, “A gametheoretic model for medium access control,” *Proceedings of the 3rd International Wireless Internet Conference (WICON)*, Austin, Tex, USA, October 2007.
- [35] L. Chen, S. H. Low and J. C. Doyle, “Contention control: a game-theoretic approach,” *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pp. 3428-3434, New Orleans, La, USA, December 2007.
- [36] M. Ćagalj, S. Ganeriwal, I. Aad and J. Hubaux, “On selfish behavior in CSMA/CA networks,” *Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, vol. 4, pp. 2513-2524, Miami, Fla, USA, March 2005.
- [37] H. Zheng and C. Peng, “Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access,” *IEEE International Conference*, vol. 5, pp. 3132-3136, 16-20 May 2005.
- [38] M. Bennis and J. Lilleberg, “Inter Base Station Resource Sharing and Improving the Overall Efficiency of B3G Systems,” *IEEE 66th Vehicular Technology Conference*, pp. 1494-1498, 2007.
- [39] A. Ghasemi and E. S. Sousa, “Fundamental Limits of Spectrum-Sharing in Fading Environments,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 2, pp. 49-658, February 2007.

- [40] L. Anchora, L. Badia, E. Karipidis and M. Zorzi, "Capacity Gains due to Orthogonal Spectrum Sharing in Multi-Operator LTE Cellular Networks," *International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pp. 286-290, 28-31 Aug. 2012.
- [41] *LTE physical layer, TS 36.201 (V9.1.0)*, 3GPP, March 2010.
- [42] G. Hardin, "The Tragedy of the Unmanaged Commons," *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 9, no. 5, 1994.
- [43] M. Bennis, S. Lasaulce and M. Debbah, "Inter-Operator Spectrum Sharing from a Game Theoretical Perspective," *Hindawi Publishing Corporation EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2009.
- [44] S. Lasaulce, Y. Hayel, R. El Azouzi and M. Debbah, "Introducing Hierarchy in Energy Games," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 08, no. 7, pp. 3833-3843, July 2009.
- [45] D. J. Goodman and N. B. Mandayam, "Power control for wireless data," *IEEE Personal Communication*, vol. 7, pp. 48-54, 2000.
- [46] C. U. Saraydar, N. B. Mandayam and D. J. Goodman, "Efficient power control via pricing in wireless data networks," *IEEE Transaction on Communications*, vol. 50, no. 2, pp. 291-303, February 2002.
- [47] R. Etkin, A. Parekh and D. Tse, "Spectrum Sharing for Unlicensed Bands," *IEEE Journal on Selected Areas in Communucations*, vol. 25, no. 3, pp. 517-528, April 2007.
- [48] L. Anchora, L. Canzian, L. Badia and M. Zorzi, "A Characterization of Resource Allocation in LTE Systems Aimed at Game Theoretical Approaches," *Computer Aided Modeling, Analysis and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, pp. 47-51, 3-4 December 2010.
- [49] H. T. Kung, T. Blackwell and A. Chapman, "Credit-based flow control for ATM networks: credit update protocol, adaptive credit allocation and statistical multiplexing," *Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications*, vol. 24, no. 4, pp. 101-114, October 1994.

- [50] J. Suris, L. DaSilva, Z. Han and A. B. MacKenzie, “Cooperative game theory for distributed spectrum sharing,” *IEEE International Conference*, pp. 5282-5287, 24-28 June 2007.
- [51] L. Anchora, M. Mezzavilla, L. Badia and M. Zorzi, “Simulation Models for the Performance Evaluation of Spectrum Sharing Techniques in OFDMA Networks,” *MSWiM '11 Proceedings of the 14th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp. 249-256, Miami, Florida, USA, 31 October - 4 November, 2011.
- [52] “ns-3”, HTML,
<http://www.nsnam.org/>.